



# Rapport de synthèse intermédiaire

Issu des travaux du Comité de pilotage pour l'élimination des mâchefers de l'incinération



12 juin 2020

## Sommaire

1. Contexte.....	3
2. Historique des travaux.....	4
3. Essais de dépollution sur les mâchefers des Cheneviers.....	6
4. Recherche de site pour une nouvelle décharge.....	15
5. Possibilités de collaboration intercantonale.....	15
Annexe : Procédure pour la recherche de site.....	16

## 1. Contexte

Les mâchefers sont les résidus solides imbrûlés, issus de la combustion des déchets. Ils correspondent à 10% à 20% des déchets incinérés. Ces résidus ultimes sont constitués d'une fraction de matériaux inertes et d'une fraction composée de matériaux valorisables, dont principalement du fer mais également des métaux non-ferreux, tels que le cuivre ou l'aluminium. La quantité de mâchefers est donc directement liée à la quantité de déchets incinérés.

La nouvelle politique de gestion des déchets impose désormais une augmentation à 60% du recyclage des déchets urbains (contre 49,3% en 2018). C'est ainsi que la future usine d'incinération Cheneviers IV, actuellement en construction, a été dimensionnée pour incinérer seulement 160'000 tonnes de déchets par an, dès sa mise en service en 2024 pour une trentaine d'années. Il en résulte malgré l'augmentation de la population qu'environ 20'000 m<sup>3</sup> de mâchefers déferraillés seront produits chaque année contre 25'000 m<sup>3</sup> aujourd'hui (35'000 tonnes), soit 600'000 m<sup>3</sup> sur 30 ans.

Aujourd'hui, conformément à l'ordonnance fédérale sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED, RS 814.600), les mâchefers doivent être stockés en décharge. Depuis 1986, la gestion des déchets en Suisse repose sur les lignes directrices suivantes:

1. Le principe général est qu'il faut récupérer préalablement les matériaux qui peuvent être valorisés, tels que les déchets organiques.
2. Les déchets qui en résultent doivent alors être éliminés par incinération.
3. Seuls les résidus de ces déchets (mâchefers) peuvent être stockés en décharge.
4. Selon l'OLED et par respect du principe de précaution, il n'est pas possible en Suisse de valoriser les mâchefers dans des matériaux de construction afin d'éviter que les polluants qu'ils contiennent ne s'écoulent dans les sous-sols et les eaux souterraines, et qu'ils créent des pollutions.

En revanche, les matériaux ferreux et non-ferreux des mâchefers peuvent être valorisés. L'OFEV estime en effet qu'il est préférable de valoriser les matériaux utiles issus des mâchefers, tels que le cuivre, l'aluminium ou le zinc, plutôt que de les extraire des mines, les raffiner et les acheminer jusqu'en Suisse avec un bilan-carbone totalement défavorable.

En vertu de l'OLED, les mâchefers doivent être entreposés dans des décharges de type D, lesquelles doivent être situées dans une zone bénéficiant d'une géologie robuste des sols. En outre, elles doivent être étanchéifiées et les eaux de lixiviation doivent être récupérées.

A Genève, les mâchefers sont pour l'instant mis en décharge au Nant de Châtillon (Bernex), mais cette installation sera définitivement remplie au début de l'année 2021. Il convient par conséquent de trouver une nouvelle solution pour l'élimination des mâchefers.

Outre les mâchefers, le site de Châtillon stocke également d'autres déchets, notamment des terres polluées, dont le volume fluctue en fonction des chantiers. Ces déchets ne sont pas mélangés aux mâchefers, mais entreposés dans un casier de type E. L'aménagement des décharges de type D ou E est strictement identique, seule la nature des déchets entreposés les différencie. La solution qui sera dégagée pour l'élimination des mâchefers devra également prendre en compte ces autres déchets.

## **2. Historique des travaux**

Les premières réflexions pour la recherche d'un nouveau site de stockage datent de 1993. Le Grand Conseil a voté, le 23 mars 2001, la loi 8269 "*ouvrant un crédit d'étude autofinancé de 780'000 F visant à assurer les besoins futurs de stockage en décharge contrôlée bioactive*".

Diverses études ont été menées depuis lors aboutissant à la conclusion que le canton disposerait de sites conformes aux exigences de l'OLED pour l'aménagement et l'exploitation d'une décharge des types D et E, à savoir des types prévus par la législation suisse pour le stockage définitif des mâchefers de l'incinération et des autres déchets de nature similaire.

Les sites répertoriés se trouvaient sur les communes de Collex-Bossy, Laconnex, Russin, Satigny et Versoix. En décembre 2014, le Conseiller d'Etat de l'époque a réuni les autorités de ces cinq communes pour leur expliquer la situation et la nécessité d'aménager une nouvelle décharge sur le territoire de l'une d'entre elles. A cette occasion, les magistrats communaux se sont étonnés qu'aucun site ne figure sur la rive gauche. Ils ont également demandé que soit investiguée la possibilité d'aménager une décharge en zone forêts.

La liste des sites potentiels a ainsi été complétée avec cinq nouveaux sites, dont certains sur les communes d'Anières et de Jussy et certains en zone forêts. Le récapitulatif complet des sites envisageables pour l'aménagement d'une nouvelle décharge de type D/E a fait l'objet d'un rapport final daté du 19 décembre 2016<sup>1</sup>. Ce rapport fait état de 13 sites, devenus 14 pour la suite de l'analyse, le site de Russin ayant été partagé en deux sites distincts.

Après examen détaillé des 14 sites potentiels à priori conformes à l'OLED, une étude multicritère entreprise avec la collaboration des communes et des services de l'Etat concernés a débouché sur 3 sites prioritaires à investiguer sur le plan géologique, situés sur les communes de Satigny, Collex-Bossy et Versoix.

De fortes résistances se sont alors manifestées dans les populations, chez les agriculteurs concernés et les autorités communales susmentionnées, si bien que le canton a décidé en mai 2018 d'interrompre les travaux de recherche d'un nouveau site.

Au début de la présente législature, le nouveau Conseiller d'Etat chargé de l'environnement a réuni à nouveau le comité de pilotage en enrichissant sa composition aux autorités françaises et vaudoises, ainsi qu'aux associations concernées et par la suite encore à un représentant du CERN. L'objectif n'était plus à tout prix d'aménager une nouvelle décharge, mais de chercher une nouvelle solution pour l'élimination des mâchefers.

En effet, la loi 8269 précitée demandait également que soit effectuée une étude des nouvelles techniques permettant d'améliorer le traitement des mâchefers et autres résidus (sous-entendu de l'incinération). En 2001, de telles techniques n'existaient pas. Ce n'est que ces dernières années que l'on a commencé à voir apparaître des nouvelles techniques de lavage des mâchefers, destinées en premier lieu à récupérer et valoriser les métaux précieux qu'ils contiennent comme l'or, l'argent, l'étain, le cuivre, l'aluminium ou le zinc. De telles installations fonctionnent en Suisse, notamment à Hinwil (Zurich) ou Posieux (Fribourg). Néanmoins, ces installations ne permettent pas de dépolluer suffisamment la partie minérale résiduelle des

---

<sup>1</sup> Recherche de secteurs potentiels d'implantation d'une nouvelle décharge pour scories sur le canton de Genève, CSD Ingénieurs SA, 19 décembre 2016.

mâchefers pour qu'elle puisse être valorisée. Elle doit donc tout-de-même être entreposée dans une décharge de type D.

Sous l'égide du canton, des essais ont été entrepris dès 2016 sur les mâchefers des Cheneviers par un groupement d'entreprises, composé des SIG et des sociétés SOREVAL SA et AUSTRALP SàRL. Ces essais ne sont pas terminés, mais ils se révèlent intéressants et, sous toutes réserves, pourraient permettre une valorisation comme matériaux de construction d'une fraction importante des mâchefers ou, à minima et sous toutes réserves également, une mise en décharge de type B (pour matériaux inertes). Une nouvelle décharge de type D/E restera néanmoins nécessaire pour une fraction des mâchefers et pour les autres déchets comme les terres polluées. Son volume pourrait cependant être revu à la baisse.

Une autre solution serait de collaborer avec un autre canton. Des solutions provisoires pour l'entreposage des mâchefers genevois dès 2021 dans des décharges extra-cantoniales sont d'ailleurs en cours de discussion. On constate cependant partout les mêmes difficultés à assurer des débouchés à long terme pour l'élimination des mâchefers.

Les trois options possibles examinées par le nouveau comité de pilotage pour l'élimination à long terme des mâchefers genevois sont les suivantes:

1. Le traitement ultérieur des mâchefers dans l'optique de valoriser une part importante de ceux-ci comme matériaux de construction ou, si cela ne devait pas être possible, de les entreposer dans une décharge de type B. A noter qu'une mise en décharge de type D/E sera quand même nécessaire pour la part minoritaire des mâchefers qui ne pourra être valorisée ou entreposée en décharge de type B, ainsi que pour d'autres déchets comme certaines terres polluées. Son dimensionnement pourrait cependant être revu à la baisse.
2. L'aménagement et l'exploitation d'une nouvelle décharge de type D/E sur le territoire du canton de Genève pour, comme aujourd'hui, y entreposer la plus grande partie des mâchefers.
3. Une installation de traitement ou une décharge située dans un autre canton à titre provisoire ou à long terme.

Ces trois options sont détaillées dans la suite de ce rapport.

### 3. Essais de dépollution sur les mâchefers des Cheneviers

Les mâchefers sont un matériau hétérogène composé notamment des éléments suivants:

- Minéraux (pierre, verre, porcelaine, ...)
- Métaux communs ferreux ou non-ferreux (ferraille, boîtes de conserves, canettes alu, enveloppes de piles, ...)
- Cendres (de bois, de papier, de carton, de déchets organiques, ...)
- Sels
- Métaux lourds et/ou rares (issus de batteries, matériel électrique ou électronique, revêtements de surface, ...)
- Métaux nobles (or, argent, platine)

De manière simplifiée, la dépollution des mâchefers se présente schématiquement comme sur la figure 1. D'une masse hétérogène, polluée par divers métaux, l'objectif est d'obtenir une grande fraction minérale dont la composition chimique et minéralogique est proche de celle des matériaux naturels et qui peut par conséquent être valorisée dans la construction, ainsi que différentes fractions de métaux pouvant idéalement être séparés et valorisés à leur tour.

Dans la réalité, cette vision idéale ne va pas pouvoir être atteinte à court terme. Il faut partir du principe qu'une séparation aussi nette ne sera pas possible et qu'une partie des minéraux, notamment la fraction la plus fine, devra quand même être déposée dans une décharge de type D.

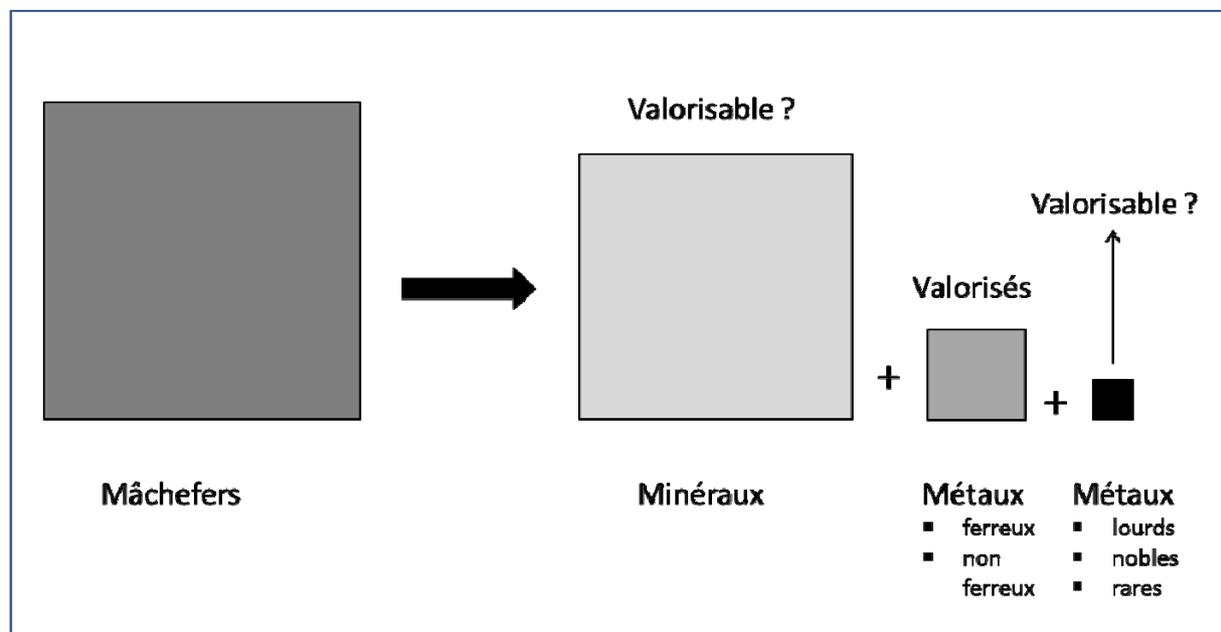


Figure 1. Schéma simplifié d'un retraitement idéal des mâchefers en vue de leur valorisation intégrale.

Dans les produits du traitement tels que présentés à la figure 1, le carré intermédiaire correspond aux métaux ferreux et non ferreux (typiquement, le fer, l'aluminium, le zinc ou le cuivre sous forme métallique) qui sont d'ores et déjà séparés des mâchefers (avec un taux

moyen de récupération de 85%) et valorisés suite au déferraillage entrepris dans la halle du Bois-de-Bay. Ils représentent aujourd'hui environ 10% de la masse initiale des mâchefers.

## **Premier essai**

Un premier essai s'est déroulé en 2017 dans l'enceinte des Cheneviers sur le produit brut en sortie de four. Il a consisté à laver 8,5 tonnes de mâchefers sur une installation de fortune construite pour l'occasion. L'objectif était d'extraire par gravimétrie les métaux les plus denses et de produire ainsi des mâchefers partiellement décontaminés. De l'or, de l'argent, de l'étain, du plomb, du cuivre et du nickel ont notamment été récupérés. Les résultats les plus intéressants de ce premier essai sont les suivants:

- Les résultats obtenus à Hinwil (ZH) ont été confirmés;
- Le potentiel économique de la méthode a été validé, avec une valeur des métaux non ferreux denses récupérés d'environ 50 F par tonne de mâchefers (hors aluminium);
- 0,3 g/t de métaux précieux libres (or, argent) ont été récupérés (voir fig. 4);
- Les cendres séparées des mâchefers sous forme de boues de lavage contiennent encore une valeur intéressante en or, argent, étain, cuivre ou titane notamment.



*Figure 2: Installation de lavage et récupération des métaux denses par gravimétrie construite pour le premier test de 2017.*



Figure 3: Installation de lavage et récupération des métaux denses par gravimétrie construite pour le premier test de 2017.



Figure 4: Or récupéré lors du premier test de 2017.

## Deuxième essai

Un deuxième essai a été entrepris à l'échelle industrielle en 2018. Il a consisté à laver 113 tonnes de mâchefers partiellement déferrailés au moyen de l'installation de lavage du gravier de l'entreprise Soreval SA au Bois-de-Bay légèrement modifiée pour l'occasion. Les métaux ont été séparés des mâchefers par un procédé innovateur, ce qui a permis de produire un sable fortement décontaminé. Les cendres fines, qui représentent la deuxième fraction la plus importante des mâchefers après le sable (15% poids sec), ont pu être séparées complètement des sels solubles et récupérées par floculation et filtre-presse.

Les résultats de ce deuxième essai sont intéressants et la qualité des résidus obtenus est déjà meilleure que celle des mâchefers sortis des installations de Hinwil ou de Posieux. Tant le sable que les boues de lavage contiennent cependant encore trop de cuivre, de zinc, de plomb, d'antimoine et, pour les boues, de cadmium, pour que l'on puisse envisager de les valoriser dans la construction. Leur destination finale reste à ce stade la décharge de type D.

Le sable présente par contre un excellent comportement à la lixiviation, ce qui est encourageant pour la suite. Ceci s'explique par le fait que les métaux résiduels sont pour l'essentiel incorporés dans les verres ou les émaux des porcelaines et céramiques présents dans la fraction minérale.



*Fig. 5: Lavage des mâchefers sur l'installation de Soreval SA au Bois-de-Bay.*



*Fig. 6: Sable de mâchefers issus du deuxième essai.*



*Fig. 7: Boues de lavage (cendres fines) en sortie de filtre-pressé*

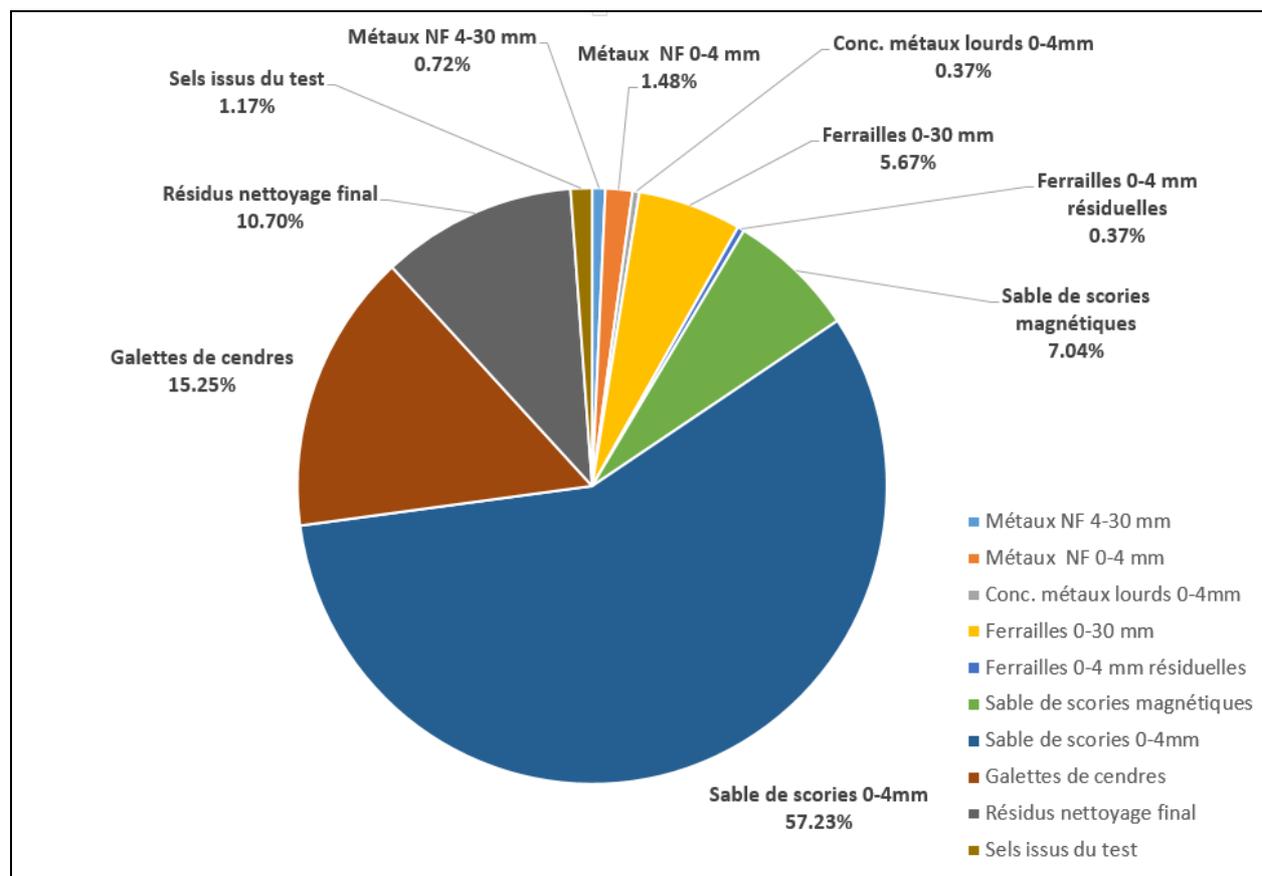


Fig. 8: Bilan quantitatif du deuxième essai.

Les résidus du nettoyage final de l'installation sont pour l'essentiel du sable et donc à rajouter quantitativement à la fraction de sable. C'est ce sable qu'il est prévu prioritairement de valoriser dans la construction pour autant qu'il soit possible d'en extraire des quantités supplémentaires suffisantes de métaux lourds, ce qui était l'objectif du troisième essai.

Un premier essai de fabrication de béton à partir du sable issu du deuxième essai a ensuite été effectué. Contenant encore 0,5% de métaux non-ferreux résiduels, ce béton présente les caractéristiques d'un béton fibré homogène avec une très bonne résistance mécanique. Produit avec 21% poids de ciment Portland, sa masse volumique de 1,78 g/cm<sup>3</sup> en fait un béton léger. Il est esthétique avec des grains de couleurs variées. Il reste encore à déterminer ses applications potentielles sur le plan constructif.

### Troisième essai

Dans le but d'améliorer sensiblement la récupération des métaux lourds, quelques tonnes de sable de mâchefers issues du deuxième essai ont fait l'objet d'un traitement par courant de Foucault sur une installation bernoise. La proportion de métaux lourds 0-4 mm ainsi obtenue a pu être portée à 2,6% contre 0,37% lors du deuxième essai (voir Figure 8). Il a ainsi pu être démontré qu'il est possible de récupérer la quasi-totalité (>99%) des métaux sous forme métallique présents dans les mâchefers.

Des analyses sont en cours pour caractériser le sable ainsi décontaminé sur les plans chimique, minéralogique et écotoxicologique.

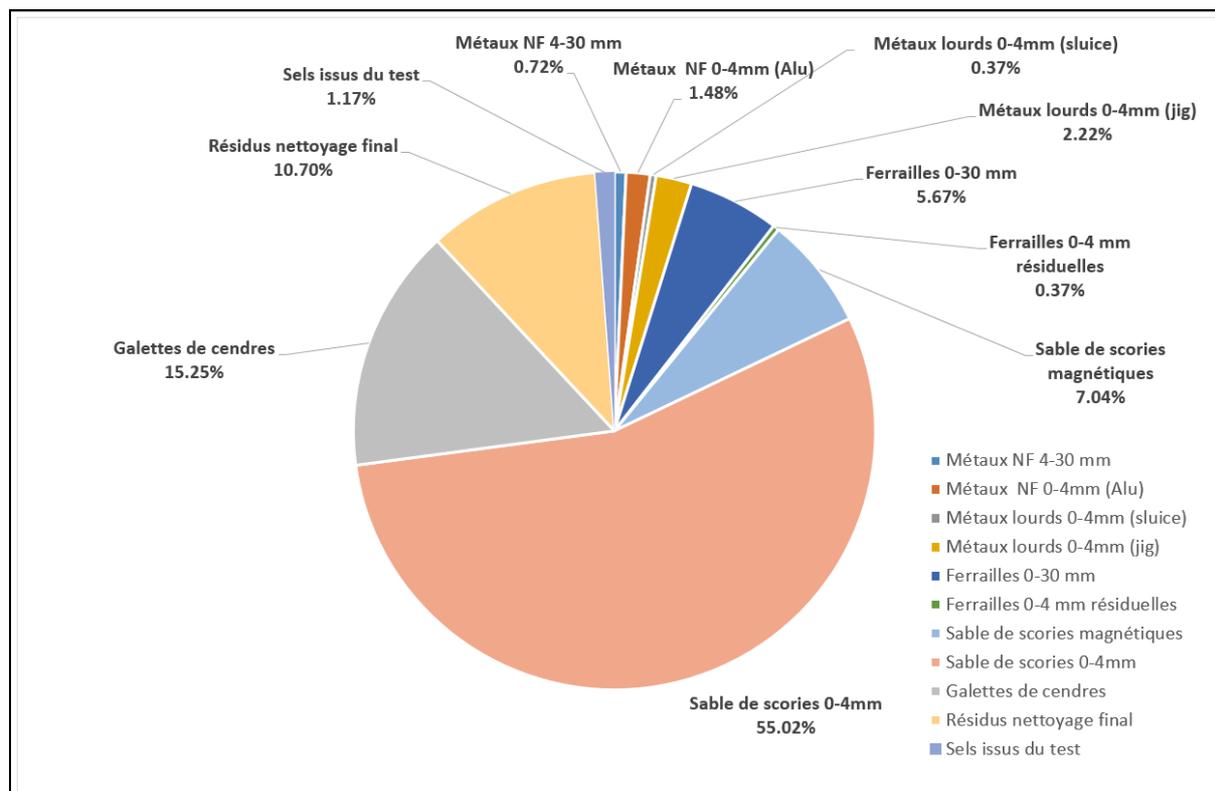


Fig. 9: Bilan quantitatif du troisième essai

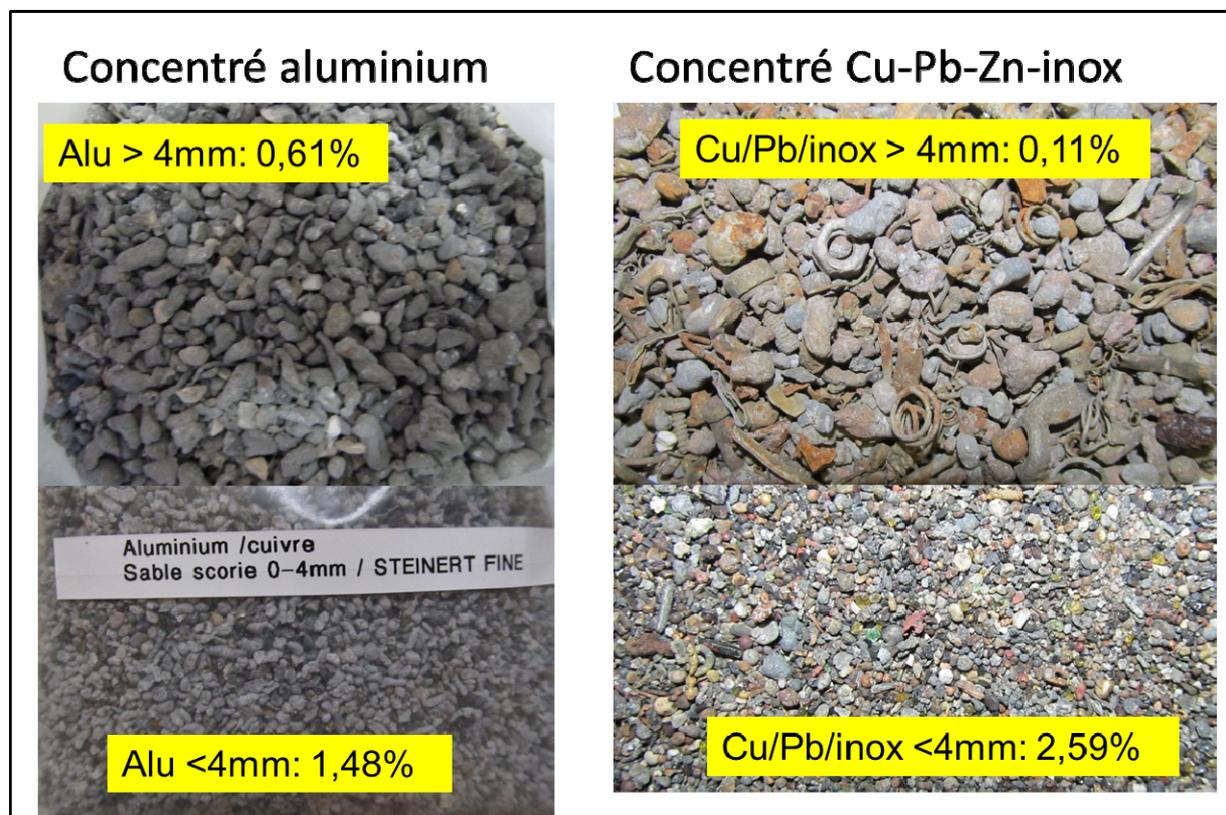


Fig. 10: Métaux non-ferreux et inox récupérés sur l'ensemble du processus.



*Fig. 11: Bloc de béton produit avec le sable de mâchefers issu du deuxième essai.*

## **Suite des travaux**

Les travaux en cours portent à ce stade sur:

- La caractérisation du sable de mâchefers décontaminé en vue de vérifier sur le plan environnemental sa compatibilité avec une valorisation dans la construction;
- L'étude des filières possibles pour le sable ou le béton dans la construction (mandat donné à l'HEPIA);
- Des essais d'hydrométallurgie sur les boues de lavage (cendres fines), dans le but de récupérer sélectivement les métaux en vue de leur valorisation;
- La valorisation des sels;
- La validation économique d'un processus industriel;
- La conceptualisation et le dimensionnement d'une installation industrielle de traitement.

## **Contacts avec l'office fédéral de l'environnement**

L'OLED ne contient pas de normes pour la valorisation des mâchefers décontaminés dans la construction. Il est donc nécessaire de discuter avec l'OFEV de la réutilisation du sable de mâchefers, voire d'envisager avec lui une adaptation de l'ordonnance.

Un premier échange a eu lieu le 17 décembre 2019 à l'occasion duquel les résultats actuels ont pu être présentés. L'OFEV a été intéressé par les essais menés à Genève et est entré en matière pour suivre les travaux et évaluer les possibilités de valorisation sur la base des résultats des analyses chimiques, minéralogiques et écotoxicologiques qui sont en cours.

L'OFEV va engager par ailleurs un projet de comparaison des différents procédés de retraitement des mâchefers existants en Suisse, tels que celui de Hinwil ou de Fribourg. Il a proposé d'inclure le procédé en développement à Genève dans la liste des procédés étudiés.

Enfin, l'OFEV s'est déclaré disposé à participer au financement du développement genevois.

Une prochaine séance est agendée durant le 2<sup>ème</sup> semestre 2020. Elle aura pour objectif de commencer à approfondir les données scientifiques relatives à la caractérisation des résidus genevois.

## **4. Recherche de site pour une nouvelle décharge**

Diverses études ont été menées depuis 1993 pour répertorier les sites potentiels susceptibles d'accueillir une nouvelle décharge pour les mâchefers de l'incinération et les autres déchets aux caractéristiques similaires (décharge de type D/E). Le détail de cette recherche est donné en annexe. Il en est ressorti trois sites prioritaires, à savoir "Bourdigny" à Satigny, "Longs-Prés" à Versoix et "Forêt Collex-Bossy".

Tant l'avancement des essais de dépollution des mâchefers (chapitre 3) que les discussions en cours avec les autres cantons ne permettent pas de miser dès aujourd'hui sur l'abandon d'un projet genevois de nouvelle décharge, fût-il revu à la baisse en conséquence notamment des progrès réalisés en matière de dépollution des mâchefers. C'est pourquoi il va être nécessaire de continuer en parallèle la recherche de sites et, par conséquent, de vérifier l'adéquation de ces sites avec la législation, en particulier de vérifier que la géologie de ces sites est bien identique à celle que l'on pense être sur la base des informations à disposition. La vérification définitive de l'adéquation de ces trois sites à l'OLED devra à terme être étayée au moyen d'investigations géologiques et hydrogéologiques détaillées (sondages). Au vu du coût de ces investigations, le département a proposé au COPIL de procéder aux sondages d'abord sur un site, puis si nécessaire sur les suivants.

## **5. Possibilités de collaboration intercantonale**

En parallèle des tests de valorisation des mâchefers et de la recherche d'un nouveau site, des discussions ont lieu avec les autorités de certains cantons et des porteurs de projets privés. En effet, début 2021 la décharge du Nant de Chatillon sera définitivement remplie. Il est donc indispensable de trouver sans attendre un exutoire aux mâchefers genevois pour l'horizon 2021.

Ces discussions sont en cours et n'ont pour l'heure pas permis de déboucher sur une solution.

Cependant, il faut être bien conscient qu'il est de plus en plus difficile d'envoyer les mâchefers genevois sur le plateau suisse car les capacités des décharges sont limitées et les oppositions bien présentes pour l'ouverture de nouveaux sites. De fait, les autorités cantonales, qui ont pour mission de planifier les installations de stockage, réservent la place disponible avant tout à leurs mâchefers et rechignent à ouvrir ces espaces aux mâchefers des voisins. C'est la raison pour laquelle s'il est possible de trouver de la place pour une solution transitoire, il est beaucoup plus aléatoire de miser sur une telle solution à long terme.

Mis au courant de cette situation, les Conseillers et Conseillères d'Etat chargés de l'environnement en Suisse romande ont demandé le 9 décembre 2019 que les services de l'environnement et les exploitants d'usines d'incinération travaillent ensemble à la réalisation d'une ou deux unités de traitement des mâchefers pour la Suisse romande, ainsi qu'à la coordination des volumes de décharge. Ces travaux ont débuté.

## Annexe : Procédure pour la recherche de site

Les diverses études menées depuis 1993 pour répertorier les sites potentiels susceptibles d'accueillir une nouvelle décharge pour les mâchefers de l'incinération et les autres déchets aux caractéristiques similaires (décharge de type D/E) ont été vérifiées et compilées dans un rapport final du 19 décembre 2016<sup>2</sup> faisant état de 13 sites potentiels (devenus par la suite 14 en raison de la séparation du site de Russin en deux secteurs différents de part et d'autre de la route du Mandement) respectant à priori tous les critères de la législation fédérale relative à la protection de l'environnement, ainsi que certains critères additionnels jugés pertinents comme par exemple une taille minimale, une bonne accessibilité et une évacuation gravitaire des lixiviats vers le réseau public d'eaux usées.

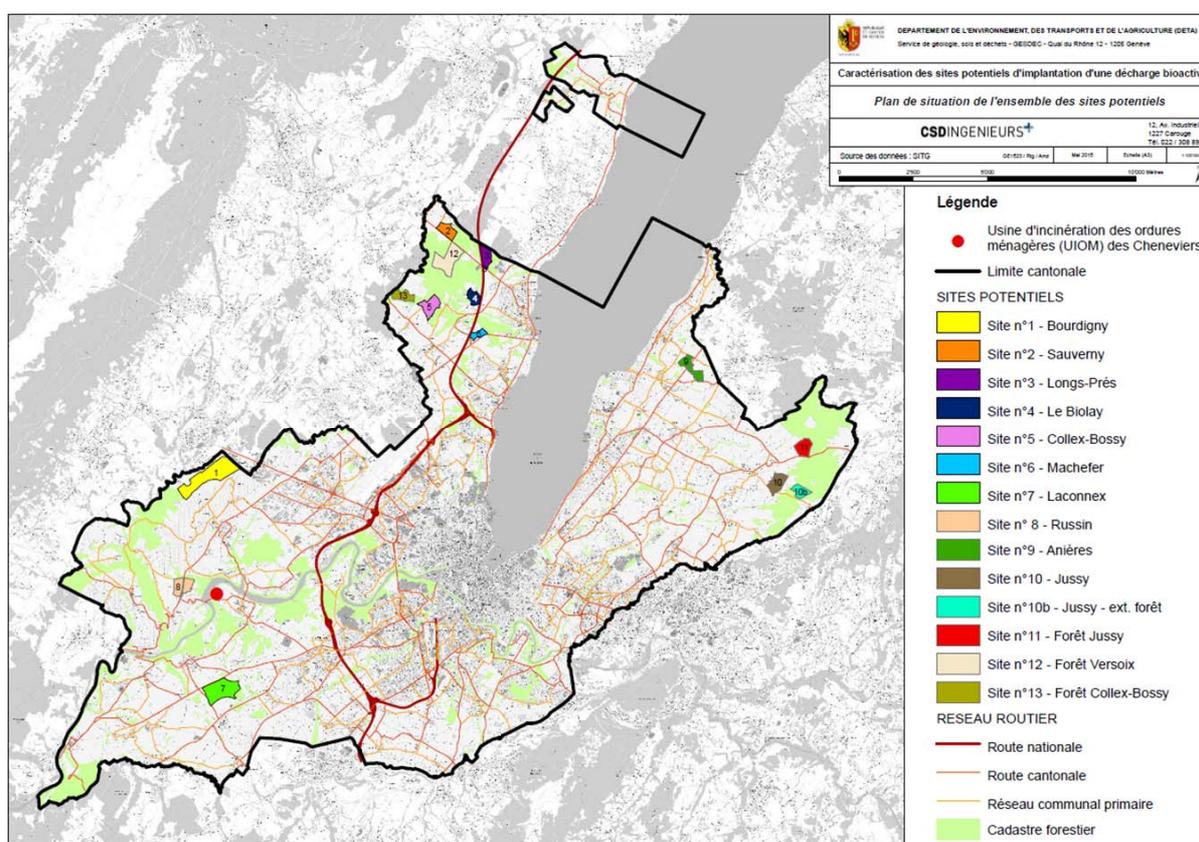


Fig. 11: Carte des sites potentiels pour l'implémentation d'une nouvelle décharge de type D.

Les sites retenus ont fait l'objet d'une comparaison multicritère rigoureuse et exhaustive pour laquelle un comité de pilotage a été créé. L'objectif était de dégager les plus aptes à recevoir une future installation. Une démarche participative a été appliquée de décembre 2015 à septembre 2017 avec les différentes parties prenantes, à savoir l'OCEV en charge du dossier, les services spécialisés du canton et les communes territoriales concernées.

Le processus et l'analyse multicritère ont été encadrés et pilotés par le professeur Dominique Bollinger de la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD),

<sup>2</sup> Recherche de secteurs potentiels d'implantation d'une nouvelle décharge pour scories sur le canton de Genève, CSD Ingénieurs SA, 2016.

spécialiste en démarche d'aide multicritère à la décision, de processus participatif multi-acteurs et de planification en matière de sites de stockage. Ils ont fait l'objet d'un rapport<sup>3</sup>

Les travaux se sont déroulés en 5 phases:

1. Recensement et définition des éléments différenciant et impactant pour la comparaison des sites;
2. Structuration de ces éléments en critères de comparaison exhaustifs, non redondants et cohérents;
3. Pondération des critères de comparaison entre eux selon différents points de vue correspondant aux différents points de vue des membres du comité de pilotage;
4. Evaluation de tous les sites selon tous les critères;
5. Analyse multicritères selon la méthode Electre III, résultats et interprétation.

Les communes concernées ont participé aux deux premières phases des travaux, mais n'ont pas souhaité établir une pondération des critères afin d'éviter d'être juge et partie.

La méthode Electre III ne livre pas qu'un seul résultat, mais une série de résultats correspondants à autant de pondérations des critères proposées par les différents acteurs. Néanmoins des tendances claires se dégagent avec des sites figurant toujours en tête de classement quelle que soit la pondération des critères.

Ainsi, les trois sites suivants se situent toujours en tête de classement. Ils y sont stables et représentent comparativement les meilleurs de tous les sites retenus:

1. "Bourdigny", commune de Satigny. Site très étendu, offrant de nombreuses possibilités, notamment celle d'enterrer complètement la décharge. Le site présente de bonnes qualités et ne présente pas de défauts majeurs, si ce n'est l'évaluation des critères "Conjonction de projets" et "Impact de la phase de construction". Un élément non pris en considération dans l'étude multicritère mais sur lequel une attention particulière devrait être portée est la proximité de la France et du CERN. Ce dernier estime d'ailleurs devoir être considéré comme un gros village et pas une zone industrielle, en raison des 8'000 personnes en moyenne qui y travaillent la journée et des 400 qui y passent la nuit et le week-end, avec pour conséquence de déplacer une éventuelle décharge à plus de 500 mètres de sa frontière.
2. "Longs-Prés", commune de Versoix. Site de localisation très intéressante par son faible impact paysager et présentant une certaine facilité de mise en œuvre. Un élément non pris en considération dans l'étude multicritère mais sur lequel une attention particulière devrait être portée est la proximité du canton de Vaud.
3. "Forêt Collex-Bossy", commune de Collex-Bossy. Site relativement bien masqué par la forêt environnante avec possibilité d'enfouir totalement la décharge. A noter là-aussi la proximité de la France et de l'anneau du CERN à moins de 100 mètres.

---

<sup>3</sup> Comparaison des secteurs potentiels et sélection des plus aptes pour l'implantation d'un nouveau site de stockage des mâchefers dans le canton de Genève. Rapport final d'analyse multicritère. D. Bollinger et S. Vergara, HEIG-VD, décembre 2017.