



SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE ET RÉSILIENCE CLIMATIQUE LES ATOUTS DES SOLUTIONS CIMENT / BÉTON

Cédric LE GOUIL - CIMbéton

Joseph ABDO - JA-CONSULTING



LES SOLUTIONS BÉTON POUR RÉDUIRE LES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

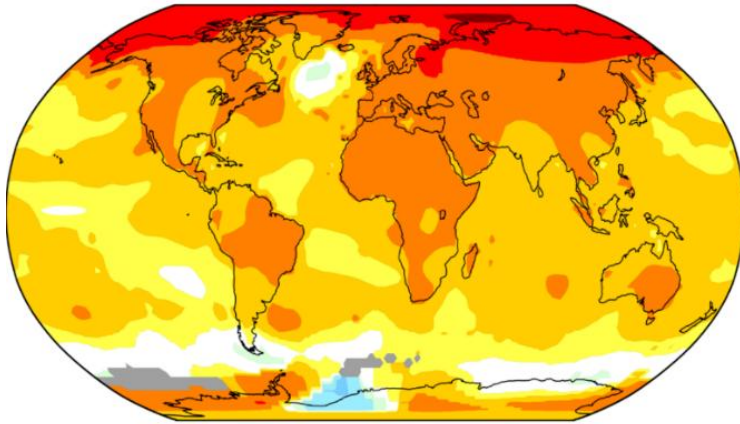
Le béton apporte aujourd'hui une panoplie de solutions environnementales :

- ❑ Nouvelles matières plus respectueuses de l'environnement (béton bas carbone, béton clair, béton poreux, béton drainant, béton dépolluant...),
- ❑ Nouvelles techniques permettant de lutter contre :
 - Le **réchauffement climatique** (revêtement clair à fort pouvoir réfléchissant, le béton comme puits pour piéger le carbone),
 - La **pollution de l'air** (matériaux à fonction dépolluante).

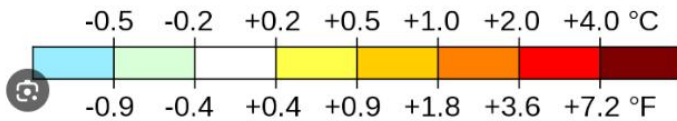


DES SOLUTIONS POUR LUTTER CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Changement de température lors des 50 dernières années



moyenne 2011-2020 vs référence 1951-1980



- Les scénarios scientifiques du GIEC indiquent une trajectoire de réchauffement à horizon 2100 de +3 °C au niveau mondial, soit environ une moyenne de +4 °C pour la France métropolitaine



+1,5 °C
en 2030



+2 °C
en 2050



+3 °C
en 2100



+2 °C
en 2030



+2,7 °C
en 2050



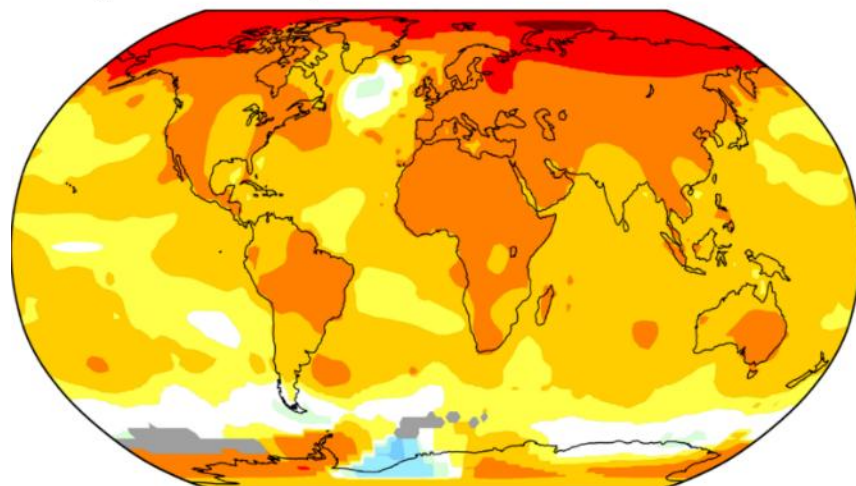
+4 °C
en 2100

- Cette trajectoire est jugée réaliste, même si elle reste incertaine et non souhaitable.

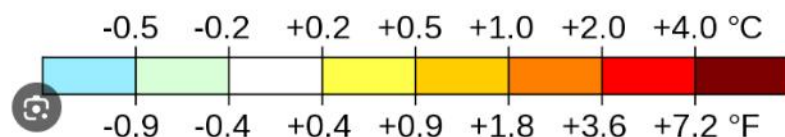
<https://www.cerema.fr/fr/actualites/adapter-mobilites-au-changement-climatique-retour-rendez>

DES SOLUTIONS POUR LUTTER CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

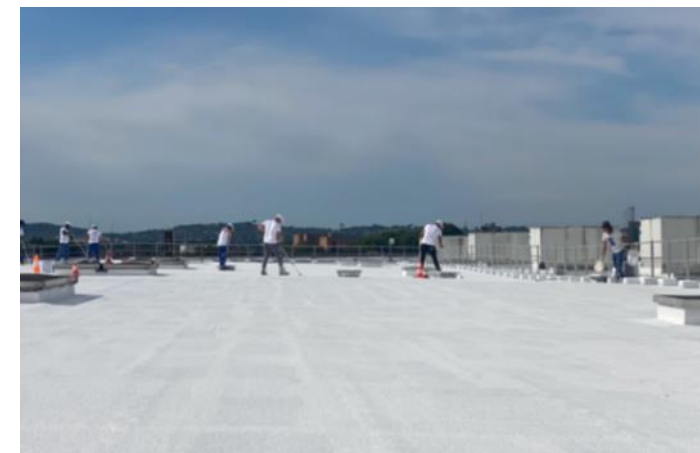
Changement de température lors des 50 dernières années



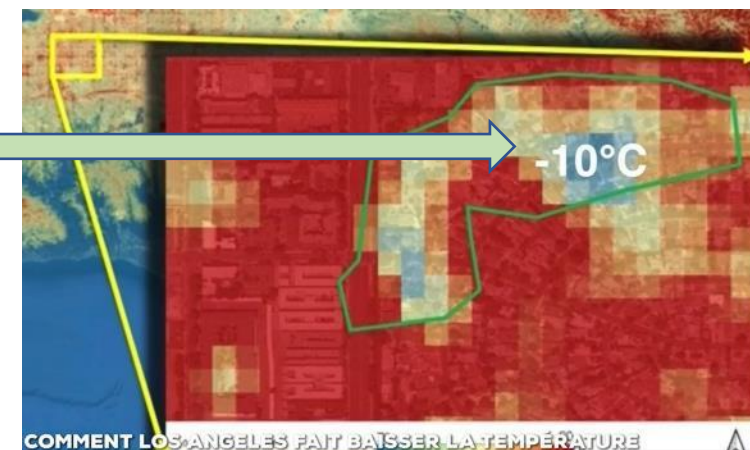
moyenne 2011-2020 vs référence 1951-1980



- ☐ Repeindre les toitures en blanc ?
- ☐ Repeindre les routes en gris ?



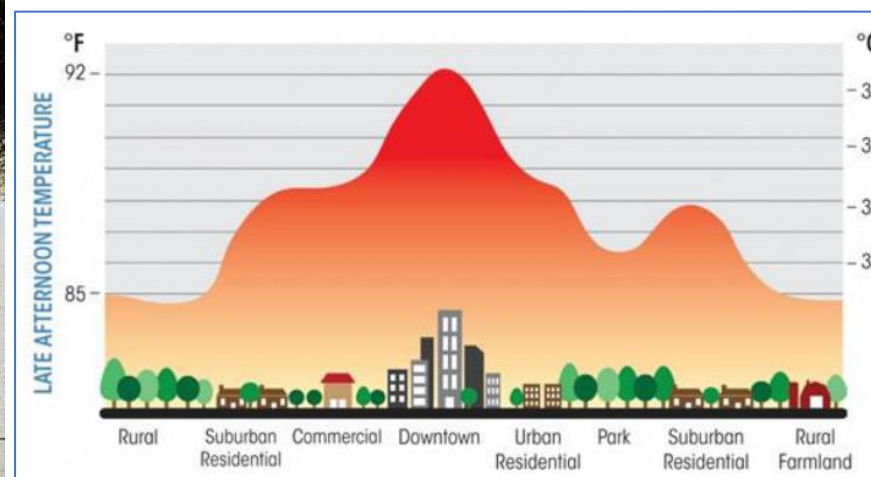
COMMENT LOS ANGELES FAIT BAISSER LA TEMPÉRATURE



COMMENT LOS ANGELES FAIT BAISSER LA TEMPÉRATURE

LA CLARTÉ DU BÉTON / CIMENT POUR LUTTER CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

- ❑ La clarté du revêtement, donc son haut pouvoir réfléchissant, peut contribuer à :
 - La réduction du réchauffement climatique grâce au **coefficient Albédo** du béton et des matériaux cimentaires en général (0,40 – 0,80).
 - La réduction de la consommation de l'éclairage public (gain 40 – 70 %).



BÉTON : UN ALBÉDO ÉLEVÉ

CEREMA - ADEME – recueil rafraichissement urbain - 2021 :



Eblouissement ?



(Bigorgne,
Hendel, APUR
2017)

	revêtement «cool»	béton clair	stabilisé	enrobé bitumineux
albédo	0,7 à 0,85	0,4 à 0,8	0,4	0,05 à 0,15
inertie thermique	forte	forte	moyenne	forte
émissivité	0,9	0,92	0,76	0,88
T° surface jour	frais	moyen	moyen	chaud à très chaud
T° surface nuit	frais	moyen	frais	chaud

<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4649-rafraichir-les-villes.html>

STABILISÉ : UN ALBEDO « RAFRAICHISSANT »

CEREMA – Gironde le département – Eau Grand Sud-Ouest Agence de l'eau Adour Garonne
Conférence Technique Territoriale – novembre 2022

« Désimperméabilisation des sols : un atout pour adapter les territoires au climat de demain »

Réaménagement boulevard
Aubanel à Miramas (13), 2019

Baisse de température surface
Enrobé → Stabilisé

- -6,4 °C à l'ombre
- -10,1°C au soleil
- -11,0° à 23h

Ressenti promeneurs ++ frais



STABILISÉ : UN ALBEDO « RAFRAICHISSANT »

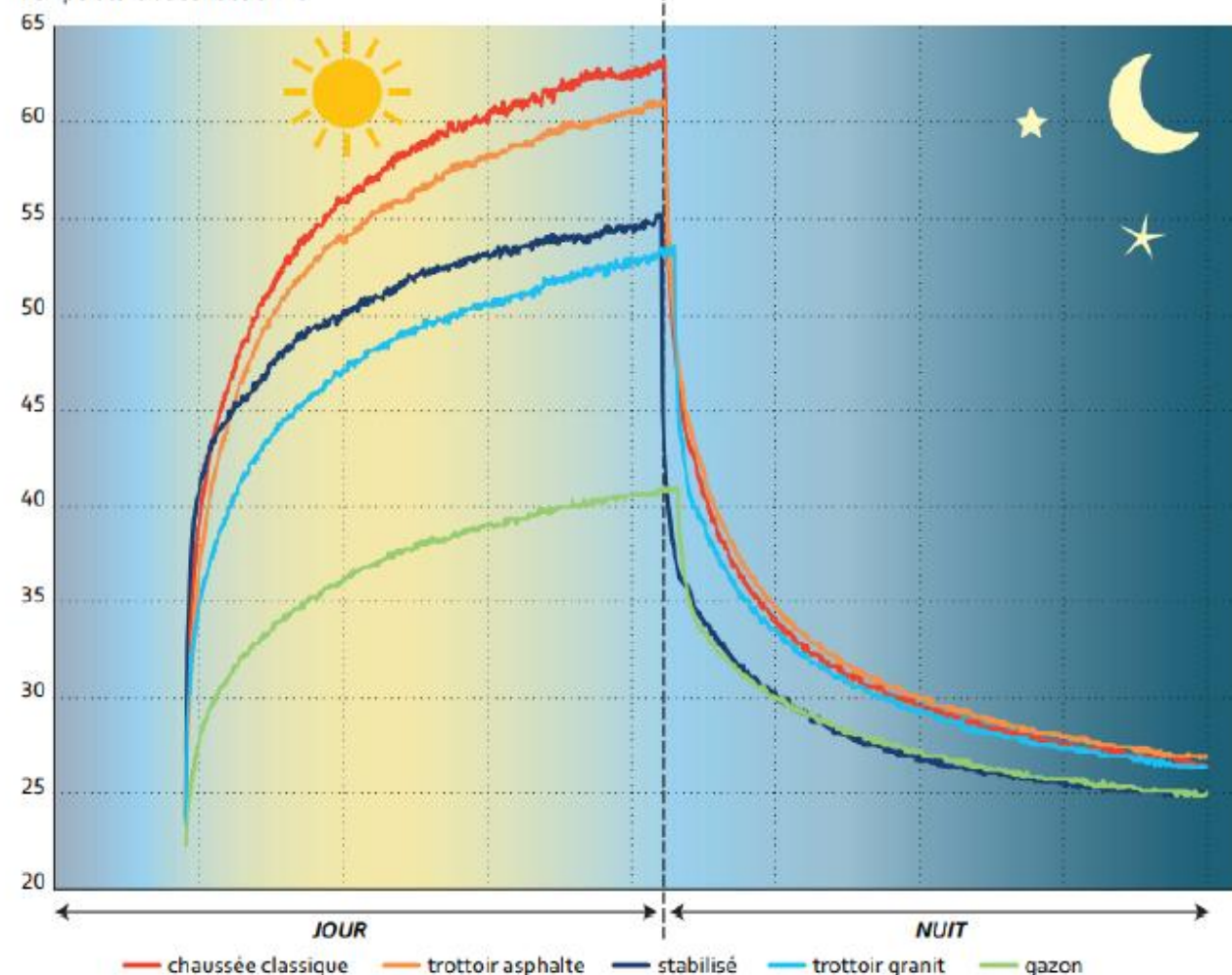
Atelier parisien d'urbanisme (apur)

Évolution de la température de surface de cinq revêtements parisiens sur 24h (Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris | Apur s. d.)

Les résultats montrent que les chaussées en bitume et trottoirs en asphalte atteignent des températures supérieures à 60 °C, tandis que le granit et le stabilisé restent entre 50–55 °C. Le gazon, agissant comme un régulateur actif par évapotranspiration, plafonne à 40 °C. L'arrosage permet une réduction thermique allant jusqu'à 9 °C en journée.

Évolution de la température de surface de cinq revêtements parisiens sur 24 h

Température de surface en °C





STABILISÉ : UN ALBEDO « RAFRAICHISSANT »

- Albédo (réflectivité solaire)
 - Conductivité thermique
 - ...
-
- Émissivité thermique (si élevé relargage la nuit)

toiture conventionnelle). On remarque que la température de surface de la toiture réfléchissante reste proche de celle de l'air extérieur pendant le jour malgré le flux solaire. De plus, l'émissivité thermique élevée des deux types de toiture (0,9) permet d'évacuer efficacement la chaleur par transfert radiatif avec la voûte céleste pendant la nuit. Par conséquent, les températures de la surface pour les deux toitures pendant la nuit sont



Revêtements à albédo élevé : « RAFRAICHISSANTS »



Synthèse

Matériaux et coûts

Mise en œuvre

Financements

Oups !

Pourquoi privilégier les matériaux à albédo élevé ?

Le revêtement des cours d'école est généralement constitué d'enrobé imperméable (béton de ciment, asphalte) de couleur sombre qui emmagasine la chaleur la journée pour la restituer la nuit, favorisant le **phénomène d'ICU**.

Un revêtement drainant de couleur claire réfléchit le reflet des rayons du soleil et limite l'absorption de chaleur par la surface. Cette caractéristique améliore le **confort thermique** de la cour.

Un revêtement drainant permet d'instaurer un cycle de l'eau vertueux qui favorise la croissance des végétaux par l'infiltration des eaux dans le sol et permet un rafraîchissement de la **température de l'air** grâce à l'évapotranspiration des plantes et des arbres.

Rafraîchissement attendu

- La mise en place de revêtement à albédo élevé - le plus souvent de couleur claire - sur les sols, les murs et les toitures est une solution efficace pour lutter contre l'ICU, car il permet de réfléchir l'énergie plutôt que la stocker.
- À Athènes, le passage pour les sols d'un revêtement foncé asphalté (albédo 0,04) à un revêtement blanc (albédo 0,55) a permis un rafraîchissement de -4°C en journée (Synnefa et al., 2011). Jouer sur les revêtements au sol est particulièrement recommandé dans les quartiers moins denses et plus ouverts au ciel.
- À Melbourne et à Sydney, l'augmentation de 0,1 de l'albédo des toits a permis une réduction -0,25°C à - 0,5°C en moyenne de la température de l'air en ville. (Imran et al., 2018; Santamouris et al., 2018). Jouer sur les toitures est particulièrement recommandé dans les quartiers très denses.
- Une étude publiée en 2014 dans la revue Urban Climate, démontre que l'utilisation intensive de matériaux à albédo élevé peut compromettre le confort thermique des piétons dans des environnements urbains. En effet, bien que l'utilisation de matériaux à albédo élevé réduise la température de l'air, la réduction n'est parfois pas suffisante pour compenser l'augmentation des charges radiantes.

Solution grise

Reflète le rayonnement solaire et rafraîchit l'air ambiant

Les villes des Cyclades adoptent un revêtement clair pour renvoyer la chaleur solaire sans l'emmagasiner, grâce à leur albédo élevé. Ces surfaces, souvent de couleur claire mais pas toujours blanches, réfléchissent l'énergie solaire avec un albédo supérieur à 0,7, limitant ainsi l'absorption de chaleur. En revanche, les matériaux urbains habituels comme l'asphalte ont un albédo faible, absorbant fortement la chaleur. Certains, comme l'enrobé, retiennent la chaleur le jour pour la libérer la nuit, contribuant à l'effet d'îlot de chaleur urbain. Cependant, privilégier systématiquement les revêtements à albédo élevé peut causer des inconforts thermiques pour les piétons en renvoyant le rayonnement solaire. Une évaluation approfondie des impacts avant leur adoption est donc vivement conseillée !

Baisse médiane de la température de l'air

-3°C

Délai des travaux



de 1 à 3 mois

Coût



de 20 à 35 € HT / m²



Réduire les consommations énergétiques



Améliorer le cadre de vie



Améliorer le bien-être et la santé

<https://plusfraichemaville.fr/fiche-solution/revetement-albedo-eleve>

Revêtements drainants/perméables : « RAFRAICHISSANTS »



Pourquoi opter pour un revêtement drainant dans une cour d'école ?

Les matériaux en asphalte, imperméables et de couleur foncée utilisés dans les villes contribuent à augmenter significativement les **températures de surfaces**, ce qui peut être source d'inconfort.

Trottoirs, chaussées, revêtements des immeubles, toitures en zinc participent fortement au **phénomène d'ICU**. Deux effets se combinent : absorption et stockage de l'énergie. Le matériau de surface (généralement constitué d'enrobé imperméable de couleur sombre) capte l'énergie solaire qui est ensuite stockée dans le matériau sous-jacent (béton, grave).

Ces revêtements imperméables empêchent l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. L'eau de pluie qui ruisselle, est collectée puis évacuée dans les réseaux d'assainissement. L'eau est ainsi considérée comme un déchet et non comme une ressource pour les sols, les végétaux et la biodiversité.

Rafrâichissement attendu

- Les revêtements drainants ou revêtements perméables ont la capacité d'infiltrer l'eau en surface. Ils peuvent aussi la stocker dans leur structure avant de la redistribuer progressivement vers la nappe ou vers des exutoires dédiés.
- L'eau qui s'infiltré dans le sol pourra être remobilisée ultérieurement (par évaporation) et/ou utilisée par les végétaux à proximité (par évapotranspiration).
- Evaporation du sol et évapotranspiration des végétaux favorisent une réduction localisée de la température de l'air.
- 1,6 (1) / 2,6°C (2) : Différence de température de l'air au moment le plus chaud de la journée entre des pavés poreux à joints enherbés non arrosés (1) ou de l'asphalte (2), à Taiwan (Lin et al., 2007).
- Les pavés poreux peuvent être arrosés ou alimentés en haut via un système de goutte à goutte installé dans le lit de pose pour diminuer la température ressentie grâce au phénomène d'évaporation.
- 5°C : Différence de température ressentie au-dessus de pavés perméables retenant l'eau, avec du sable et une arrivée d'eau, à Toulouse – par comparaison avec des pavés classiques (Hydroplus, Juillet-Sept 2020)



Revêtement drainant / perméable - école

Synthèse

Matériaux et coûts

Mise en œuvre

Financements

Oups !

■ Solution grise

Conserve les usages habituels de l'école tout en infiltrant les eaux de pluie

Les cours d'école ont un formidable potentiel pour passer d'îlot de chaleur à îlot de fraîcheur, notamment en jouant sur le revêtement du sol. Les revêtements drainants sont constitués de matériaux spécialement conçus pour permettre à l'eau de s'écouler efficacement sur une surface, évitant les flaques d'eau et les risques de chute. Sols en béton, sols naturels... chaque usage de la cour correspond un type de revêtement drainant qui permettra de gérer les eaux pluviales tout en rendant la cour plus agréable à vivre pour les élèves. Ces types de surfaces peuvent parfois accueillir des plantes (fleurs, arbustes) qui bénéficieront elles aussi de la bonne infiltration de l'eau dans le sol.

Baisse médiane de la température de l'air **-2,1°C**

Délai des travaux
de 1 à 2 mois

Coût
de 5 à 150 € HT / m²



Gérer les eaux pluviales



Prévenir les risques d'inondation

<https://plusfraichemaville.fr/fiche-solution/revetement-drainant-ecole>

Revêtements drainants/perméables : « RAFRAICHISSANTS »



Les pavés poreux, à l'échelle locale

- Les pavés sans arrosage ou sans alimentation en eau présentent des effets de rafraîchissement très limités, tant sur les températures de surface que sur les températures ressenties.
- Par contre, les revêtements perméables arrosés ou alimentés en eau présentent des effets de rafraîchissement importants : jusqu'à 5°C de différence de température ressentie, par comparaison avec des revêtements classiques.
- Des matériaux avec une porosité importante en profondeur et porosité faible en surface montrent des temps de séchage plus importants et des températures de surfaces plus faibles. Des écarts de température de surface allant jusqu'à 19°-25C sont observés entre ce type de matériaux et des matériaux secs et imperméables.

Pavés poreux, Saint-Etienne (42)



- 19 à - 25°C

Différence de température de surface en journée entre des pavés perméables retenant l'eau, avec du sable et une arrivée d'eau, et des pavés standards imperméables à Toulouse et au Japon (Ishizuka et al., 2006).

- 5°C

Différence de température ressentie au-dessus de pavés perméables retenant l'eau, avec du sable et une arrivée d'eau, à Toulouse – par comparaison avec des pavés classiques (Hydroplus, Juillet-Sept 2020)

1,6 (1) / 2,6°C (2)

Différence de température de l'air au moment le plus chaud de la journée entre des pavés poreux à joints enherbés non arrosés (1) ou de l'asphalte (2), à Taiwan (Lin et al., 2007).

Revêtements drainants/perméables : « RAFRAICHISSANTS »

Arbres

Revêtements drainants

Revêtements à albedo élevé

« Lisière d'une tierce forêt » végétalisation d'une aire de stationnements à Aubervilliers

Le projet a intégré plusieurs solutions de rafraîchissement :

- la **plantation de 72 arbres** ;
- l'**aménagement de revêtements clairs et poreux**.

Un parking privatif recouvert d'enrobé bitumineux a été requalifié avec un revêtement en béton poreux et des plantations denses d'arbres. Une évaluation de l'impact rafraîchissant a été menée sur le stress thermique d'un piéton, grâce à des mesures fixes et mobiles. Des effets bénéfiques pour le stress thermique sont observés suite notamment à la création d'ombrage par les nouveaux arbres se traduisant par une réduction de la température de l'air et de la température moyenne de rayonnement.

- 0,3°C à -1°C de température d'air
- 6° à -2,5°C UTCI (indice de confort)
C'est l'effet de rafraîchissement mesuré des aménagements. (Parison, 2020)

Évaluation microclimatique : LIED : Martin Hendel, Sophie Parison, Maxime Chaumont, Météo-France : Raphaëlle Kounkou-Arnaud, Frédéric Long
Maître d'oeuvre : Fieldwork architecture : Andrej Bernik, Marcos Da Silva
Maîtrise d'ouvrage : Alteralia : Patricia Robert
Projet réalisé à Aubervilliers en 2020



Aubervilliers, Tierce Forêt





LE BÉTON, Puits pour piéger le carbone

Le béton est un puits pour piéger le CO₂. Ce phénomène se déroule :

- ❑ **Pendant la vie de l'ouvrage : captage par le béton de 10 à 15 kg de CO₂** par tonne de béton pour produire, en se combinant avec la chaux libre existante dans le béton, du carbonate de calcium CaCO₃.
- ❑ **Après la vie dans l'ouvrage : captage de 15 à 35 kg de CO₂** par tonne de matériau dans le cas où le béton est transformé en granulats et recyclé dans des ouvrages où il est maintenu en contact avec l'air (utilisation en remblai, talus, ballast, gabions, plates-formes diverses).
- ❑ **Au total, un béton pourra piéger une quantité de CO₂, allant de 25 à 50 kg de CO₂** par tonne de béton.

C'est le phénomène de carbonatation dont l'effet bénéfique sur le bilan carbone doit être pris en compte.



VOIRIE EN BÉTON DÉPOLLUANT

Béton dépolluant

- ❑ Formulé à partir d'un ciment à effet photocatalytique dont le catalyseur est une variété de dioxyde de titane (TiO_2), utilisé en très faible quantité et intimement lié à la matrice cimentaire,
- ❑ Le TiO_2 engendre, sous l'action des rayons UV, des réactions d'oxydo-réduction entraînant la transformation des oxydes d'azote Nox , en produits acides qui sont, en partie, neutralisés par le carbonate de calcium alcalin contenu dans le béton et éliminés par l'eau de pluie.



VOIRIE EN BÉTON DÉPOLLUANT

Dans le cas d'un pic de pollution, le béton dépolluant peut réduire les Nox et les COV d'environ 45 %

PRINCIPE DE LA RÉACTION PHOTOCATALYTIQUE

1. Dégradation des polluants de l'air

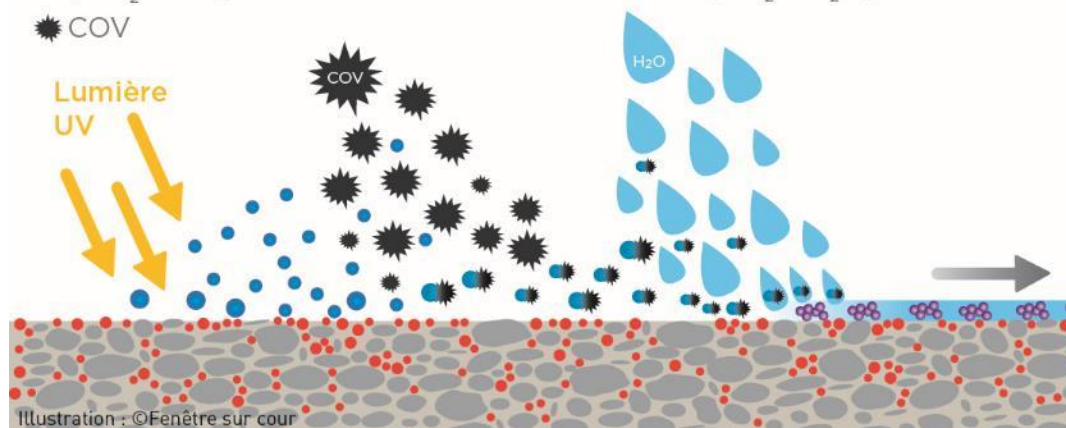
- Titane (TiO_2)
- Oxygène actif (O)
[$\text{TiO}_2 + \text{UV}$]
- COV

2. Transformation des polluants en acides

- CO_2
- [COV + O]

3. Élimination par les eaux de pluie

- Eau de pluie (H_2O)
- Acide carbonique (H_2CO_3)
[$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$]



PRINCIPE DE LA RÉACTION PHOTOCATALYTIQUE

1. Dégradation des polluants de l'air

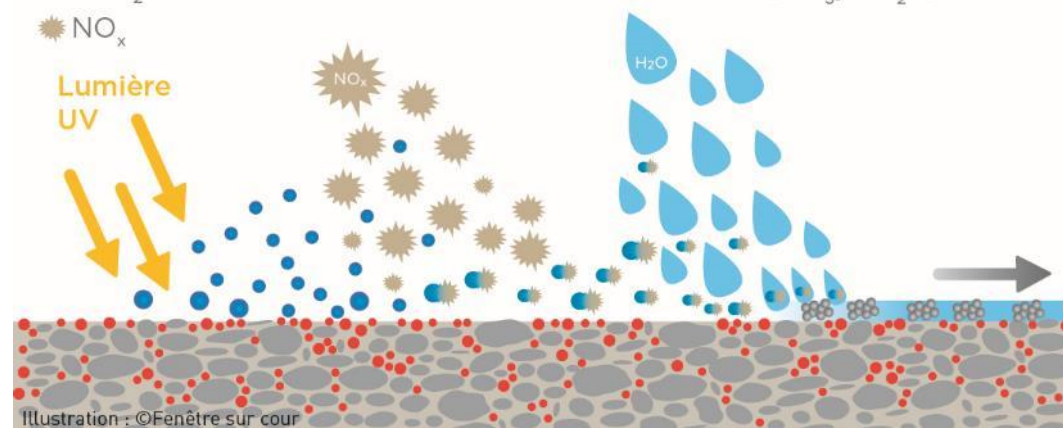
- Titane (TiO_2)
- Oxygène actif (O)
[$\text{TiO}_2 + \text{UV}$]
- NO_x

2. Transformation des polluants en acides

- Acides (NO_3^-)
[$\text{NO}_x + \text{O}$]

3. Élimination par les eaux de pluie

- Eau de pluie (H_2O)
- Nitrates
[$\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$]





BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

- T50. Voiries et aménagements urbains en béton.
Tome 1 - Conception et dimensionnement. CIMbéton, 2019.
- Les bétons décoratifs : voiries et aménagements urbains.
Tome 3 – Les règles de l'art. SPECBEA.
- Comment intégrer quantitativement la carbonatation atmosphérique dans le bilan-carbone des matériaux cimentaires. Mickael THIERY, Nicolas ROUSSEL, Guillaume HABERT, Patrick BELIN - Université Paris-est, LCPC, division BCC - Patrick DANGLA UR Navier, Equipe « milieux poreux » - AFGC, GC 2009.



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

