



PRIMEQUAL

Programme de recherche interorganisme
pour une meilleure qualité de l'air



CARTHAGE

CONTRIBUTION DE L'AIR DANS LES RISQUES ET TRANSFERTS ASSOCIÉS AUX HAP EN AGRICULTURES URBAINES : GESTION ET EVALUATION

Intersol - 26 mars 2025



Plan

I. Contexte et objectifs

II. Méthodologie

III. Résultats (Air, sol, eau, végétaux, calculs de risques, préconisations)

IV. Conclusions et perspectives



CONTRIBUTION DE L'AIR DANS LES RISQUES ET TRANSFERTS ASSOCIÉS AUX HAP EN AGRICULTURES URBAINES : GESTION ET EVALUATION

- Plusieurs formes d'agricultures urbaines : jardins associatifs (familiaux ou partagés) & micro-fermes urbaines (production et mise sur le marché de denrées alimentaires)
- Demande croissante de foncier agricole en zone urbaine
- Nombreux bénéfices pour populations urbaines/usagers : auto-production/ prix abordable ; circuits courts ; multi-fonctionnalité (activités de loisirs, activités sociales et collaboratives)
- Contexte urbain marqué par la présence de HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) liée au trafic, chauffage, activités industrielles
- Possibilité d'une contamination par les HAP des végétaux potagers produits en zone urbaine par l'air et les sols

→ Essais expérimentaux pour tester des modalités de culture et de préparation pour réduire les teneurs en HAP dans les végétaux potagers cultivés en milieu urbain



II. Méthodologie

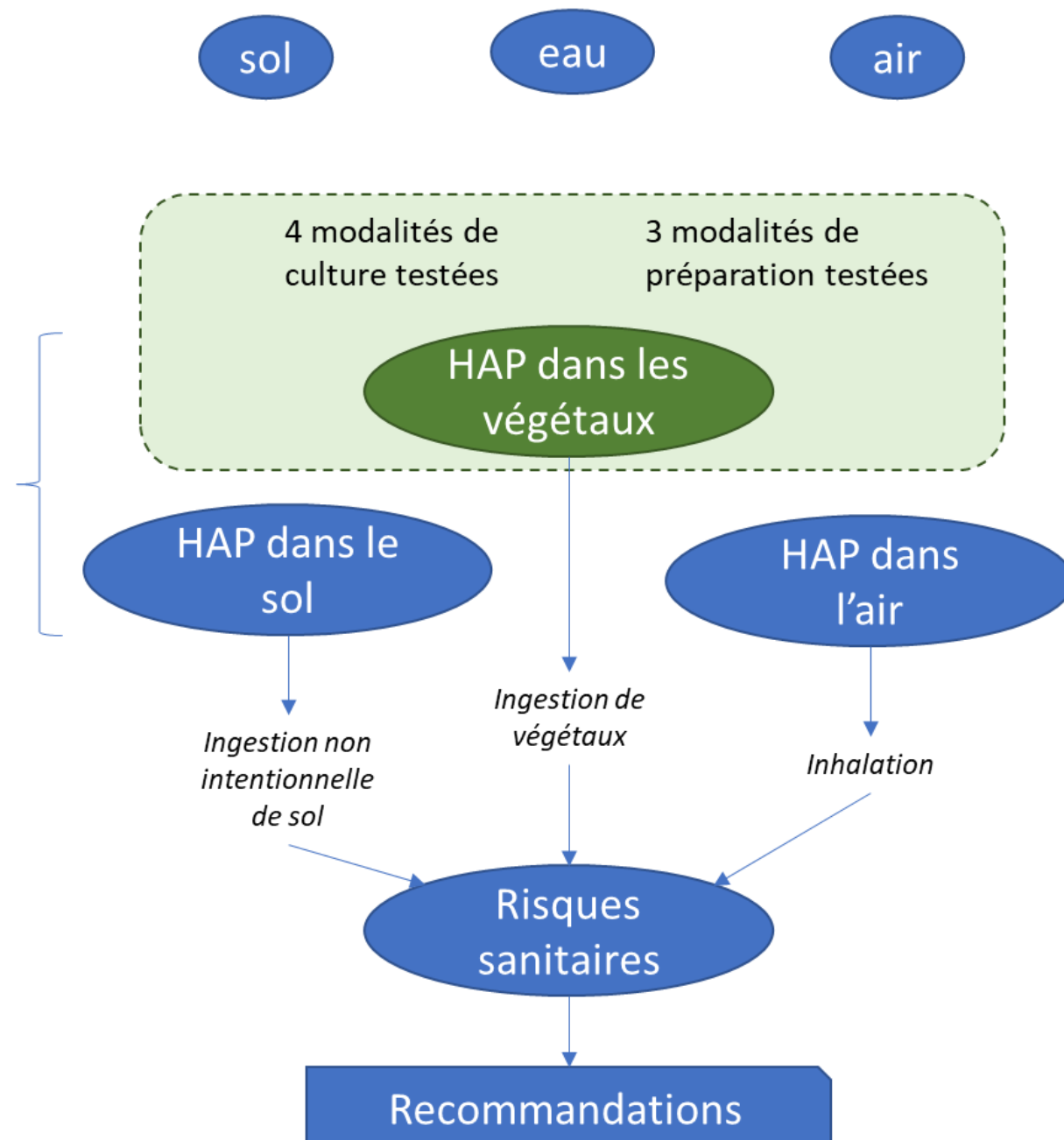
Sources de contamination
par les HAP en agriculture
urbaine

Projet CARTHAGE

Niveau de contamination
en agriculture urbaine

Voies d'exposition
en agriculture urbaine

Bilan



Trois micro-fermes
urbaines sélectionnées
à Nanterre, Saint-Denis
et Montreuil



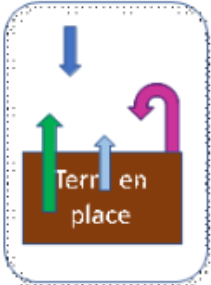
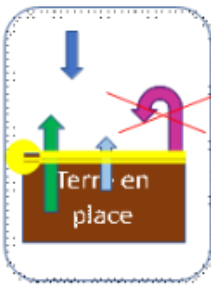

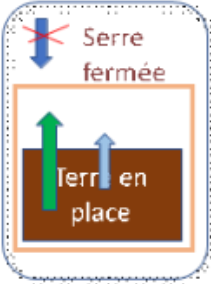

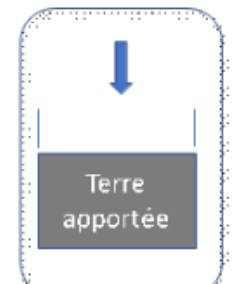
II. Méthodologie

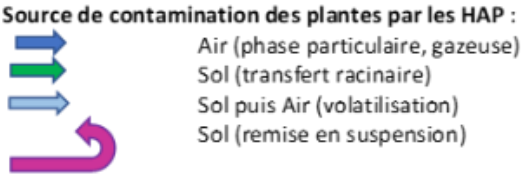
Phase expérimentale : acquisition de données sur les niveaux de HAP dans les végétaux potagers en conditions réelles de cultures

- Cultures de **végétaux potagers** (légume-fruit, -feuille, -racine, aromate) au droit de **trois micro-fermes urbaines** franciliennes pendant deux ans
- Modalités de **culture** pour mettre en évidence la **contribution des apports atmosphériques**, de l'effet « splash » et des transferts racinaires
- Modalité de **préparation** : lavage, épluchage, cuisson

Représentation schématique des modalités de cultures expérimentales mises en place dans les 3 micro-fermes pilotes du projet CARTHAGE



| Année N – Persil, Carotte, Courgette, Salade | | Année N+1 – une espèce végétale |
|--|---|--|
| TROIS Microfermes | | UNE Microferme |
|  <p>Pleine terre (PT)</p> |  <p>Pleine terre avec revêtement (PTR)</p> |  |
|  <p>Pleine terre sous serre (PTS)</p> |  <p>Hors-sol avec terre d'apport (HS)</p> |  |



Phase expérimentale : Quantification des HAP dans les compartiments « air », « sol » et « eau »



I / Stations météo locales : pour évaluer les différences de micro-climats (vitesse et direction du vent, température et hygrométrie ambiante, précipitations)

Stations météo sur des mâts de 10 m respectant les standards météo France à Nanterre et Montreuil



Station météo sur un mât de 1,5 m à Saint-Denis



II / Suivi des retombées en HAP sur les trois micro-fermes (mesures des dépôts et des concentrations dans l'air)



Jauge pour mesures de dépôts atmosphériques (à gauche) et préleveur automatique DA80 (à droite)

III / Prélèvements et analyses de sol des futures parcelles expérimentales et de l'eau d'irrigation des cultures



Analyses réalisées:

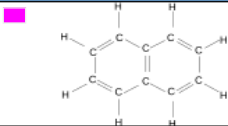
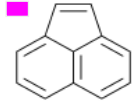
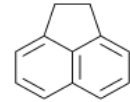
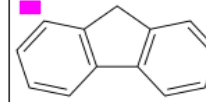
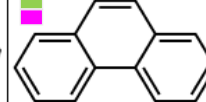
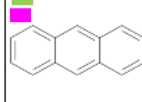
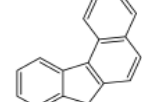
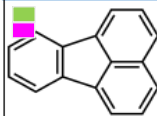
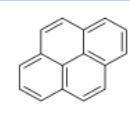

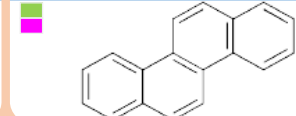
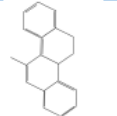
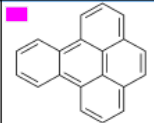
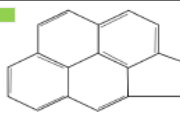
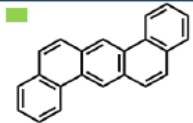
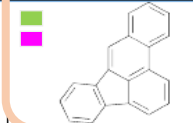

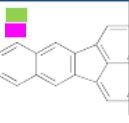
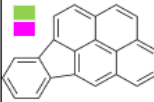
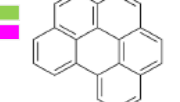

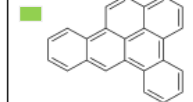
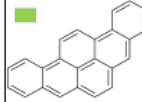
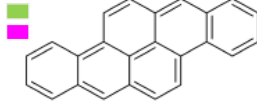
- 20 HAP: sol et végétaux
- 18 HAP: Dépôts, gaz, particules

HAP à surveiller - directive air ambiant n°2004/107/CE
→ 7 HAP: B[a]A, B[b]F, B[k]F, B[j]F, B[a]P, DB[a,h]A, Ind

HAP réglementés dans l'air: R221-1 code environnement- modifié par décret n°2010-1250/ valeur de 1 ng/m³
→ BaP (PM10)

HAP réglementés dans denrées alimentaires : CE n°1881/2006 modifié (n°835/2011)
→ 4 HAP: BaP, BaA, BbF, CHR

Liste des HAP analysés selon leur nombre de cycles aromatiques

| 2C | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|
| Naphtalène | | | | | |
|  | | | | | |
| 3C | | | | | |
| Acenaphthylene | Acenaphthene | Fluorene | Phénanthrène | Anthracène | Benzo[c]fluorène |
|  |  |  |  |  |  |
| 4C | | | | | |
| Fluoranthène | Pyrène | Benz[a]anthracène | Chrysène | 5-Méthylchrysène | |
|  |  |  |  |  | |
| 5C | | | | | |
| Benzo(e)pyrene | Cyclopenta[c,d]pyrène | Dibenz[a,h]anthracène | Benzo[b]fluoranthène | Benzo[j]fluoranthène | Benzo[k]fluoranthène |
|  |  |  |  |  |  |
| 6C | | | | | |
| Indéno[1,2,3,c-d]pyrène | Benzo[g,h,i]pérylène | Dibenzo[a,i]pyrène | Dibenzo[a,e]pyrène | Dibenzo[a,j]pyrène | Dibenzo[a,h]pyrène |
|  |  |  |  |  |  |

2C

B(a)P: HAP le plus toxique pour l'Homme

6C



| | Analyse chimique HAP | Autre analyse |
|---|--|--|
| Sols | 3 échantillons composites par site (1 par modalité) | Teneur en matière sèche |
| Substrat hors sol | 3 échantillons composite (1 par site) | |
| Copeaux de bois (site Nanterre) | 3 échantillons | |
| Air (dépôts atmosphériques) | 63 échantillons | |
| Air (concentrations dans l'air ambiant) | 2 campagnes (5 semaines en été 2019 et 3 semaines en hiver 2020) i.e. 114 échantillons | |
| Eau d'irrigation | 3 analyses composite (1 L par site) | |
| Végétaux bruts | 55 | Teneur en matière sèche (252 analyses) |
| Végétaux lavés | 128 | |
| Végétaux épluchés | 44 (courgette/carotte) | Teneur en lipides (68 analyses) |
| Végétaux cuits | 25 (courgette/carotte) | |

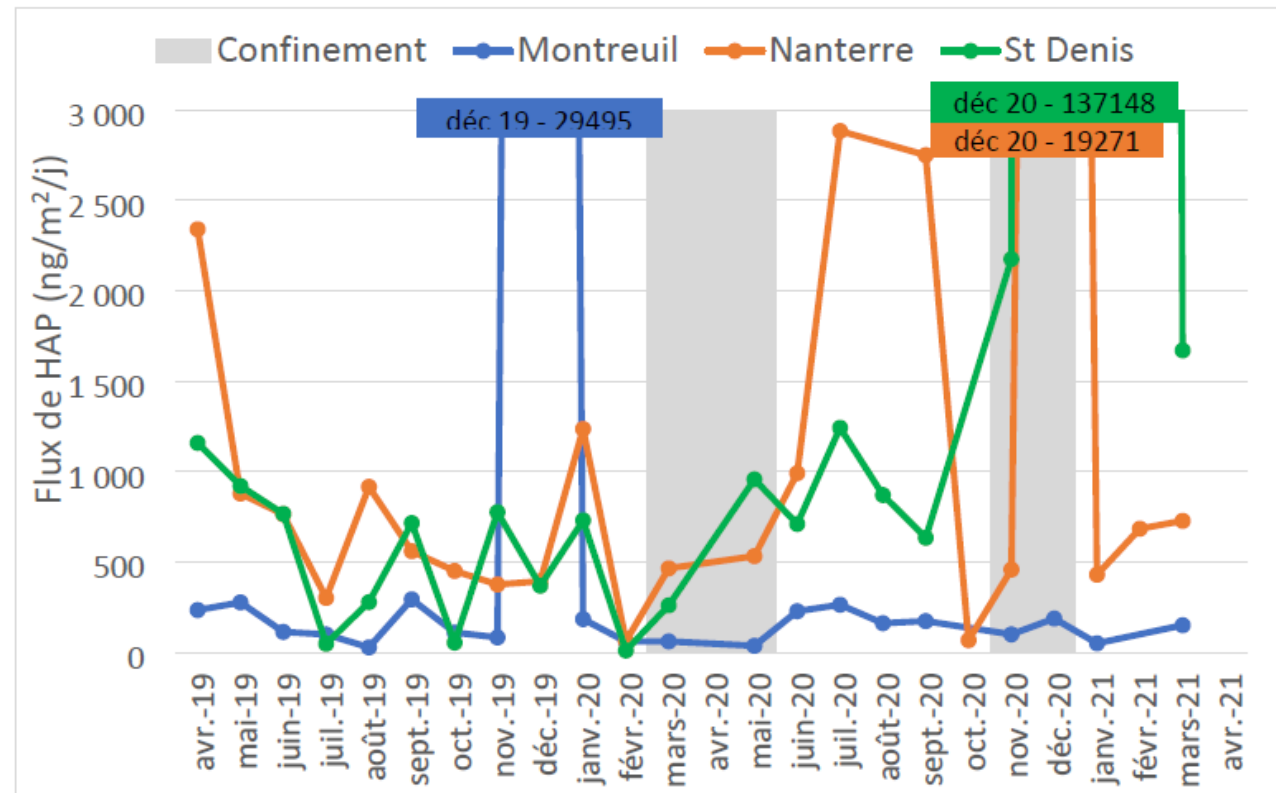
NB : pour les végétaux, le décompte des analyses ne considère pas les ré-analyses, ce qui porte à 280 le nombre total d'analyses pour les végétaux

Nombre d'échantillons des différentes matrices étudiées



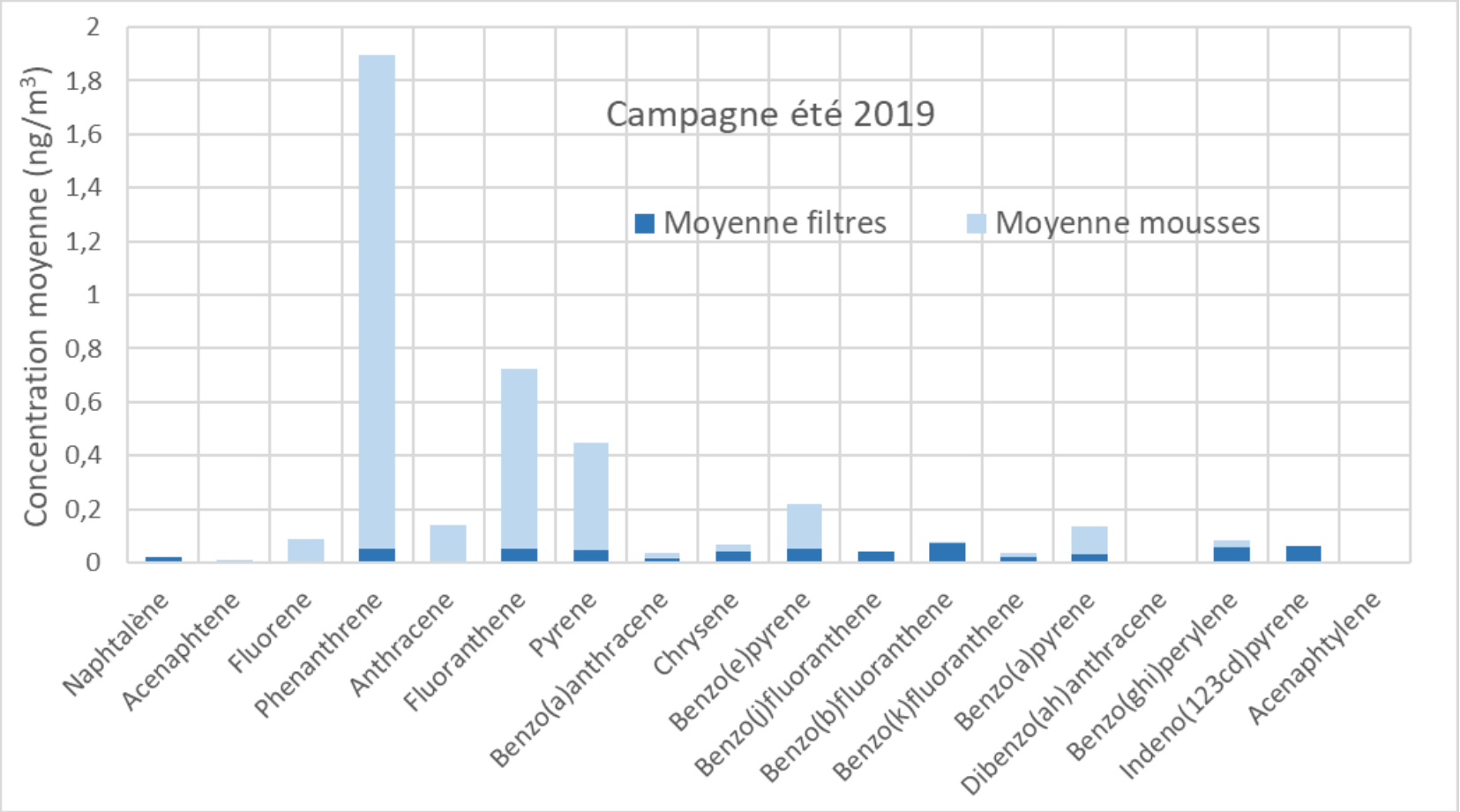
III. Résultats - Air

- Dépôts variables en fonction des mois et des micro-fermes, **tendance générale** tout de même **similaire** entre les sites à quelques exceptions près
- **Montreuil** présente un flux total de l'ordre de celui du **fond rural** (145 ng/m²/j), **Saint-Denis et Nanterre** présentent des flux totaux **5 à 6 fois plus élevés** (756 et 870 ng/m²/j)
- Les 5 HAP présentant les flux les plus importants tous sites confondus sont le **phénanthrène**, le **fluoranthène**, le **pyrène**, le **chrysène** et le **benzo(b)fluoranthène**.



III. Résultats - Air

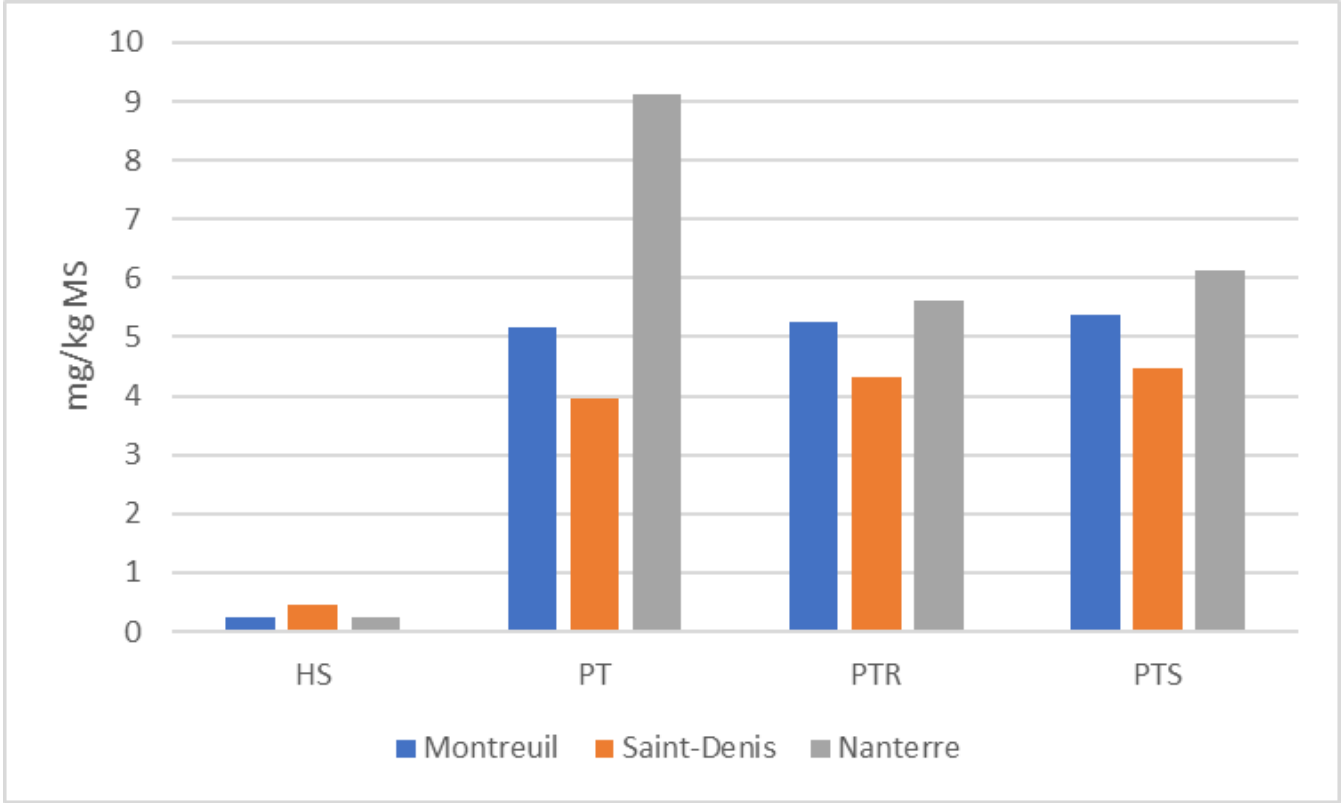
- En été, la forme majoritaire des 18 HAP est **gazeuse** (mousses) et le composé majoritaire est le **phénanthrène**
- Les **HAP lourds** sont présents sous forme **particulaire** (filtres)
- En été, la concentration moyenne en HAP particuliers est de 0,6 ng/m3 et celle en HAP gazeux de 3,1 ng/m3



Concentrations moyennes gazeuses (mousses) et particulières (filtres) de 18 HAP mesurées sur le site de Montreuil à l'été 2019

III. Résultats – Sol et eau

- Les trois micro-fermes affichent des **concentrations dans les sols comprises entre 4 et 9,1 mg/kg** (somme 24 HAP), dépassant pour certains HAP les teneurs moyennes ou médianes mesurées au sein des réseaux de référence pour les sols, RMQS Ile de France ou BDSolU
- **Nanterre affiche les concentrations maximales** en HAP dans les sols tandis que la modalité **Hors-Sol**, composée d'un substrat peu contaminé, présente des concentrations en HAP dans les sols **20 à 40 fois plus faibles**
- Les principaux HAP présents dans le sol sont des HAP lourds : **le fluoranthène, le benzo(a)pyrène et le benzo(b)fluoranthène.**



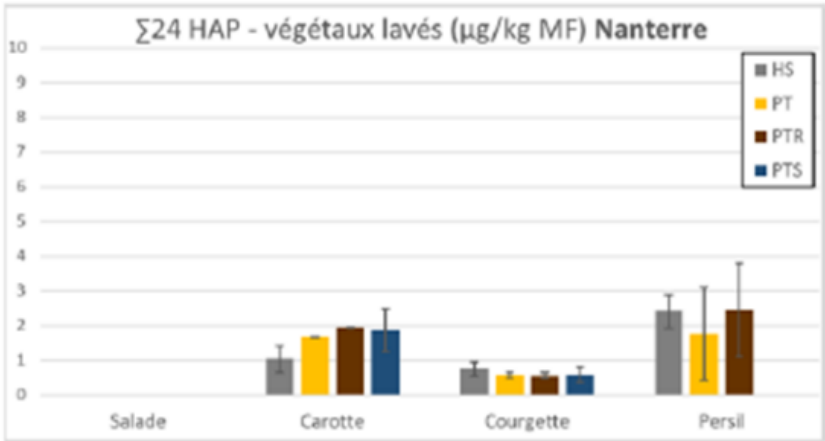
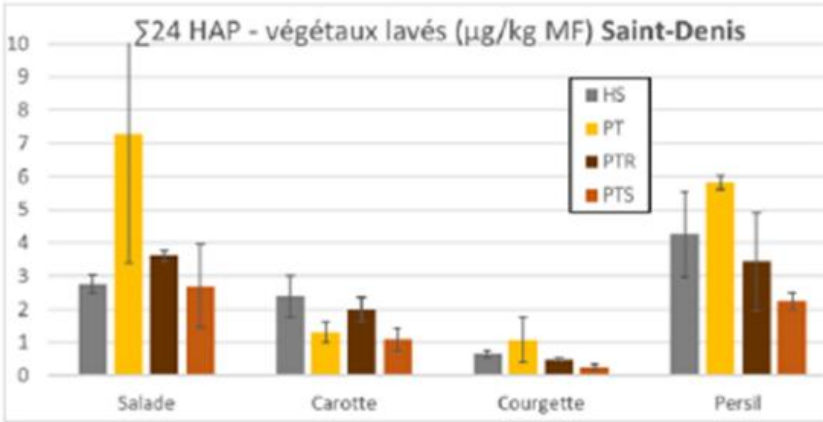
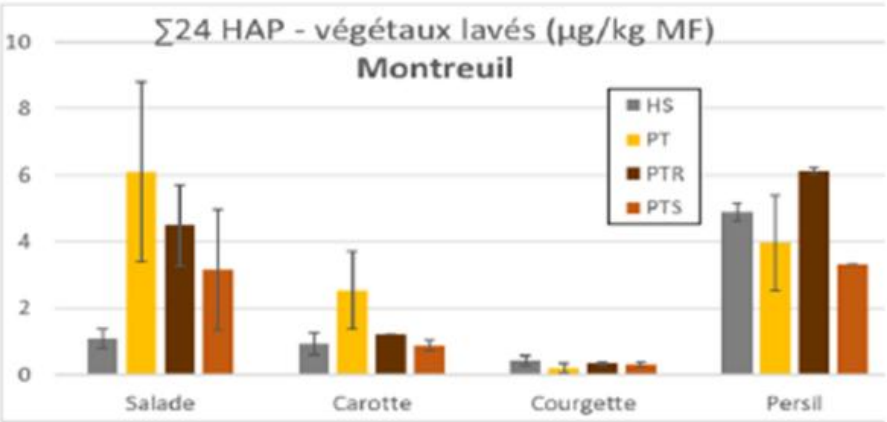
- **L'eau** servant d'arrosage utilisée dans les 3 micro-fermes ne révèle pour sa part **aucune trace d'HAP.**

HS : Hors-sol
PT : Pleine terre
PTR : Pleine terre recouvert
PTS : Pleine terre sous serre



Concentrations des 24 HAP dans les sols cultivés selon les modalités et les micro-fermes

III. Résultats – Végétaux



Concentrations dans les végétaux lavés (somme des 24HAP) selon les modalités de culture sur les micro-fermes (les valeurs inférieures à la LQ ne sont pas prises en compte)

- Les teneurs les **plus élevées** sont observées sur la **salade** puis le **persil**. Les **courgettes** affichent les concentrations en HAP les **plus basses**, et les carottes des concentrations intermédiaires

- Les teneurs en HAP rencontrées dans les végétaux cultivés à Montreuil sont du même ordre de grandeur que celles rencontrées dans les végétaux cultivés à Saint-Denis. Les teneurs rencontrées dans les végétaux cultivés à **Nanterre sont globalement plus faibles**, toutes modalités confondues.
- Les principaux HAP retrouvés, tous sites et végétaux confondus, sont le **phénanthrène**, le **fluoranthène** et le **pyrène**



* Pas de salade à Nanterre car consommées accidentellement par des animaux de la ferme

III. Résultats – Végétaux

Bilan global des effets des modalités de culture en fonction des végétaux, toutes micro-fermes confondues

| Par rapport à une culture pleine terre, si... | Légume- feuille Salade | Légume-feuille Persil | Légume-racine Carotte | Légume-fruit Courgette |
|---|---------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| ...passage en Hors Sol | +++ | -- | - | -- |
| ...utilisation d'un revêtement au sol | + | -- | - | - |
| ...utilisation d'une serre | ++ | + | + | + |

Effet significatif de la modalité démontré par un test statistique avec prise en compte de la LQ/2
 Effet non significatif de la modalité démontré par un test statistique avec prise en compte de la LQ/2
Tendances observées lorsque les valeurs inférieures à la LQ ne sont pas prises en compte :
+++ : réduction des teneurs en HAP supérieure à -60%
++ : réduction des teneurs en HAP comprise entre -40 et -60%
+ : réduction des teneurs en HAP comprise entre -20% et -40%
- : réduction des teneurs en HAP comprise entre 0 et -20%
-- si augmentation des teneurs en HAP par rapport à la référence modalité Pleine Terre

- Seule la culture **hors-sol** avec apport de terre peu contaminée contribue **significativement** à la réduction des teneurs en HAP **dans les salades** par rapport à la culture en pleine terre
- Il n’y a pas de réduction **significative** pour les autres végétaux testés



III. Résultats – Végétaux

- Le **lavage contribue significativement** à réduire les teneurs en HAP pour les salades. Une tendance similaire est observée pour le persil
- L'**épluchage des carottes contribue** à réduire **significativement** les teneurs en HAP, le constat n'est **pas valable pour les courgettes**
- La réduction des teneurs en HAP via la **cuisson** vapeur est observée uniquement au niveau des carottes et n'est pas significative. Pour les courgettes cuites, la cuisson ne réduit pas les concentrations en HAP et démontre même une tendance inverse.

Bilan global des effets des modalités de préparation en fonction des végétaux, toutes micro-fermes confondues

| Préparation | Légume feuilles Salade | Légume Feuille Persil | Légume racine Carotte | Légume fruit Courgette |
|----------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Lavage | ++ | + | / | / |
| Epluchage | / | / | ++ | - |
| Cuisson vapeur | / | / | ++ | -- |

Effet significatif de la modalité démontré par un test statistique avec prise en compte de la LQ/2
 Effet non significatif de la modalité démontré par un test statistique avec prise en compte de la LQ/2.
Tendances observées lorsque les valeurs inférieures à la LQ ne sont pas prises en compte :
+++ : réduction des teneurs en HAP supérieure à -60%
++ : réduction des teneurs en HAP comprise entre -40 et -60%
+ : réduction des teneurs en HAP comprise entre -20% et -40%
- : réduction des teneurs en HAP comprise entre 0 et -20%
— si augmentation des teneurs en HAP par rapport à la référence modalité Pleine Terre
/ : non mesuré



III. Résultats – Calculs de risques



Dans un premier temps, pour étudier la contribution des trois voies d'expositions (ingestion de sol, ingestion de légumes, inhalation de l'air), les calculs de QD et d'ERI ont été menés et présentés uniquement pour la **modalité pleine terre**.

Remarque : A Nanterre, les légumes feuilles n'ont pas pu être récoltés. Les résultats de calculs de risques liés à cette micro-ferme sont de fait sous-estimés car ne prenant pas en compte cette famille de légumes.

| SCENARIO « GENERIQUE » | |
|--|--|
| Evaluation de l'exposition et des risques pour un adulte sur les 3 micro-fermes (comparaison des modalités de culture) | |
| Objectifs | Données d'entrée |
| <ul style="list-style-type: none">• Evaluer les expositions et les risques sanitaires sur les 3 micro-fermes ;• Evaluer la part liée aux voies d'inhalation, d'ingestion de sol et de végétaux potagers ;• Comparer l'exposition alimentaire estimée pour les trois micro-fermes à l'exposition moyenne de la population française (Anses, 2011) ;• Identifier les substances qui contribuent majoritairement à l'exposition et les risques sanitaires ;• Identifier les catégories (légumes-feuille, légumes-racine, légumes-fruit, etc) de végétaux qui tirent l'exposition et les risques sanitaires. | <ul style="list-style-type: none">• Part de végétaux consommés issus de la microferme et exposés à la contamination (100%) ;• Concentrations des végétaux lavés ;• Concentrations moyennes dans les sols, les végétaux ou l'air : si une concentration est inférieure à la limite de quantification (LQ), la valeur n'est pas prise en compte dans le calcul des moyennes ;• Les concentrations dans l'air en été pour le site de Montreuil ont été appliquées aux trois sites. |
| | Paramètres testés |
| | Concentrations spécifiques dans les sols et végétaux pour chacun des sites : Nanterre, Montreuil et Saint-Denis. En fonction des 4 modalités de culture : pleine terre (PT), pleine terre avec revêtement (PTR), pleine terre sous serre (PTS) et hors sol avec terre d'apport (HS) |

III. Résultats – Calculs de risques

DANGER SANITAIRE

Capacité intrinsèque d'une substance, d'un phénomène physique, d'un agent biologique à provoquer un effet néfaste sur la santé

×

EXPOSITION

La situation réelle dans laquelle nous sommes confrontés au danger

- À quel niveau ou quelle quantité sommes-nous exposés ?
- À quelle fréquence et sur quelle durée ?
 - sur le long terme = exposition chronique
 - sur le court terme = exposition aiguë
- Par quelle voie ? Par inhalation, par ingestion, par contact

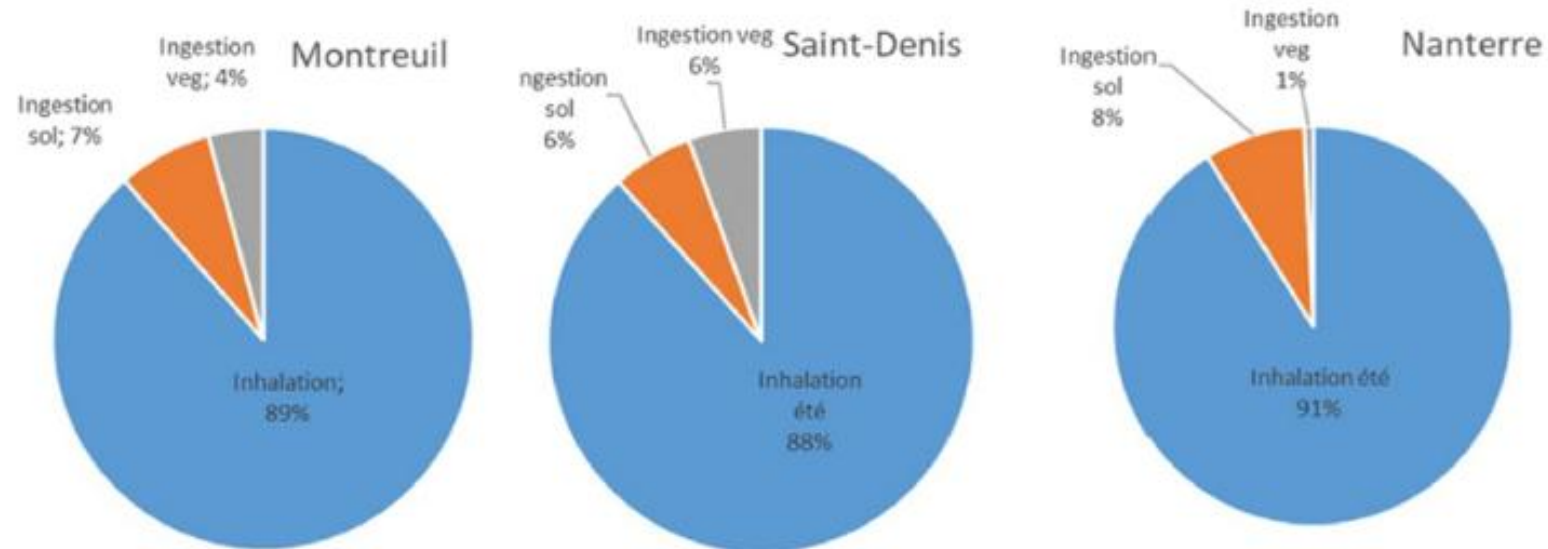
=

RISQUE SANITAIRE

Probabilité de survenue des effets néfastes du danger sur la santé

Le risque peut prendre la forme d'une infection, d'une intoxication, d'une atteinte physique ou encore d'une maladie chronique comme certains cancers, le diabète, l'asthme, etc.

Il dépend des circonstances d'exposition et des caractéristiques de la population (âge, immunité...)



Contribution des trois voies d'exposition au Quotient de Danger pour les trois sites

- Les **quotients de danger pour les trois sites sont similaires** avec un QD autour de 0,013 et une contribution majoritaire de la voie **inhalation de l'air** (entre 88 et 91 % en fonction des sites)
- Pour les trois voies d'exposition, le **benzo(a)pyrène** est l'HAP qui tire majoritairement les risques

III. Résultats – Calculs de risques

DANGER SANITAIRE

Capacité intrinsèque d'une substance, d'un phénomène physique, d'un agent biologique à provoquer un effet néfaste sur la santé

×

EXPOSITION

La situation réelle dans laquelle nous sommes confrontés au danger

- À quel niveau ou quelle quantité sommes-nous exposés ?
- À quelle fréquence et sur quelle durée ?
 - sur le long terme = exposition chronique
 - sur le court terme = exposition aiguë
- Par quelle voie ? Par inhalation, par ingestion, par contact

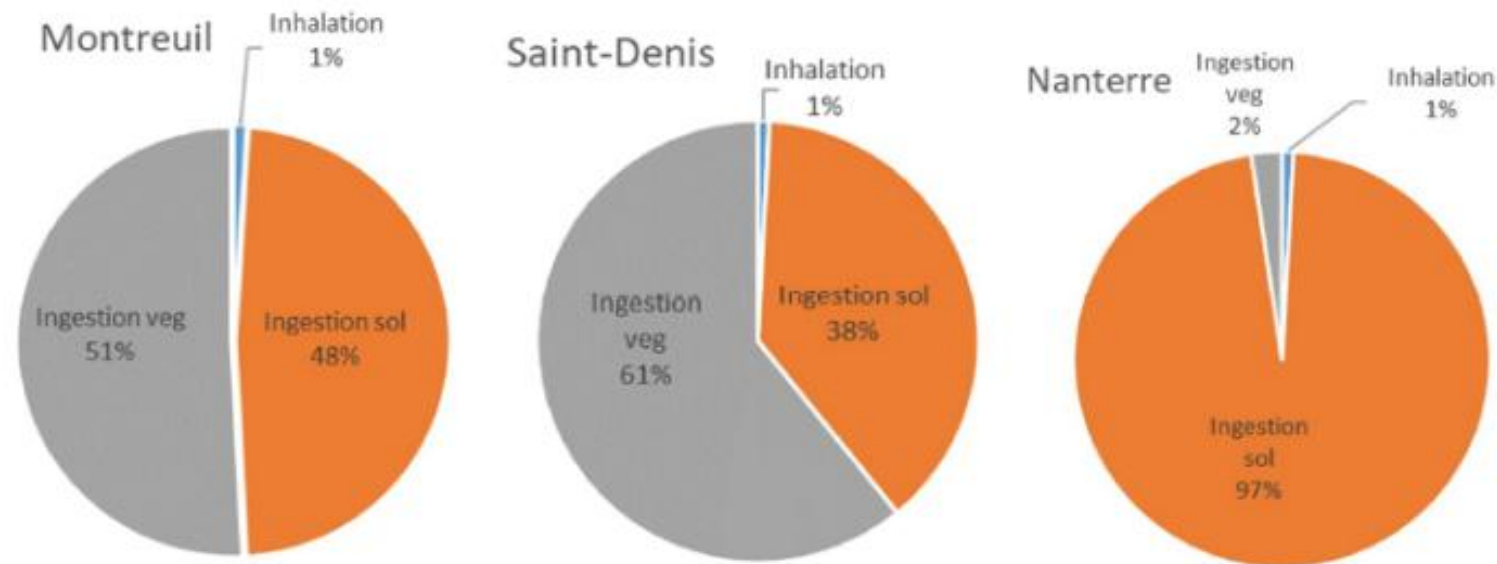
=

RISQUE SANITAIRE

Probabilité de survenue des effets néfastes du danger sur la santé

Le risque peut prendre la forme d'une infection, d'une intoxication, d'une atteinte physique ou encore d'une maladie chronique comme certains cancers, le diabète, l'asthme, etc.

Il dépend des circonstances d'exposition et des caractéristiques de la population (âge, immunité...)



Contribution des trois voies d'exposition à l'Excès de Risque Individuel pour les trois micro-farmes

- **Les Excès de Risque Individuels (ERI)** pour les trois sites sont du **même ordre de grandeur** avec un ERI entre 8E-07 et 10E-07
- L'inhalation de l'air est la voie minoritaire pour les trois sites. **L'ingestion de végétaux est la voie majoritaire** pour Saint-Denis et Montreuil. En l'absence de récolte de salade à Nanterre, l'ingestion de sol est la voie majoritaire pour ce site
- Les **HAP lourds** contribuent majoritairement aux risques sans seuil

III. Résultats – Calculs de risques

Hiérarchisation des risques sanitaires par modalité de culture

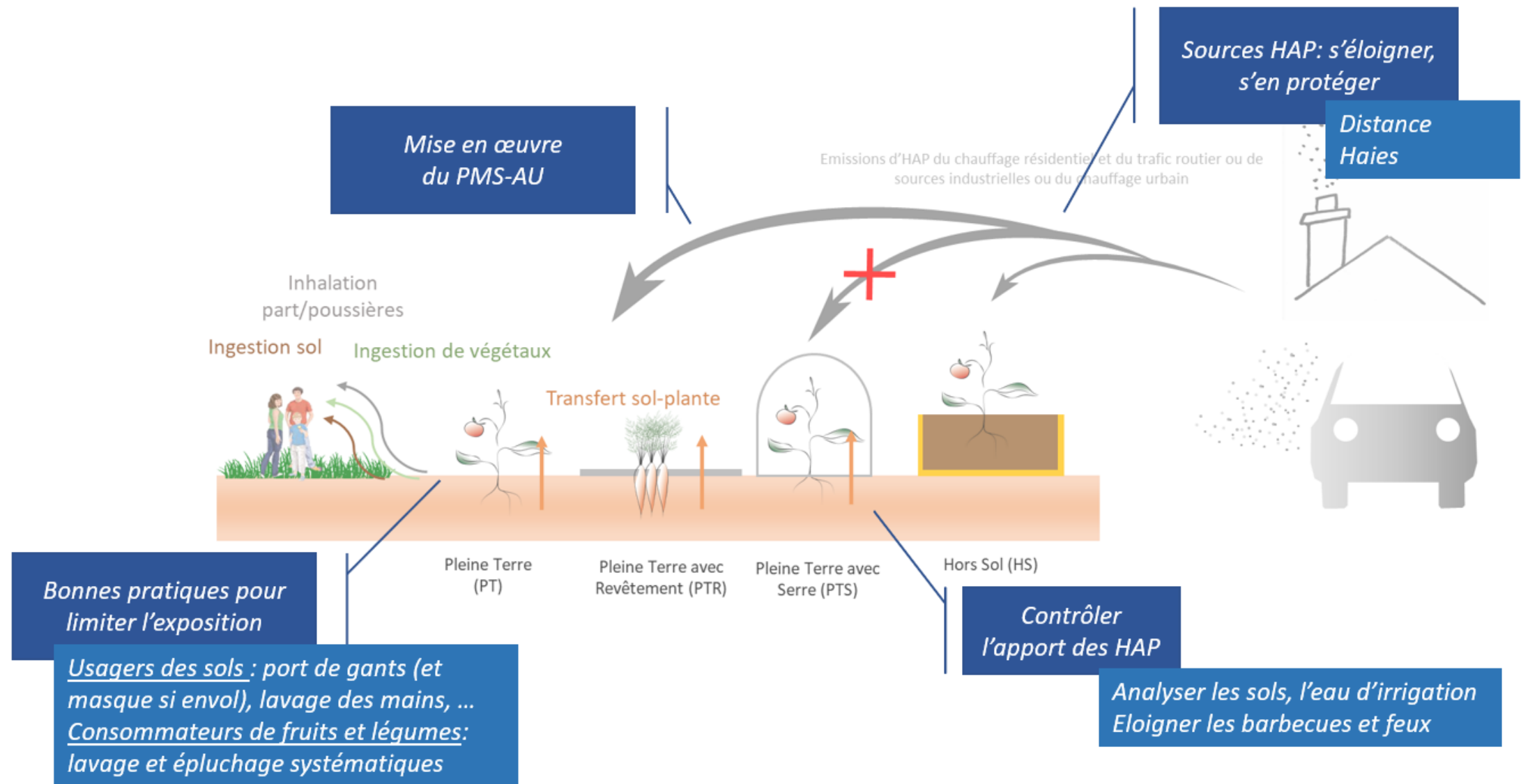
| | Total (Ingestion et Inhalation) |
|----------------------------------|---------------------------------|
| ERI (excès de risque individuel) | |
| Montreuil | PT ≈ PTS ≈ PTR > HS |
| Nanterre | PT ≈ PTS > PTR ≈ HS |
| Saint-Denis | PT ≈ PTS > PTR > HS |
| QD (quotient de danger) | |
| Montreuil | PT ≈ PTS ≈ PTR ≈ HS |
| Nanterre | PT ≈ PTS ≈ PTR ≈ HS |
| Saint-Denis | PT ≈ PTS ≈ PTR ≈ HS |

Dans un second temps et cette fois pour comparer les effets de chaque modalité de culture sur les calculs de risques, les QD et ERI ont été calculés par micro-ferme, par voie d'exposition et par modalité.

- La culture hors-sol est la seule modalité de culture permettant de réduire le risque total d'un facteur 10 pour les effets sans seuil (valeurs ERI) pour les trois sites étudiés mais a peu d'impact sur les effets à seuil (valeurs QD)
- La culture de végétaux sous serre ne permet pas de réduire le risque global de manière significative sur les trois sites
- La culture de végétaux en présence d'un revêtement au sol permet, en « coupant » la voie d'exposition par ingestion de sol, de réduire le risque global pour les effets sans seuil pour Saint-Denis et Nanterre. Cette modalité n'est pas significative pour Montreuil et pour les effets à seuil.



III. Résultats – Préconisations



Recommandations formulées pour réduire les risques associés aux HAP en agriculture urbaine



IV. Conclusions et perspectives

- Les **sources de contamination** des végétaux cultivés en agriculture urbaine sont multiples (**sol, eau d'arrosage, air**)
- Dans l'objectif d'étudier la contribution de l'air sur la contamination des végétaux par les HAP, le projet a permis de tester **4 modalités de cultures et 3 modalités de préparation dans 3 micro-fermes urbaines** franciliennes.
- Seule la culture **hors-sol avec apport de terre peu contaminée contribue significativement à la réduction des teneurs en HAP dans les salades** par rapport à la culture en pleine terre. Il n'y a pas de réduction des teneurs pour les autres végétaux testés.
- Globalement, la mise en œuvre d'une *serre* pour limiter les dépôts atmosphériques ou d'un **revêtement** pour limiter le ré-
envol des particules de sol ne se révèle **pas efficace**.
- Le **lavage et l'épluchage contribuent** à la réduction des teneurs en HAP.
 - Parmi les modalités testées, seule la **culture hors-sol contribue à réduire le risque sanitaire** global dans les trois micro-fermes.
 - Des **préconisations sont proposées** à plusieurs niveaux afin de réduire le risque associé à la présence des HAP dans les sols et l'air.

Pour aller plus loin : Dans CARTHAGE, des travaux menés sur les BCF et comparaison aux modèles prédictifs, sur la perception des consommateurs. Livrables disponibles sur le site de [l'ADEME](#) et de [l'INERIS](#)



MERCI POUR VOTRE ATTENTION