



AIRCOVERY



23 Juin 2022



Thème: Sols et enjeux climatiques

ETUDE DE L'EMPREINTE CARBONE D'UN CHANTIER DE DEPOLLUTION DES SOLS – SOURCE D'OPTIMISATION PAR LA REGENERATION DE CHARBON ACTIF SUR SITE

Introduction

Dans un monde soumis au dérèglement climatique ainsi qu'à la raréfaction des ressources (énergétiques et matières premières), les émissions de gaz à effet de serre sont scrutées à la loupe et représentent un challenge quotidien. Plus qu'ailleurs, ces émissions de GES doivent être l'enjeu principal de notre secteur des Sites et Sols Pollués.

Plusieurs méthodologies existent et sont disponibles afin de quantifier les émissions de gaz à effet de serre pour une activité précise. Pour les activités de dépollution, il en est autrement. Chaque opération revêt un caractère unique (projet immobilier / contexte industriel / friche) qui nécessiterait une analyse méticuleuse et couteuse après coup.

Nous proposons de réaliser un bilan des émissions de gaz à effet de serre pour un projet type afin de déterminer les voies d'optimisation potentielles.

Dans un premier temps, les grands principes de la méthodologie mise en œuvre seront rappelés ainsi que les sources utilisées pour estimer les grandeurs d'émissions carbone.

La démarche simplifiée sera ensuite appliquée à un chantier de désorption thermique in-situ supposé énergivore. Le périmètre de l'étude sera précisé et l'évaluation du bilan carbone détaillée et interprétée. La démarche sera ensuite rapidement réitérée à périmètre équivalent avec de l'excavation, du venting in-situ et du traitement de la pollution par biopile ventilée.

Enfin le sujet sera élargi de manière pragmatique sur les possibles voies de diminution des émissions de gaz à effet de serre sur un chantier de dépollution et présentera la solution ayant recours à de la régénération de charbon actif sur site.



METHODOLOGIE D'EVALUATION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE (GES)

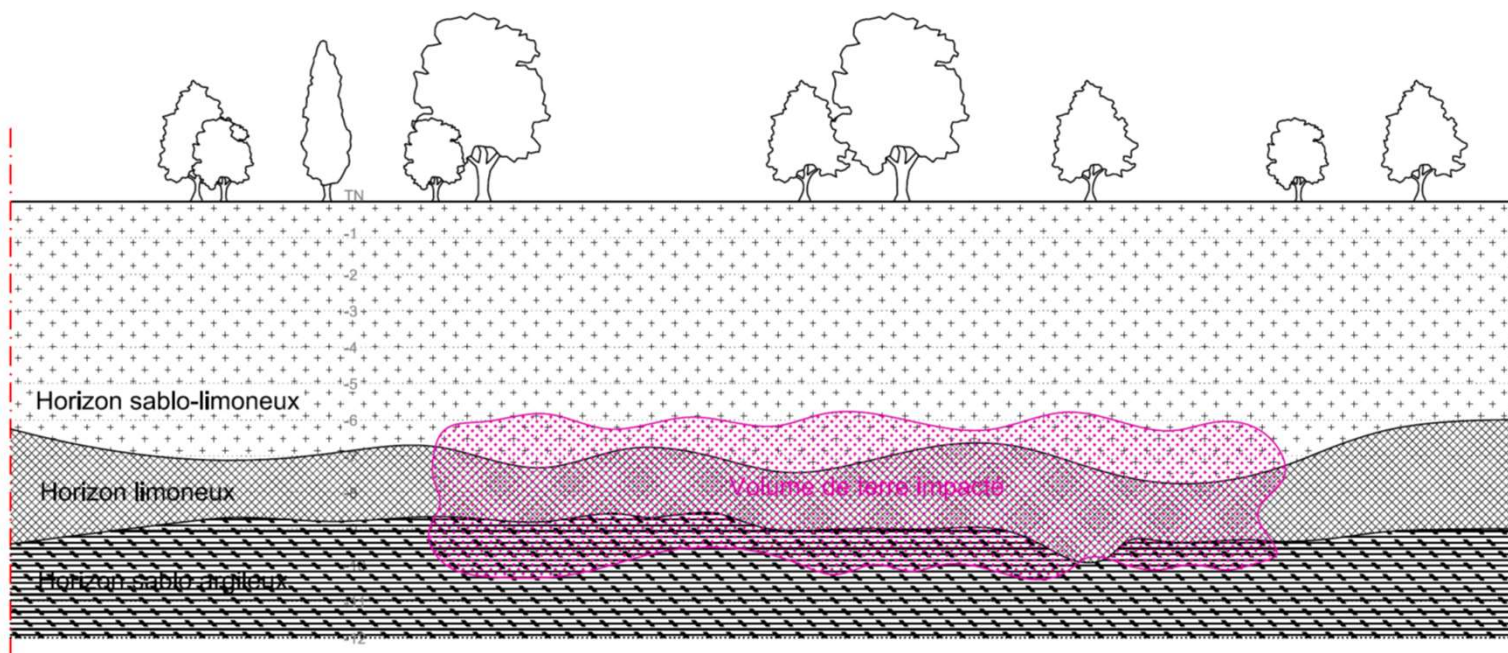
EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

METHODOLOGIE

	Catégorie d'émission	N°	Postes d'émissions	Exemple de sources d'émissions
Catégorie 1	Emissions directes de GES	1	Emissions directes des sources fixes de combustion	Combustion d'énergie de sources fixes
		2	Emissions directes des sources mobiles à moteur thermique	Combustion de carburant des sources mobiles
		3	Emissions directes des procédés hors énergie	Procédés industriels non liés à une combustion pouvant provenir de décarbonatation, de réactions chimiques, etc.
		4	Emissions directes fugitives	Fuites de fluides frigorigènes, bétail, fertilisation azotée, traitement de déchets organiques, etc.
		5	Emissions issues de la biomasse (sols et forêts)	Biomasse liée aux activités sur le sol, les zones humides ou l'exploitation des forêts.
Catégorie 2	Emissions indirectes associées à l'énergie	6	Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité	Production de l'électricité
		7	Emissions indirectes liées à la consommation de vapeur, chaleur ou froid	Production de vapeur, chaleur et froid
Catégorie 3	Autres émissions indirectes de GES*	8	Emissions liées à l'énergie non incluse dans les catégories « émissions directes de GES » et « émissions de GES à énergie indirectes »	- Extraction, production, et transport des combustibles consommés par la PM - Emissions associées au transport et à la distribution d'électricité, de vapeur, chaleur et froid consommé par la PM - Extraction, production, et transport des combustibles consommés lors de la production d'électricité, de vapeur, de chaleur et de froid consommée par la PM
		9	Achats de produits ou services	- Extraction et production des intrants matériels et immatériels de la PM qui ne sont pas inclus dans les autres postes. - Sous traitance
		10	Immobilisations de biens	Extraction et production des biens corporels et incorporels immobilisés par la PM
		11	Déchets	Transport et traitement des déchets de la PM
		12	Transport de marchandise amont	Transport de marchandise dont le coût est supporté par la PM
		13	Déplacements professionnels	Transports des employés par des moyens n'appartenant pas à la PM
		14	Actifs en leasing amont	Actifs en leasing tel que les consommations d'énergie et la fabrication des équipements en tant que tel
		15	Investissements	Sources liées aux projets ou activités liées aux investissements financiers
		16	Transport des visiteurs et des clients	Consommation d'énergie liés au transport des visiteurs de la PM qu'ils soient clients, fournisseurs ou autre.
		17	Transport des marchandises aval	Transport et à la distribution dont le coût n'est pas supporté par la PM
		18	Utilisation des produits vendus	Consommation d'énergie
		19	Fin de vie des produits vendus	Traitement de la fin de vie des produits
		20	Franchise aval	Consommation d'énergie des franchisés
		21	Leasing aval	Consommation d'énergie des actifs en bail
		22	Déplacement domicile-travail et télétravail	Déplacement domicile-travail et télétravail
		23	Autres émissions indirectes	Emissions indirectes non couvertes par les postes précédemment cités dans les catégories 7 à 23

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

APPLICATION A UN CHANTIER DE DEPOLLUTION

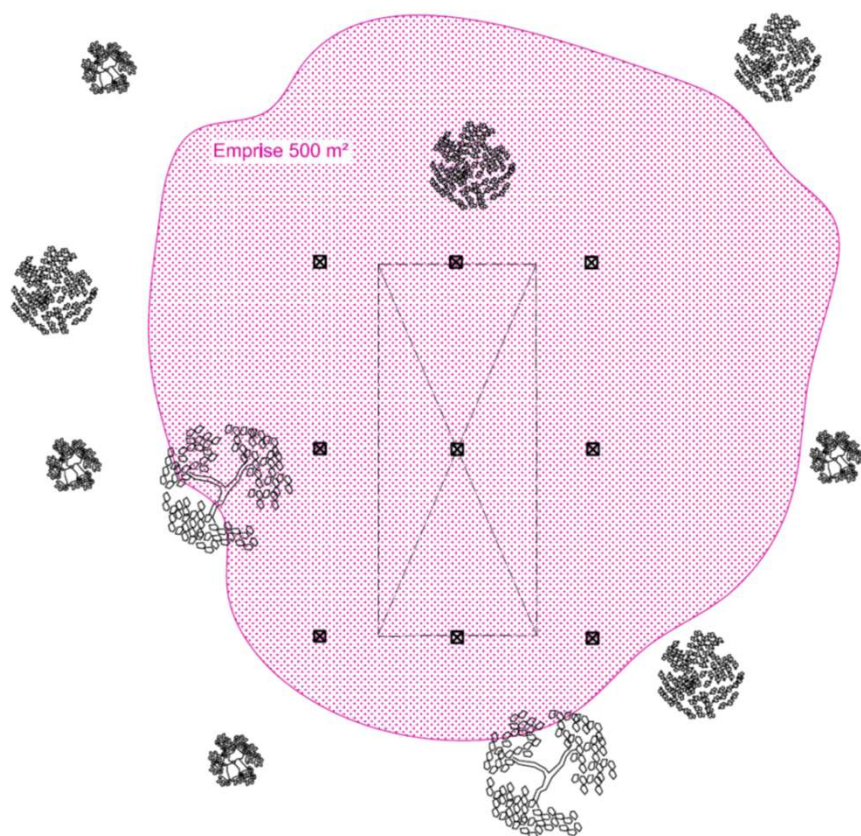


DONNEES

- Impact sur des solvants chlorés, hors nappe, à -8m/TN
- Volume de 2000m³
- Epaisseur moyenne 4m (-10m/TN à -6m/TN)
- Surface 500m²

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

APPLICATION A UN CHANTIER DE DEPOLLUTION

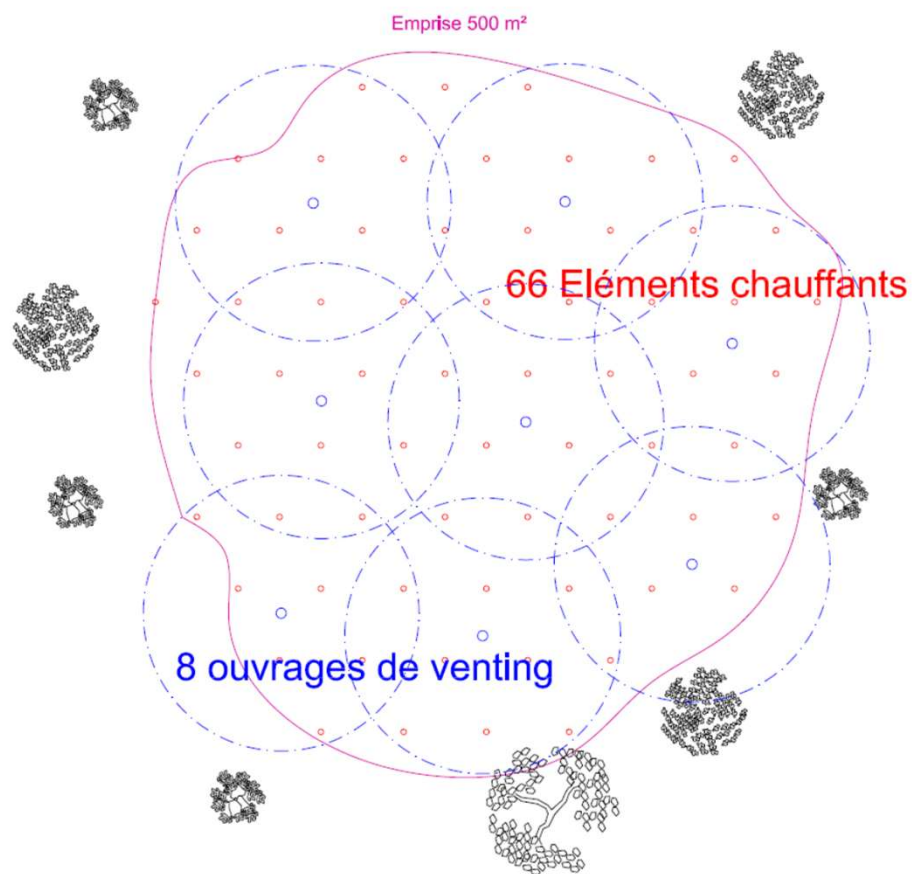


DONNEES

- Impact sur des solvants chlorés, hors nappe, à -8m/TN
- Volume de 2000m³
- Epaisseur moyenne 4m (-10m/TN à -6m/TN)
- Surface 500m²

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR DESORPTION THERMIQUE



DONNEES

- 66 ouvrages chauffants
température cible 95°C
- 8 ouvrages de venting
- 9 mois de traitement
- 95% d'efficacité
- Présence de personnel
hebdomadaire

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR DESORPTION THERMIQUE

Catégorie d'émission	N°	Postes d'émissions	Sources d'émissions du chantier	Emission de GES unitaire	Emission de GES totale
Emissions directes de GES	2	Emissions directes des sources mobiles à moteur thermique	Livraison du matériel, machines de forage, moyens de levage (30 tonnes sur 250 km)	0,17 kg eq CO2/ tonne/km	1275 kg eq CO2
Emissions indirectes associées à l'énergie	6	Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité	Consommation électrique : 800 MWh	0,082 kg eq CO2/ kWh	65600 kg eq CO2
Autres émissions indirectes de GES*	8	Emissions liées à l'énergie non incluse dans les catégories « émissions directes de GES » et « émissions de GES à énergie indirectes »	Fourniture du charbon actif (63 tonnes % saturation à 15% en masse)	1 kg eq CO2/kg pour du charbon actif recyclé 11 kg eq CO2/kg pour du charbon actif neuf	63000 kg eq CO2
	9	Achats de produits ou services	Tubes de forage (2 tonnes), réseaux d'extraction(1 tonne), éléments chauffants (66), câbles électriques (3km), sondes de mesure (20), sous traitance de forage	Acier - fer : 1432 kg eq CO2 /tonne, PEHD : 1920 kg eq CO2 /tonne, Element chauffant : 50 kg eqCO2/unité, Sondes de mesure 3 kg eq CO2/unité	8144 kg eq CO2
	10	Immobilisations de biens	Immobilisation de filtre à charbon actif, skid d'extraction, système de refroidissement des gaz, système de pilotage (régulation de chauffage).	Amortissement des filtres, container, systèmes de refroidissement	2000 kg eq CO2
	11	Déchets	Charbon actif (63 tonnes + 9,5 tonnes de produit extrait=72,8 tonnes), déchets de chantier (5 tonnes)	Incinération non combustible : 23 kg eq CO2/tonnes	1702 kg eq CO2
	12	Transport de marchandise amont	Transport des filtres à charbon actif / 15 tonnes (5 rotations) à 100 km	0,117 kg eq CO2/ tonne/km	878 kg eq CO2
	13	Déplacements professionnels	transport de 2 personnes en moyenne (installation/suivi) toutes les semaines sur 100 km Aller/retour durant 9 mois	0,2 kg eq CO2/ km	1440 kg eq CO2
				Total :	144 t eq CO2

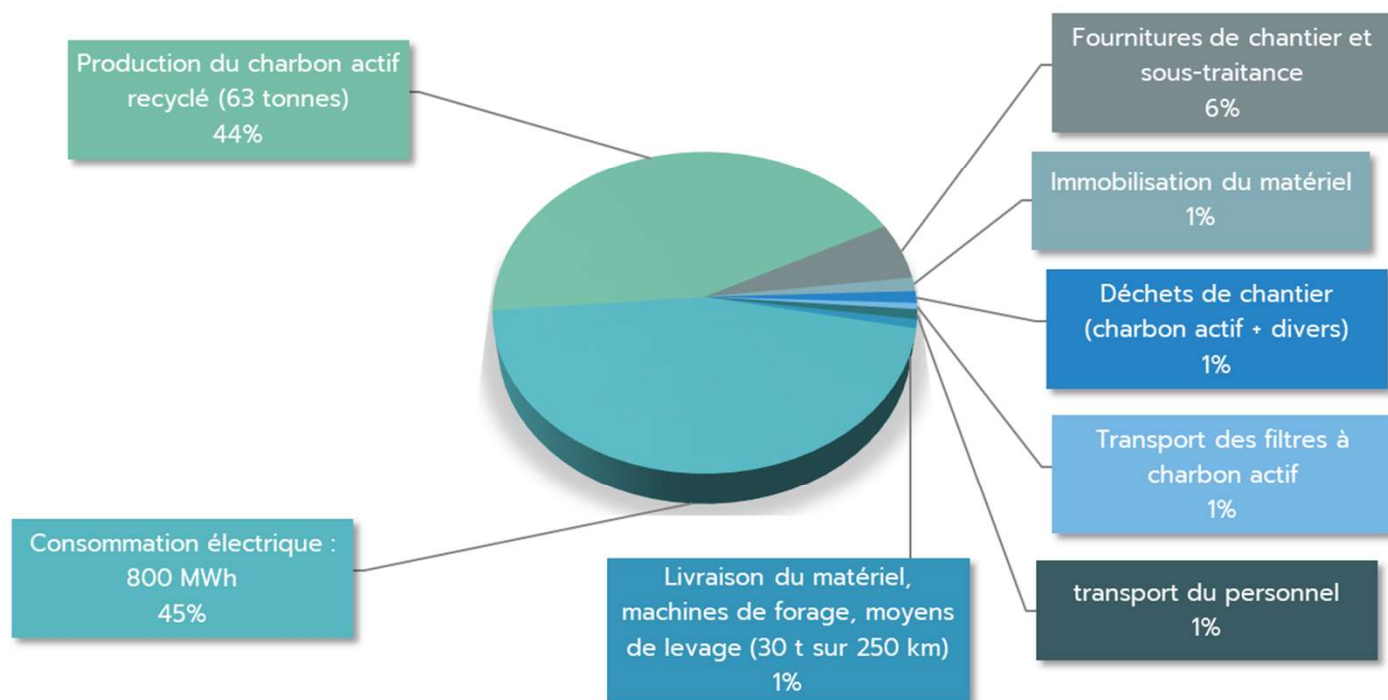
DONNEES

- 66 ouvrages chauffants température cible 95°C
- 8 ouvrages de venting
- 9 mois de traitement
- 95% d'efficacité
- Présence de personnel hebdomadaire

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR DESORPTION THERMIQUE

Emission de GES totale
Désorption thermique



DONNEES

- 66 ouvrages chauffants température cible 95°C
- 8 ouvrages de venting
- 9 mois de traitement
- 95% d'efficacité
- Présence de personnel hebdomadaire

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR EXCAVATION

Volume de
découverte :
 6150m^3 (11070t
d=1,8)

Volume
d'excavation :
 2000m^3 (3600 t
d=1,8)

Volume de remblais
du site : 6150m^3
Volume de remblais
d'apport : 2000m^3

DONNEES

- Terrassement talus 1H/2V
- Opération minimaliste
Sans blindage;
Sans tente;
Sans captage des
émissions fugitives
- Evacuation hors site
à 150 km
- Durée 3 mois
- Présence quotidienne

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR EXCAVATION

Catégorie d'émission	N°	Postes d'émissions	Sources d'émissions du chantier	Emission de GES unitaire	Emission de GES totale
Emissions directes de GES	2	Emissions directes des sources mobiles à moteur thermique	Livraison du matériel (2 pelles 35 tonnes, 1 dumper, 1 compacteur) sur 30 km. Consommation des engins : pelle=200 l /jour *engin (150 jour*engin) Dumper=100 l /jour*engin (75 jour*engin) Compacteur = 75 litres/jour*engin (15 jour*engin)	0,17 kg eq CO2/ tonne/km pour le transfert 0,8 kg eq CO2/kg de carburant consommé	31563 kg eq CO2
Emissions indirectes associées à l'énergie	6	Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité	Consommation électrique : 720 kWh	0,05 kg eq CO2/ kWh	360 kg eq CO2
Autres émissions indirectes de GES*	9	Achats de produits ou services	Baches, géotextile, drains	PEHD : 1920 kg eq CO2 /tonne	1920 kg eq CO2
	10	Immobilisations de biens	Immobilisation engins, base vie	amortissement des filtres, container, systèmes de refroidissement	500 kg eq CO2
	11	Déchets	3600 tonnes de terres polluées	Traitement déchets minéraux en centre de stockage : 33 kg eq CO2/tonne	118800 kg eq CO2
	12	Transport de marchandise amont	Transport des terres polluées (3600 t) à 150 km, apport de matériaux de remblais (3600t) à 30 km.	0,117 kg eq CO2/ tonne/km	75816 kg eq CO2
	13	Déplacements professionnels	transport de 4 personnes en moyenne (encadrement, conducteurs) les jours ouvrés durant 3 mois à 100 km en moyenne	0,2 kg eq CO2/ km	6000 kg eq CO2
				Total :	235 t eq CO2

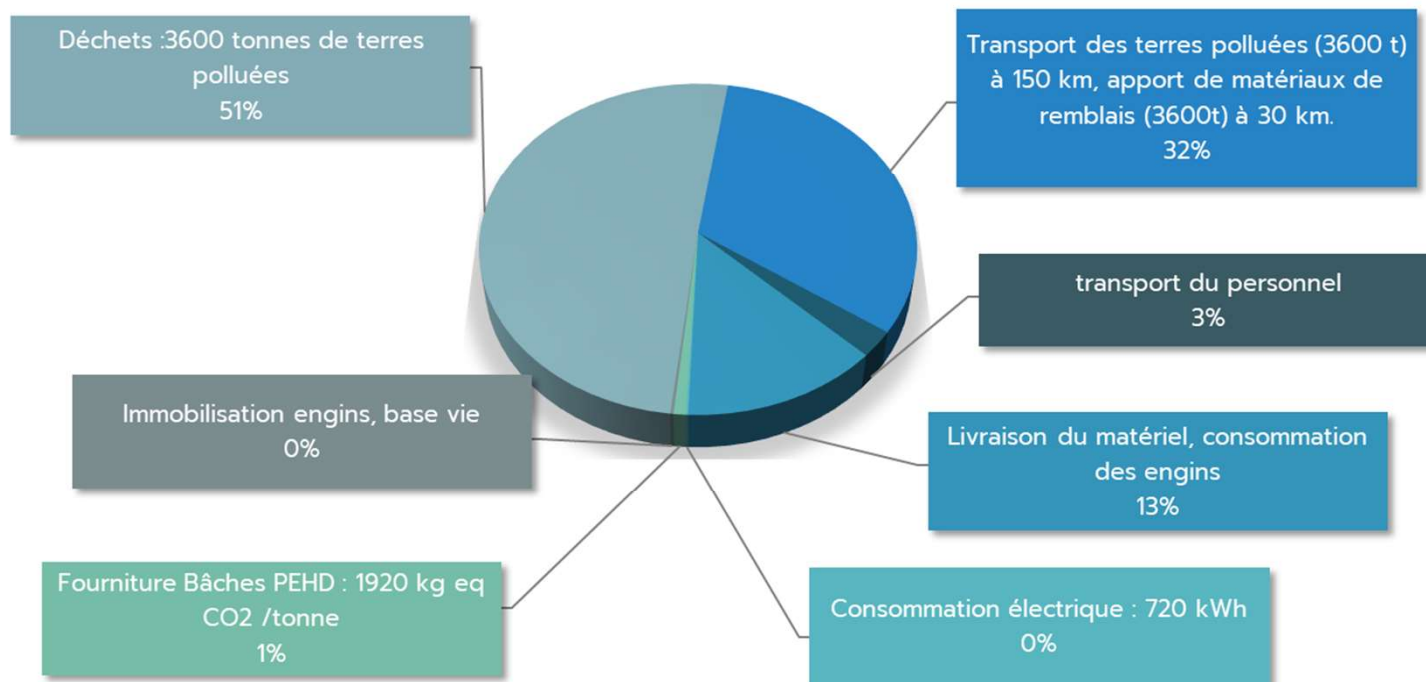
DONNEES

- Terrassement talus 1H/2V
- Opération minimaliste
Sans blindage;
Sans tente;
Sans captage des émissions fugitives
- Evacuation hors site à 150 km
- Durée 3 mois
- Présence quotidienne

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR DESORPTION THERMIQUE

Emission de GES totale
Excavation

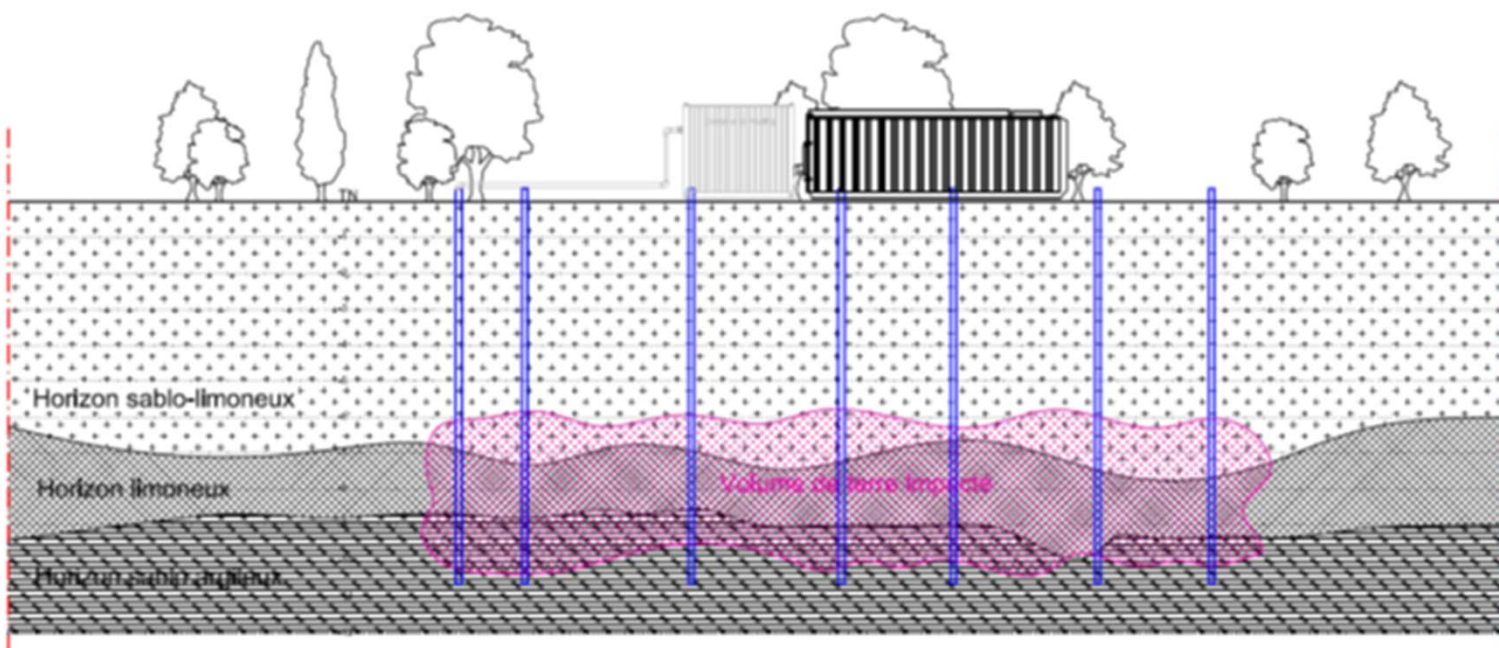


DONNEES

- Terrassement talus 1H/2V
- Opération minimaliste
Sans blindage;
Sans tente;
Sans captage des émissions fugitives
- Evacuation hors site à 150 km
- Durée 3 mois
- Présence quotidienne

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR VENTING



DONNEES

- 80 ml de forage
- 78 MWh d'électricité
- Durée 3 ans
- Extraction de 6 tonnes de pollution
- Suivi de traitement mensuel

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR VENTING

Catégorie d'émission	N°	Postes d'émissions	Sources d'émissions du chantier	Emission de GES unitaire	Emission de GES totale
Emissions directes de GES	2	Emissions directes des sources mobiles à moteur thermique	Livraison du matériel, machines de forage (10 tonnes sur 250 km)	0,17 kg eq CO2/ tonne/km	425 kg eq CO2
Emissions indirectes associées à l'énergie	6	Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité	Consommation électrique : 78 MWh	0,082 kg eq CO2/ kWh	6396 kg eq CO2
Autres émissions indirectes de GES*	8	Emissions liées à l'énergie non incluse dans les catégories « émissions directes de GES » et « émissions de GES à énergie indirectes »	Fourniture du charbon actif (40 tonnes), 15% de saturation en masse	1 kg eq CO2/kg pour du charbon actif recyclé 11 kg eq CO2/kg pour du charbon actif neuf	40000 kg eq CO2
	9	Achats de produits ou services	réseaux d'extraction(0,3 tonne), câbles électriques (0,2km), sondes de mesure (5), sous traitance de forage	PEHD : 1920 kg eq CO2 /tonne	766 kg eq CO2
	10	Immobilisations de biens	Immobilisation de filtre à charbon actif, skid d'extraction.	amortissement des filtres, container	880 kg eq CO2
	11	Déchets	Charbon actif ((40 tonnes + 6 tonnes de produit extrait=46 tonnes), déchets de chantier (1 tonne)).	incinération non combustible : 23 kg eq CO2/tonnes	1081 kg eq CO2
	12	Transport de marchandise amont	Transport des filtres à charbon actif / 15 tonnes (3 rotations) à 100 km	0,117 kg eq CO2/ tonne/km	527 kg eq CO2
	13	Déplacements professionnels	transport de 1,5 personne en moyenne (installation/suivi) toutes les mois sur 100 km Aller/retour durant 36 mois	0,2 kg eq CO2/ km	1080 kg eq CO2
				Total :	51 t eq CO2

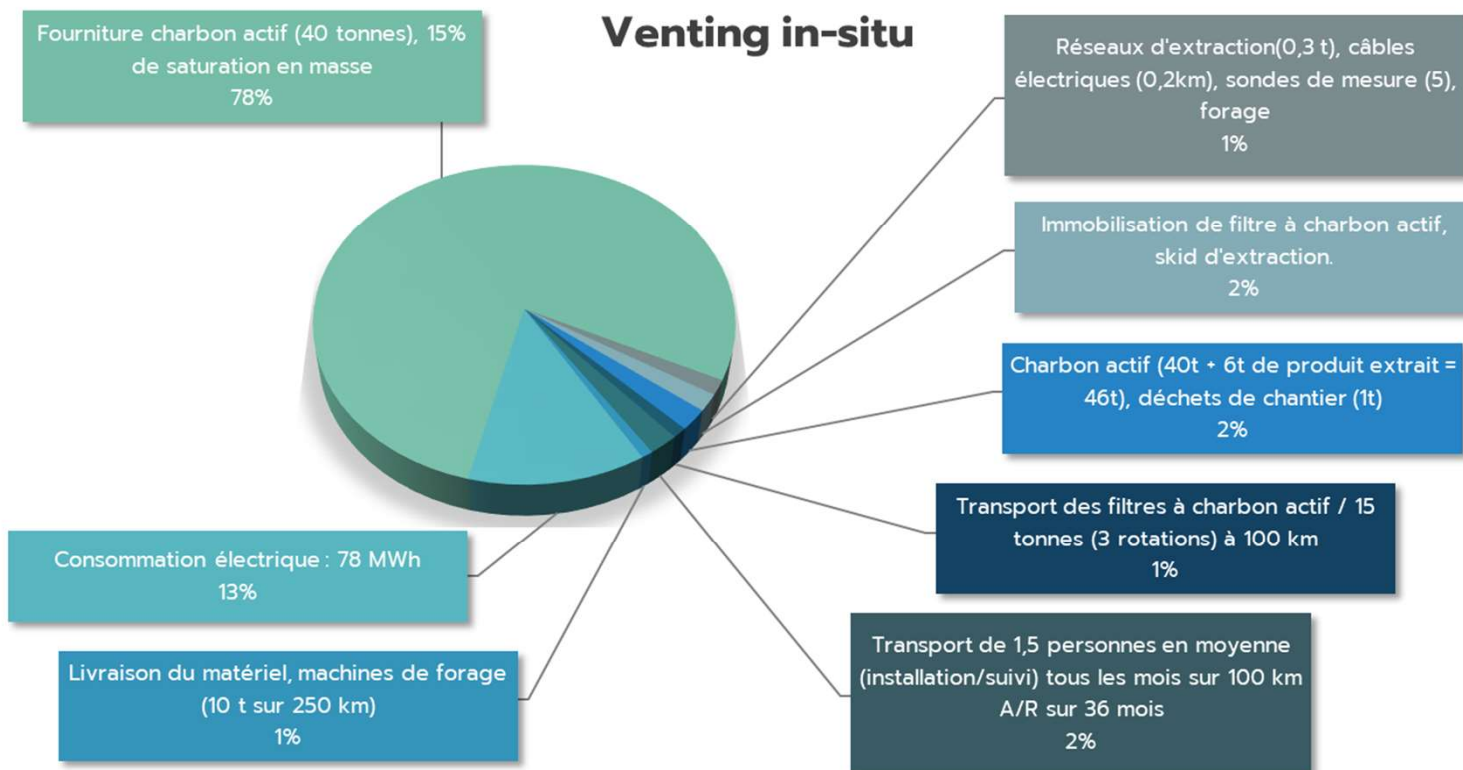
DONNEES

- 80 ml de forage
- 78 MWh d'électricité
- Durée 3 ans
- Extraction de 6 tonnes de pollution
- Suivi de traitement mensuel

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR VENTING

Emission de GES totale Venting in-situ



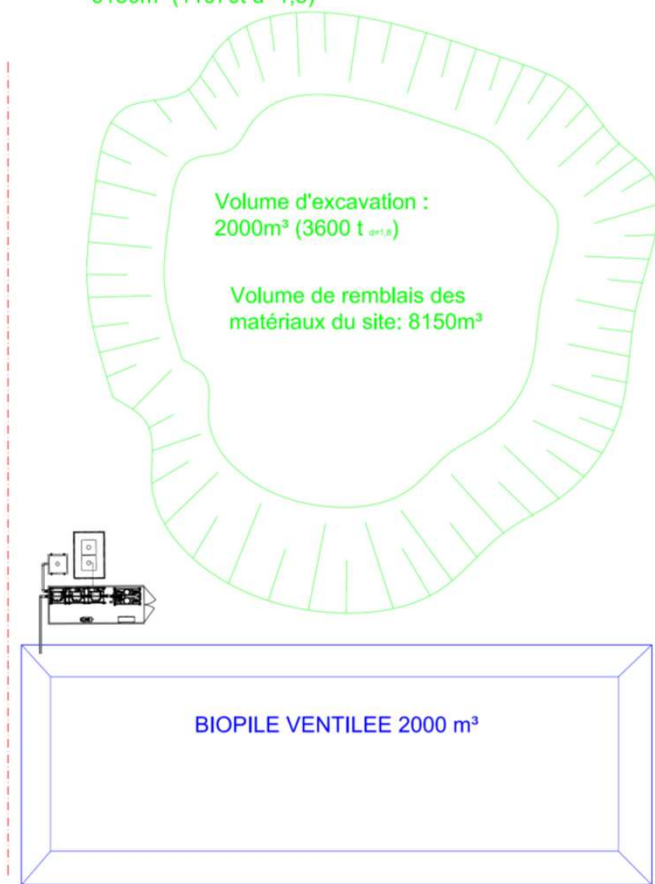
DONNEES

- 80 ml de forage
- 78 MWh d'électricité
- Durée 3 ans
- Extraction de 6 tonnes de pollution
- Suivi de traitement mensuel

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR PILE VENTILEE

Volume de découverte :
6150m³ (11070t d=1,8)



DONNEES

- 6150 m³ terrassées
- 2000 m³ de terres en traitement sur site
- 30 MWh d'électricité
- Durée 18 mois
- Extraction de 7,5 tonnes de pollution
- Suivi quotidien durant le terrassement / mensuel

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR PILE VENTILEE

Catégorie d'émission	N°	Postes d'émissions	Sources d'émissions du chantier	Emission de GES unitaire	Emission de GES totale
Emissions directes de GES	2	Emissions directes des sources mobiles à moteur thermique	Livraison du matériel (2 pelles 35 tonnes, 1 dumper, 1 compacteur) sur 30 km. Consommation des engins : pelle=200 l /jour *engin (175 jour*engin) Dumper=100 l /jour*engin (105 jour*engin) Compacteur = 75 litres/jour*engin (20 jour*engin)	0,17 kg eq CO2/ tonne/km	38263 kg eq CO2
Emissions indirectes associées à l'énergie	6	Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité	Consommation électrique : 30 MWh	0,082 kg eq CO2/ kWh	2460 kg eq CO2
Autres émissions indirectes de GES*	8	Emissions liées à l'énergie non incluse dans les catégories « émissions directes de GES » et « émissions de GES à énergie indirectes »	Fourniture du charbon actif (50 tonnes), 15% de saturation en masse	1 kg eq CO2/kg pour du charbon actif recyclé 11 kg eq CO2/kg pour du charbon actif neuf	50000 kg eq CO2
	9	Achats de produits ou services	Réseaux d'extraction (0,3 tonne), câbles électriques (0,2km), sondes de mesure (5), bâches, matériaux drainants	PEHD : 1920 kg eq CO2 /tonne	2000 kg eq CO2
	10	Immobilisations de biens	Immobilisation de filtres à charbon actif et skid d'extraction.	Amortissement des filtres, conteneurs, systèmes de refroidissement	500 kg eq CO2
	11	Déchets	Charbon actif (50 tonnes + 7,5 tonnes de produit extrait=46 tonnes), déchets de chantier (3 tonnes)	incinération non combustible : 23 kg eq CO2/tonnes	1392 kg eq CO2
	12	Transport de marchandise amont	Transport des filtres à charbon actif / 15 tonnes (4 rotations) à 100 km Transport de matériaux drainants pour pile ventilée (50 t à 30 km)	0,117 kg eq CO2/ tonne/km	878 kg eq CO2
	13	Déplacements professionnels	Transport 3 personnes en moyenne (installation / suivi) sur 100 km A/R tous les mois sur 18 mois	0,2 kg eq CO2/ km	1080 kg eq CO2
				Total :	97 t eq CO2

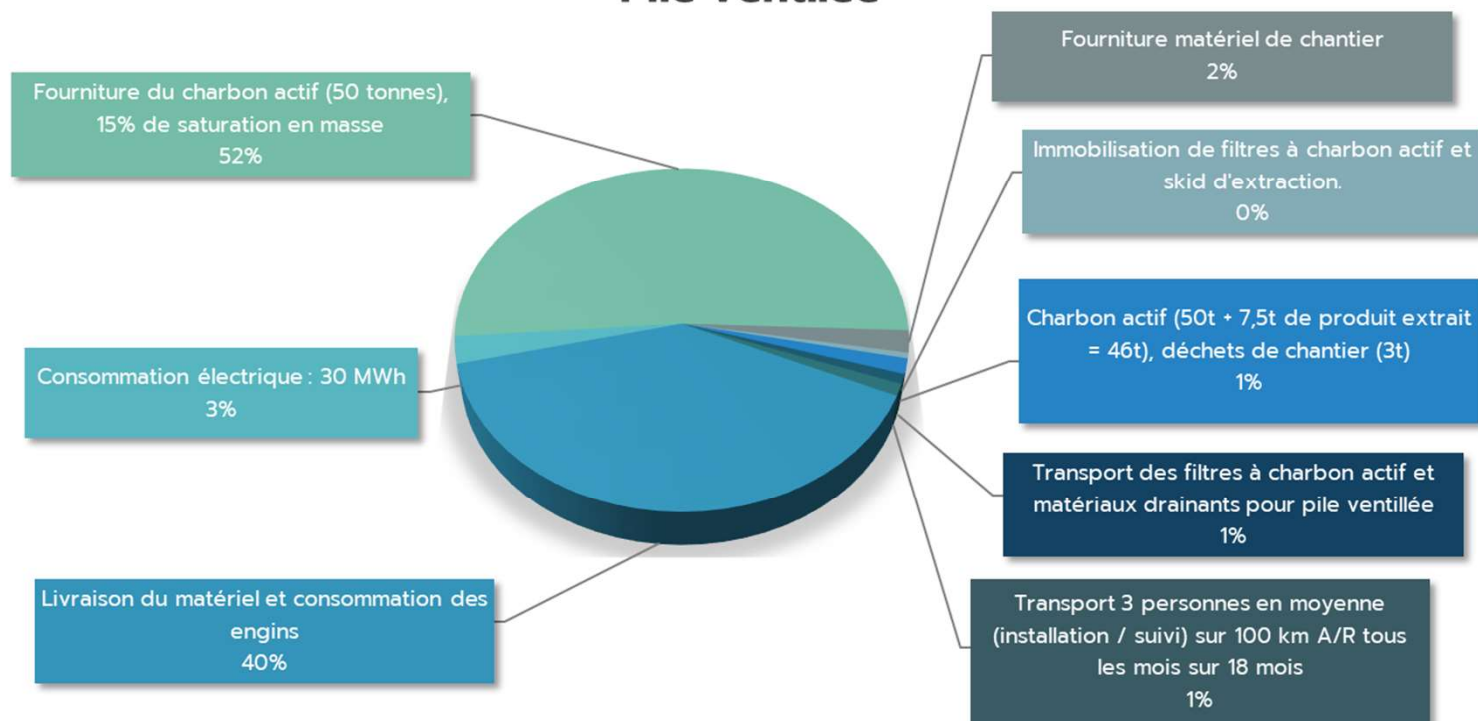
DONNEES

- 6150 m3 terrassées
- 2000 m3 de terres en traitement sur site
- 30 MWh d'électricité
- Durée 18 mois
- Extraction de 7,5 tonnes de pollution
- Suivi quotidien durant le terrassement / mensuel

EVALUATION DES EMISSIONS DE GES

TRAITEMENT PAR PILE VENTILEE

Emission de GES totale
Pile ventilée



DONNEES

- 6150 m3 terrassées
- 2000 m3 de terres en traitement sur site
- 30 MWh d'électricité
- Durée 18 mois
- Extraction de 7,5 tonnes de pollution
- Suivi quotidien durant le terrassement / mensuel

VOIES D' AMELIORATION



ANALYSE DU CYCLE DE VIE DU CHARBON ACTIF

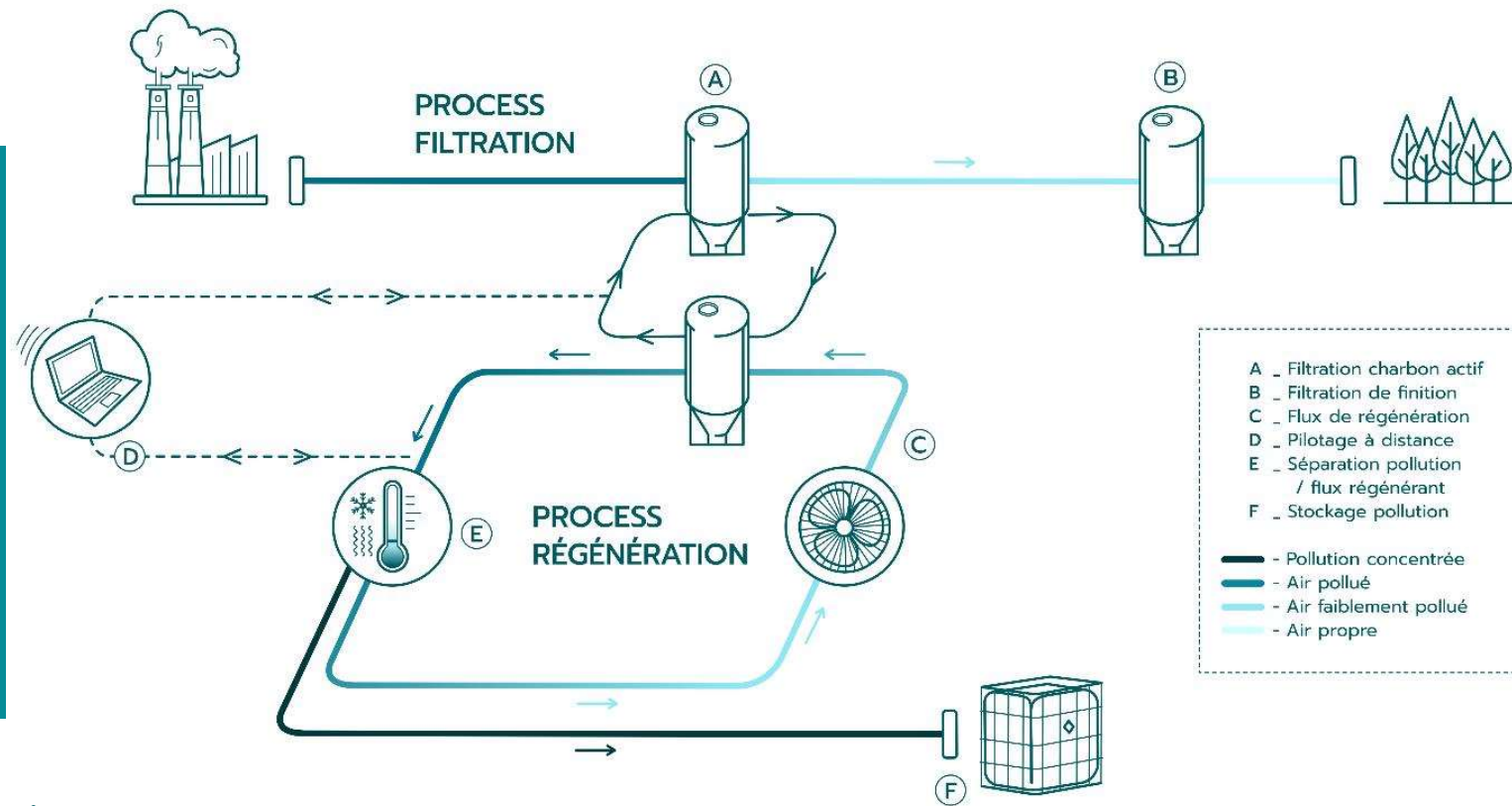
Charbon actif = + gros contributeur aux émissions de GES des chantiers dépollution

Catégorie	Charbon actif vierge	Charbon actif recyclé	Transport
Epuisement des ressources énergétiques	0.90 kgeqCO ₂ /kg	0.33 kgeqCO ₂ /kg	3.5 ^{E-2} kgeqCO ₂ /kg
Potentiel de réchauffement climatique	11.00 kgeqCO ₂ /kg	1.17 kgeqCO ₂ /kg	1.1 ^{E-1} kgeqCO ₂ /kg
Potentiel de création d'ozone photochimique	1.2 ^{E-3} kgeqCO ₂ /kg	5.4 ^{E-4} kgeqCO ₂ /kg	2.4 ^{E-4} kgeqCO ₂ /kg
Potentiel d'acidification	5.8 ^{E-3} kgeqCO ₂ /kg	1.8 ^{E-3} kgeqCO ₂ /kg	6.6 ^{E-4} kgeqCO ₂ /kg
Potentiel d'eutrophisation des terres	5.2 ^{E-4} kgeqCO ₂ /kg	3 ^{E-4} kgeqCO ₂ /kg	1.3 ^{E-4} kgeqCO ₂ /kg
Potentiel de toxicité humaine	4.2 ^{E-8} kgeqCO ₂ /kg	3.2 ^{E-8} kgeqCO ₂ /kg	1.5 ^{E-8} kgeqCO ₂ /kg
TOTAL :	11.9 kgeqCO₂/kg	1.47 kgeqCO₂/kg	0.146 kgeqCO₂/kg

Source : Bayer P., Heuer E., Karl U., Finkel M. Economical and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies. *Water Res.* 2005, 39, 1719–28.

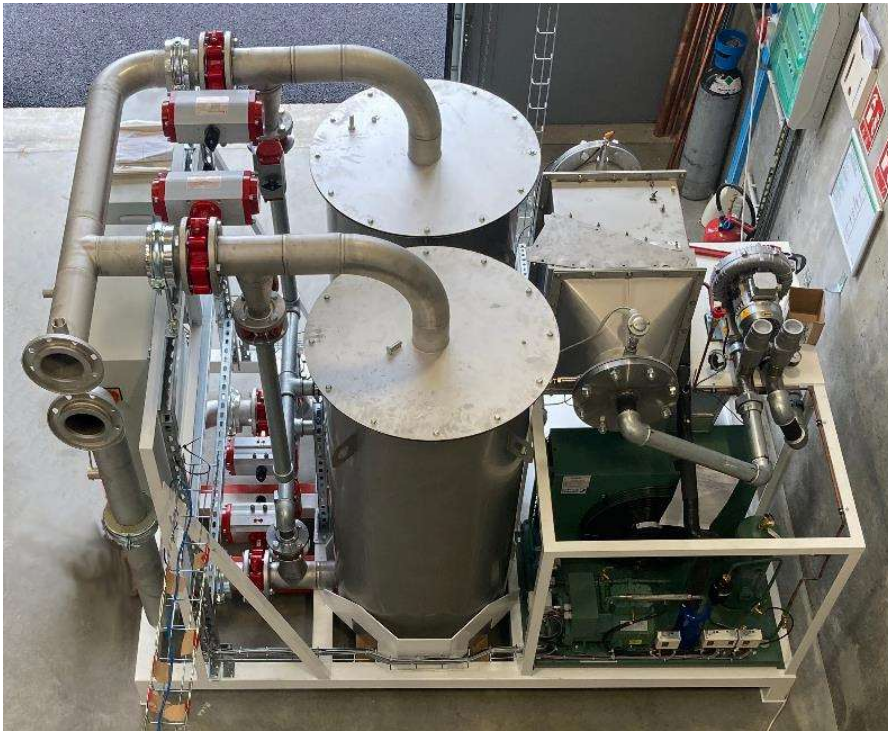
PROCEDE DE REGENERATION DE CHARBON ACTIF

- Régénération TSA
Temperature Swing Adsorption
= variation de température
Air chaud
Gaz inerte
Vapeur d'eau
- Régénération PSA
Pression Swing Adsorption
= variation de pression



- Régénération ≠ Réactivation

PROCEDE DE REGENERATION DE CHARBON ACTIF



PROCEDE DE REGENERATION DE CHARBON ACTIF



EMISSION DE GES AVEC CHARBON ACTIF

Type de chantier	Emissions de GES avec utilisation de CA neuf	Emissions de GES avec utilisation de CA recyclé
Désorption thermique in-situ	774 t eq CO ₂	144 t eq CO ₂
Excavation	235 t eq CO ₂	235 t eq CO ₂
Venting in-situ	451 t eq CO ₂	51 t eq CO ₂
Pile ventilée sur site	597 t eq CO ₂	97 t eq CO ₂

Recyclé vs neuf

Baisse émission GES de 80%.

Peut être moins : moindre capacité d'adsorption du CA recyclé vs CA neuf

Désorption électrique vs terrassement

Possible grâce à l'utilisation de dispositifs de filtration optimisés et énergie électrique française relativement peu carbonée

EMISSION DE GES AVEC REGENERATION

Type de chantier	Emissions de GES avec utilisation de CA neuf	Emissions de GES avec utilisation de CA recyclé	Emissions de GES avec régénération	Gain / CA neuf
Désorption thermique in-situ	774 t eq CO ₂	144 t eq CO ₂	96 t eq CO ₂	-87%
Excavation	235 t eq CO ₂	235 t eq CO ₂	S/O	S/O
Venting in-situ	451 t eq CO ₂	51 t eq CO ₂	26 t eq CO ₂	-94%
Pile ventilée sur site	597 t eq CO ₂	97 t eq CO ₂	63 t eq CO ₂	-89%

CONCLUSION

- Les techniques de réhabilitation in-situ présentent les plus faibles masses d'émission de GES. Cela ne tient pas tant à la préservation de l'état du site (végétation et structures), qu'aux quantités d'énergie moindres mises en jeux.
- La pertinence d'une opération de dépollution de site doit être évaluée selon son efficacité, son coût financier, son coût environnemental et son coût sociétal : ses émissions de GES. Selon l'urgence d'un projet et ses objectifs de réhabilitation il convient d'évaluer la technique la plus adaptée selon tous ces critères.

Dans quelle mesure la réglementation prend elle en compte les émissions de GES en dépollution ?

- Sur des chantiers avec des polluants adaptés et présentant des masses de pollution à extraire importantes, **la régénération sur site présente une alternative technologique intéressante au charbon actif – en euros et en CO₂**



1 route de Trevoux, 69250 NEUVILLE SUR SAONE

06 63 19 58 56

Guillaume.morel@aircovery.fr

www.aircovery.fr