

# Sécurisation des Opérations de BioVenting par évaluation des cinétiques d'échanges et de biodégradation

Projet  
SOBIOVE

Jean-Marie CÔME (GINGER) - Laurent THANNBERGER (VALGO)

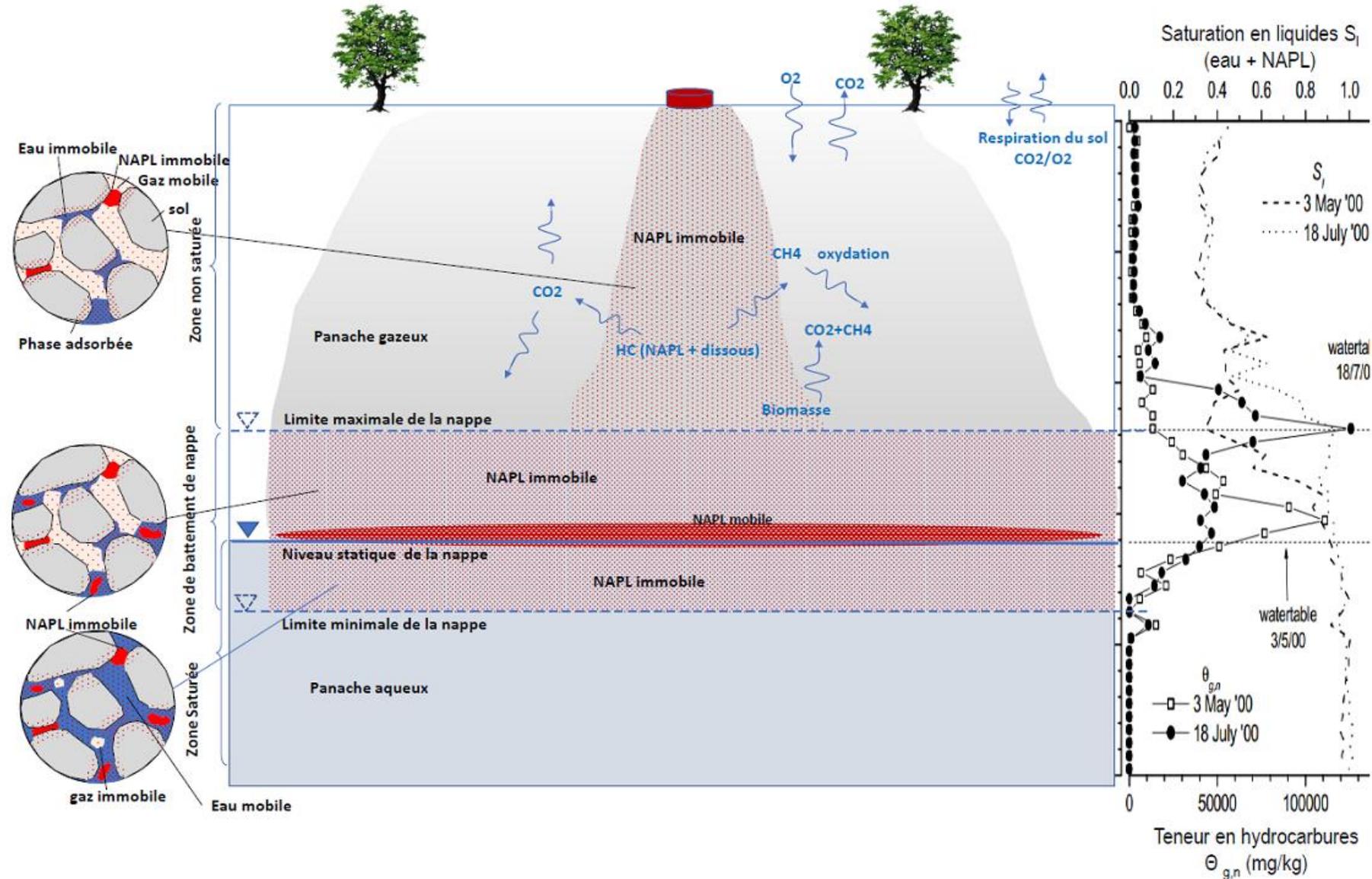


1. Contexte
2. Dimensionnement d'un essai pilote
3. Suivi d'un essai pilote
4. Réception d'un essai pilote (Bilan de masse)
5. Evaluation de l'impact du procédé en termes d'émissions de GES

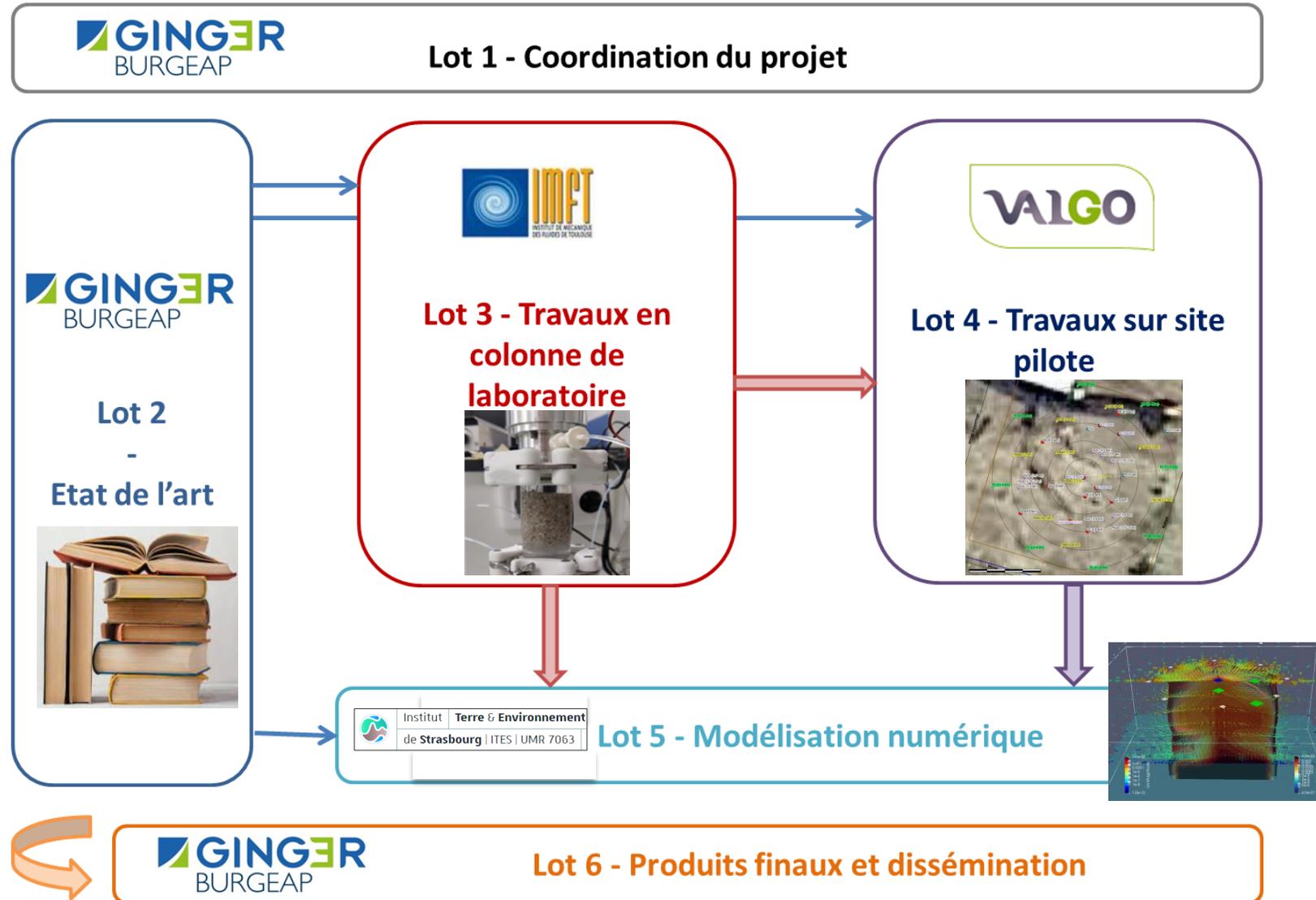


# 1. Contexte technique

Verrou majeur : ratio volatilisation/biodégradation dans les taux d'abattement de la pollution



# 1. Contenu et structuration du projet SOBIOVE



# 2. Dimensionnement d'un essai pilote

- **Données préalables**

En complément de l'expérience des opérateurs

- Essais de caractérisation (essais E1). Présélection par :
  - Analyse des paramètres d'exclusion et limitants (cf. Guide ESTRAPOL)
  - Analyse/discussion sur la composition du NAPL (analyses TPH)
  - Prise en compte des GdS
  - Caractérisation des propriétés pétrophysiques et variabilité : lithologie, granulométrie, perméabilité, ...→ efficacité du transport gazeux
- Essais en laboratoire (d'orientation E2 et de performance E3)
  - Essais en colonne
  - Essai de biodégradabilité
  - Mesure de la respirométrie



## 2. Dimensionnement d'un essai pilote

- **Dispositions générales**

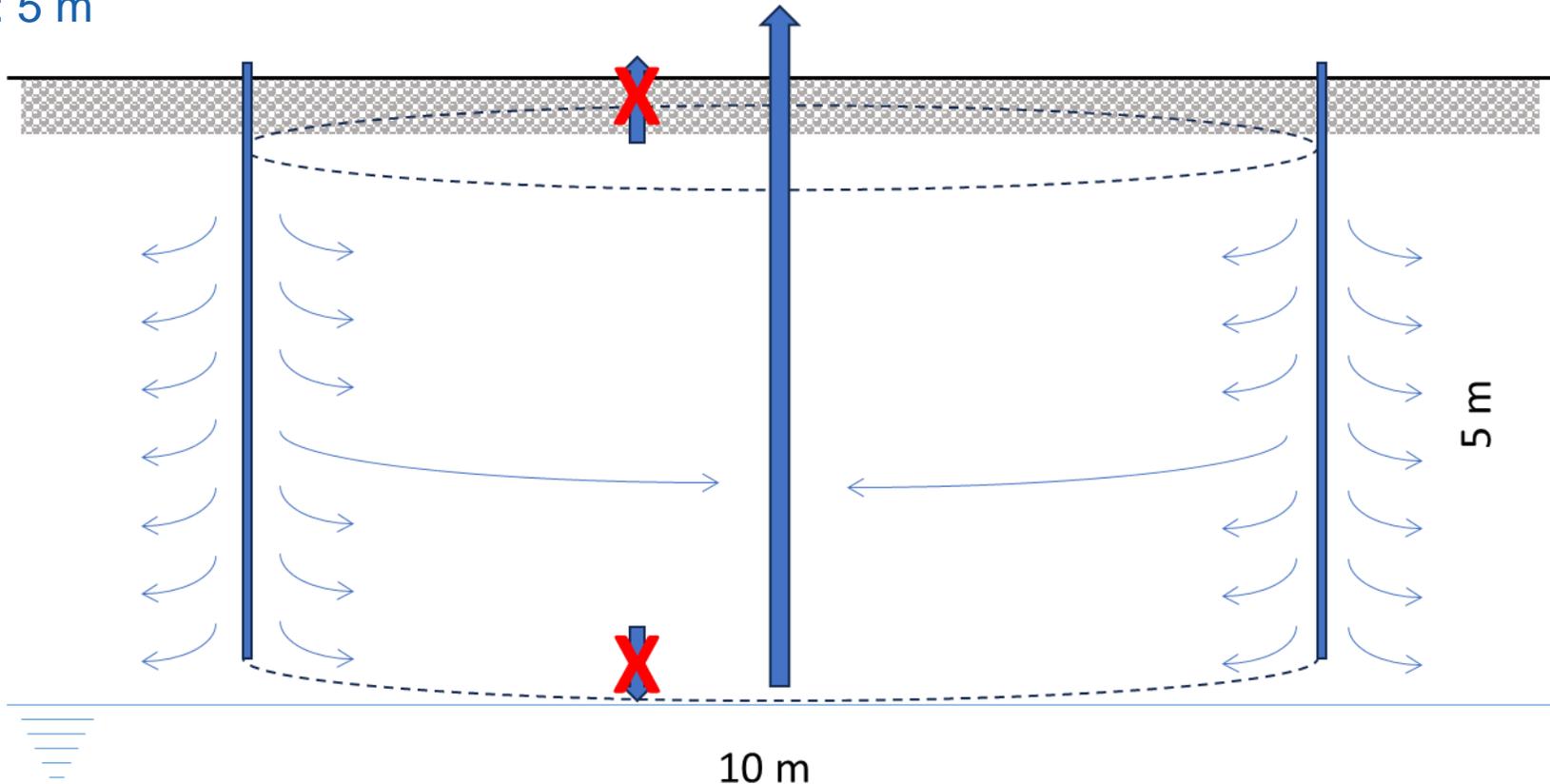
- Choix de la zone d'essai : à l'instar des échantillons de laboratoire, elle doit être représentative
- Choix des paramètres de suivi
  - physiques, (mécanique des fluides, ...)
  - chimiques (polluants, nutriments)
  - biologiques (flore totale et spécifique)
- Réalisation d'un état initial de la zone (protocole MACAOH)



## 2. Dimensionnement d'un essai pilote

- **Design technique**

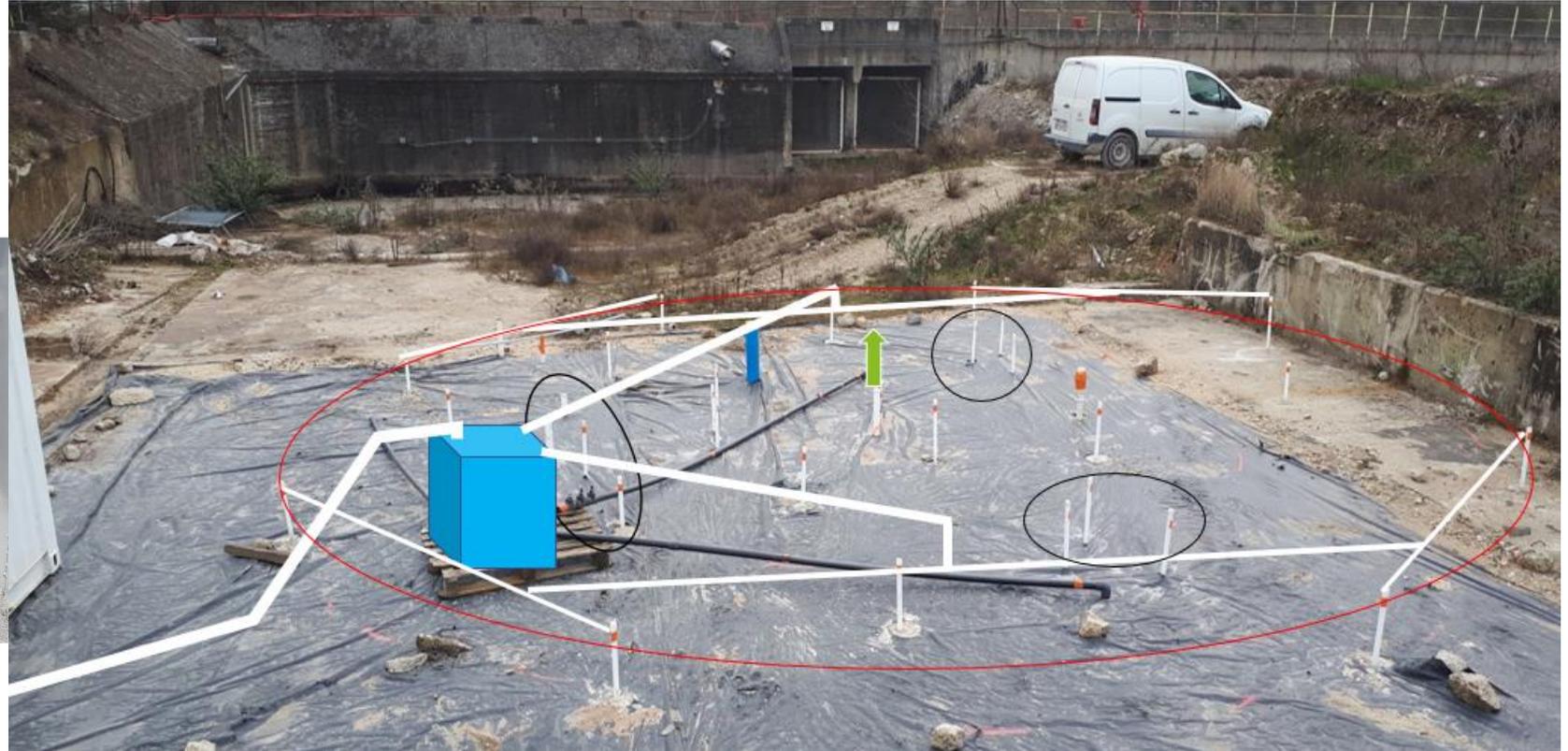
- Création d'une zone cylindrique virtuellement isolée par les flux gazeux (injection = 1,5 x aspiration)
- Débit d'aspiration fondé sur le taux de renouvellement et la vitesse de pore
- Durée : 3 mois Venting + 5 mois Bioventing (régime d'aération différents)
- Rayon : 5 m
- Profondeur : 5 m



## 2. Dimensionnement d'un essai pilote

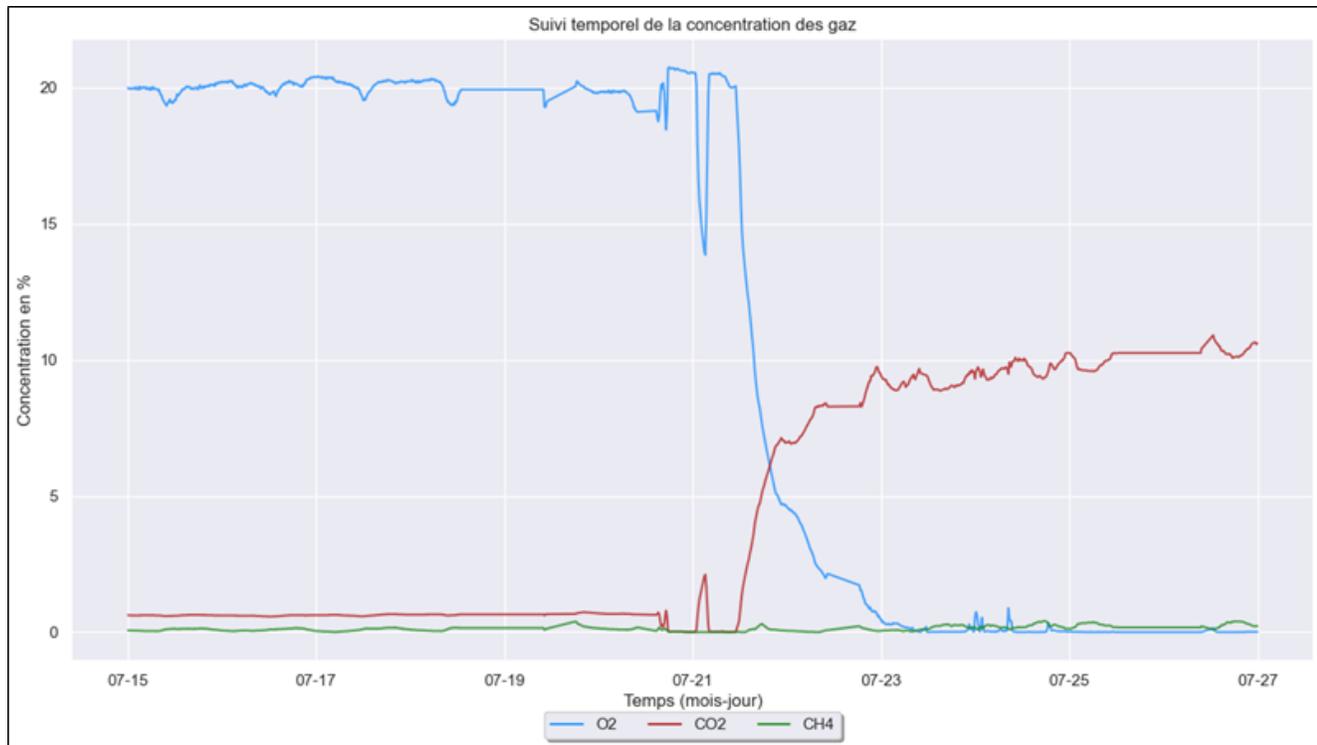
- **Design technique**

- 8 points d'injection périphériques 1" à R = 5 m, crépinés 1-4,5 m
- 1 puits d'extraction : PE-C, crépiné 1,75-5 m
- 18 piézais 1" (a : ca. 2 m - b : ca. 3,5 m - c : ca. 4,5 m)
- 1 puits de rabattement de nappe : 4 à 10 m
- 2 piézomètres 1" : Pz1 : 4-10 m - Pz1b: 5-8 m

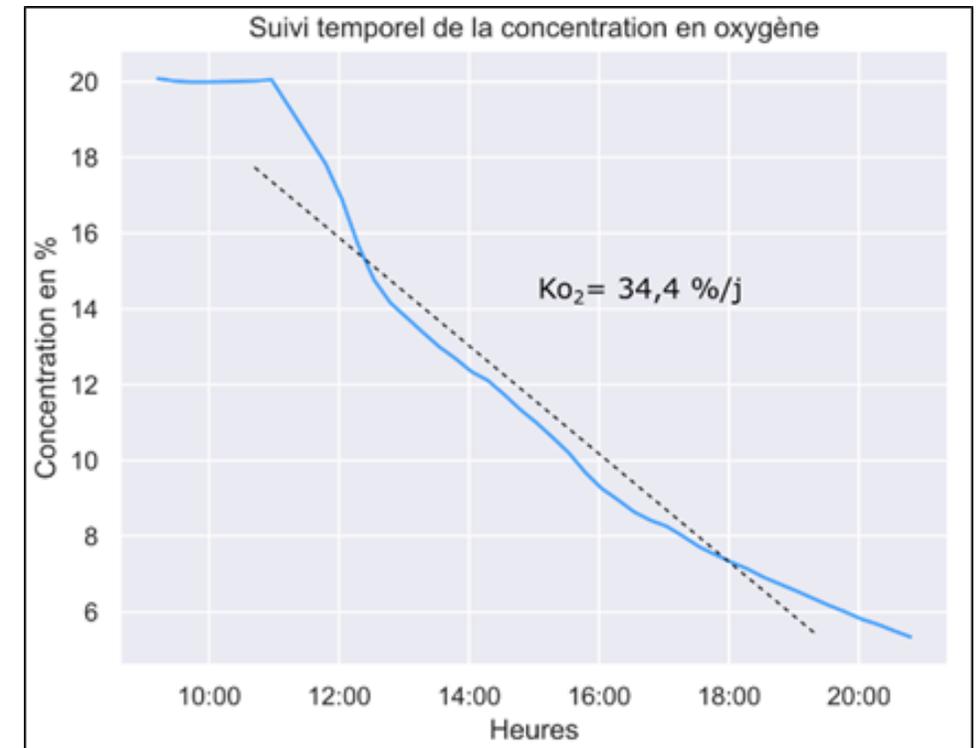


# 2. Dimensionnement d'un essai pilote

- Essais de courte durée
  - Estimation perméabilité des sols (mesures P et Q → modèles)
  - Détermination rayon d'influence de l'apport de O<sub>2</sub>
  - Détermination du taux d'utilisation de O<sub>2</sub> (suivi O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
  - Essai de relaxation

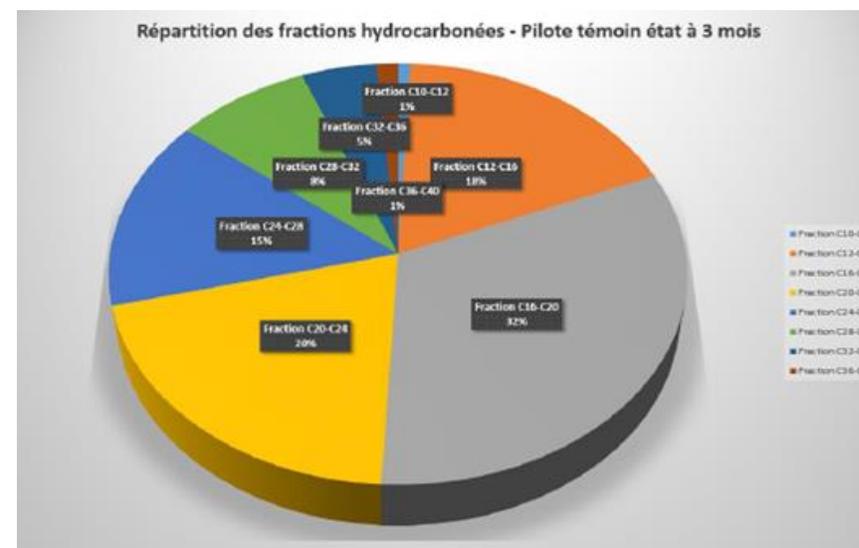
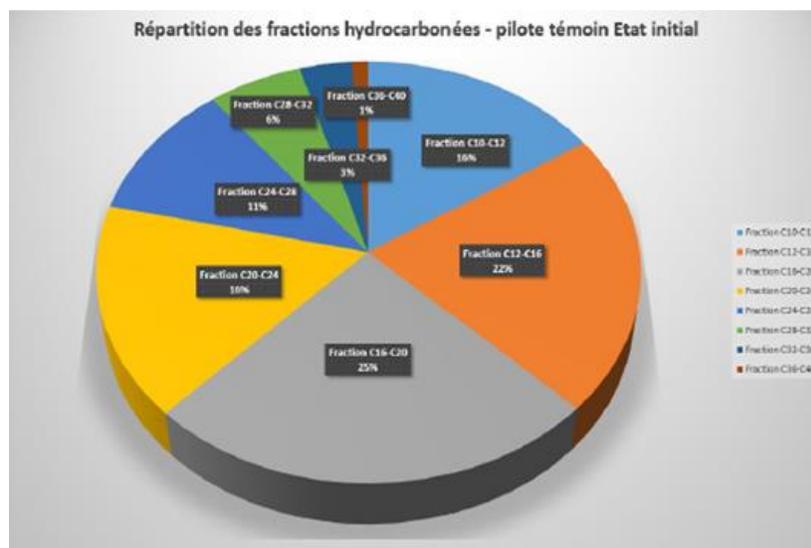


Cinétique de dégradation # 1,6 mg HC/kg sol/jour



## 2. Dimensionnement d'un essai pilote

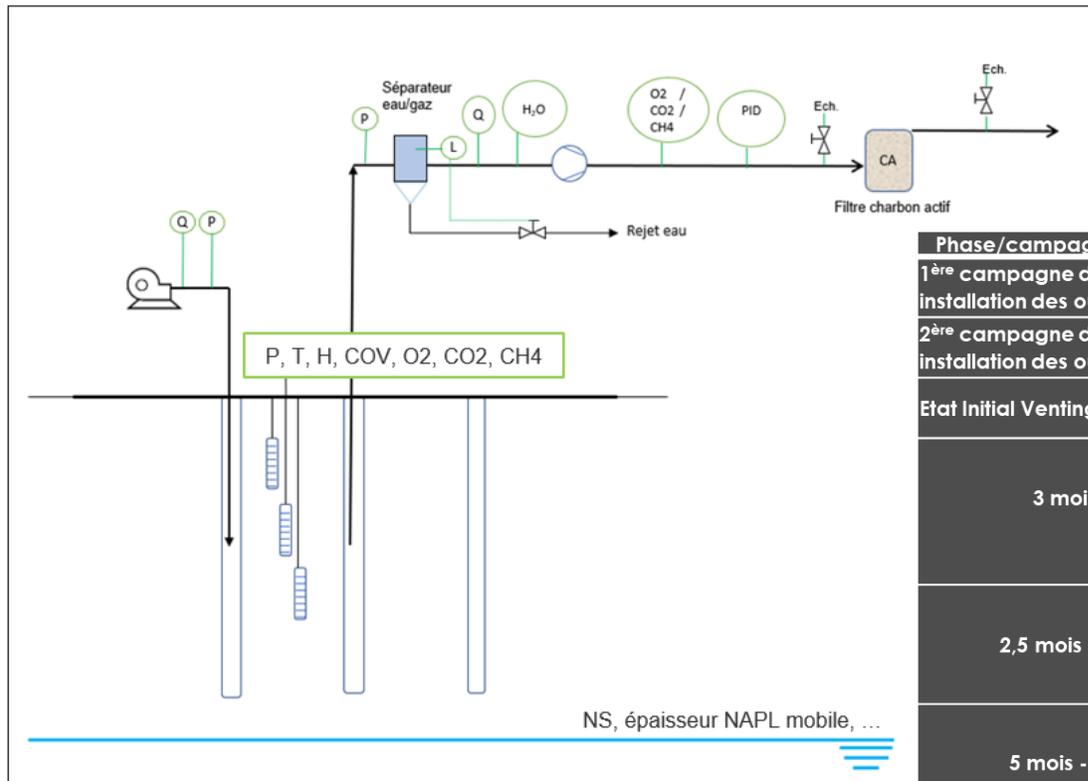
- Essais de longue durée (essai de performance E3)
  - Durée et design de l'essai
    - durée  $\geq 3$  mois
    - phase de Venting + phase de relaxation + phase de Bioventing -> ratio volatilisation/biodégradation
  - Si l'apport de nutriments est envisagé, faisable et maîtrisable, il peut être testé lors de cet essai
  - Sondages dans les sols à l'état final
    - peu souvent réalisés, mais recommandé. Si les concentrations évoluent peu, leur répartition en termes de classes de polluants peut être source d'information (fraction TPH, ...)
  - Outils et méthodes de dimensionnement des débits d'injection/extraction d'air



# 3. Suivi d'un essai pilote

## • Conception d'un pilote

- Piézaires et puits d'aspiration : pression / dépression, CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub>, COV, % H<sub>2</sub>O
- Nappe : NS, épaisseur éventuelle de NAPL
- Préférer le suivi avec enregistrement vs mesures ponctuelles

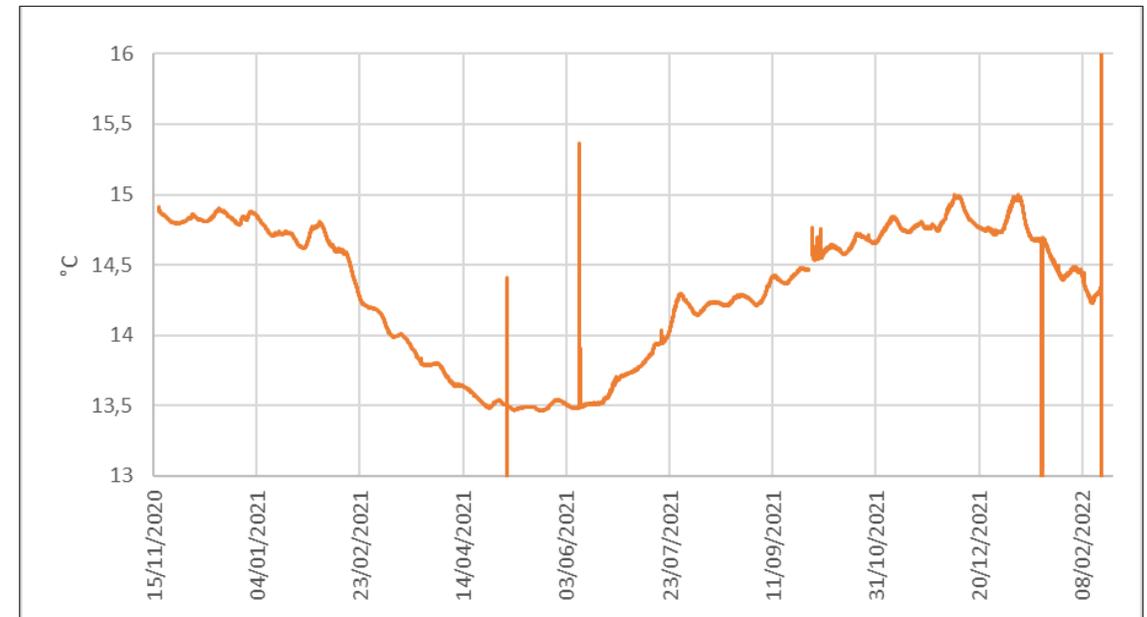


Phase/campagne	Date	Prélèvements
1 <sup>ère</sup> campagne de prélèvement et installation des ouvrages	01/03/2020	16 sondages sols jusqu'à 10 m de profondeur ; éch : TPH +BTEX, NGL, P, K
2 <sup>ème</sup> campagne de prélèvement et installation des ouvrages	28/01/2021	16 sondages sol : 0-6m de profondeur éch : TPH C5-C40+BTEX +COT ; phénols ; NGL, P, K, microflores
Etat Initial Venting (T0)+ lancement	19/04/2021	GdS (TPH split + BTEX) ; CO <sub>2</sub> pour <sup>14</sup> C ; 1 prélèvement de NAPL (TPH split C5-C40) 1 prélèvement de ESO (TPH+CO <sub>2</sub> dissous +NO <sub>3</sub> /PO <sub>3</sub> /SO <sub>4</sub> /Cl/DCE, DBO <sub>5</sub> , PH et rédox)
3 mois - venting	22/04/2021	} GdS (TPH split + BTEX) ; CO <sub>2</sub> pour <sup>14</sup> C
	04/05/2021	
	25/05/2021	
	08/06/2021	
2,5 mois - Relaxation	19/07/2021	} GdS (TPH split + BTEX) ; CO <sub>2</sub> pour <sup>14</sup> C
	23/07/2021	
	09/08/2021	
5 mois - Bioventing	28/09/2021	} GdS (TPH split+ BTEX) ; CO <sub>2</sub> pour <sup>14</sup> C ; TPH C5-C40+BTEX +COT : NGL ; P & K ; microflores 1 prélèvement de ESO (TPH+CO <sub>2</sub> dissous +NO <sub>3</sub> /PO <sub>3</sub> /SO <sub>4</sub> /Cl/DCE, DBO <sub>5</sub> , PH et rédox)
	26/10/2021	
	13/12/2021	
	17/01/2022	
Bioventing: 5 <sup>ème</sup> prélèvement Etat final: Sondages sols	15/02/2022	} GdS (TPH split + BTEX) ; CO <sub>2</sub> pour <sup>14</sup> C
	07/03/2022	

# 3. Suivi d'un essai pilote

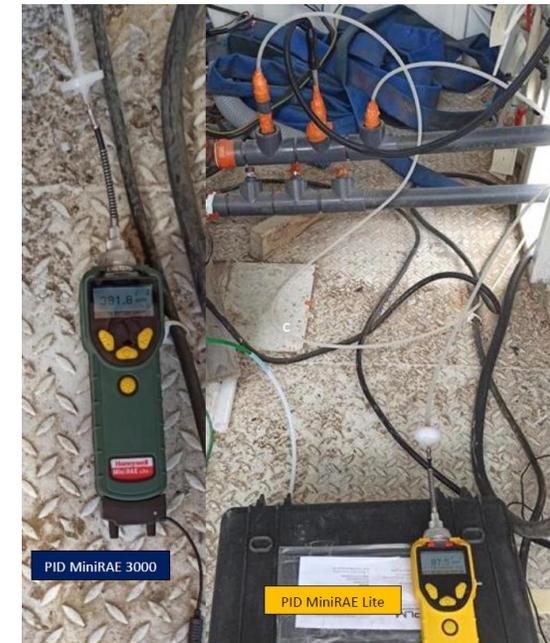
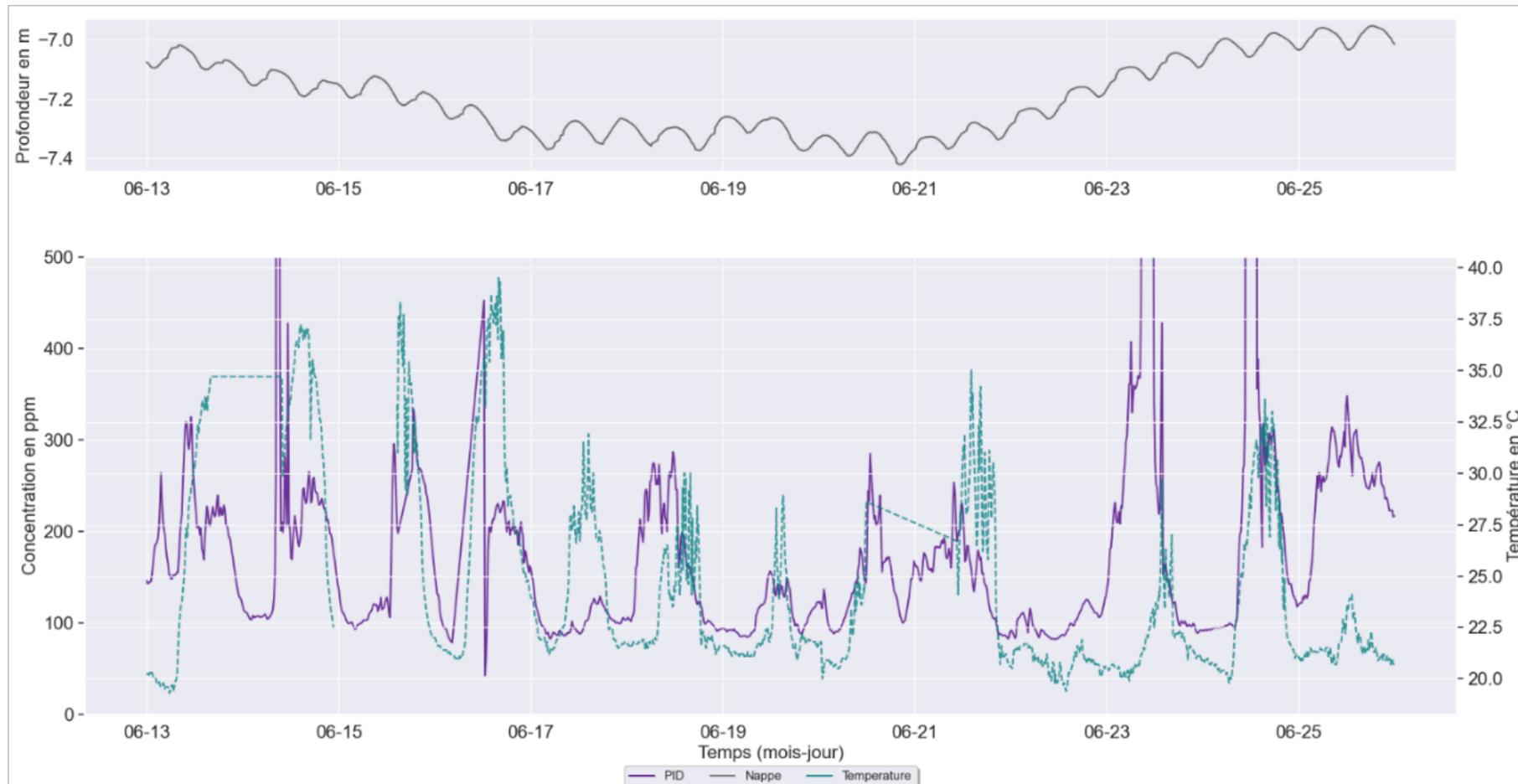
- **Suivi des paramètres liés à la phase gazeuse (paramètres physiques)**
  - Puits d'extraction et d'injection : pression, débit d'air, température, humidité
    - Vérification périodique débits et pressions des différentes branches du réseau aéraulique, si besoin ajustement (vannes de réglage)
    - Contrôle température et humidité
  - Air atmosphérique : pluie, température de l'air, pression
  - Dans le sol à plusieurs profondeurs : température de l'air, pression
  - Dans le cas d'une insufflation, une HR de 80% est recherchée, afin de maintenir l'humidité du sol (barbotage, ...)
  - Prendre en compte l'effet des soufflantes

Suivi température eau de nappe Pz1



# 3. Suivi d'un essai pilote

- **Suivi des paramètres liés à la phase gazeuse (paramètres chimiques)**
  - Mesures PID en continu : puits d'extraction (Indicateur global de la concentration en COV totaux)
  - Mesures ponctuelles de la concentration en HC (TPH C5-C10) : puits d'extraction + piézairs



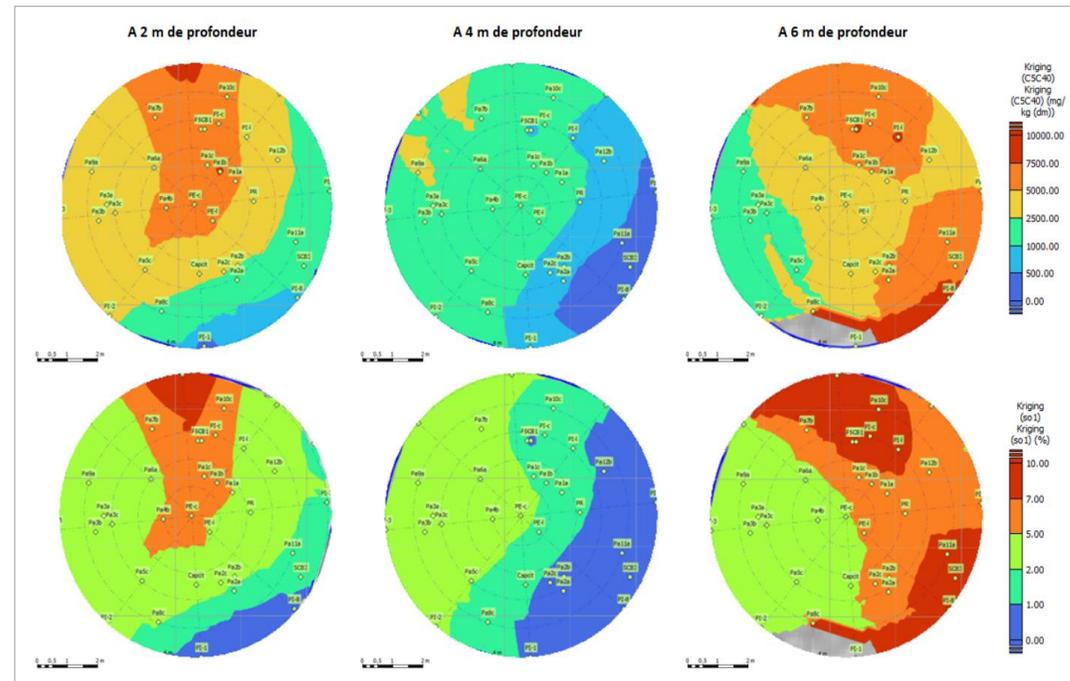
# 3. Suivi d'un essai pilote

- **Suivi des paramètres liés à la phase gazeuse (paramètres biologiques ou liés à la biodégradation)**
  - Suivi teneurs  $O_2$  : évaluer si l'apport en  $O_2$  **est suffisant**. !  $O_2$  ne doit pas être limitant
  - Suivi teneurs  $CO_2$  - > bilan de masse pour estimer les **masses d'hydrocarbures biodégradés** (une fois établie la part ne provenant pas des hydrocarbures)
  - Suivi teneurs  $CH_4$  et  $H_2S$  -> confirmer (ou pas) que **biodégradation anaérobie** minoritaire -> conforter hypothèses de calculs (équations stœchiométriques pour le calcul du bilan de masse)



# 3. Suivi d'un essai pilote

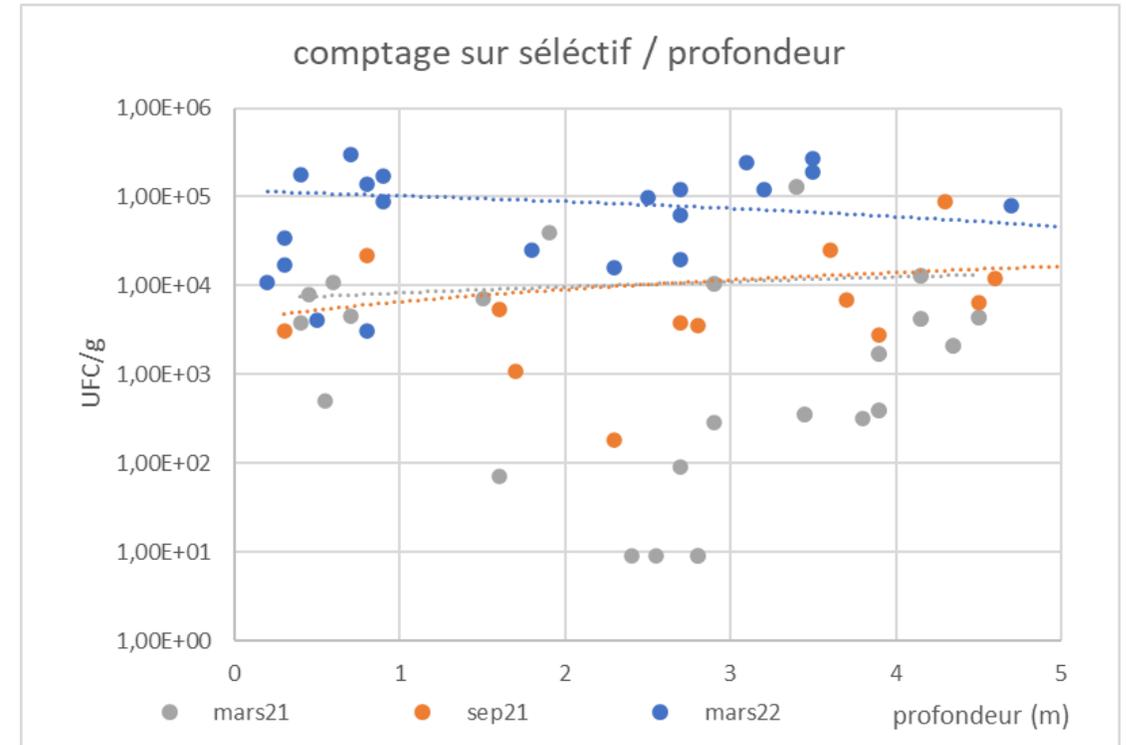
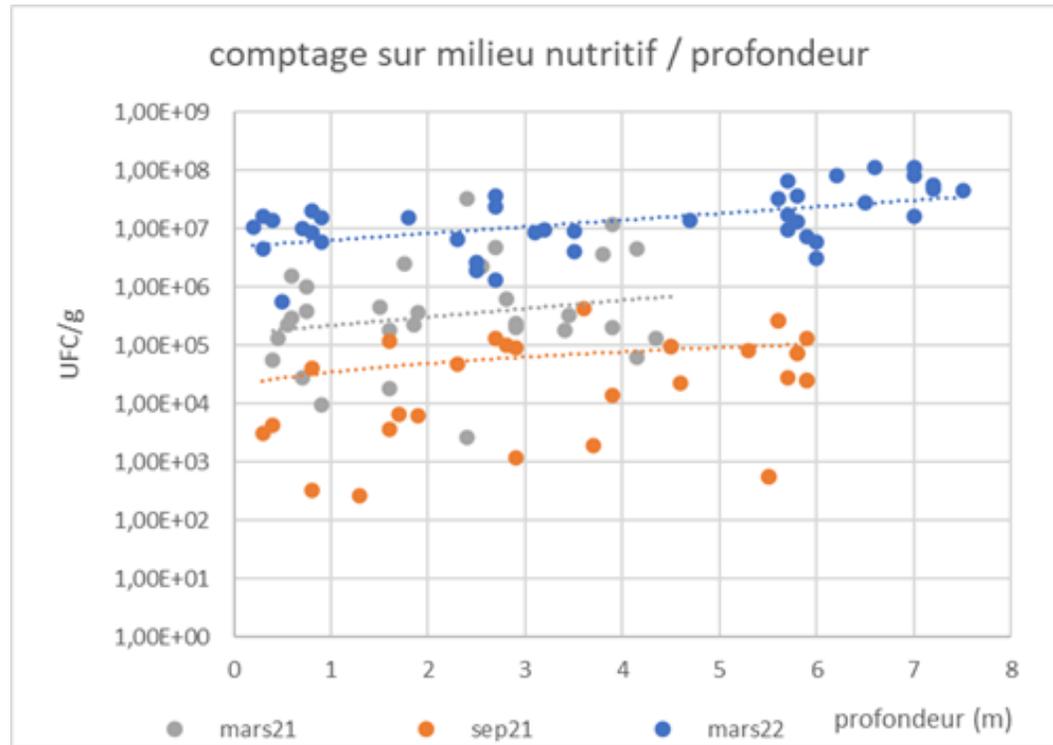
- Suivi des paramètres dans le sol
  - Paramètres chimiques :
    - Si HC : TPH C5-C40 (méthode split, 15 fractions aliphatiques et aromatiques) vivement préconisé



- Estimation de la fertilité
  - Ratio **C** / **N** / **P** / **K**, on recherche un optimum **100** / (**5 à 15**) / **1** / **1**  
**COT**, **NGL**, **P** élémentaire, **K** élémentaire
  - Dans le cas du projet SOBIOVE, 73% du COT est constitué par le carbone des polluants

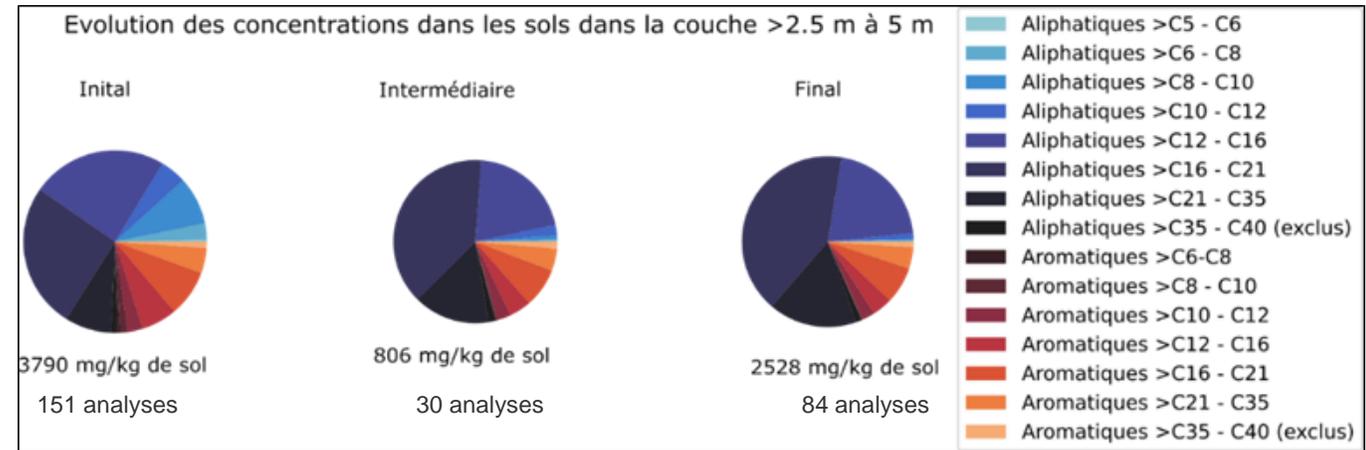
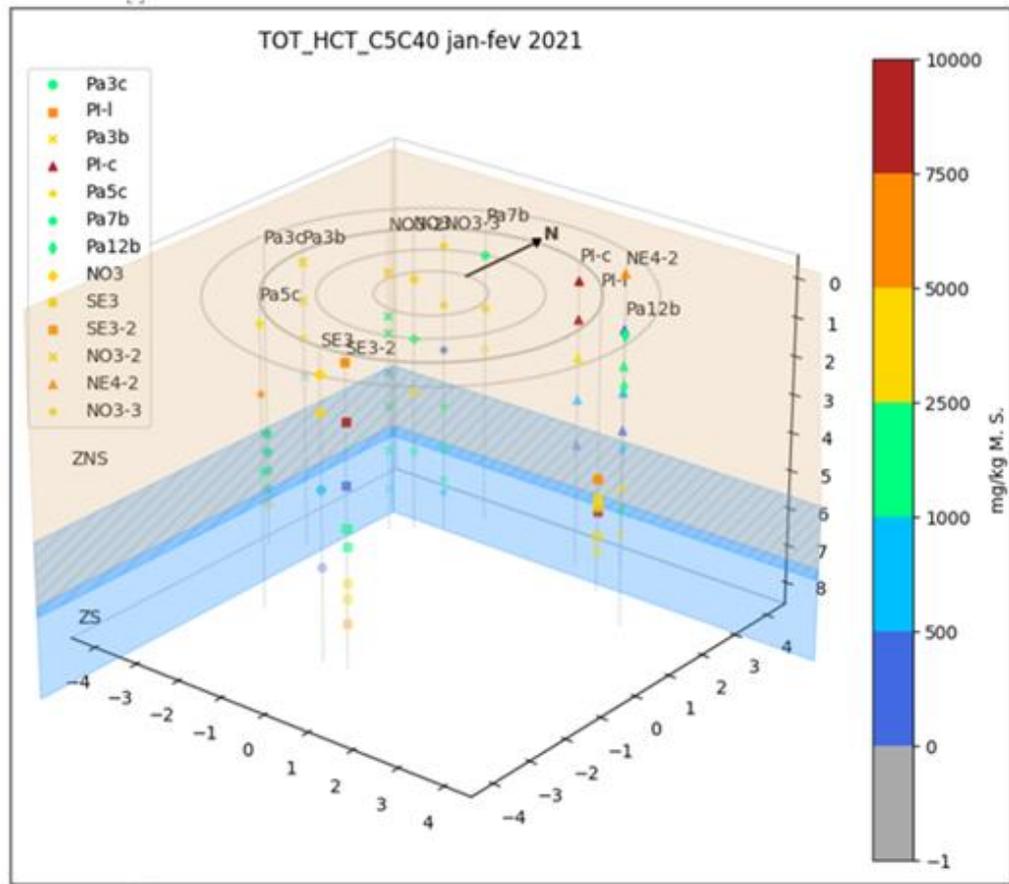
# 3. Suivi d'un essai pilote

- Suivi des paramètres dans le sol
  - Paramètres biologiques
    - Numération bactérienne
    - Outils de la génomique



# 4. Bilan de masse

- Bilan de masse fondé sur les concentrations dans les sols



Etat initial - Masse de TPH C5-C40 en kg (Logiciel KARTOTRAK)

Quantile	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9	0.95
Zone non saturée	2941	2802	2651	2505	2347	2283
Zone de battement de nappe	2011	1835	1642	1464	1334	1199

Etat final - Masse de TPH C5-C40 en kg (Logiciel KARTOTRAK)

Quantile	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9	0.95
Zone non saturée	1940	1766	1656	1530	1467	1418
Zone de battement de nappe	912	826	768	699	649	619

**Bilan Etat final / Etat initial (quantile 0.95)**  
 diminution de 870 kg (-39%), dont 465 kg de C5-C12 (-89%)

# 4. Bilan de masse

- **Bilan de masse fondé sur les concentrations dans les gaz extraits**

- Suivi recommandé sur le puits d'extraction

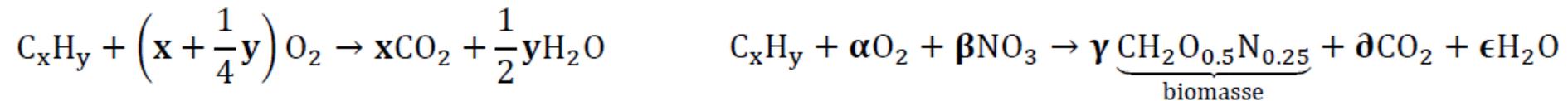
- suivi quasi-continu ( $\Delta t$  1h max) : Q, Concentrations COV totaux (PID), O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>
- campagnes ponctuelles prélèvement gaz + analyses labo (TPH C5-C16 pour les HC)

- Masse extraite par volatilisation

- Flux gazeux -> Masse de polluant

$$\text{Masse [g]} = C \text{ [ppm, ppb ou \%]} \times M_m \text{ [g/mol]} \times FC \text{ [mol/m}^3\text{]} \times \text{débit d'extraction [m}^3\text{/s]} \times \text{durée [s]}$$

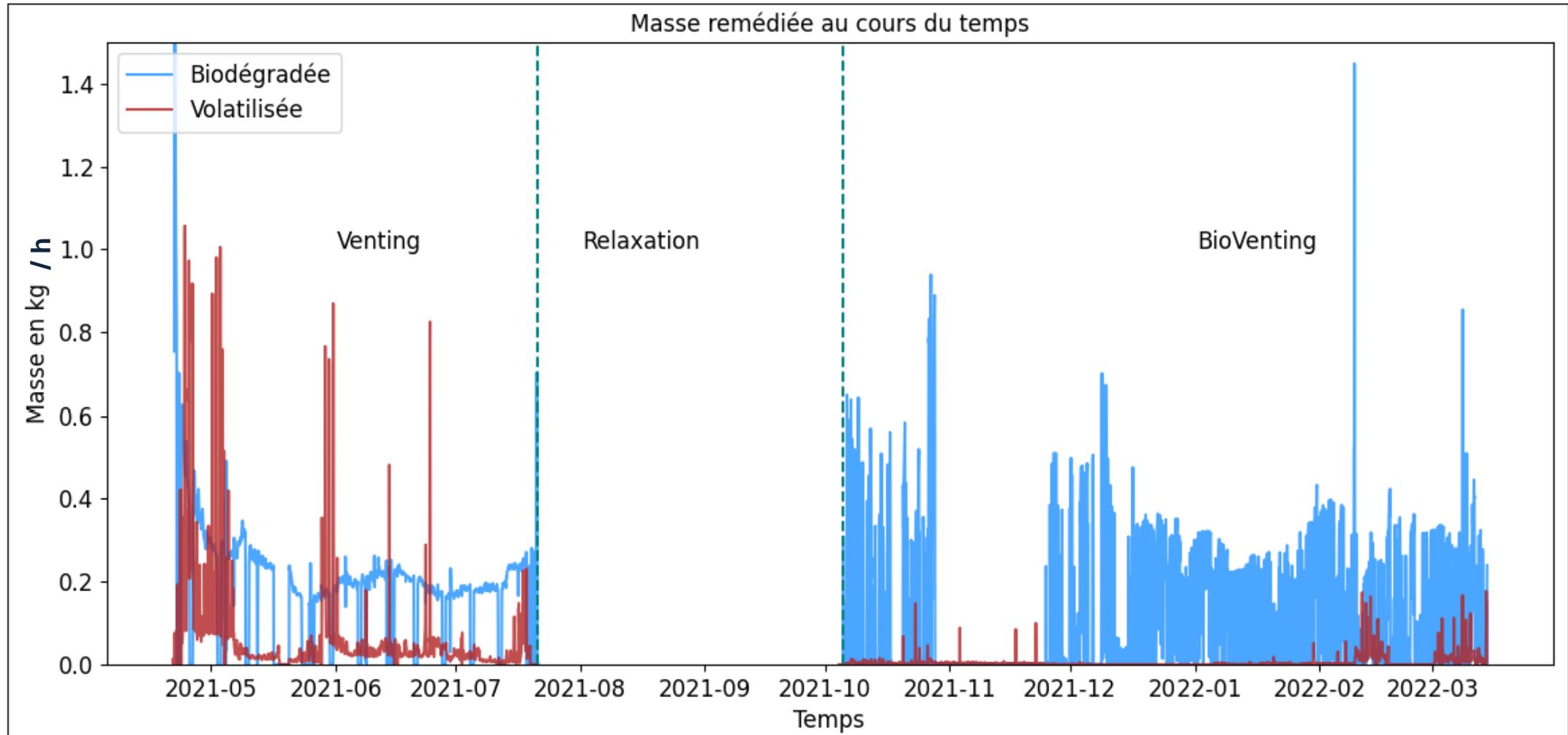
- Masse extraite par biodégradation (aérobie)



$$\text{Masse [g]} = C \text{ [\%]} \times M_{mCO_2} \text{ [g/mol]} \times FC \text{ [mol/m}^3\text{]} \times \text{débit d'extraction [m}^3\text{/s]} \times \text{durée [s]} \times 1/\delta$$

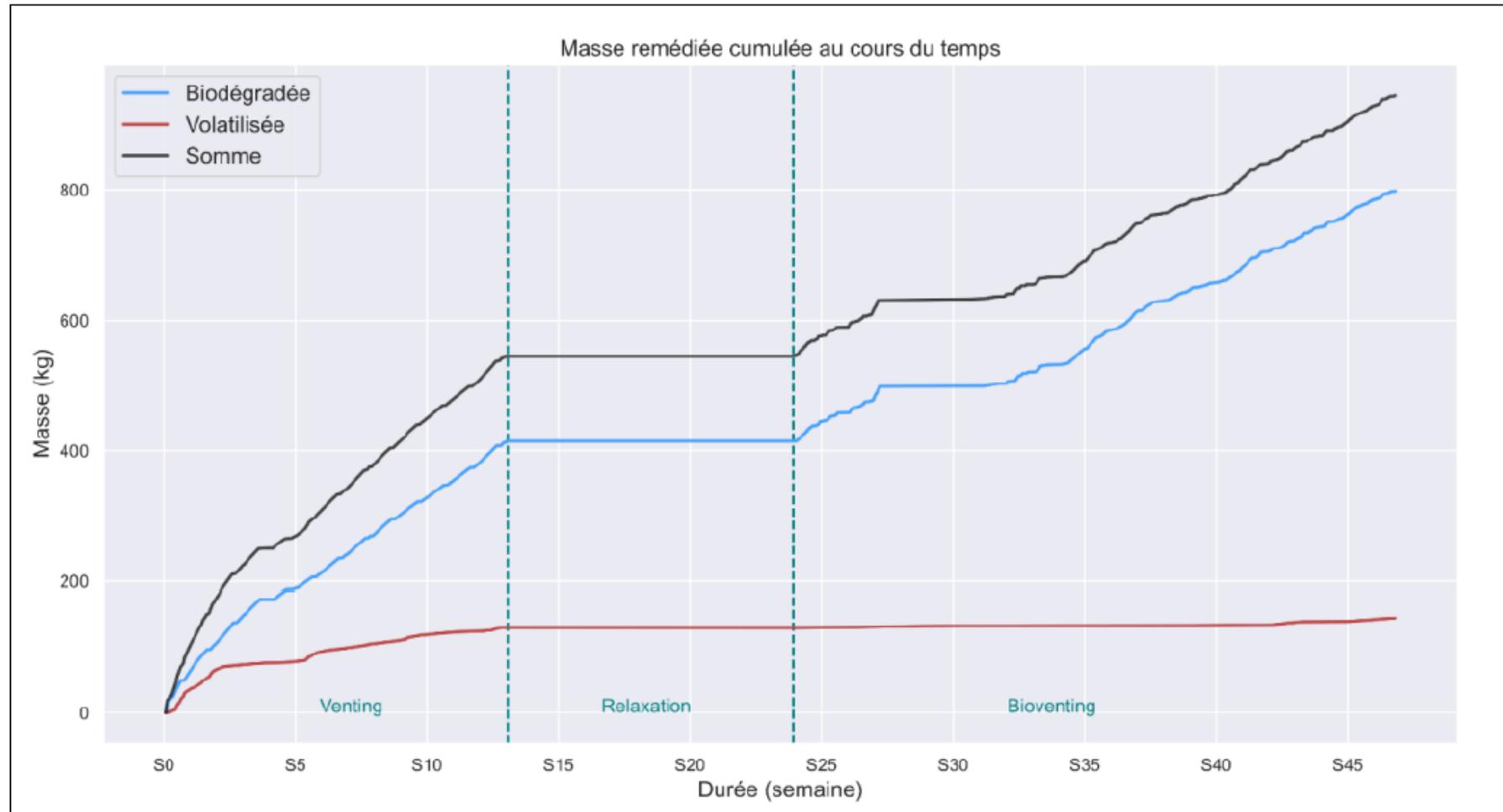
# 4. Bilan de masse

- Bilan de masse fondé sur les concentrations dans les gaz extraits



# 4. Bilan de masse

- **Bilan de masse fondé sur les concentrations dans les gaz extraits**
  - Phase Venting : 130 kg volatilisés / 415 kg biodégradés
  - Phase Bioventing : 15 kg volatilisés / 385 kg biodégradés



# 4. Bilan de masse

- **Discussion entre les 2 approches**

- **Concentrations en HC dans les sols**

- bilan de masse : 870 à 1000 kg de TPH C5-C40 (selon le quantile considéré). [Masse t0 # 2280 kg]
    - Incertitudes fortes & multiples : nombre + localisation différente des échantillons de sols entre les campagnes, représentativité spatiale des échantillons analysés, méthodes d'analyse au laboratoire, maîtrise relative des conditions aux limites du système, méthodes de spatialisation des données

- **Concentrations dans les gaz au puits d'extraction**

- Bilan de masse : 945 kg (145 kg par volatilisation et 800 kg par biodégradation)
    - Incertitudes
      - Paramètres mesurés à l'extraction : Q < à 5%, PID # 3%, P, T # 1%, choix HC modèle 30 % max
      - Conditions de biodégradation : non prise en compte du CH<sub>4</sub>
      - Conditions aux limites du système

- **Conclusions et recommandations**

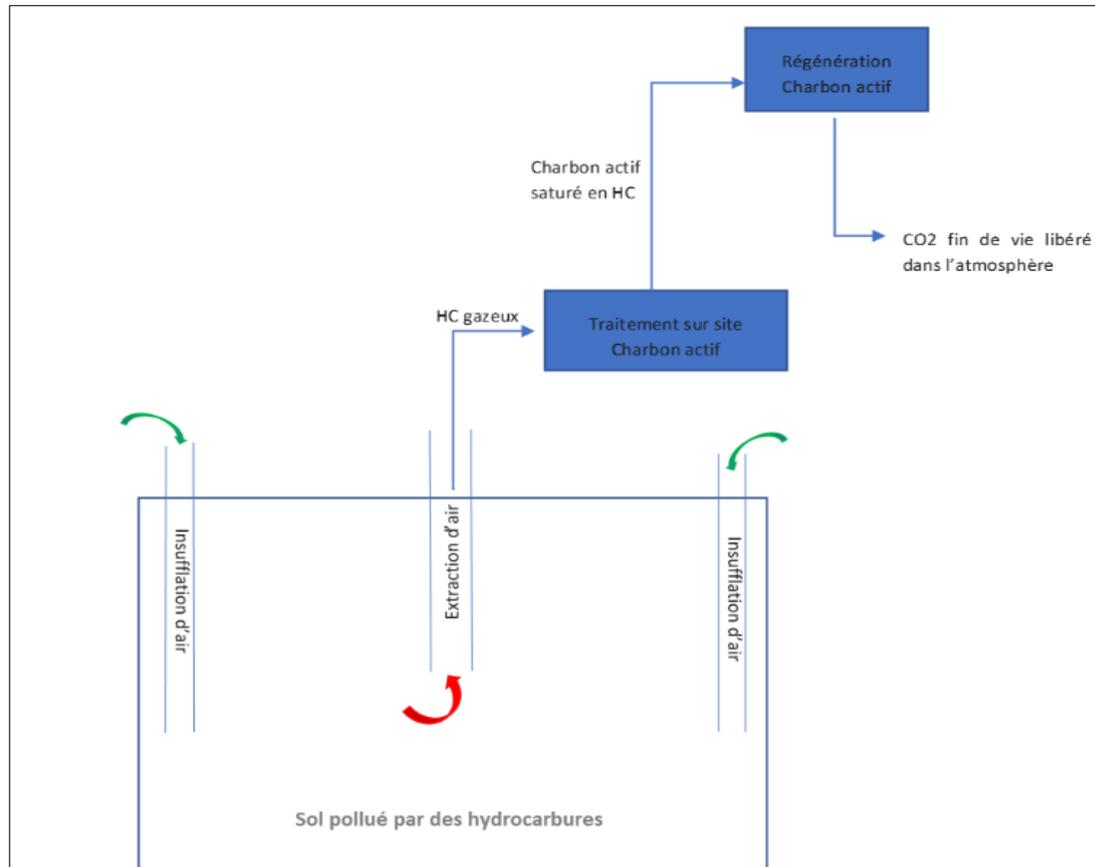
- Méthode C gaz :
      - Incertitudes < Incertitudes Méthode C sols
      - La seule méthode capable de distinguer les masses volatilisées et biodégradées
      - La seule méthode capable de suivre l'évolution dans le temps des cinétiques des deux processus
    - -> La seule méthode permettant de piloter/optimiser un traitement par Bioventing.

# 5. Bilan émissions GES

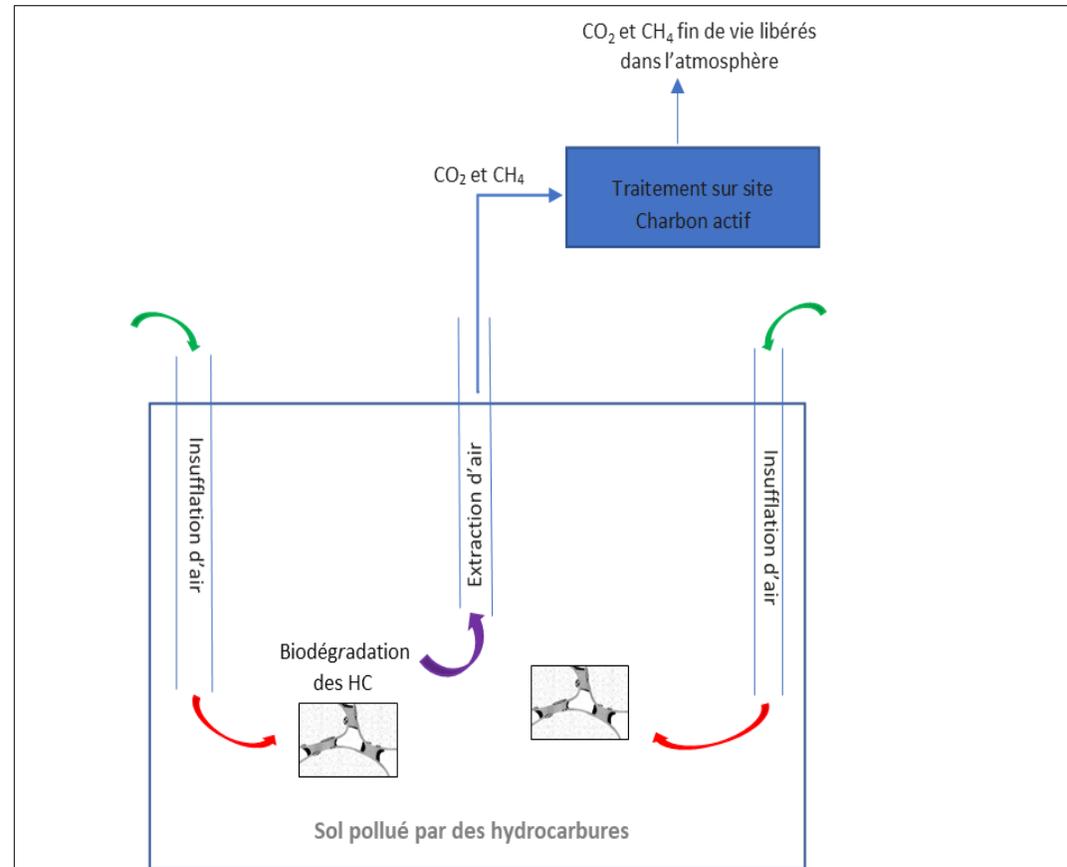
- **Modélisation du système & hypothèses**

- périmètre spatial : zone pilote (diamètre 10 m, profondeur 5 m)
- périmètre temporel : phase de Venting + phase de Bioventing

Processus de volatilisation

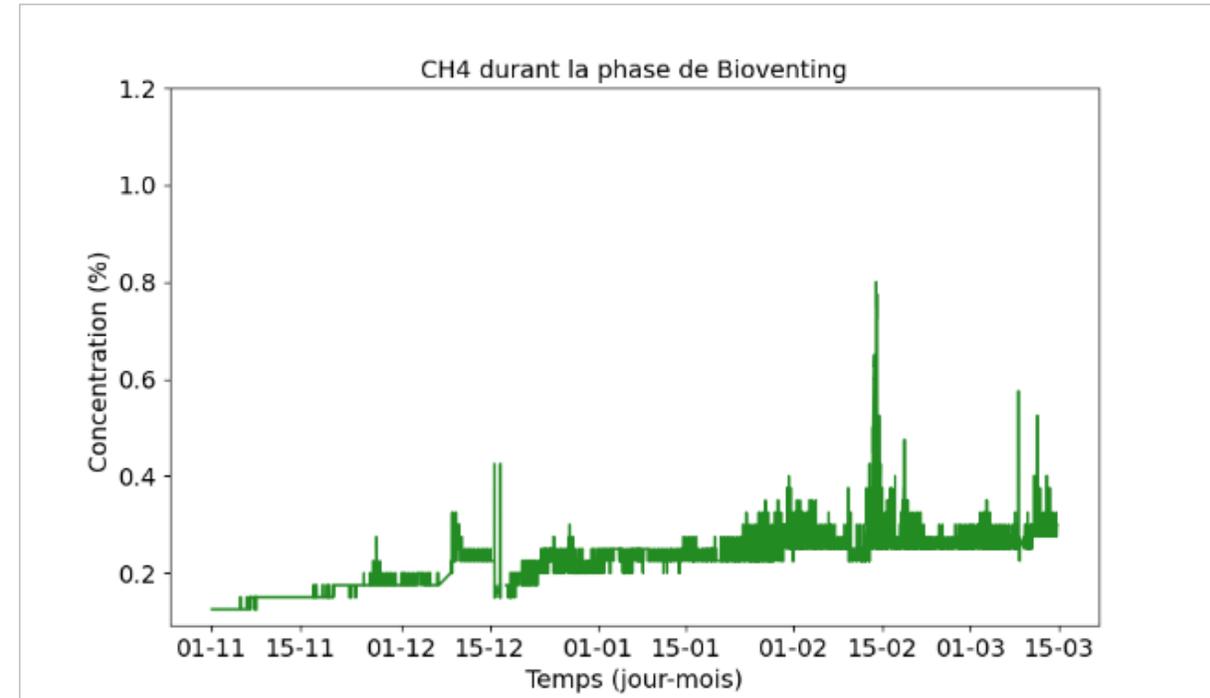
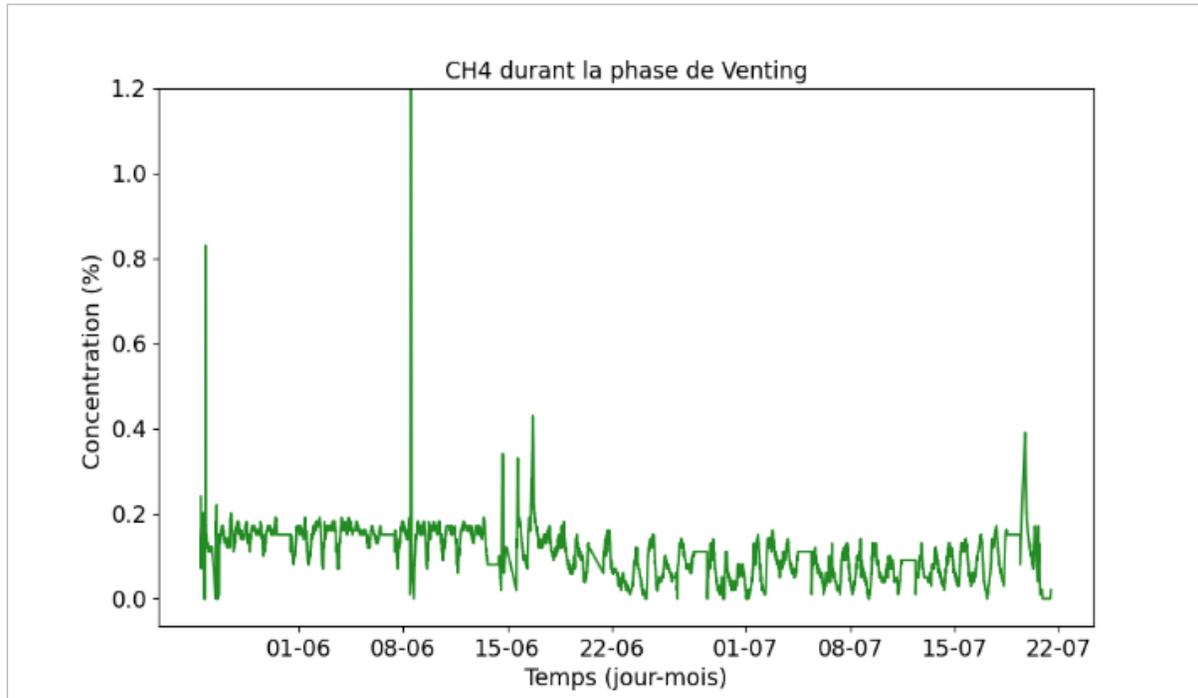


Processus de biodégradation



# 5. Bilan émissions GES

- **Modélisation du système & hypothèses**
  - Concentrations en CH<sub>4</sub>



# 5. Bilan émissions GES

- **Modélisation du système & hypothèses**

- Principales étapes

- Traitement sur site
- Fabrication du charbon actif
- Transport du charbon actif
- Régénération du charbon actif (hypothèse retenue : 90% du charbon actif est régénéré)
- Consommation d'électricité pour le fonctionnement du pilote

- Quantités de polluants et de gaz liées à l'essai pilote

<b>Phase</b>	<b>Venting</b>	<b>Bioventing</b>
Quantité de polluant traitée [kg]	545	400
Dont quantité traitée par volatilisation [kg]	130	15
Dont quantité traitée par biodégradation [kg]	415	385
Quantité de CO <sub>2</sub> générée par biodégradation des HC dans le sol et sortie du système par le puits d'extraction [kg]	1 156	1 072
Quantité de CH <sub>4</sub> générée par biodégradation des HC dans le sol et sortie du système par le puits d'extraction [kg]	49	46
Durée [j]	90	150

# 5. Bilan émissions GES

- **Modélisation du système & hypothèses**

- Autres hypothèses retenues

- Distance de transport pour la livraison du charbon actif fixée à 200 km
- Consommation de charbon actif considérée pour une saturation de 10%
- Le charbon actif traite 100% des hydrocarbures, 0% du CO<sub>2</sub> et 0% du CH<sub>4</sub>
- Un ratio massique CO<sub>2</sub>/HC de 3,12 pour la dégradation des HC lors de la désorption du charbon actif
- Un ratio massique CO<sub>2</sub>/HC de 2,78 pour la biodégradation aérobie des HC

Paramètre	Valeur	Unité	Source
Emissions pour la production de charbon actif neuf	7.0	<u>kgCO2eq</u> / kg charbon	Fournisseur <sup>2</sup>
Emissions pour la production de charbon actif régénéré	1.58	<u>kgCO2eq</u> / kg charbon	Fournisseur <sup>3</sup>
Taux de charbon actif régénéré	90	%	Fournisseur
Emissions pour le transport de charbon actif	0.14	<u>kgCO2eq</u> / t.km	<u>Ecoinvent</u>
Emissions pour la consommation électrique	64	<u>gCO2eq</u> / kWh	INIES
Distance de transport pour la livraison de charbon actif	200	<u>km</u>	GINGER BURGEAP
Emission de CO <sub>2</sub> en fin de vie des hydrocarbures (après désorption depuis le charbon actif)	3,12	<u>kgCO2</u> / kg	GINGER BURGEAP
PRG CH <sub>4</sub> à 100 ans <sup>4</sup>	27,9	-	GIEC

# 5. Bilan émissions GES

- Résultats - Unité fonctionnelle : toute la durée de l'essai

	Phase	Venting	Bioventing	Total	Unité
Inventaires des principales quantités mises en jeu	Quantité totale de polluant traitée	545	400	945	kg
	Quantité de polluant traitée par biodégradation	415	385	800	kg
	Quantité de polluant traitée par volatilisation	130	15	145	kg
	Charbon actif	1 300	150	1450	kg
	Quantité de CO <sub>2</sub> générée par la biodégradation des HC dans le sol et sortie du système par le puits d'extraction	1 156	1 072	2 228	kg
	Quantité de CH <sub>4</sub> générée par la biodégradation des HC dans le sol et sortie du système par le puits d'extraction	49	46	95	kg
	Quantité de CO <sub>2</sub> générée après régénération du charbon actif	406	47	452	kg
	Consommation d'électricité	2 160	380	2 540	kWh
	Durée	90	150	240	j
Emissions de GES	Production charbon actif	2 864	330	3 194	kgCO <sub>2</sub> eq
	Transport charbon actif	36	4	40	kgCO <sub>2</sub> eq
	CO <sub>2</sub> généré par biodégradation	1 156	1 072	2 228	kgCO <sub>2</sub> eq
	CH <sub>4</sub> généré par biodégradation	1 357	1 282	2 640	kgCO <sub>2</sub> eq
	CO <sub>2</sub> généré après régénération du charbon actif	406	47	452	kgCO <sub>2</sub> eq
	Electricité	138	24	163	kgCO <sub>2</sub> eq
	<b>Total</b>	<b>5 957</b>	<b>2760</b>	<b>8 717</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>

% Venting / Bioventing # 2.2

# 5. Bilan émissions GES

- Résultats - Unité fonctionnelle : 1000 kg de HC traités Venting / Bioventing

	Phase	Venting	Bioventing	Unité
Inventaires des principales quantités mises en jeu	Quantité de polluant traitée	1 000	1 000	kg
	Quantité de polluant traitée par biodégradation	761	963	kg
	Quantité de polluant traitée par volatilisation	239	38	kg
	Quantité de charbon actif utilisée	2 385	375	kg
	Quantité de CO <sub>2</sub> générée par biodégradation des HC dans le sol et sortie du système par le puits d'extraction	2 121	2 680	kg
	Quantité de CH <sub>4</sub> générée par biodégradation des HC dans le sol et sortie du système par le puits d'extraction	89	115	kg
	Quantité de CO <sub>2</sub> générée après régénération du charbon actif	744	117	kg
	Consommation d'électricité	3964	950	kWh
	Durée	165	375	j
Emissions de GES	Production de charbon actif	5 255	826	kgCO <sub>2</sub> eq
	Transport de charbon actif	65	10	kgCO <sub>2</sub> eq
	CO <sub>2</sub> généré par biodégradation	2 121	2 680	kgCO <sub>2</sub> eq
	CH <sub>4</sub> généré par biodégradation	2 491	3 206	kgCO <sub>2</sub> eq
	CO <sub>2</sub> généré après régénération du charbon actif	744	117	kgCO <sub>2</sub> eq
	Electricité	254	61	kgCO <sub>2</sub> eq
	<b>Total</b>		<b>10 930</b>	<b>6 900</b>

% Venting / Bioventing # 1.6

# 5. Bilan émissions GES

- Résultats - Unité fonctionnelle : 1000 kg de HC traités Volatilisation / Biodégradation

	Processus	Volatilisation	Biodégradation	Unité
Inventaires des principales quantités mises en jeu	Quantité de polluant traitée	1 000	1 000	kg
	Quantité de polluant traitée par biodégradation	0	1 000	kg
	Quantité de polluant traitée par volatilisation	1 000	0	kg
	Quantité de charbon actif utilisée	10 000	0	kg
	Quantité de CO <sub>2</sub> générée par biodégradation des HC dans le sol et sortie du système par le puits d'extraction	0	2 784	kg
	Quantité de CH <sub>4</sub> générée par la biodégradation des HC dans le sol et sortie du système par le puits d'extraction	0	119	kg
	Quantité de CO <sub>2</sub> générée après régénération du charbon actif	3 120	0	kg
	Consommation d'électricité	16 617	987	kWh
	Durée du traitement	692	408	j
Emissions de GES	Production du charbon actif	22 030	0	kgCO <sub>2</sub> eq
	Transport du charbon actif	274	0	kgCO <sub>2</sub> eq
	CO <sub>2</sub> généré par biodégradation	0	2 784	kgCO <sub>2</sub> eq
	CH <sub>4</sub> généré par biodégradation		3 331	kgCO <sub>2</sub> eq
	CO <sub>2</sub> généré après régénération du charbon actif	3120	0	kgCO <sub>2</sub> eq
	Electricité	1 063	63	kgCO <sub>2</sub> eq
	<b>Total</b>	<b>26 487</b>	<b>6 178</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq</b>

% Volatilisation / Biodégradation # 4.3

<https://www.ginger-burgeap.com/sobiove/>

<https://www.valgo.com/> (disponible prochainement)

<https://librairie.ademe.fr/> (disponible prochainement)

[jm.come@groupeginger.com](mailto:jm.come@groupeginger.com)

[laurent.thannberger@valgo.com](mailto:laurent.thannberger@valgo.com)



## PROJET SOBIOVE

---

Sécurisation des Opérations de Bioventing par Evaluation  
des cinétiques d'échanges et de biodégradation

---

**GUIDE TECHNIQUE**  
Recommandations issues des résultats du projet

08/2023

