

# LES BÉNÉFICES ENVIRONNEMENTAUX DES REVÊTEMENTS DE SOLS PERMÉABLES

*Rapport d'étude 1 : #îlots de chaleur urbains*



ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE  
DES SYSTÈMES DE SOLS PERMÉABLES O2D®



NOVEMBRE 2020

---

Directeur de publication : Olivier Bataille

Rédactrices : Julie Bertout et Jessica Lépinasse

Etude réalisée par O2D ENVIRONNEMENT avec l'intervention du Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) de Junia Hauts de France et du Laboratoire d'Analyses Microbiologiques des Sols (LAMS). Projet labellisé par HYDREOS et subventionné par l'ADEME dans le cadre de l'initiative PME 2016 Eau et Milieux Aquatiques.

Photographie : LGCgE et O2D ENVIRONNEMENT

Maquette et illustrations : O2D ENVIRONNEMENT

Date de publication : novembre 2020

# ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DES SYSTÈMES DE SOLS PERMÉABLES O2D®

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Brice Louvel, Christelle Pruvot, François Leconte, Margaux Pierret (LGCgE Junia Hauts-de-France) ainsi qu'Emmanuel Bourguignon (LAMS) pour leur travaux d'expérimentations et d'analyses.

Nous tenons également à remercier Alexandre Folmer et Clément Sannier (Hydreos) ainsi que Cédric Djedovic (Ademe) pour leur accompagnement et soutien dans le cadre de ce projet de recherche.

# PRÉAMBULE

Les dernières décennies ont vu naître un nouveau modèle d'aménagement, inscrit dans une vision durable et raisonnée de l'urbanisme. Celui-ci intègre des enjeux environnementaux de plus en plus prégnants dans les sociétés civiles. Pour répondre aux besoins de l'éco-construction, des techniques et matériaux innovants se développent. Les revêtements de sol perméables sont une des solutions permettant de limiter l'impact de l'artificialisation des sols, inhérente aux opérations d'aménagement.

O2D ENVIRONNEMENT® accompagne les projets de parkings, voies d'accès et aires de vie perméables depuis 2004. Le concept et la formulation des solutions O2D® comportent des **avantages environnementaux intrinsèques** : infiltration naturelle des eaux pluviales sans ruissellement, système de sol « ouvert » rétablissant les échanges air-eau-sol, apport de matière organique et d'un couvert végétal pour certaines de ces solutions.

Dans un contexte d'adaptation au changement climatique et de lutte contre les effets néfastes de l'urbanisation (imperméabilisation des sols, érosion de la biodiversité, émission de CO<sub>2</sub>, formation d'îlots de chaleur urbains...) O2D ENVIRONNEMENT® a souhaité évaluer les performances environnementales des systèmes qu'elle préconise. Avec la volonté d'optimiser ses solutions, la société lance en 2017 le projet de recherche et développement ACTIV-S<sup>1</sup>. Pour cela, elle met en œuvre une **plateforme expérimentale de parking perméable**, destinée à tester différentes compositions de fondations et matériaux de surface. Située en métropole lilloise, au siège de la société, cette planche d'essai a été construite en mai 2018. Les expérimentations menées depuis lors portent sur huit places de stationnement réalisées avec les systèmes de sol perméables O2D®, ainsi qu'une place en enrobé classique et un terre-plein enherbé.

Pour répondre aux objectifs du projet, les expérimentations prennent plusieurs directions. Trois d'entre elles sont explicitées à travers une série de rapports d'étude sur les bénéfices environnementaux des revêtements de sol perméables :

- 1/ Le premier porte sur les **performances thermiques** des solutions O2D®,
- 2/ Le second sur la caractérisation des milieux restaurés par les systèmes O2D® au regard de la **biodiversité**,
- 3/ Le troisième sur les capacités de **rétenion et dégradation des hydrocarbures** des systèmes végétalisés.

Ce rapport est donc le premier de la série et porte la thématique **#îlots de chaleur urbains**.

Ce projet a été mené en collaboration avec deux laboratoires. Le Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) Junia Hauts-de-France a procédé à l'instrumentation de la plateforme, à des relevés Biodiversité et à une série de tests en laboratoire et in-situ. Le Laboratoire d'Analyse Microbiologique des Sols (LAMS) a réalisé des analyses de sols et des relevés Biodiversité dans différentes couches de substrats.

Les études menées dans le cadre de ce projet de recherche apportent des données scientifiques concernant l'impact environnemental des solutions de revêtements perméables et végétalisés O2D®.

---

<sup>1</sup> *Projet subventionné par l'ADEME dans le cadre de l'initiative IPME 2016 Eau & Milieux Aquatiques et labellisé par le pôle de compétitivité HYDREOS.*

## 1. Cadre de l'étude

PAGE 4

---

### 1.1 L'îlot de chaleur urbain

### 1.2 L'impact des revêtements de sol

1.2.1 Principes physiques des matériaux de revêtements

1.2.2 Revêtements de sol ou systèmes de sol ?

### 1.3 Méthodologie

1.3.1 Contexte

1.3.2 Instrumentation

1.3.3 Composition des systèmes

1.3.4 Méthodes de calculs utilisées

## 2. Résultats

PAGE 12

---

### 2.1 Comportement thermique en période estivale

2.1.1 Evolution des températures à la profondeur maximale

2.1.2 Evolution des températures aux profondeurs intermédiaires

2.1.3 Evolution des températures en surface

### 2.2 Comportement thermique en période de canicule

2.2.1 Etude de la canicule du 5 au 13 août 2020

2.2.2 Etude statistique sur l'ensemble des événements caniculaires observés

2.2.3 Synthèse

### 2.3 Transfert de chaleur vertical dans les systèmes étudiés

### 2.4 Comportement thermique après un épisode pluvieux

### 2.5 Comparaison du comportement thermique au cours d'une année entre les systèmes O2D® et l'Enrobé ou la zone enherbée témoin (année 2019)

2.5.1 Moyennes mensuelles des températures, aux différentes profondeurs

2.5.2 Comparaison du comportement thermique en surface des systèmes O2D® par rapport à la zone enherbée

2.5.3 Comparaison du comportement thermique en surface des systèmes O2D® par rapport à l'enrobé

## 3. Interprétations & perspectives

PAGE 29

---

### 3.1 La surface : capteur de l'énergie solaire et interface d'échanges

### 3.2 La fondation : réservoir de chaleur et d'humidité

### 3.3 Synthèse sur les propriétés climatiques des systèmes

### 3.4 Perspectives

## 4. Conclusion

PAGE 32

---

# 1. CADRE DE L'ÉTUDE

## 1.1 L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

---

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain, aussi appelé ICU, désigne la différence de température entre les zones urbanisées et les zones rurales avoisinantes. L'aménagement urbain implique forcément une modification du milieu naturel, et avec elle, une modification du microclimat. Dans le contexte actuel de changement climatique, l'élévation des températures en milieu urbain et la récurrence des phénomènes extrêmes (canicules et vagues de chaleur) ont vraisemblablement un effet aggravant sur la formation et l'intensité des ICU.

C'est pourquoi, depuis les années 1970, de nombreux travaux sont menés afin de comprendre les phénomènes d'ICU mais également d'aboutir à des recommandations et stratégies d'adaptation des villes face à l'urgence climatique. Suite aux premières approches plutôt descriptives, les intérêts scientifiques se sont focalisés sur la caractérisation des ICU et plus récemment sur leur modélisation, notamment prédictive [Deilami, et al., 2018].

La littérature nous enseigne les différents facteurs mis en cause dans l'apparition et l'amplitude des îlots de chaleur urbains. Il existe certains facteurs dits « non maîtrisables » liés au climat général de la localité étudiée, aux conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, ensoleillement et précipitations) et aux propriétés climatiques des sites ruraux environnants [Stewart, 2011].

Les autres facteurs d'influence identifiés trouvent leur origine dans la manière dont est construite la ville :

- La **morphologie urbaine** dessine un tissu urbain plus ou moins dense et haut (notions de rugosité, de canyons) ayant une incidence sur la circulation de l'air, des rayonnements solaire et infrarouge.
- L'**imperméabilisation et la minéralisation** de l'environnement urbain induit la rareté de l'eau et de la végétation, réduisant de ce fait le phénomène d'évapotranspiration qui participe au rafraîchissement de l'air [Imhoff, et al., 2010].
- L'**émission de chaleur anthropique**, conséquence de la concentration des activités humaines et de leurs consommations énergétiques, contribue à l'échauffement de l'air ambiant.
- Les **typologies de matériaux** utilisés pour revêtir les sols et le bâti ont une influence capitale sur le microclimat des villes de par leurs caractéristiques physiques (albédo, inertie thermique, émissivité, perméabilité).

De nombreuses études sur les îlots de chaleur urbains, de l'échelle de la rue à l'échelle de la région, prennent en compte l'ensemble des éléments constitutifs des aménagements ainsi que les conditions météorologiques de la période observée. Parmi les méthodes couramment utilisées, on trouve : les relevés de température de l'air ambiant (capteurs à 2 mètres du sol), les mesures de température de surfaces - toits, façades et sols - à distance (caméra thermique, thermographie aérienne) ou par contact (capteurs tels que thermocouples, sondes thermiques et hydriques).

On sait que l'amplitude de l'ICU est fortement corrélée aux typologies de matériaux de surface présents dans l'environnement urbain, ce qui s'avère être l'objet de notre étude. En effet, nous nous intéressons ici à l'impact que peut avoir l'aménagement de systèmes de sol perméables, tels que préconisés par O2D ENVIRONNEMENT®, sur les variations de températures à l'interface sol/air et en profondeur. L'objectif est d'évaluer l'apport de ces aménagements sur les variables climatiques étudiées.

## 1.2 L'IMPACT DES REVÊTEMENTS DE SOL

### 1.2.1 PRINCIPES PHYSIQUES DES MATÉRIAUX DE REVÊTEMENTS

L'occupation, la couverture et l'imperméabilisation des sols urbains sont des facteurs ayant une grande incidence sur l'augmentation des températures de surface et par conséquent, sur la variabilité de l'ICU [Imhoff, et al., 2010]. Le type de matériau utilisé pour aménager l'espace public s'avère donc déterminant. Pour répondre aux usages de la circulation des véhicules, les surfaces de voiries et de parkings doivent satisfaire à certaines exigences techniques. Les matériaux de revêtements sont alors choisis selon des critères fonctionnels et des qualités mécaniques.

On retrouve traditionnellement, au sein des surfaces de parkings notamment, trois matériaux privilégiés : l'asphalte (mélange de granulats concassés, fines et liant bitumineux), l'enrobé (béton bitumineux noir ou coloré) et le béton désactivé (béton hydraulique laissant apparaître les granulats après un traitement de surface). Ces matériaux minéraux présentent des caractéristiques physiques impactant négativement leur comportement thermique au regard des ICU : étanchéité, couleur sombre et inertie thermique.



FIGURE 1 : VUE AÉRIENNE DE LILLE | SOURCE : GOOGLE EARTH

On note la forte minéralisation de l'espace urbain, ainsi que l'opportunité de désimperméabilisation que représenterait une trame viaire si étendue.

A gauche de l'image (marqué en bleu), l'Esplanade du Champ de Mars, surface carrossable rendue perméable suite à un vaste projet de réhabilitation, comprenant deux parkings réalisés avec les systèmes O2D®.

L'albédo des revêtements de sol détermine leur capacité à réfléchir le rayonnement solaire d'une part, et les rayonnements (visibles et infrarouges) provenant des inter-réflexions entre les différentes surfaces urbaines, d'autre part. Un matériau sombre comme l'asphalte, à faible albédo, a un potentiel d'emmagasinement d'énergie important [Morini, et al., 2016]. Il réfléchit peu l'énergie solaire, ce qui explique l'échauffement de sa température de surface.

La notion d'**inertie thermique** est relative à certaines caractéristiques physiques des matériaux, à savoir leur capacité thermique, leur conductivité thermique et leur diffusivité thermique. Dans un matériau à forte inertie thermique, la chaleur se diffuse moins rapidement mais une fois chaud, le matériau mettra beaucoup plus de temps à se refroidir. Plus le temps d'absorption et de restitution est long, plus le matériau est considéré comme thermiquement inerte.

Ces deux principes physiques expliquent comment les matériaux minéraux « classiques » utilisés pour les revêtements des surfaces carrossables réagissent face à l'énergie qu'ils reçoivent. Le béton brut par exemple, a une inertie thermique élevée et un albédo faible. Il absorbe près de 80% de l'énergie solaire et des rayonnements de réflexion qui atteignent sa surface [IAU îdF, 2010]. Celle-ci s'échauffe lentement et le matériau accumule la chaleur. Lorsqu'il ne reçoit plus d'énergie, il commence à se refroidir mais la phase de restitution de chaleur est particulièrement longue.

Ce **cycle de stockage-déstockage**, inhérent aux surfaces minérales, engendre un réchauffement du climat local et contribue à la formation d'îlots de chaleur. Le cycle de déstockage de l'énergie accumulée en période nocturne se révèle particulièrement impactant en période de canicule.



Les **infrastructures routières et zones de stationnement fortement minéralisées** ont un comportement thermique particulièrement défavorable en termes d'élévation des températures de surface et représentent des superficies importantes au sein des espaces urbains. Pourtant, leur caractère imperméable n'est pas inéluctable. D'autres solutions existent aujourd'hui, permettant d'aménager ces surfaces en limitant leur contribution à l'échauffement de l'air ambiant.

## 1.2.2 REVÊTEMENTS DE SOL OU SYSTÈMES DE SOL ?

Force est de constater que les études sur l'ICU de surface prennent généralement en compte les seuls revêtements de surface [Mohajerani et al., 2017] et que le comportement thermique des différents matériaux face à la chaleur est bien documenté [Di Giuseppe, et al., 2017 ; Miyajima, et al., 2015 ; Mohajerani, et al., 2017 ; Klok, et al., 2012]. Pour autant, l'exposition à l'énergie solaire de mélanges hétérogènes de matériaux constitutifs d'un sol urbain est, elle, peu étudiée. Or, les sols de nos villes sont d'origine anthropique et construits par superposition de couches de différents matériaux.

Si la conduction de la chaleur dans le sol n'atteint généralement pas les couches profondes, celle-ci diffère selon les matériaux constitutifs des couches, leur niveau d'imperméabilisation et leur compaction. Suivant une conception de sol « ouverte », les systèmes de sol perméables O2D® garantissent la circulation de l'eau et de l'air à travers leurs structures.

Ces nouveaux sols urbains, permettant l'aménagement de voiries, parkings et cheminements perméables, n'ont que très peu fait l'objet de caractérisations au regard de la problématique des îlots de chaleur urbains. Ils représentent pourtant une opportunité d'adaptation de la ville au changement climatique, en réduisant l'impact de l'aménagement de nombreuses surfaces traditionnellement minéralisées.

**Cette étude a pour but de mesurer les performances thermiques des systèmes de sol perméables O2D® en observant l'évolution de leur température à différentes profondeurs et en surface.**

**Notre hypothèse est que la constitution des places de parking perméable, c'est-à-dire la nature des matériaux utilisés et leur succession verticale, est à l'origine d'un comportement thermique singulier. La quantité de chaleur accumulée ainsi que sa cinétique de stockage/déstockage seraient fonction de la nature du matériau constitutif et des matériaux sus- et sous-jacents. Dans toute notre étude, nous nommons « système » l'ensemble de la structure incluant le revêtement de surface, le lit de pose et la fondation (sauf pour la zone enherbée témoin qui ne présente pas ces différentes couches).**

Afin d'apporter une contribution à la compréhension du phénomène d'îlot de chaleur urbain, les résultats présentés dans ce rapport se concentrent sur les périodes chaudes (normales saisonnières estivales et épisodes de canicule), plus représentatives de la problématique étudiée.

## 1.3 MÉTHODOLOGIE

### 1.3.1 CONTEXTE

Cette étude est menée en région Hauts-de-France, dans la métropole lilloise, zone présentant une forte densité de population et un taux d'imperméabilisation d'environ 72%. Bien que bénéficiant d'un climat tempéré, la métropole de Lille fait elle aussi face aux problématiques d'îlot de chaleur, notamment au cours d'épisodes de températures supérieures aux normales saisonnières voire de canicules, qui se révèlent être de plus en plus récurrents. Le site d'expérimentation se situe à Lesquin, au sein d'une zone logistique présentant des caractéristiques urbaines telles que l'imperméabilisation des sols et une forte minéralisation. En revanche, l'espace limitrophe étant relativement dégagé et ne comprenant pas de bâtiments hauts, la plateforme expérimentale bénéficie de conditions d'ensoleillement optimales et d'une bonne aération.

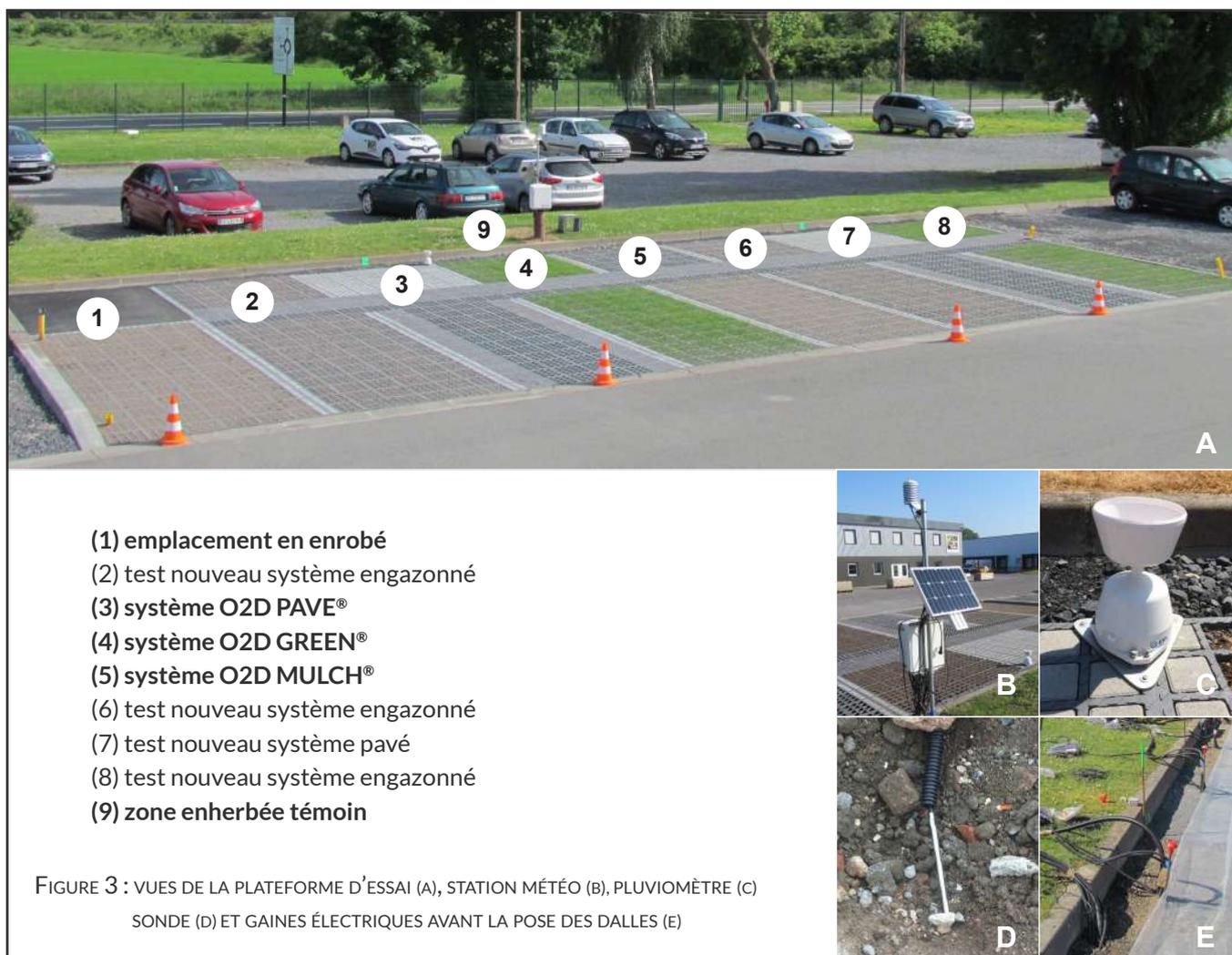


FIGURE 2 : VUE AÉRIENNE DE L'ENVIRONNEMENT DU SITE EXPÉRIMENTAL | SOURCE : GOOGLE EARTH  
(EMPLACEMENT DE LA PLATEFORME MARQUÉ D'UNE CROIX ORANGE)

### 1.3.2 INSTRUMENTATION

En mai 2018, nous avons procédé à la mise en œuvre de huit places de stationnement perméables, chacune correspondant à une combinaison de **remplissage de dalles alvéolées, lit de pose et fondation**. Une place en enrobé et une zone enherbée témoin ont également été instrumentées afin de pouvoir **comparer les modalités des systèmes O2D® à une place de stationnement imperméable « traditionnelle » ainsi qu'à un espace de pleine terre urbain**.

L'instrumentation des places de parking a été assurée par le laboratoire LGCgE (Junia Hauts-de-France). Deux types de sondes Campbell Scientific ont été installées, dans différentes couches de construction, sous une zone non circulée en tête de parking. Les sondes thermiques (117) ont été enterrées à -3, -8, -24 et -55 cm, elles donnent la température en degré Celsius avec une précision de 0,4°C. Les sondes thermo-hydriques (CS655) ont été enterrées à -16 cm. Un pluviomètre (Kalyx-RG) et une sonde de température et d'humidité relative extérieure (CS215) ont également été installés. Le tout est connecté à une centrale d'acquisition (CR1000X Series de marque Campbell Scientific) alimentée par une batterie reliée à un panneau solaire (SP30). Le programme choisi permet l'acquisition de données toutes les cinq minutes sans interruption. Ainsi, l'exploitation des données enregistrées nous permet une **analyse fine du comportement thermique des différents systèmes de sol étudiés**, dans des conditions usuelles de mise en œuvre : taille réelle et parking fonctionnel.



Notons que cette étude ne prend pas en compte certaines grandeurs physiques et variables climatiques : l'intensité du vent, l'ensoleillement, l'albédo du revêtement et le taux d'humidité du sol. Les différentes modalités étudiées bénéficiant des mêmes conditions climatiques, nous supposons ici que ces paramètres n'impactent pas l'analyse des résultats pour comparer les systèmes entre eux. Ces variables pourront en revanche faire l'objet d'une seconde étude.

Les places (6), (7) et (8) ne sont pas retenues dans ce rapport statistique car malgré des comportements comparables entre les modalités de même type, nous avons observé un effet d'ombre provenant de l'arbre adjacent. Nous avons donc souhaité éliminer ce biais en ne retenant que les modalités bénéficiant des mêmes conditions d'ensoleillement.

### 1.3.3 COMPOSITION DES SYSTÈMES

Les données présentées dans cette étude comparent les cinq systèmes de sol des emplacements numérotés (1), (3), (4), (5) et (9) sur la vue de la plateforme expérimentale (cf. Figure 3).

Les systèmes O2D® sont composés d'une typologie de fondation et lit de pose, de la dalle support TTE® en matière plastique recyclée, et d'une typologie de remplissage (cf. Figure 4). Voici les compositions détaillées des cinq systèmes. La sous-fondation des systèmes (1) à (5) est composée de grave drainante d'une granulométrie de 20/40 mm (de -55 cm à -24 cm).

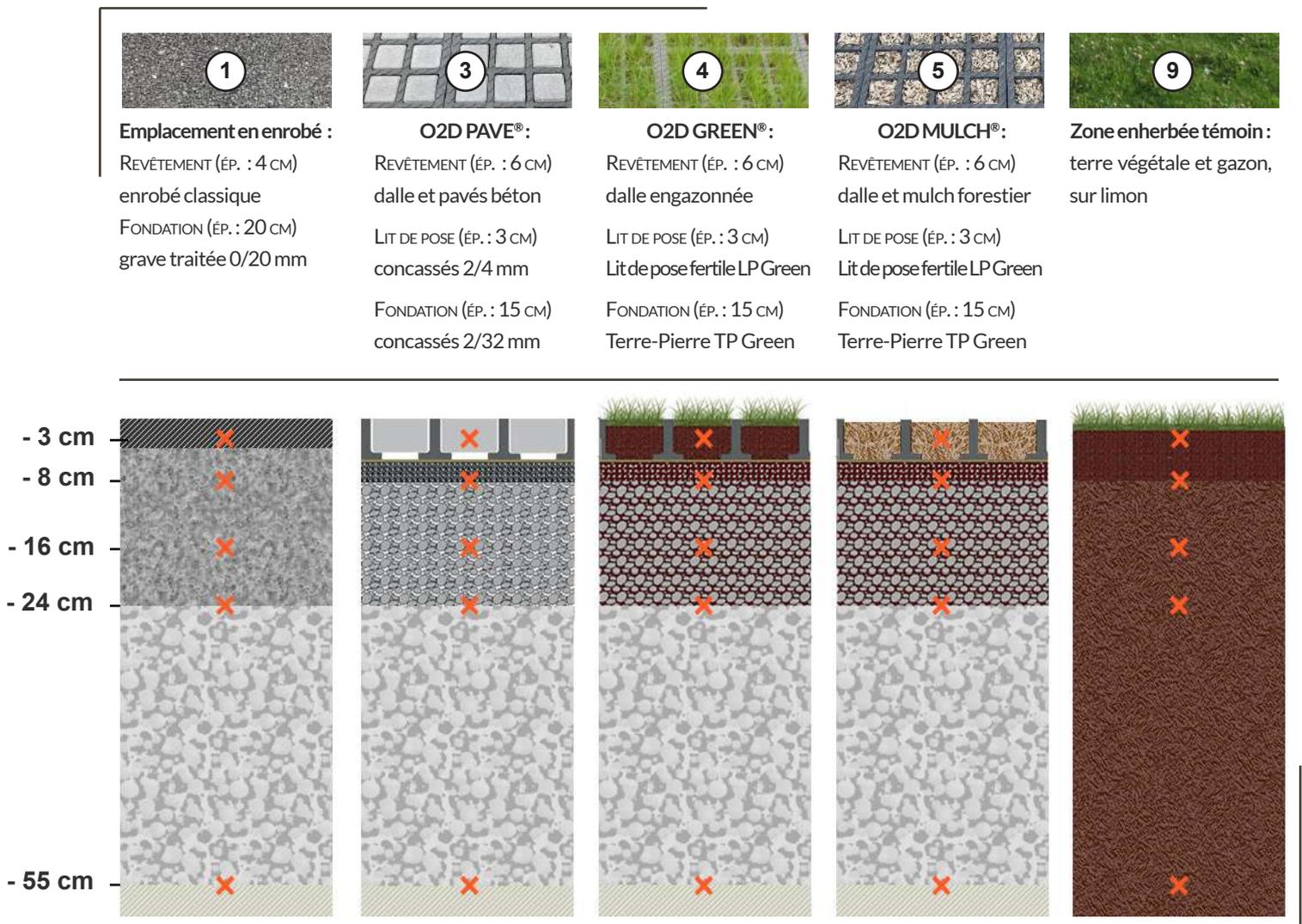


FIGURE 4 : VISUELS DES REVÊTEMENTS, COMPOSITIONS ET VUES EN COUPE DES SYSTÈMES DE SOLS AVEC POSITIONNEMENT DES SONDES

## 1.3.4 MÉTHODES DE CALCULS UTILISÉES

### A | PÉRIODES CONSIDÉRÉES POUR LE CALCUL DES MOYENNES DE TEMPÉRATURES

L'analyse précise du comportement des systèmes au regard des ICU nécessite de considérer différentes périodes en fonction des phénomènes étudiés. Ainsi, dans ce rapport, les températures moyennes pourront être calculées sur :

- **une période mensuelle** : moyenne de l'ensemble des températures relevées par mois, soit 8 036 à 8 897 mesures (en fonction du nombre de jours dans le mois).
- **une période jour (24h)** : moyenne de l'ensemble des températures relevées sur 24h, de minuit à minuit, soit 287 mesures.
- **une période diurne** : moyenne de l'ensemble des températures relevées entre le lever et le coucher du soleil selon le calendrier solaire pendant les périodes de canicule ou entre 8h et 20h pour le reste de l'année.
- **une période nocturne** : moyenne de l'ensemble des températures relevées entre le coucher et le lever du soleil selon le calendrier solaire pendant les périodes de canicule ou entre 20h et 8h pour le reste de l'année.

### B | ÉTUDE STATISTIQUE POUR COMPARER LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES EN PÉRIODE DE CANICULE (CF PARAGRAPHE 2.1.3)

Afin de comparer statistiquement les systèmes en période de canicule, des analyses de Kruskal-Wallis (méthode non paramétrique, comparaison de K échantillons) associées à une comparaison multiple par paire par une procédure de Dunn, ont été réalisées. Celles-ci permettent de déterminer si les différences entre les systèmes en termes de comportement thermique sont significatives.

Les calculs ont été réalisés grâce au logiciel XLSTAT.

### C | COMPARAISON DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE DEUX SYSTÈMES 1 ET 2 (CF PARAGRAPHES 2.1.3 ; 2.4.2 ; 2.4.3)

Pour les besoins de l'étude, nous serons amenés à réaliser deux types de comparaison :

- systèmes de sols construits (solutions O2D® et enrobé) vs systèmes de sols naturels urbains non construits (zone végétalisée témoin)
- systèmes de sols perméables (solutions O2D®) vs systèmes de sols imperméables (enrobé)

Afin de comparer au mieux les écarts de comportement thermique entre deux systèmes, les différences de température sont calculées toutes les 5 minutes, la moyenne de ces différences est ensuite calculée par jour (287 mesures) ou par mois (environ 9 000 mesures).

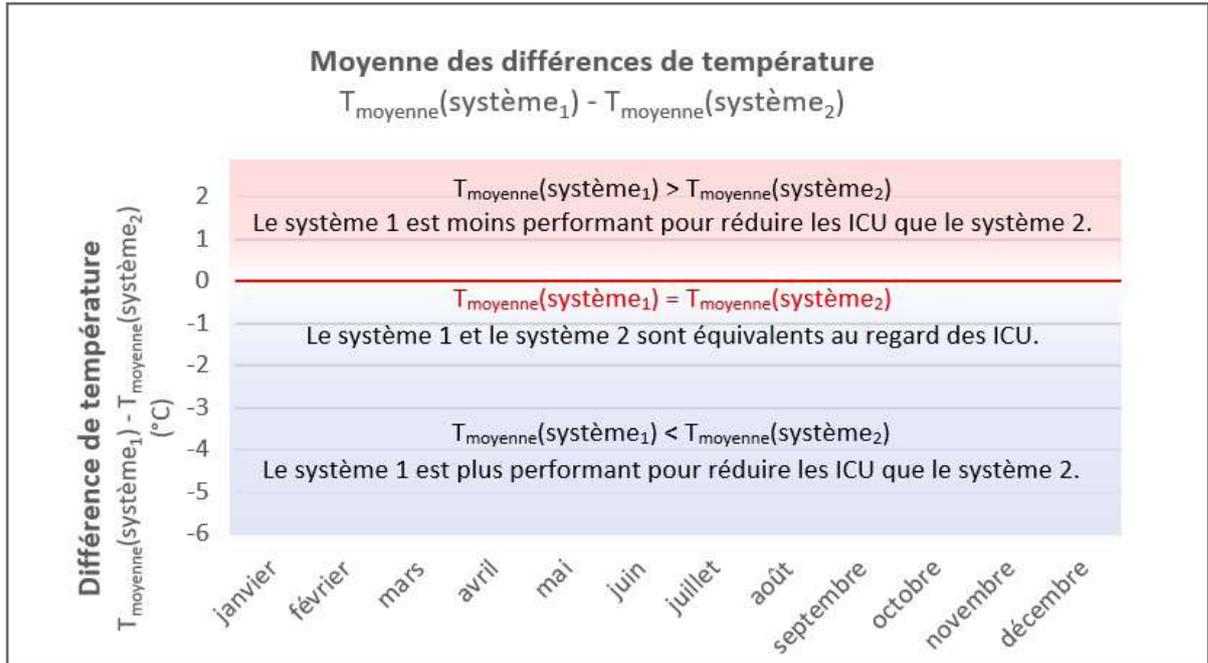


FIGURE 5 : MÉTHODE DE CALCUL DES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES

Les graphiques représentent les moyennes des différences de température entre les deux systèmes :  $T_{\text{moyenne}}(\text{systeme}_1) - T_{\text{moyenne}}(\text{systeme}_2)$ .

- Une **différence nulle** (représentée par la ligne rouge sur le graphique) signifie que les deux solutions n'ont pas de différence de température, en moyenne.
- Une **différence positive** signifie que le « système 1 » a une température supérieure à celle du « système 2 », en moyenne.
- Une **différence négative** signifie que le « système 1 » a une température inférieure à celle du « système 2 », en moyenne.

## D| RÉGRESSIONS LINÉAIRES POUR L'ÉTUDE DU TRANSFERT VERTICAL DE CHALEUR (PARAGRAPHE 2.2)

Afin d'étudier la relation entre les températures de deux couches, nous reportons sur un graphique la température maximale atteinte par la couche sous-jacente en fonction de la température maximale de la couche sus-jacente chaque jour, sur un mois. Nous appliquons ensuite une courbe de tendance linéaire. L'équation ainsi que le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la courbe de tendance obtenue nous permettent alors d'établir le degré de relation entre les valeurs étudiées.

Les régressions linéaires sont réalisées à l'aide du logiciel Excel.

Ce rapport présente cinq types d'études thermiques :

- le comportement thermique aux différentes profondeurs en période estivale
- le comportement thermique de surface en période de canicule
- le transfert vertical de chaleur au sein des différents systèmes
- le comportement climatique des cinq modalités après un épisode pluvieux
- l'étude des données relevées sur une année complète en comparant les comportements thermiques des systèmes O2D® avec celui de la zone enherbée témoin puis à celui de l'emplacement en enrobé

## 2.1 COMPORTEMENT THERMIQUE EN PÉRIODE ESTIVALE

### 2.1.1 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES À LA PROFONDEUR MAXIMALE (-55 CM)

La profondeur -55 cm a été choisie car à une telle profondeur, la température des sols varie généralement peu. Ceci se vérifie dans notre étude. Lorsque la température extérieure s'élève durant plusieurs jours ensoleillés consécutifs, nous observons qu'une augmentation de la température peut se propager jusqu'à -55 cm. Les courbes de température des systèmes de sol observés subissent une **variation linéaire** (cf. Figure 6, A). Au cours de la période étudiée (22 au 28 juillet 2018), les températures extérieures oscillent entre 12°C et 37°C et nous observons une augmentation des températures à -55 cm d'environ 2°C pour l'ensemble des places considérées.

Il est intéressant de noter que la place en enrobé révèle une température supérieure d'au moins 2°C par rapport aux autres places, sur toute la période.

### 2.1.2 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES AUX PROFONDEURS INTERMÉDIAIRES (-24 CM, -16 CM ET -8 CM)

A partir de -24 cm de profondeur, les variations de température suivent clairement un **cycle journalier**. On observe deux phénomènes bien distincts dans les courbes : la phase de stockage pendant laquelle les matériaux de surface reçoivent le rayonnement solaire et s'échauffent, suivie d'une phase de déstockage durant laquelle la décroissance de température s'effectue.

Les relevés de températures aux profondeurs intermédiaires -24 cm, -16 cm et -8 cm (cf. Figure 6, B - D), permettent de rassembler les systèmes en trois familles :

- Les matériaux « chauds » : Enrobé
- Les matériaux « modérément chauds » : O2D PAVE®
- Les matériaux « frais » : O2D GREEN®, O2D MULCH® et la zone enherbée témoin

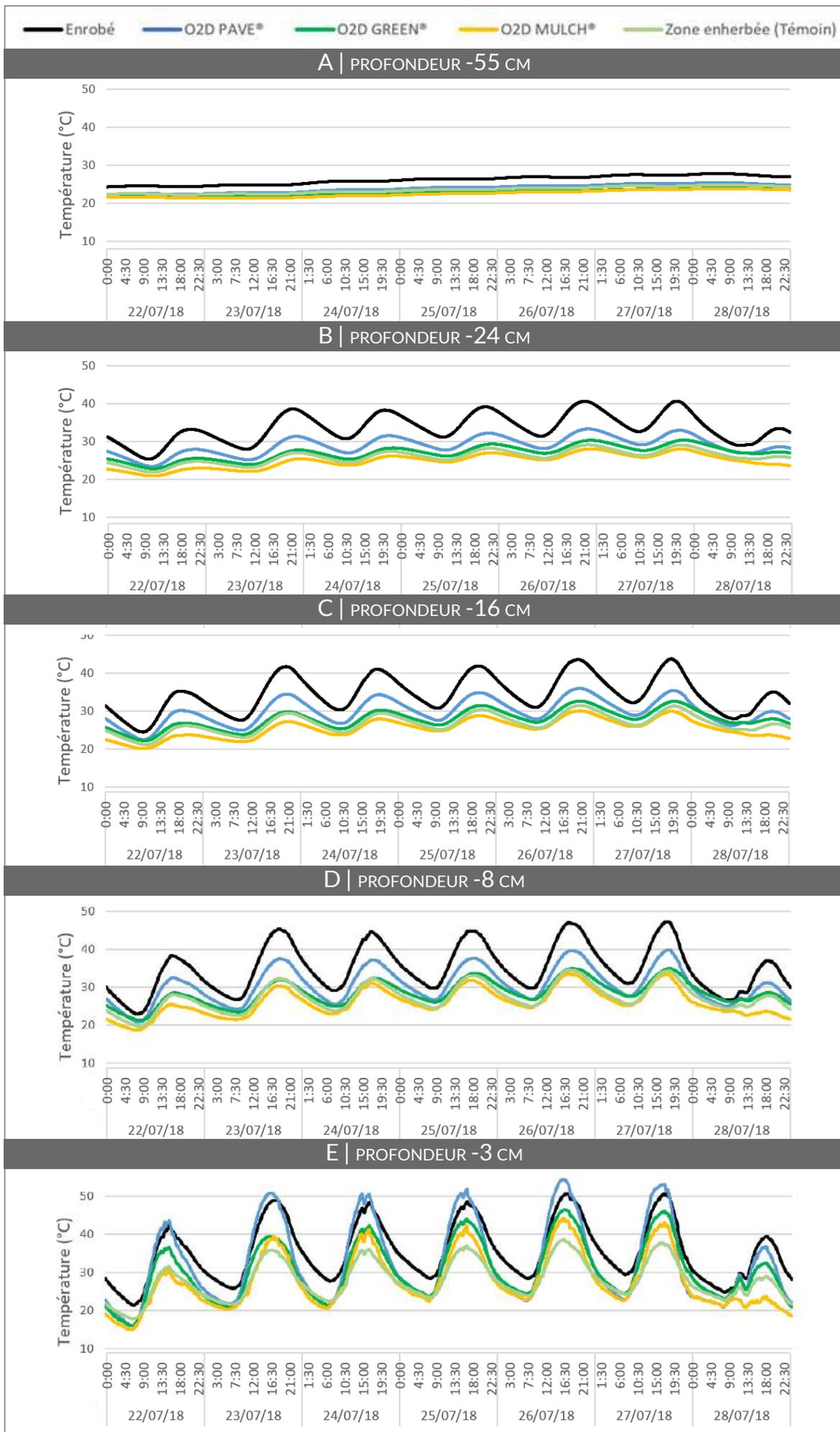


FIGURE 6 : RELEVÉS DES TEMPÉRATURES AUX DIFFÉRENTES PROFONDEURS DURANT LA PÉRIODE ESTIVALE DU 22 AU 28 JUILLET 2018

### 2.1.3 ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES EN SURFACE (-3 CM)

La température de surface nous semble d'autant plus importante qu'elle permet d'appréhender l'influence des systèmes de sol sur la température de l'air ambiant.

La température que nous considérons comme celle de surface correspond à la température mesurée par la sonde positionnée à -3 cm, donc selon les modalités :

- à 3 cm sous la surface de l'enrobé et de la zone enherbée témoin
- au cœur des alvéoles pour les trois systèmes O2D®

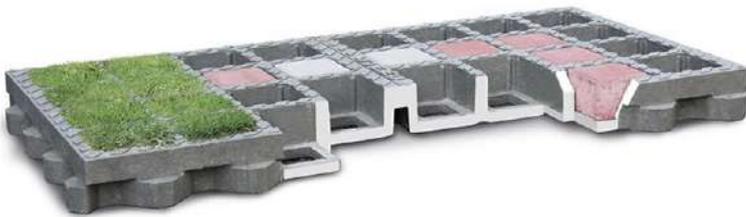


FIGURE 7 : VUE DE LA DALLE AVEC COUPE LATÉRALE MONTRANT L'INTÉRIEUR DES ALVÉOLES



FIGURE 8 : VUE DE LA SONDE À -3 CM DANS UNE ALVÉOLE

L'allure des courbes de température en surface suit un cycle journalier. On identifie bien les phases de stockage et de déstockage de chaleur par les systèmes de sol. Cependant, leurs comportements thermiques diffèrent de ce qui s'observe pour les couches sous-jacentes (cf. Figure 6).

La différence la plus notable, illustrée sur la Figure 9 ci-dessous, est le passage de la courbe de température du système O2D PAVE® au dessus de celle de l'enrobé. Il n'y a qu'en surface que ce phénomène est observé. Par ailleurs, on remarque un écart important de température entre l'enrobé et les quatre autres modalités lors de la phase de déstockage.

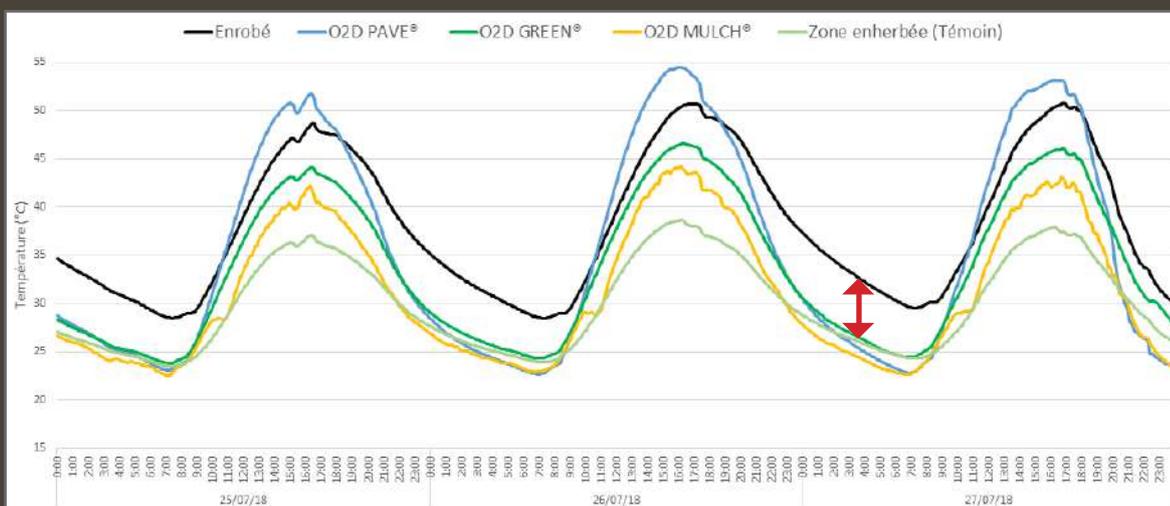


FIGURE 9 : RELEVÉS DES TEMPÉRATURES À -3 CM (FOCUS SUR LES CYCLES JOURNALIERS DU 25 AU 27 JUILLET 2018)



EN PÉRIODE DIURNE, les systèmes peuvent se rassembler en trois familles :

- Les matériaux « très chauds » (température maximale > 45°C) : Enrobé et système O2D PAVE®
- Les matériaux « modérément chauds » : systèmes O2D GREEN® et O2D MULCH®
- Les matériaux « frais » : zone enherbée témoin

L'enrobé et le système O2D PAVE® s'échauffent rapidement (cf. Figure 9). Le pavé témoigne d'une plus grande amplitude thermique et atteint, sur les heures les plus chaudes de la journée, des températures maximales supérieures à celles de l'enrobé.



EN PÉRIODE NOCTURNE, le comportement des matériaux est différent. Les systèmes se regroupent alors en deux familles :

- Les matériaux « chauds » : l'enrobé.
- Les matériaux « frais » : les systèmes O2D PAVE®, O2D GREEN®, O2D MULCH® et la zone enherbée témoin.

La vitesse de refroidissement du système O2D PAVE® et la température minimale de surface relevée (équivalente à celles des systèmes O2D GREEN®, O2D MULCH® et de la zone enherbée témoin) démontrent que le pavé déstocke très aisément sa charge thermique bien qu'il chauffe beaucoup en journée.

Ce comportement du système O2D PAVE® est d'autant plus important dans le cadre de la lutte contre la formation d'ICU puisque le cycle journalier des îlots de chaleur urbains peut s'observer selon deux phases, à savoir une période diurne et une période nocturne [Pigeon, 2007].

**En période diurne**, l'énergie des flux radiatifs est reçue puis stockée dans les matériaux, et dissipée via le flux de chaleur sensible<sup>2</sup>. Les systèmes perméables et végétalisés permettent également une dissipation via le flux de chaleur latente correspondant au flux de vapeur d'eau qui s'échange entre la surface de la Terre et l'atmosphère.

**En période nocturne**, la chaleur accumulée durant la journée dans les matériaux urbains est progressivement restituée dans l'air par convection et radiation, tout au long de la nuit.

C'est pourquoi nous distinguons ces périodes dans la suite des résultats :

- **jour** : 24h, de minuit à minuit
- **période diurne** : selon le calendrier solaire pendant les périodes de canicule / selon un découpage horaire 8h-20h pour le reste de l'année
- **période nocturne** : selon le calendrier solaire pendant les périodes de canicule / selon un découpage horaire 20h-8h pour le reste de l'année

<sup>2</sup> Flux de chaleur sensible : transport de chaleur qui s'établit entre la surface terrestre et l'atmosphère.



O2D PAVE® O2D GREEN® O2D MULCH®

Lecture du graphique, cf. paragraphe 1.3.4, C

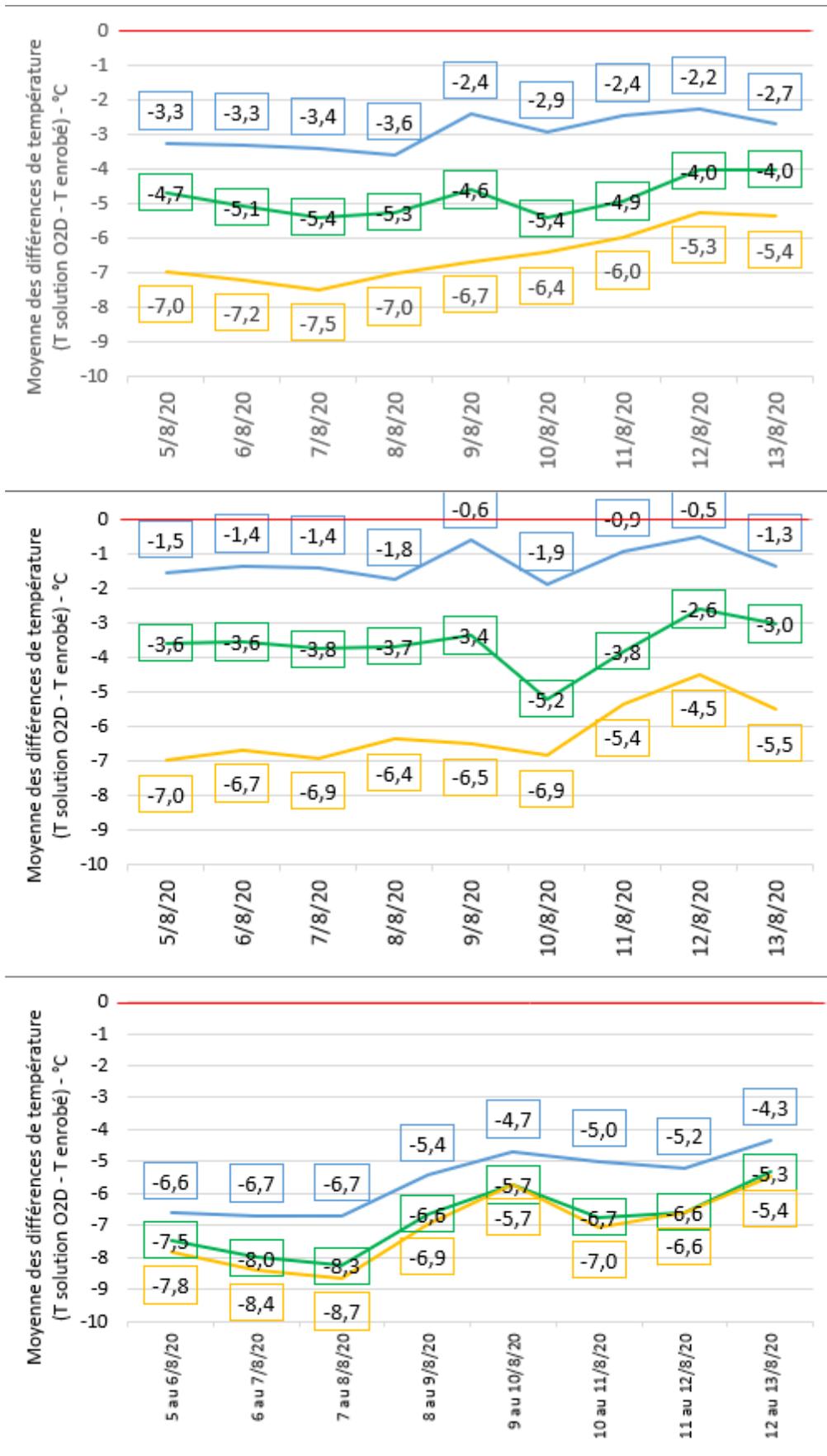


FIGURE 11 : MOYENNE DES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES EN SURFACE (-3 CM) PAR RAPPORT À L'ENROBÉ LORS DE LA CANICULE DU 5 AU 13 AOÛT 2020 : A| PAR JOUR (24H), B| EN PÉRIODE DIURNE ET C| EN PÉRIODE NOCTURNE

## 2.2.2 ÉTUDE STATISTIQUE SUR L'ENSEMBLE DES ÉVÉNEMENTS CANICULAIRES OBSERVÉS

Cette étude a été réalisée sur quatre épisodes caniculaires (25 au 28 juin 2018, 25 au 30 juin 2019, 23 au 27 juillet 2019 et 5 au 13 août 2020) soit sur un total de 23 journées (env. 190 mesures diurnes) et 21 nuits (env. 95 mesures nocturnes)<sup>4</sup>.

Les résultats de l'analyse statistique par la méthode Kruskal Wallis sont présentés sur la Figure 12. Chaque point correspond à la moyenne des températures relevées par jour de canicule, le trait horizontal rouge représente la valeur médiane de l'ensemble des données et la croix rouge représente la valeur moyenne de l'ensemble des données<sup>5</sup>.

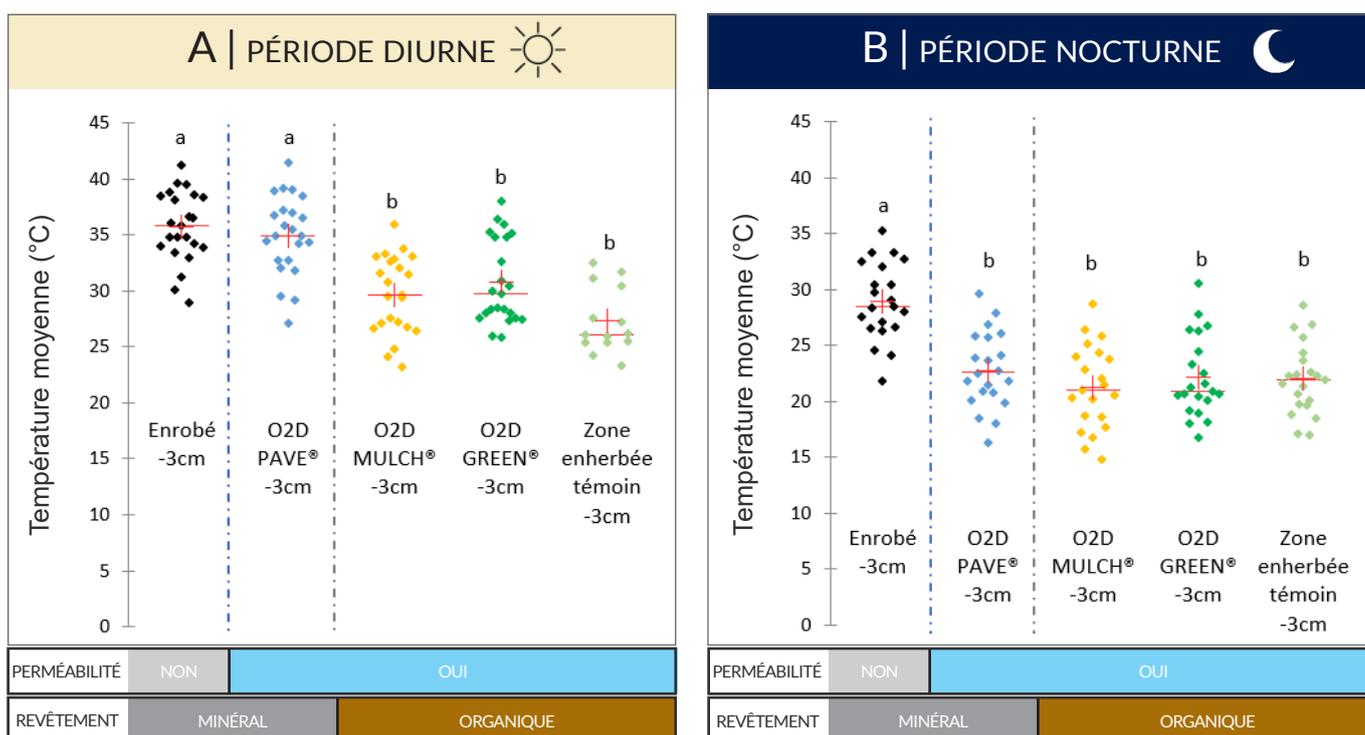


FIGURE 12 : TEMPÉRATURES MOYENNES DE SURFACE (-3 CM) POUR LES CINQ MODALITÉS PAR JOUR EN PÉRIODE DE CANICULE  
A| PÉRIODE DIURNE, B| PÉRIODE NOCTURNE

### INTERPRÉTATION DU GRAPHIQUE PRÉSENTÉ EN FIGURE 12

EN PÉRIODE DIURNE, les systèmes se regroupent en deux familles :

- (a) **Les matériaux « très chauds »** (température moyenne d'environ 35°C) : l'enrobé et O2D PAVE®
- (b) **Les matériaux « chauds »** (température moyenne d'environ 28°C) : O2D MULCH®, O2D GREEN® et la zone enherbée témoin

Ce regroupement, basé sur le comportement thermique, coïncide avec la **nature – minérale ou organique – du revêtement**.

EN PÉRIODE NOCTURNE, les systèmes se regroupent en deux familles :

- (a) **Les matériaux « chauds »** (température moyenne d'environ 29°C) : l'enrobé
- (b) **Les matériaux « frais »** (température moyenne d'environ 22°C) : O2D PAVE®, O2D MULCH®, O2D GREEN® et la zone enherbée témoin

Ce regroupement, basé sur le comportement thermique, coïncide avec la **perméabilité du système**.

<sup>4</sup> La différence de nombre de mesures est conséquente de la durée des périodes diurnes et nocturnes en période estivale.

<sup>5</sup> Les températures relevées pour le témoin lors de la canicule d'août 2020 ont dû être écartées en raison d'une ombre portée sur sa zone de mesure par un véhicule stationné sur un emplacement adjacent.

SYSTÈME 1 \ SYSTÈME 2	Enrobé -3 cm	O2D PAVE® - 3 cm	O2D MULCH® - 3 cm	O2D GREEN® - 3 cm	Zone enherbée témoin - 3 cm
Enrobé - 3 cm		-0,7	-6,0	-5,0	-8,4
O2D PAVE® - 3 cm	-6,2		-5,3	-4,2	-7,6
O2D MULCH® - 3 cm	-6,0	-1,5		1,0	-2,4
O2D GREEN® - 3 cm	-6,8	-0,6	0,9		-3,4
Zone enherbée témoin - 3 cm	-7,0	-0,8	0,8	-0,1	

FIGURE 13 : DIFFÉRENCES DES MOYENNES DE TEMPÉRATURES DE SURFACE SUR L'ENSEMBLE DES ÉVÈNEMENTS CANICULAIRES PRÉSENTÉS EN FIGURE 12

JAUNE : DIFFÉRENCES DIURNES ENTRE LE SYSTÈME INDIQUÉ EN TÊTE DE COLONNE MOINS LE SYSTÈME INDIQUÉ TÊTE DE LIGNE

BLEU : DIFFÉRENCES NOCTURNES ENTRE LE SYSTÈME INDIQUÉ EN TÊTE DE LIGNE MOINS LE SYSTÈME INDIQUÉ EN TÊTE DE COLONNE

#### LECTURE DU TABLEAU PRÉSENTÉ EN FIGURE 13

La différence moyenne relevée en surface **par rapport à l'enrobé** en période diurne est de **-5°C pour O2D GREEN®** et **-6°C pour O2D MULCH®** (-8,4°C pour la zone enherbée témoin).

La différence moyenne relevée en surface **par rapport à l'enrobé** en période nocturne est de **-6,8°C pour O2D GREEN®**, **-6°C pour O2D MULCH®** et **-6,2°C pour O2D PAVE®** (-7°C pour la zone enherbée témoin).

À LA VUE DE CES RÉSULTATS  
STATISTIQUES, NOUS POUVONS  
ÉMETTRE CES DEUX HYPOTHÈSES

1| En période diurne, la nature du revêtement - minérale ou organique - est le facteur influençant la température moyenne de la surface.

2| En période nocturne, la perméabilité du système est le facteur influençant la température moyenne de surface.

## 2.2.3 SYNTHÈSE

EN CONCLUSION, TOUTES LES SOLUTIONS O2D® TÉMOIGNENT D'UN COMPORTEMENT THERMIQUE FAVORABLE SIGNIFICATIF DURANT UN ÉPISODE DE CANICULE

Les résultats observés pour l'enrobé confirment sa contribution à l'échauffement de l'air ambiant. Il accumule beaucoup la chaleur et la restitue lentement, ses températures nocturnes restant élevées.

Les systèmes O2D GREEN® et O2D MULCH® ont des comportements très similaires à celui de la zone enherbée témoin, ils chauffent modérément la journée et refroidissent beaucoup la nuit.

Le système O2D PAVE®, bien qu'accumulant la chaleur en surface sur les phases diurnes, est capable de la déstocker rapidement pour permettre un refroidissement nocturne très efficace.

Sachant que l'amplitude de l'ICU est plus grande en période nocturne qu'en période diurne [Arnfield, 2003], la capacité de refroidissement nocturne dont font preuve les systèmes O2D® est donc une performance climatique d'autant plus impactante lors de canicules.

	En surface (-3 cm)		En profondeur (-8 cm, -16 cm, -24 cm)		Capacité de stockage de chaleur
	JOUR	NUIT	JOUR	NUIT	
Enrobé	très chaud	chaud	chaud	modérément chaud	FORTE
O2D PAVE®		frais	modérément chaud	frais	
O2D GREEN®	modérément chaud				frais
O2D MULCH®					
Zone enherbée témoin	frais	frais	frais	FAIBLE	

FIGURE 14 : SYNTHÈSE DES COMPORTEMENTS THERMIQUES DES SYSTÈMES EN FONCTION DES PROFONDEURS

LES RÉSULTATS CI-DESSUS, POUR LES CINQ MODALITÉS ÉTUDIÉES, SONT REPRÉSENTATIFS DE CE QUI EST OBSERVÉ LORS DE PÉRIODES CHAUDES ET CANICULAIRES DEPUIS LA MISE EN ŒUVRE DE LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE EN JUIN 2018.

## 2.3 TRANSFERT DE CHALEUR VERTICAL DANS LES SYSTÈMES ÉTUDIÉS

D'après APUR [Les îlots de chaleur urbains à Paris, Cahier#4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris, p. 13], le matériau de surface joue le rôle de capteur de l'énergie solaire et le matériau sous-terrain joue le rôle de réservoir de l'énergie.

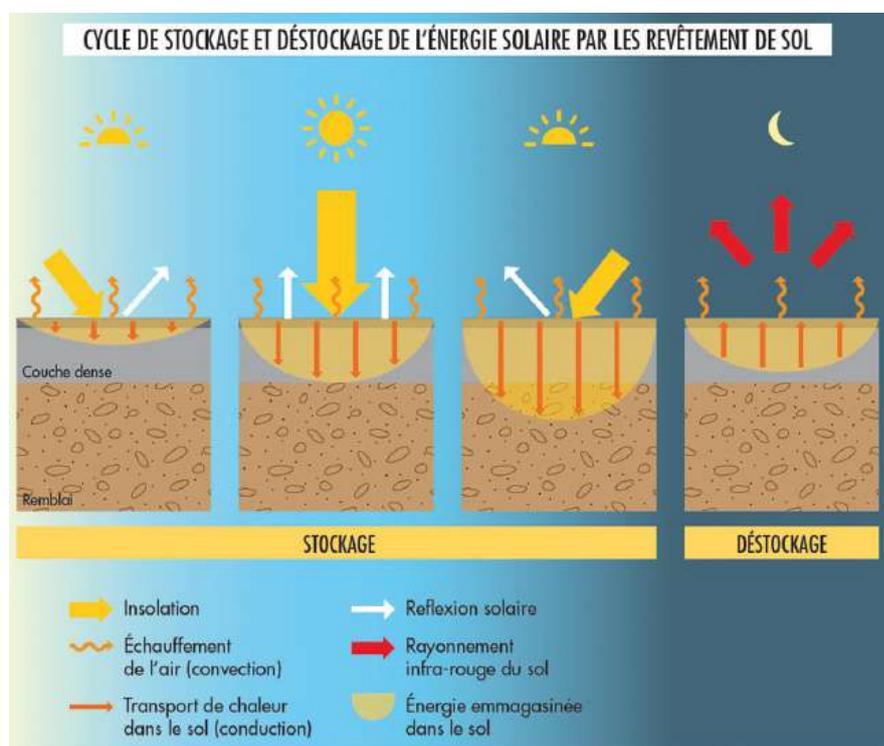


FIGURE 15 : CYCLE DE STOCKAGE ET DÉSTOCKAGE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PAR LES REVÊTEMENTS DE SOL  
(SOURCE : ©APUR LES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS À PARIS, CAHIER#4 : INFLUENCE CLIMATIQUE DES REVÊTEMENTS DE SOL À PARIS, P. 13)

L'étude des courbes de températures mesurées aux différentes profondeurs pour chacun des systèmes nous permet d'analyser leur dynamique de transfert thermique vertical.

Nous observons, pour tous les systèmes étudiés, un **réchauffement graduel des différentes couches décalé dans le temps par rapport à la surface.**

Ce réchauffement suit une courbe de profil similaire à celle des températures de surface (stockage puis déstockage de chaleur) jusque -24 cm, ce qui atteste d'un **transfert de chaleur de la surface vers les couches sous-jacentes** (cf. Figure 16).

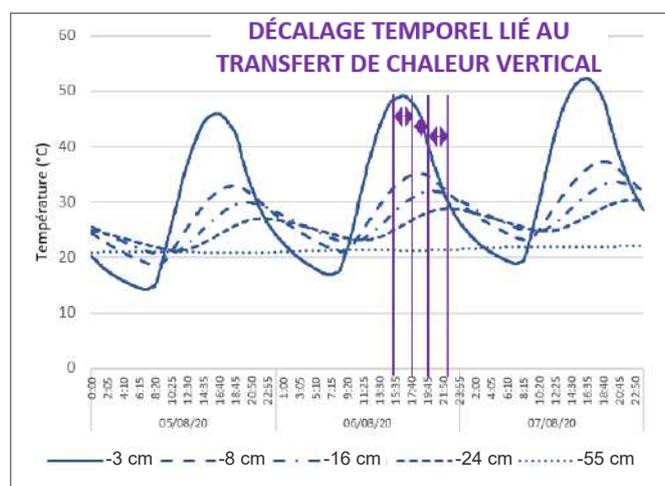


FIGURE 16 : COURBES DE TEMPÉRATURES AUX DIFFÉRENTES PROFONDEURS POUR LE SYSTÈME O2D PAVE® DU 5 AU 7 AOÛT 2020

Si l'on considère les températures maximales des couches sous-jacentes par rapport aux températures maximales de la surface, sur chaque cycle journalier, on observe une forte corrélation entre elles (cf. Figure 17, coefficient de corrélation  $R^2 > 0,95$ ). De plus, les régressions linéaires montrent que l'enrobé transmet sa chaleur à la couche sous-jacente avec très peu de perte de calories, tandis que la transmission de chaleur à la couche sous-jacente par le pavé est plus faible (il en est de même pour les autres systèmes O2D® testés).

AINSI, NOUS POUVONS EN DÉDUIRE QUE LA QUANTITÉ DE CHALEUR TRANSMISE DANS LES COUCHES SOUS-JACENTES DES SYSTÈMES PERMÉABLES O2D® EST STATISTIQUEMENT INFÉRIEURE À CELLE TRANSMISE SOUS L'ENROBÉ.

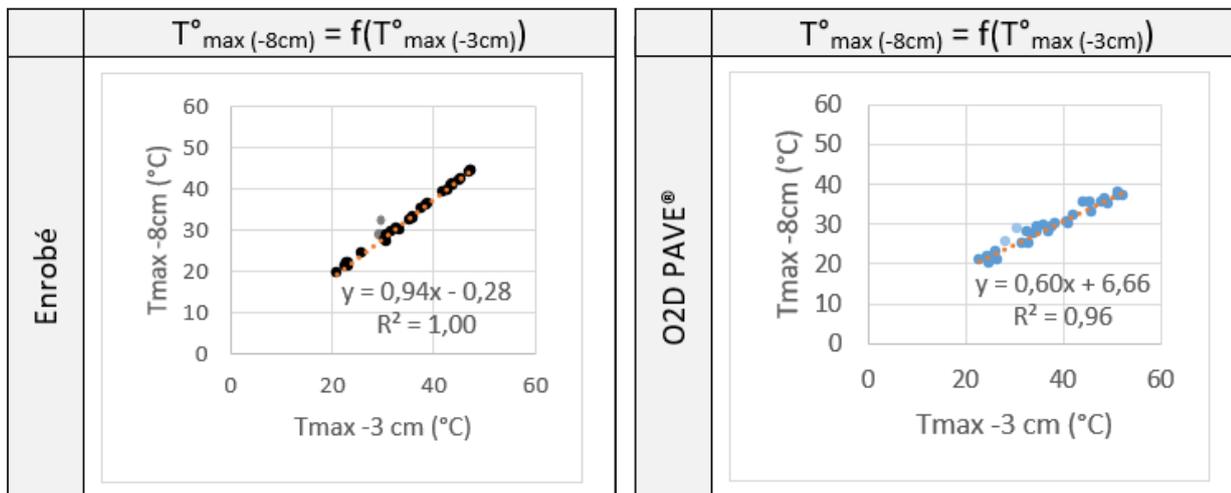


FIGURE 17 : TEMPÉRATURES MAXIMALES À - 8 CM EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE MAXIMALE DE SURFACE, AOÛT 2020 (RÉSULTATS REPRÉSENTATIFS D'UNE ÉTUDE RÉALISÉE SUR LES MOIS DE MAI À AOÛT 2019 ET 2020)

Cette observation nous permet d'expliquer pourquoi, bien que le système O2D PAVE® chauffe au moins autant que l'enrobé jusqu'à l'insolation la plus intense de la journée, les températures relevées de -8 cm à -55 cm sous le système O2D PAVE® sont toujours inférieures à celles relevées sous l'enrobé.

Les fondations de ces deux systèmes étant minérales, nous pouvons émettre l'hypothèse selon laquelle le **transfert de chaleur de la surface vers les couches sous-jacentes serait réduit grâce à la perméabilité du revêtement et à la porosité des fondations.**

## 2.4 COMPORTEMENT THERMIQUE APRÈS UN ÉPISODE PLUVIEUX

Pour cette étude, la période du 23 juillet 2019 au 31 juillet 2019 a été retenue, avec les conditions météorologiques suivantes :

- 4 journées très ensoleillées et chaudes avant l'événement pluvieux (épisode caniculaire)
- pas de pluie durant les 15 jours précédents l'événement pluvieux
- un événement pluvieux important (26,6 mm sur 24h) étalé sur une journée
- des températures élevées 2 jours après l'événement pluvieux

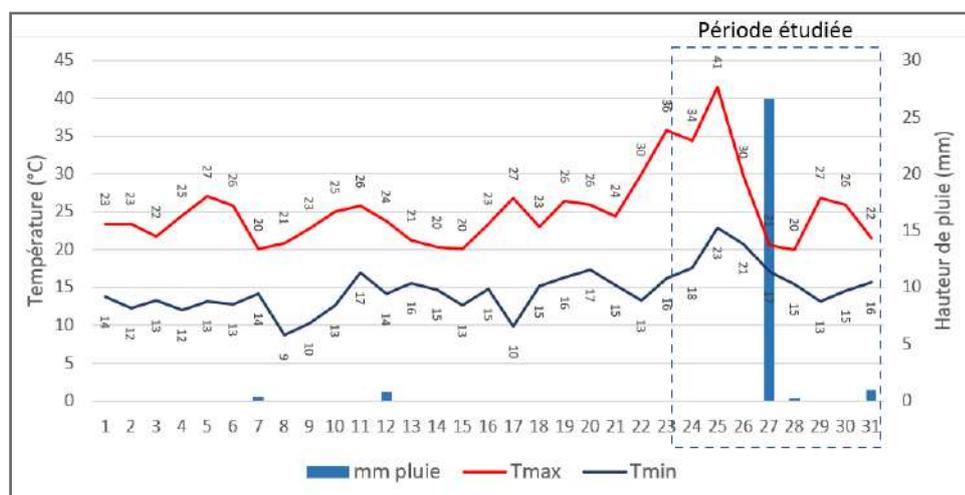


FIGURE 18 : DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES - JUILLET 2019

Lorsque l'on observe les courbes de températures relevées aux différentes profondeurs, on constate que **tous les systèmes réagissent rapidement à l'épisode pluvieux**. Ceci peut s'expliquer par les différents facteurs météorologiques combinés que sont le rafraîchissement des surfaces par l'eau de pluie, la baisse conséquente des températures ainsi que le faible rayonnement solaire.



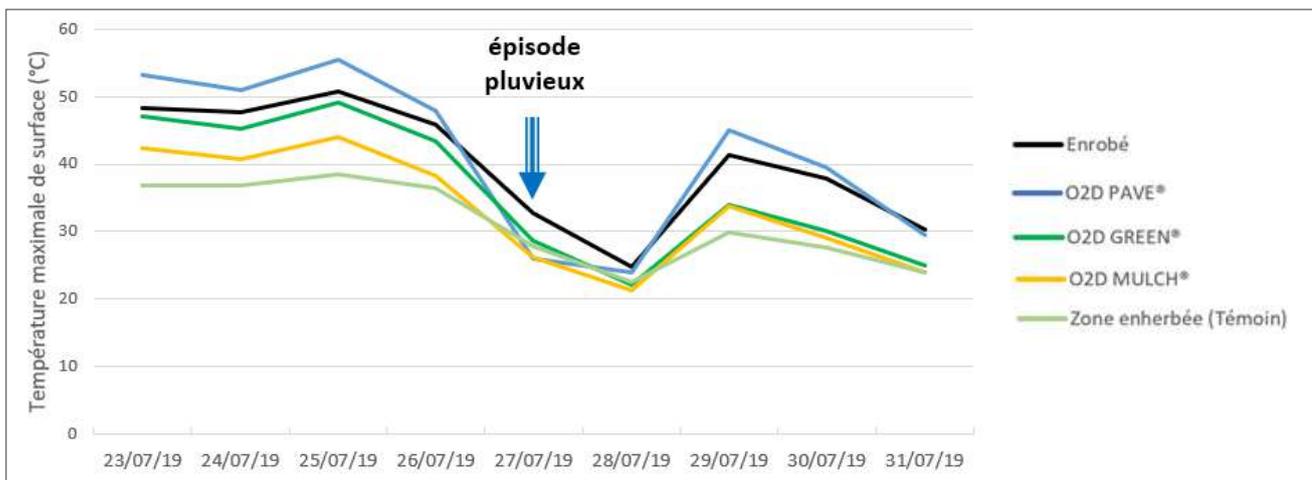


FIGURE 19 : TEMPÉRATURES MAXIMALES DE SURFACE SUR LA PÉRIODE DU 23 AU 31 JUILLET 2019

Si l'on reporte les températures de surface maximales des différents systèmes sur cette période pour étudier le comportement avant et après l'épisode pluvieux (cf. Figure 19), on remarque que :

- **Tous les systèmes perméables refroidissent plus rapidement que l'enrobé** au cours de l'évènement pluvieux (l'enrobé est plus chaud de 6°C que le pavé le 27 juillet).
- **Le comportement thermique du système O2D GREEN® est durablement influencé par l'évènement pluvieux** (sa température maximale se rapproche de celle de la zone enherbée témoin, alors qu'avant l'évènement elle était supérieure d'environ 10°C).

La végétation étant en dormance sur cette période très chaude, nous expliquons cette observation par la capacité de rétention d'eau du système O2D GREEN®. **La terre joue ici son rôle de régulateur thermique grâce au phénomène d'évaporation.** L'eau absorbée par le substrat des alvéoles et les fondations organiques est relarguée par évaporation pendant plusieurs jours après l'épisode pluvieux (flux de chaleur latente).

Ce changement de comportement ne s'observe pas pour l'enrobé ni le pavé puisque l'humidité résiduelle en surface est rapidement évaporée.

Ces résultats sont représentatifs d'autres épisodes pluvieux observés, attestant de l'influence de la perméabilité et des capacités de rétention en eau des systèmes de sols sur leur comportement thermique.

## 2.5 COMPARAISON DU COMPORTEMENT THERMIQUE AU COURS D'UNE ANNÉE ENTRE LES SYSTÈMES O2D® ET L'ENROBÉ OU LA ZONE ENHERBÉE TÉMOIN (ANNÉE 2019)

### 2.5.1 MOYENNES MENSUELLES DES TEMPÉRATURES, AUX DIFFÉRENTES PROFONDEURS

Les températures mesurées pour toutes les modalités étudiées témoignent d'un comportement thermique saisonnier : les températures moyennes les plus élevées correspondent aux mois estivaux et les plus faibles aux mois hivernaux.

Le système O2D MULCH® a un comportement thermique moyen équivalent à celui de la zone enherbée témoin. Les systèmes O2D PAVE® et O2D GREEN® ont des températures moyennes légèrement supérieures à celles du témoin. Les températures moyennes relevées pour le système enrobé sont supérieures à celles des systèmes de sols perméables O2D®, et ce, à toutes les profondeurs (nous ne présentons ici que les températures de surface).

Nous observons donc que **les matériaux constitutifs du système imperméabilisé, en enrobé, stockent davantage de chaleur que ceux des systèmes perméables.**

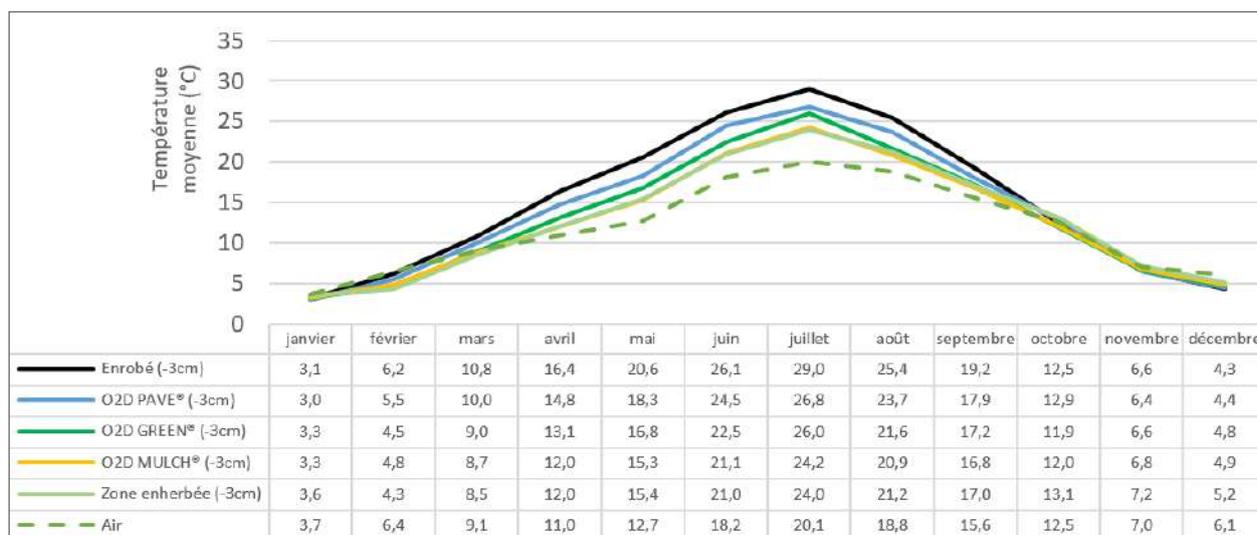


FIGURE 20 : MOYENNES MENSUELLES DES TEMPÉRATURES EN SURFACE AU COURS DE L'ANNÉE 2019

Les deux études comparatives suivantes se concentrent sur les températures de surface. En effet, ce sont celles qui illustrent le mieux les comportements thermiques des différentes modalités. Par ailleurs, la température de surface est la plus pertinente au regard de l'étude des îlots de chaleur urbains. Si la capacité de réchauffement et de refroidissement du système complet de sol est une variable importante, la chaleur transitant par le revêtement en surface est celle qui a le plus d'impact sur l'échauffement ou le rafraîchissement de l'air ambiant, via les flux de chaleur sensible et latent.

**Ainsi, nous considérons que les températures de surface traduisent le temps et l'intensité du cycle de stockage/déstockage de chaleur du système complet de sol (revêtement en surface et fondation).**

## 2.5.2 COMPARAISON DU COMPORTEMENT THERMIQUE EN SURFACE DES SYSTÈMES O2D® PAR RAPPORT À LA ZONE ENHERBÉE

L'objectif des solutions développées par O2D ENVIRONNEMENT® est la préservation des fonctions naturelles du sol. Un sol naturel assure une fonction de régulation thermique de l'air ambiant. C'est pourquoi nous mettons ici en évidence la **différence moyenne de température entre les différents systèmes et la zone témoin enherbée** (cf. Figure 21).

Les solutions O2D GREEN® et O2D MULCH® ont un comportement thermique moyen semblable à celui de la zone témoin tout au long de l'année (moyenne des différences avec la zone enherbée < 1°C).

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Enrobé - 3 cm	-0,5	1,8	2,2	4,4	5,1	5,1	5,1	4,2	2,1	-0,6	-0,4	-1,1
O2D PAVE® - 3 cm	-0,6	1,0	1,4	2,6	2,9	3,7	2,8	2,5	0,7	-1,1	-0,9	-0,5
O2D GREEN® - 3 cm	-0,5	0,0	0,0	0,1	0,7	0,7	0,8	-0,3	-0,6	-1,3	-0,9	-0,3
O2D MULCH® - 3 cm	-0,3	0,5	0,2	0,0	-0,2	0,1	0,3	-0,3	-0,2	-1,0	-0,4	0,1

moyenne des différences avec la zone enherbée ≤ 0°C  
 0°C < moyenne des différences avec la zone enherbée < 1°C  
 1°C < moyenne des différences avec la zone enherbée < 2°C  
 2°C < moyenne des différences avec la zone enherbée < 4°C  
 moyenne des différences avec la zone enherbée > 4°C

FIGURE 21 : MOYENNES DES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES AVEC LA ZONE ENHERBÉE PAR MOIS AU COURS DE L'ANNÉE 2019

EN PÉRIODE DIURNE, les différences de températures entre les solutions minérales (enrobé et O2D PAVE®) et le témoin sont importantes (cf. Figure 22, A). Cependant, la **capacité et la vitesse de refroidissement d'O2D PAVE®** lui permettent de retrouver des températures équivalentes à celles de la zone enherbée témoin en PÉRIODE NOCTURNE (cf. Figure 22, B). L'enrobé, quant à lui, conserve un comportement thermique défavorable en période nocturne.

Toutes les solutions O2D® ont un comportement thermique équivalent à la zone enherbée témoin en période nocturne (cf. Figure 22, B).

Le tableau présentant les moyennes des différences de températures (cf. Figure 21) traduit bien ces observations, et met en évidence le **comportement thermique particulièrement défavorable de l'enrobé au regard des ICU, d'avril à août.**

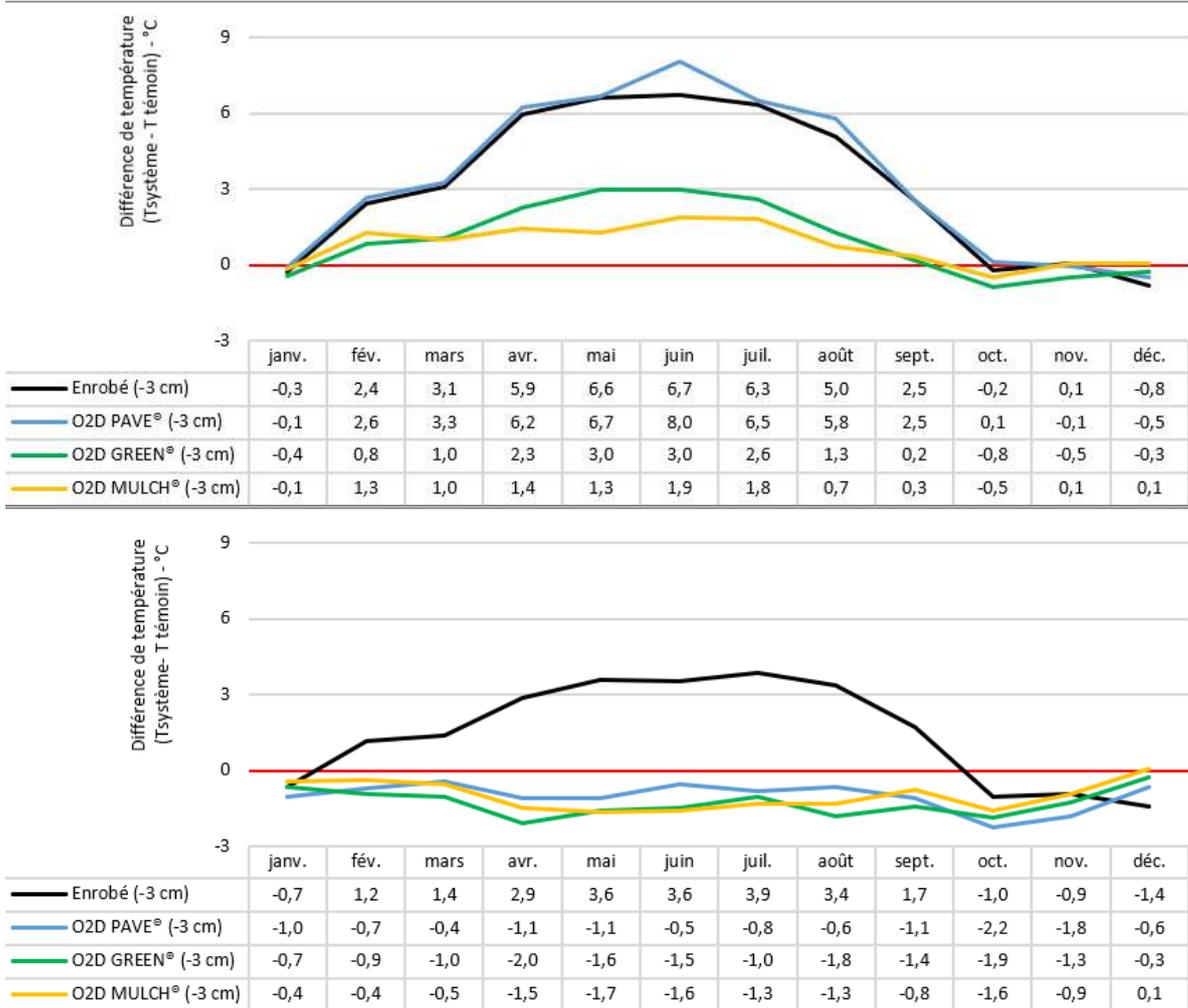


FIGURE 22 : MOYENNES MENSUELLES DES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES ENTRE LES SYSTÈMES DE SOL CONSTRUITS ET LA ZONE ENHERBÉE TÉMOIN AU COURS DE L'ANNÉE 2019 : A| PÉRIODE DIURNE, B| PÉRIODE NOCTURNE.

Pour rappel, une différence négative indique que le système est plus froid que la zone témoin enherbée et une différence positive indique que le système est plus chaud que la zone témoin enherbée.

### 2.5.3 COMPARAISON DU COMPORTEMENT THERMIQUE EN SURFACE DES SYSTÈMES O2D® PAR RAPPORT À L'ENROBÉ

Des matériaux imperméables comme l'enrobé sont traditionnellement mis en œuvre sur les parkings, voiries et parvis en raison de leurs qualités mécaniques, leur résistance aux contraintes de la circulation automobile et leur facilité de mise en œuvre.

Afin d'étudier le comportement thermique de chaque système O2D® par rapport à celui de l'enrobé, nous comparons ici leurs différences moyennes de températures en surface (cf. Figure 23).

En période nocturne, les températures de toutes les solutions O2D® sont significativement moins élevées que celles de l'enrobé. Cette caractéristique est primordiale au regard de la lutte contre les îlots de chaleur urbains, en lien avec le cycle de déstockage et la vitesse de refroidissement nocturne.

Les solutions O2D GREEN® et O2D MULCH® témoignent de performances climatiques diurnes et nocturnes bénéfiques pour la lutte contre les ICU, leurs températures étant bien moins élevées que celles de l'enrobé.

La solution O2D PAVE® a un comportement thermique diurne équivalent à celui de l'enrobé mais démontre un bien meilleur refroidissement nocturne (cf. Figure 22, B et C). Ses matériaux de fondation stockant peu l'énergie solaire, le système O2D PAVE® ne remplit pas un rôle de réservoir de chaleur en période nocturne, comparativement à l'enrobé.

O2D PAVE® O2D GREEN® O2D MULCH®

Lecture du graphique, cf. paragraphe 1.3.4, C

A | PAR JOUR (24H)



B | PÉRIODE DIURNE



C | PÉRIODE NOCTURNE



FIGURE 23 : MOYENNES DES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES ENTRE LES SYSTÈMES O2D® ET L'ENROBÉ AU COURS DE L'ANNÉE 2019 : A| PAR JOUR (24H), B| PÉRIODE DIURNE ET C| PÉRIODE NOCTURNE

L'étude du comportement thermique des cinq modalités de sols urbains considérés nous a rapidement amenés à **différencier les périodes diurne et nocturne**. Les cycles journaliers de stockage-déstockage de l'énergie solaire par les systèmes de sol ont bien été identifiés et se sont révélés particulièrement différenciant. Ce phénomène s'observe dès les couches de fondation (à partir de -24 cm), témoignant du transfert vertical de chaleur au sein des systèmes de sol depuis la surface vers les couches sous-jacentes. Les analyses menées mettent en évidence les **implications distinctes du revêtement de surface et de la fondation dans les propriétés climatiques des systèmes de sols**.

### 3.1 LA SURFACE : CAPTEUR DE L'ÉNERGIE SOLAIRE ET INTERFACE D'ÉCHANGES

La surface du système de sol joue les rôles de capteur de l'énergie solaire et d'accumulateur de la chaleur en période diurne. La nature du revêtement de surface influence de façon très marquée la réponse climatique du système de sol. Notre étude confirme un échauffement surfacique beaucoup plus élevé pour les matériaux minéraux comme l'enrobé et le revêtement en pavé béton O2D PAVE®. Les matériaux organiques comme O2D GREEN®, O2D MULCH® et la zone témoin enherbée s'échauffent et accumulent significativement moins l'énergie solaire durant la journée.

En dépit de la constitution minérale du système O2D PAVE®, nous constatons qu'il témoigne d'un très bon refroidissement nocturne, atteignant des températures minimales similaires à celles des autres systèmes de sols O2D® et de la zone enherbée témoin. La perméabilité du système O2D PAVE® permet la circulation de l'air entre les différentes couches de matériaux et l'air ambiant, contribuant ainsi au refroidissement rapide du système jusqu'à sa surface. Le cycle de déstockage étant réduit à quelques heures, le transfert de chaleur vers l'air ambiant ne s'opère donc pas la nuit. Cette capacité de refroidissement nocturne rapide est importante pour la lutte contre les ICU, et plus particulièrement en période de canicule.

### 3.2 LA FONDATION : RÉSERVOIR DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ

L'observation d'un réchauffement graduel des différentes couches de fondation atteste du transfert de chaleur s'effectuant de la surface vers les couches sous-jacentes. Par ailleurs, les matériaux de fondation révèlent des cycles de stockage-déstockage décalés dans le temps par rapport à celui de la surface. Cette étude confirme bien le rôle de réservoir de chaleur que joue la fondation au sein du système de sol. Une fondation réalisée avec un matériau fermé et imperméable, telle que celle du système en enrobé, stocke beaucoup plus la chaleur qu'une fondation perméable mise en œuvre avec un matériau concassé permettant une certaine porosité, et donc une circulation de l'air, au sein du système de sol.

L'étude du comportement thermique des systèmes de sol après un épisode pluvieux a mis en évidence l'importance de la capacité de rétention en eau des fondations. Alors que les systèmes minéraux perméable (O2D PAVE®) ou imperméable (enrobé) retrouvent rapidement leurs capacités d'échauffement, on constate que les systèmes organiques (O2D GREEN® et O2D MULCH®) sont impactés durablement par la captation d'eau. Les températures maximales relevées les jours suivant l'événement se rapprochent de celles de la zone enherbée témoin. Les systèmes organiques jouent clairement un rôle de régulateur thermique grâce au phénomène d'évaporation.

### 3.3 SYNTHÈSE SUR LES PROPRIÉTÉS CLIMATIQUES DES SYSTÈMES

---



#### ENROBÉ

Comme pressenti au vu de la littérature, l'enrobé a confirmé son comportement thermique défavorable. Au cours de nos études comparatives, il s'est révélé être la modalité la moins appropriée dans un contexte d'îlot de chaleur urbain : il chauffe vite, atteint des températures très élevées et transmet la chaleur aux couches plus profondes de sol, enclenchant un mécanisme de réchauffement progressif journalier en période de canicule.



#### SYSTÈME O2D GREEN® ET SYSTÈME O2D MULCH®

Les deux solutions qui se rapprochent le plus du comportement thermique des sols naturels sont la solution végétalisée et la solution de mulch forestier. Les moyennes mensuelles des systèmes organiques O2D® sont relativement proches de celles d'un terre-plein enherbé (zone témoin). Les graminées sont souvent en dormance lors des fortes chaleurs et ne contribuent que très peu à l'évapotranspiration. L'intérêt thermique des systèmes O2D GREEN® et O2D MULCH® se manifeste plutôt par la proportion de matière organique présente dans les substrats de remplissage et fondations, et notamment :



- **leur pouvoir réfléchissant** (albédo plus élevé que l'enrobé) et leur forte inertie thermique engendrant une moindre absorption de l'énergie solaire
- **la perméabilité, la nature et la porosité de leurs matériaux constitutifs** engendrant une bonne circulation de l'air et de l'eau ainsi qu'une capacité de rétention de l'humidité

CES SYSTÈMES DE SOLS PERMÉABLES FONT DONC PREUVE DU MEILLEUR COMPORTEMENT CLIMATIQUE DANS LA LUTTE CONTRE LA FORMATION D'ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS.



#### SYSTÈME O2D PAVE®

Malgré sa sensibilité au rayonnement solaire et ses capacités d'échauffement, le système de dalle alvéolée et pavés béton se révèle intéressant pour la réduction de l'effet d'ICU.

LE REFROIDISSEMENT NOCTURNE DONT IL FAIT PREUVE LUI PERMET DE NE PAS CONTRIBUER À L'ÉCHAUFFEMENT DE L'AIR AMBIANT DURANT LA NUIT, CE QUI EST UN FACTEUR DÉTERMINANT LORS DE PÉRIODES DE CANICULES.

	Nature du revêtement de surface	Nature du système de fondation	Comportement en période diurne et nocturne	Ecart moyen de T° en surface en période estivale (juin à août) par rapport à la zone enherbée témoin	Ecart moyen de T° en surface en période de canicule par rapport à l'enrobé <b>PÉRIODE DIURNE</b>	Ecart moyen de T° en surface en période de canicule par rapport à l'enrobé <b>PÉRIODE NOCTURNE</b>	Performance pour la lutte contre la formation d'ICU
<b>Enrobé</b>	Minéral imperméable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu de porosité</li> <li>• Matériau minéral fermé</li> <li>• Imperméable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Echauffement en journée</li> <li>• Faible refroidissement nocturne</li> </ul>	<b>+4,8°C</b>	/	/	<b>Mauvaise</b>
<b>O2D PAVE®</b>	Minéral perméable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosité</li> <li>• Grave minérale ouverte</li> <li>• Perméable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Echauffement en journée</li> <li>• Refroidissement nocturne rapide</li> </ul>	<b>+3°C</b>	-0,7°C	<b>-6,2°C</b>	Bonne
<b>O2D GREEN®</b>	Organique perméable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosité</li> <li>• Grave et matière organique</li> <li>• Perméable</li> <li>• Capacité de rétention d'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Echauffement modéré en journée</li> <li>• Refroidissement nocturne</li> </ul>	+0,6°C	<b>-5°C</b>	<b>-6,8°C</b>	Très bonne
<b>O2D MULCH®</b>	Organique perméable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosité</li> <li>• Grave et matière organique</li> <li>• Perméable</li> <li>• Capacité de rétention d'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Echauffement modéré en journée</li> <li>• Refroidissement nocturne</li> </ul>	+0,1°C	<b>-6°C</b>	<b>-6°C</b>	Très bonne
<b>Zone enherbée témoin</b>	Organique perméable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limon</li> <li>• Perméable</li> <li>• Capacité de rétention d'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible échauffement en journée</li> <li>• Refroidissement nocturne</li> </ul>	/	<b>-8,4°C</b>	<b>-7°C</b>	Très bonne

## 3.4 PERSPECTIVES

Cette étude méritera sans doute un second volet afin de mettre en perspective certaines variables manquantes dans le cadre de la plateforme expérimentale actuelle. Il pourrait être intéressant de compléter les études comparatives en intégrant notamment les paramètres du rayonnement solaire, du vent ou encore de l'humidité du sol. Une série de tests en laboratoire portant sur des carottages permettrait en outre de maîtriser les conditions climatiques (ensoleillement artificiel, taux d'humidité et température) et de consolider les résultats obtenus *in situ*.

Concernant l'étude des matériaux constitutifs des systèmes de sol, un axe de recherche pourrait porter sur la comparaison de différents coloris d'enrobé. Nous réalisons actuellement des relevés thermiques sur différents coloris de pavés béton dans le système O2D PAVE®. Il n'est pas exclu d'en optimiser également la composition afin de limiter ses capacités d'échauffement. Enfin, les matériaux constitutifs des fondations mériteraient également un sujet d'étude à part entière, en faisant varier leurs niveaux de perméabilité, de porosité et de proportion de matière organique, afin d'en évaluer l'influence climatique tout en gardant leurs propriétés mécaniques.

Aussi, comme cela est souvent discuté, nous pouvons nous interroger sur l'utilisation d'un arrosage raisonné régulier afin d'humidifier les sols et limiter le stress hydrique des plantes des systèmes végétalisés. Dans ce cas, le transfert de chaleur latente observé dans cette étude (évaporation de l'eau contenue dans le substrat), serait augmenté grâce à l'évapotranspiration des plantes. Cela permettrait de profiter au mieux de leurs capacités thermorégulatrices lors d'épisodes de chaleur et de sécheresse prolongés.

## 4. CONCLUSION

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est fortement lié à la façon dont sont construites les villes et aux matériaux composant les surfaces de l'espace public. L'occupation des sols est difficilement réversible dans les centres-villes qui concentrent les activités humaines et leurs besoins fonctionnels.

Dans ce cadre, les matériaux bitumeux sont souvent choisis pour leurs propriétés mécaniques en réponse aux usages des infrastructures routières et de parkings. **Afin de limiter l'impact de l'artificialisation des sols sur l'environnement et la qualité de vie, les politiques d'aménagement peuvent néanmoins tendre vers des solutions alternatives.**

La vision d'O2D ENVIRONNEMENT® est de rendre aux sols urbains leurs fonctions écologiques naturelles, notamment celles d'infiltration des eaux pluviales et de régulation thermique, tout en permettant leur fonction de support des activités humaines. Ces solutions ont prouvé leur efficacité en termes d'usage, pour l'aménagement de surfaces carrossables mais aussi d'espaces piétons (cheminements, allées de cimetière, cours intérieures, places publiques etc.).

L'étude présentée dans ce rapport permet d'attester des **performances climatiques des systèmes de sols perméables, tels que préconisés par O2D ENVIRONNEMENT®, dans un contexte de lutte contre la formation d'îlots de chaleur urbains.**

Nous distinguons quatre critères impliqués dans le comportement thermique des systèmes de sols : **la nature du revêtement de surface** (dont dépendent les caractéristiques thermiques, hydriques et radiatives), **la perméabilité du système**, **la porosité de la fondation** et **la capacité de rétention en eau de la fondation.**

La perméabilité et la présence de matière organique, voire de végétation, semblent être la combinaison idéale pour lutter contre l'échauffement de l'air ambiant par les systèmes de sols urbains. Cela confirme certaines recommandations pour l'adaptation de la ville au changement climatique, allant dans le sens du **retour de l'eau et du végétal dans l'espace public.**

**C'est l'association de solutions vertueuses qui permettra de tendre vers un modèle de ville plus résilient face au défi climatique :** conception bioclimatique du bâti, matériaux aux performances thermiques favorables, réintroduction de l'eau et du végétal, adaptation des formes urbaines.

Les systèmes de sols urbains innovants remplissent des **objectifs environnementaux multiples au sein des villes :** gestion des eaux pluviales par infiltration, adaptation au changement climatique, retour de la biodiversité dans les sols, végétalisation de surface. Nous exposerons ces autres bénéfices environnementaux dans les **rapports #2 et #3** portant sur le **potentiel de recolonisation des systèmes par la biodiversité du sol** et le **pouvoir de biodégradation des hydrocarbures.**

LES RELEVÉS DE TEMPÉRATURES EN TEMPS RÉEL DES SYSTÈMES DE SOLS PRÉSENTÉS DANS CETTE ÉTUDE SONT CONSULTABLES À L'ADRESSE [WWW.ECOPARKING.FR](http://WWW.ECOPARKING.FR).

# BIBLIOGRAPHIE

- APUR (2017). *Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier#4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris*, 13.
- Arnfield, A. (2003). *Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology*, 23:1–26.
- Deilami, K., Kamruzzaman, M., & Liu, Y. (2018). *Urban heat island effect : A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 30-42.
- Di Giuseppe, E., Pergolini, M., & Stazi, F. (2017). *Numerical assessment of the impact of roof reflectivity and building envelope thermal transmittance on the UHI effect. Energy Procedia*, 404-413.
- IAU îdF (2010). *Les îlots de chaleur urbains - Répertoire de fiches connaissance*, 9.
- Imhoff, M., Zhang, P., Wolfe, R., & Bounoua, L. (2010). *Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. Remote Sens. Environ.*, 504-513.
- Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H., & Mauri, E. (2012). *The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. Resources, Conservation and Recycling*, 23-29.
- L'agence de développement et d'urbanisme de Lille Métropole (2017). *Les Ilôts de chaleur urbains (ICU)*.
- Miyajima, S., Uoi, N., Murata, T., Takeda, M., Morishima, W. & Watanabe, M. (2015). *Effect of structural modification on heat transfer through man-made soils in urban green areas. Soil Science and Plant Nutrition*, 70-87.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). *The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. Journal of Environmental Management*, 522-538.
- Morini, E., Touchaei, A., Castellani, B., Rossi, F., & Cotana, F. (2016). *The impact of albedo increase to mitigate the urban heat island in Terni (Italy) using the WRF model. Sustainability*, 999.
- Pigeon, G. (2007). *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine : Projets CLUESCOMPTE et CAPITOUL. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse*.
- Stewart. (2011). *Redefining the urban heat island. Thèse de doctorat, The University of British Columbia, Vancouver*.

**O2D ENVIRONNEMENT®**  
**S'ENGAGE AU QUOTIDIEN POUR LE DÉVELOPPEMENT**  
**DE SOLUTIONS VERTUEUSES AVEC UN OBJECTIF :**  
*préserver les fonctions naturelles du sol*



**O2D**  
ENVIRONNEMENT

**FRANCE**  
O2D ENVIRONNEMENT®  
117 rue Pierre Brizon  
59810 LESQUIN  
Tél. : +33(0)3 20 06 83 76  
Email : [contact@o2d.fr](mailto:contact@o2d.fr)

**BELGIQUE**  
O2D ENVIRONNEMENT®  
Rue Joseph Stevens 7  
1000 BRUXELLES  
Tél. : +32(0)487 84 73 62  
Email : [contact@o2d.be](mailto:contact@o2d.be)

Retrouvez-nous  
sur les réseaux

et sur [bimobject.com/fr/o2d](http://bimobject.com/fr/o2d)

[www.o2d-environnement.com](http://www.o2d-environnement.com)