

CONTEXTE en quelques chiffres:

326 millions de tonnes de déchets/an

produit en France (Ademe, 2017)

qu'il faut recycler, enfouir, retraiter ...

224 millions de tonnes: secteur de la construction

70 millions de tonnes :activités économiques (hors construction)

32 millions de tonnes pour les ménages.

CONTEXTE en quelques chiffres:



[Valorisation des biodéchets \(leclair.org\)](http://leclair.org) 2020

DMA: déchets ménagers et assimilés ordures ménagères résiduelles, déchets ménagers collectés séparément, déchets des activités économiques collectés par le service public, encombrants des ménages et déchets collectés en déchèterie, y compris les déblais et les gravats.

SOURCES OF MARINE LITTER



- 1 SEWAGE RELATED DEBRIS
- 2 LITTER DROPPED IN TOWNS AND CITIES
- 3 POORLY MANAGED BINS AND LANDFILL SITES NEAR THE COAST
- 4 LOST FISHING EQUIPMENT
- 5 SHIPPING MATERIALS LOST OVERBOARD
- 6 POORLY MANAGED INDUSTRIES
- 7 LITTER DROPPED AT THE BEACH

Sediment

Storage in Streambed



Valorisation des mâchefers issus de l'incinération des déchets ménagers sans risque pour l'environnement

E. BICCHI
2022

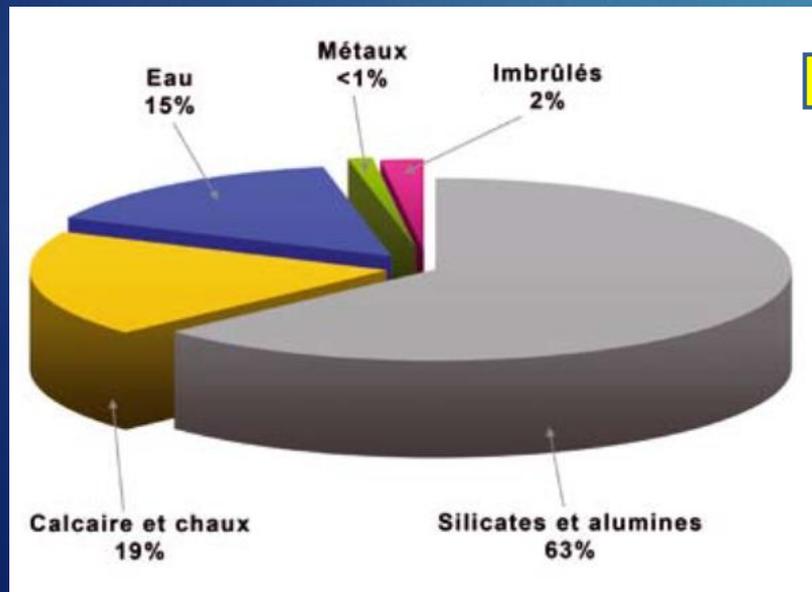


Que est ce qu'un mâchefer ?

Définition: résidu solide résultant de l'incinération des ordures ménagères et assimilés (**MIOM** *)

Mâchefer d'incinération de déchets non dangereux (**MIDND**), Art. 2, arrêté ministériel du 18 novembre 2011

Composée de:



grave de mâchefer

*mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

<https://www.youtube.com/watch?v=osy714TajOc&feature=youtu.be>

Pourquoi s'intéresser aux mâchefers et à leur valorisation?

Chaque année (Amorce, 2018):

- plus de 15 millions de tonnes de déchets
- 126 installations de traitement thermique
- 3 millions de tonnes de mâchefers produites (20 à 25 % du tonnage initial)



**Enjeux
environnementaux et
financiers**



Implantations françaises métropolitaines des Installations de Maturation et d'Elaboration (IME). Rapport Cerema, 2016

Pourquoi s'intéresser aux mâchefers et à leur valorisation?

Enjeux environnementaux

Valorisation s'inscrit dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015:

- réduction de la quantité des déchets stockés car valorisés
- objectif "zéro décharge" en évitant l'enfouissement
- réduction de l'emploi de matériaux naturels et préservation des ressources naturelles
- réduction des émissions de gaz à effet de serre dans phase de valorisation et dans le transport

Pourquoi s'intéresser aux mâchefers et à leur valorisation?

Enjeux financiers

réel intérêt économique car limitation coût de:

- traitement des déchets
- graves de mâchefer moins cher que celui des matériaux naturels *
- transport car poids spécifique de la grave de mâchefer est inférieur de plus de 30 % à celui d'une grave naturelle

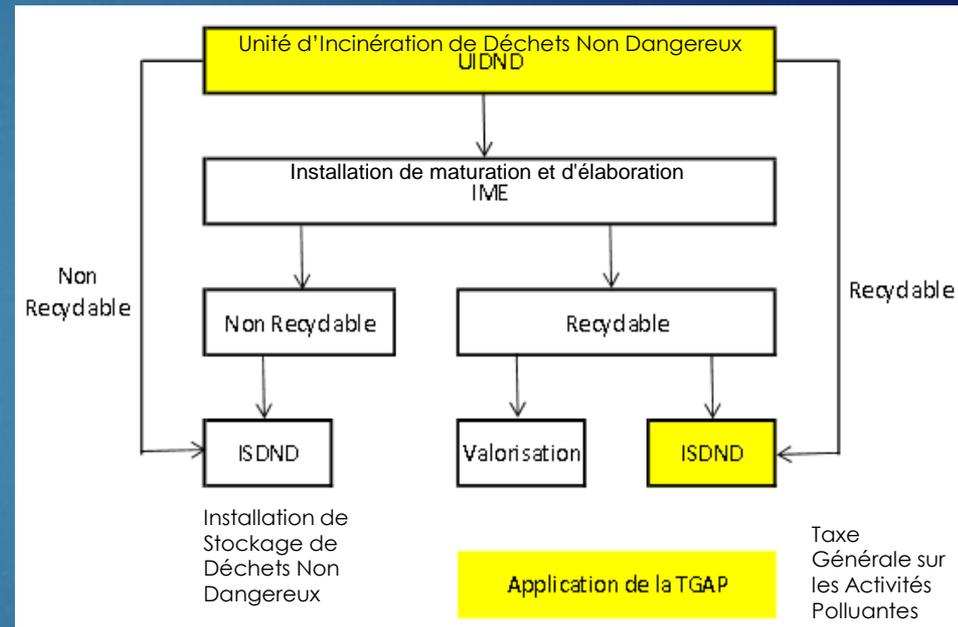


Schéma sur la TGAP appliquée sur les mâchefers
Etude RECORD, 2015

*Prix de vente mâchefer: 10,15 €HT/t; coût d'élimination : 90 €HT/t - AMORCE (2018)

Prix de vente grave naturelle; 50-100 €HT/t

ISDND: Installation déchets non dangereux

Pourquoi s'intéresser aux mâchefers et à leur valorisation?

- Pour industriels et collectivité valorisation s'inscrit dans logique de développement durable car contribue à préservation des ressources naturelles

Mais

- Pour associations de protection de l'environnement mâchefers constituent un risque de pollution du milieu

Composition mâchefers

Composition des mâchefers				
Paramètre	Unité	Minimum	Maximum	Médiane
Imbrûlés	% sur sec	1,1	5	2,4
Si	% sur sec	30	61	49
Ca	% sur sec	7,4	15	11
Fe	% sur sec	3,9	18	7,6
Al	% sur sec	1,6	18	5,8
Na	% sur sec	0,86	8	4,1
Mg	% sur sec	0,7	3,5	1,6
Sulfates	% sur sec	0,11	6,4	1
K	% sur sec	0,22	1,6	0,75
Ti	% sur sec	0,12	2,3	0,57
P	% sur sec	0,4	0,75	0,51
Cl	% sur sec	0,01	0,58	0,3
Zn	mg/kg MS	1250	3570	2195
Pb	mg/kg MS	431	3763	1731
Cu	mg/kg MS	810	3000	1423
Mn	mg/kg MS	630	2127	944
Cr	mg/kg MS	165	800	433
Sn	mg/kg MS	<20	600	173
Ni	mg/kg MS	65	250	126
Cd	mg/kg MS	<2	37	15
As	mg/kg MS	<5	22	10
Hg	mg/kg MS	<0,05	111	13
Dioxines et furannes	ng/kg MS	4	21	9,2

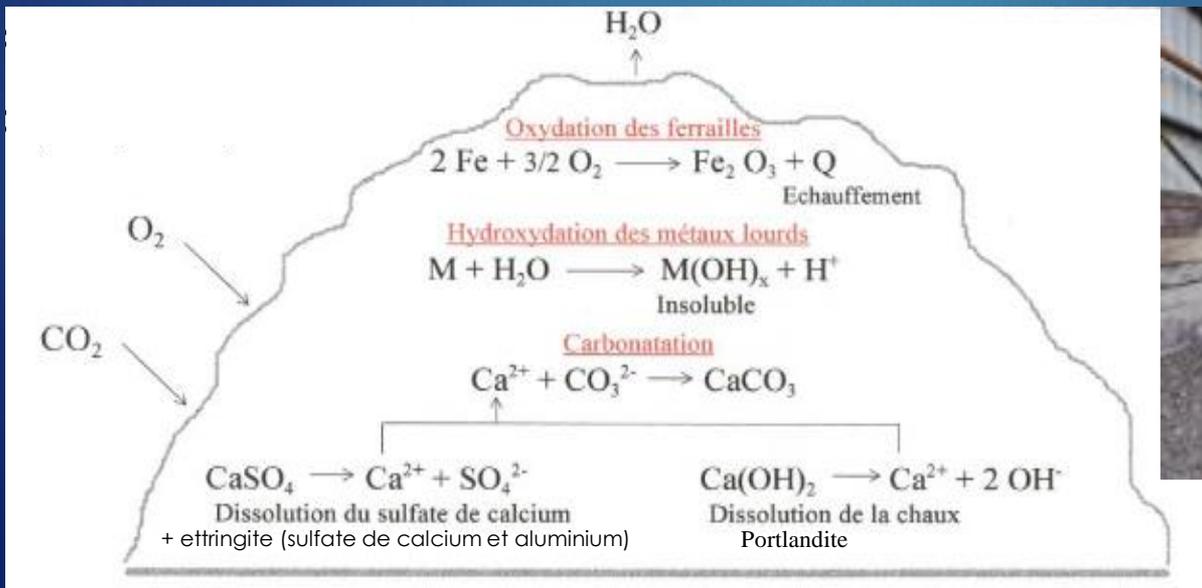
Composition élémentaire moyenne des mâchefers (Polden, 2015)

Evolutions possible selon méthodes de collectes sélectives et tributaire de technologie des fours et de qualité des traitements

Operations de préparation et d'élaboration des mâchefers pour valorisation

Maturation (3-6 mois)

- Carbonatation par CO₂ atmosphérique
- Minéralisation et stabilisation métaux lourds (Pb, Zn, Cr, Cu) → diminution impact environnemental car diminution de relargage, lors d'un contact avec l'eau, des sels solubles et des métaux lourds
- Oxydation ferrailles
- Perte d'humidité par égouttage



<https://www.letri.com/le-sydom/>

Operations de préparation et d'élaboration des mâchefers pour valorisation

Maturation – Carbonatation

Conséquences:

- diminution de la porosité totale
- diminution de la perméabilité
- augmentation de la résistance mécanique

Caractéristiques Physiques	Minimum – Maximum
Teneur en eau (% massique)	10 - 30
Masse volumique apparente (kg.m-3)	1 100 - 1 200
Masse volumique intrinsèque (kg.m-3)	2 500 - 2 800
Porosité intrinsèque (%vol)	40 - 50
Surface spécifique BET (m2.g-1)	4 - 30
Caractéristiques géotechniques	
Los Angeles (LA) (en %)	35 - 50
Micro Deval (MDE) (en%)	13 - 20
Valeur au bleu de méthylène (en %)	0.01 - 0.4
Equivalent sable	30 - 60
Indice Portant Immédiat (IPI)	30 - 80
Teneur en eau massique à l'optimum Proctor (en %)	12 - 25

Etude Record, 2015

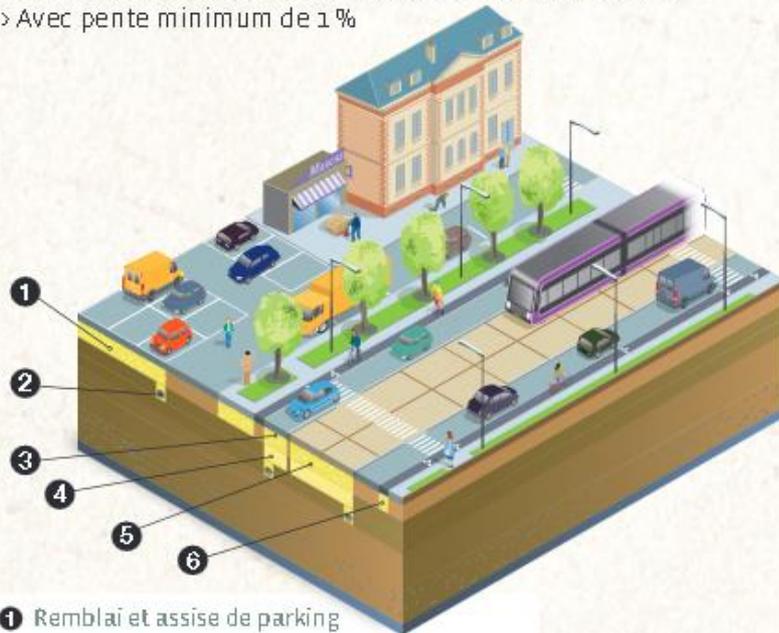


Caractéristiques permettant de les utiliser en sous couche routière

Valorisation en sous couche routière

> Type 1 : usage revêtu

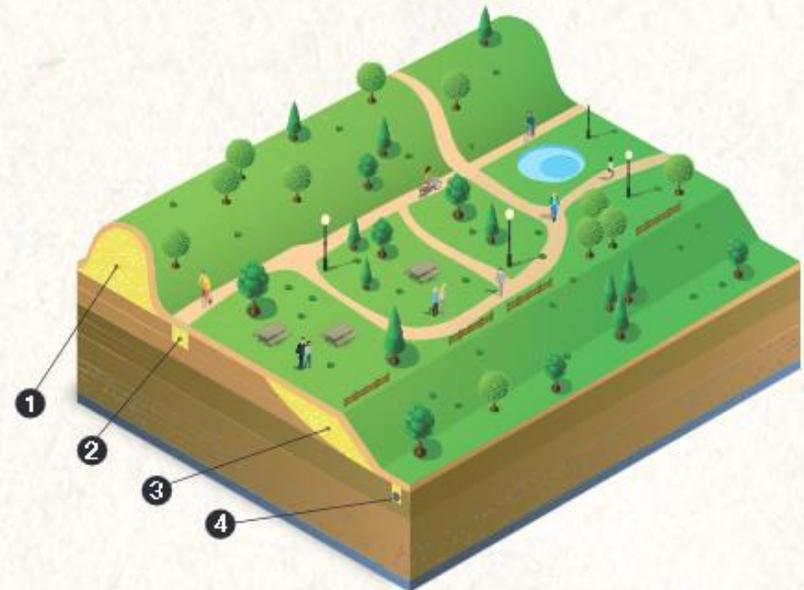
- > Ouvrages de 3 mètres de hauteur maximum
- > En sous-couche de roulement, de chaussée ou d'accotement revêtus : remblai, remblai sous ouvrage, couche de forme, ... revêtu d'une couche de surface réputée imperméable (asphalte, enrobé, enduit superficiel, béton, pavés jointoyés)
- > Avec pente minimum de 1 %



- 1 Remblai et assise de parking
- 2 Remblai de tranchée en zone revêtue
- 3 Couche de forme et assise de chaussée
- 4 Remblai en zone revêtue
- 5 Remblai et couche de forme de voie de TCSP
- 6 Remblai de tranchée en zone revêtue

> Type 2 : usage recouvert

- > Ouvrages de 6 mètres de hauteur maximum
- > En remblai technique connexe à une infrastructure routière ou en accotement
- > Ouvrages routiers recouverts par au moins 30 cm de matériaux naturels ou équivalents, comme de la terre végétale
- > Avec pente minimale de 5 %

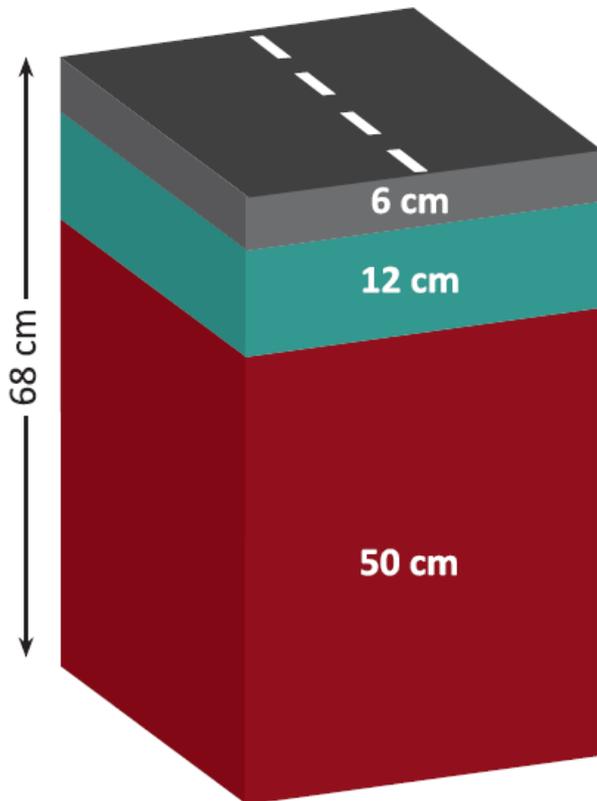


- 1 Merlon phonique ou paysager (sous terre végétalisée d'au moins 30 cm)
- 2 Remblai support d'allée piétonne ou piste cyclable (30 cm de matériaux)
- 3 Remblai de plateforme végétalisée couverte de 30 cm de matériaux
- 4 Remblai de tranchée en zone revêtue

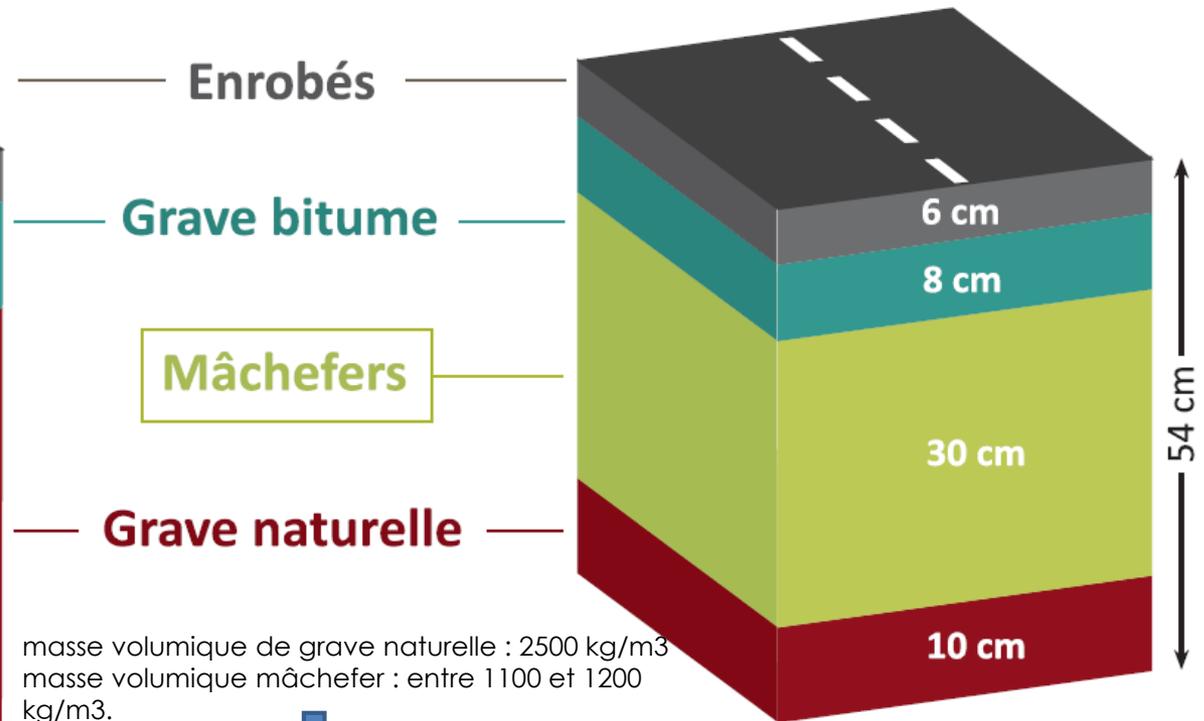
Valorisation en sous couche routière

OPTIMISATION DE LA CHAUSSÉE :

SANS MÂCHEFERS



AVEC MÂCHEFERS



masse volumique de grave naturelle : 2500 kg/m³
masse volumique mâchefer : entre 1100 et 1200 kg/m³.



matériau plutôt léger par rapport aux granulats naturels

Valorisation en sous couche routière



Utilisation interdite si:

- contact avec un enrobé
- zone de remblais ou de couche en zone inondable
- périmètre rapproché (30 mètres minimum) de tout cours d'eau
- présence de captage d'alimentation en eau potable

Valorisation en sous couche routière...mais

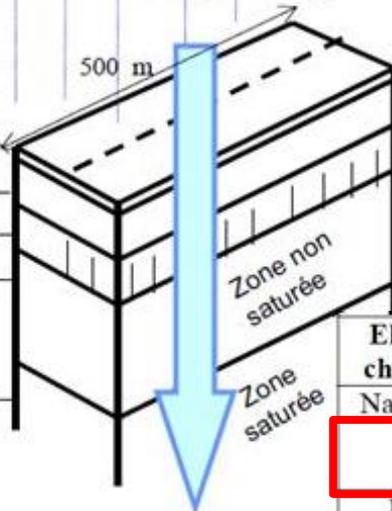
Scénario

2 climats français :
océanique et méditerranéen

Perméabilité de la structure à l'eau, l'O₂ et le CO₂

500 m

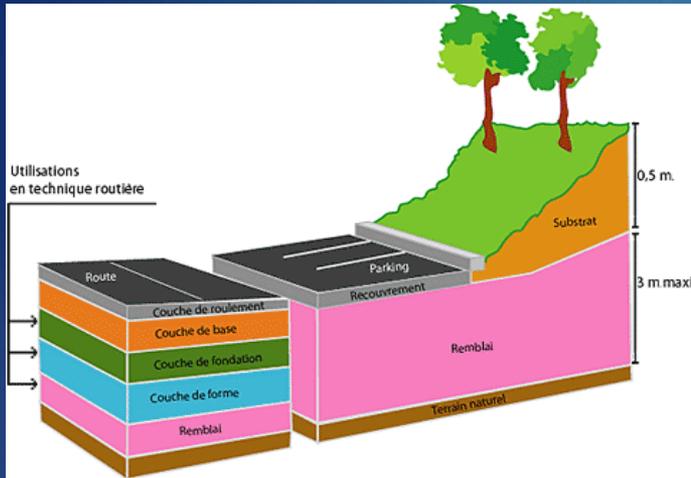
- Enrobé :
2 états de dégradation
- Matériau de chaussée classique
- Mâchefers
- Sols encaissants :
3 types de sols (sableux,
limoneux et argileux)
- Nappe phréatique :
2 sens d'écoulements
(parallèle ou perpendiculaire
à la route)



Eléments chimiques	Evolution générale de la concentration sur 20 ans	Concentration (à 20 ans) par rapport au seuil de potabilité ⁸
Na, Cl et K	Décroissance assez rapide	-
SO ₄	Décroissance lente	Quatre fois plus élevées que le seuil de potabilité
Pb, As	Décroissance lente	Inférieures aux seuils de potabilité
Cd, Fe	Peu d'évolution	Supérieures aux seuils de potabilité
Cu, Zn, Al, PO ₄	Peu d'évolution	Largement inférieures aux seuils de potabilité
Ni	Croissance lente	Largement inférieures au seuil de potabilité

La valorisation en France et Italie

FRANCE



80% mâchefers utilisés en sous couches routières

ITALIE



<https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=24/10/2019>
modifiée



40% mâchefers utilisé en additifs du ciment

La valorisation en France et Italie

MAIS

- Limites réglementaires sur les tests de lixiviation ne sont pas les même en France et en Italie (D. Lgs 186/2006 pour l'Italie et Arrêté du 18/11/2011 JORF 0277 pour la France)

Elément	Italy (mg/l) L/S 10/1	France (mg/l) U1 L/S 10/1	France U2(mg/l) L/S 10/1
As	0,05	0,06	0,06
Cd	0,005	0,005	0,05
Cr	0,05	0,2	0,1
Cu	0,05	5	5
Hg	0,001	0,001	0,001
Ni	0,01	0,05	0,05
Pb	0,05	0,16	0,1
Zn	3	5	5
F	1,5	6	3
Ba	1	5,6	2,8
Mo	N.I.	0,56	0,28
Sb	N.I.	0,07	0,06
Se	0,01	0,01	0,01
Chlorides	100	1000	500
Sulfates	250	1000	500
pH	5,5-12	5,5-13	5,5-13

CAS D'ETUDE



UVE A
ITALIE



UVE B
FRANCE



- 500 000 t/an de déchets

- 100 000 t/an de déchets



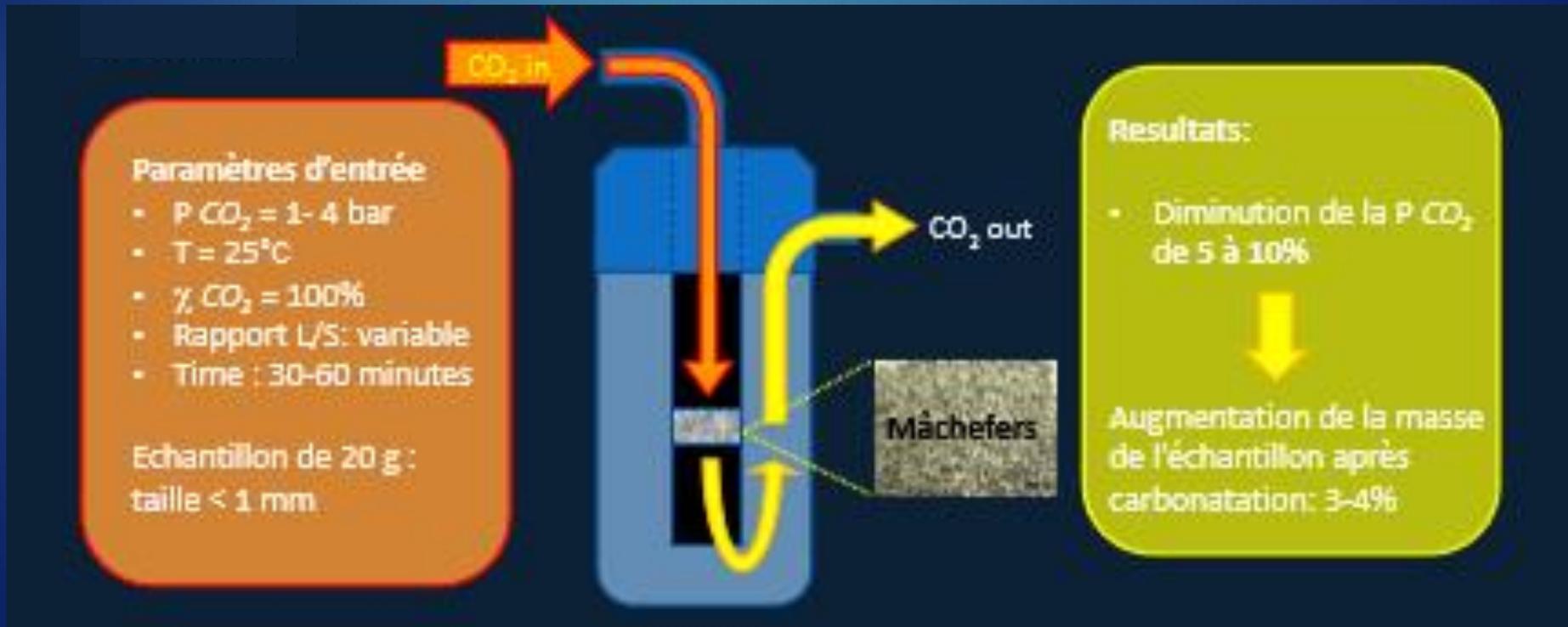
objectifs :

- définir un procédé innovant expérimental pour optimiser la phase d'inertage des mâchefers UVE A de Turin et de UVE B de Lasse
- développer de nouvelles filières de valorisation de ces mâchefers sans risques pour l'environnement et la santé humaine.

TRAITEMENTS D'INERTAGE TESTÉS

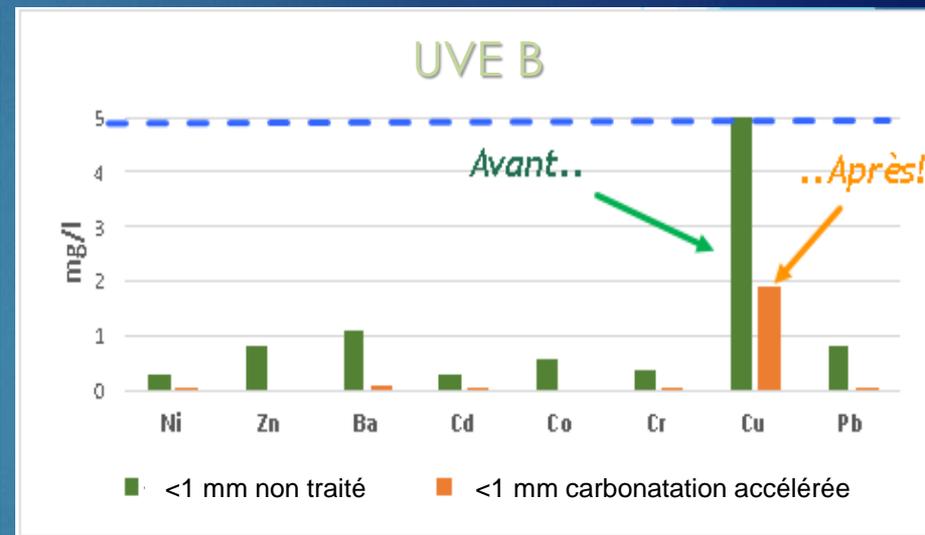
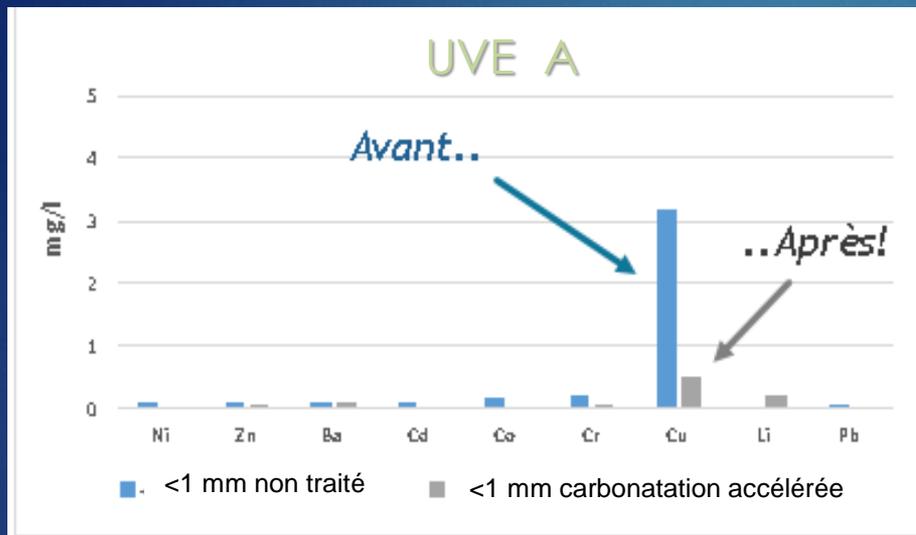
• Carbonatation accélérée en laboratoire

Carbonatation améliorée en augmentant le taux de CO_2 dans une chambre confinée. Tendre vers un état de carbonatation maximal et accéder à mesures plus réalistes concernant relargage éléments potentiellement polluants.



Carbonatation accélérée en laboratoire

Comparaison tests de lixiviation mâchefers entre UVE A Italie et B France

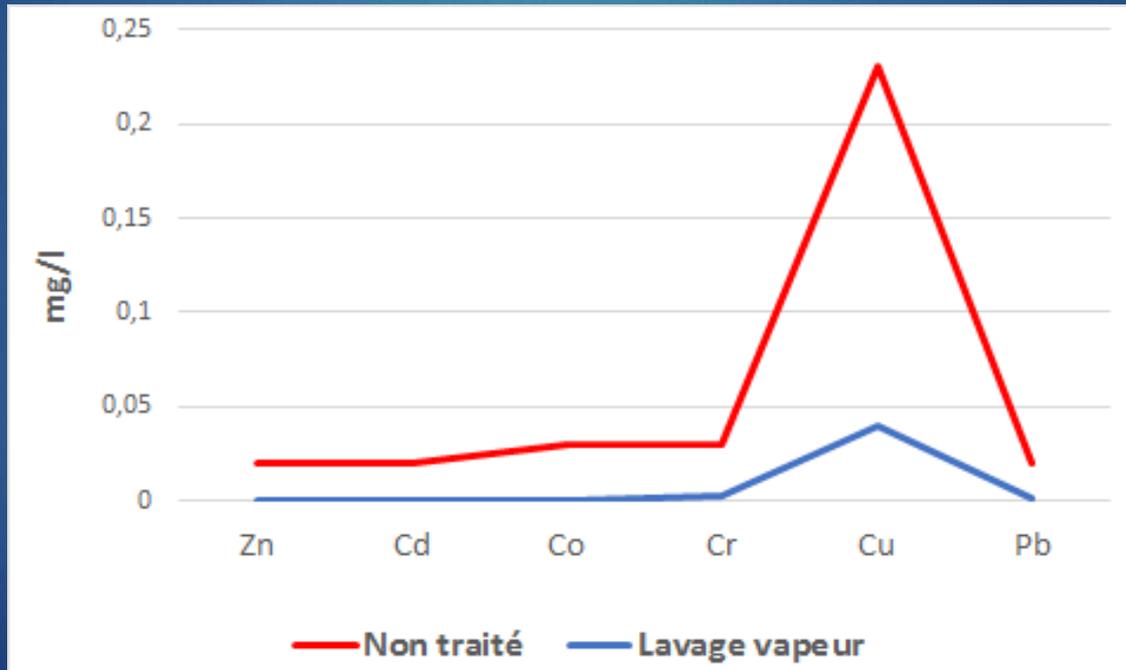


Les tests de lixiviation ont été effectués pendant 24h (8h en agitation et 16h à repos). Tous métaux lourds sont réduits après carbonatation accélérée. Cu est réduit de 70% pour l'UVE A et de 60% pour l'UVE B.

• Lavage à la vapeur

Paramètres

- $P \text{ CO}_2 = 2 \text{ bar}$
- $T = 75^\circ\text{C}$
- Vapeur d'eau désionisée
- Time : 1 à 4mn
- Quantité d'eau: 30mL



Concentration de métaux lourds faible après traitement des mâchefers de l'UVE A.

• Tests préliminaires de géopolymérisation



Métakaolin



Mâchefers



Eau + NaOH +
 Na_2SiO_3



Géopolymère à
haute performance
géotechnique

Application pour la fraction < 1mm plus concentrée en substances toxiques.

Intérêt des géopolymères: leur grand potentiel d'immobilisation ainsi que leur facilité de fabrication du fait de leur durcissement à faible température.

Conclusion

Les résultats obtenus sont prometteurs et le projet se poursuit pour développer les méthodes expérimentées à l'échelle industrielle.



Merci pour votre attention



LA MAISON
DE L'ENVIRONNEMENT