



Source : Etat de Fribourg – Service de l'environnement - 2013

## Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Gestion des déchets bitumineux en Suisse - Installations de traitement  
Bilan économique et technique de la situation de l'élimination des  
déchets bitumineux en Suisse

RAPPORT D'ETUDE  
Février 2021

GE02164.100

**CSD INGENIEURS SA**

Avenue Industrielle 12

CH-1227 Carouge

+41 22 308 89 00

geneve@csd.ch

www.csd.ch

**Mentions légales**

**Mandant** : Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Déchets et matières premières, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

**Mandataire** : CSD Ingénieurs SA

**Auteurs** : Eric Säuberli, Alexandre Flacher

**Accompagnement OFEV** : Clara-Marine Pellet et David Hiltbrunner

**Remarque** : La présente étude / le présent rapport a été réalisé(e) sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

**Photographie de couverture** : Etat de Fribourg – Service de l'environnement – 2013

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>10</b>
1.1	Mandat	10
1.2	Bases de l'étude	11
<b>2</b>	<b>Problématique à résoudre – cadre et objectif</b>	<b>12</b>
2.1	Problématique générale à résoudre	12
2.2	Bases légales, réglementaires et normatives en Suisse	14
2.3	Synthèse du cadre légal et réglementaire des pays voisins	20
2.3.1	France	21
2.3.2	Belgique	22
2.3.3	Italie	24
2.3.4	Allemagne	25
2.3.5	Autriche	26
2.3.6	Pays-Bas	27
2.3.7	Synthèse	29
2.4	Teneurs maximales en agrégats de bitume recyclés admissibles selon les normes routières et l'état de la technique	30
2.4.1	Situation en Suisse	30
2.4.2	Situation dans l'Union européenne	33
2.5	État des lieux actuel des filières de valorisation, traitement et élimination en Suisse et à l'étranger	38
2.5.1	Situation en Suisse	38
2.5.2	Situation dans l'Union européenne	39
2.6	Estimation des quantités futures de déchets bitumineux produits en Suisse et excédents non valorisés	45
2.6.1	Résultats de l'étude « Modélisation des flux du bitume en Suisse»	45
2.6.2	Synthèse de la problématique à résoudre et des quantités non valorisées à traiter	47
<b>3</b>	<b>État de la technique – installations de traitement</b>	<b>52</b>
3.1	Vue d'ensemble – vision générale	52
3.2	Traitement thermique	54
3.2.1	Traitement thermique dans une installation dédiée	54
3.2.2	Traitement thermique en cimenterie	68
3.2.3	Pyrolyse	70
<b>3.3</b>	<b>Traitement mécanique</b>	<b>71</b>
3.3.1	Description générale du processus	71

3.3.2	Etat de la technique.....	71
3.3.3	Schémas de flux et qualité des fractions issues du traitement .....	73
3.3.4	Aspects économiques .....	77
3.3.5	Protection de l'environnement.....	78
<b>3.4</b>	<b>Traitement physico-chimique.....</b>	<b>79</b>
3.4.1	Description générale du processus.....	79
3.4.2	Etat de la technique.....	81
3.4.3	Schémas de flux .....	82
3.4.4	Qualité des fractions issues du traitement .....	83
3.4.5	Aspects économiques .....	84
3.4.6	Protection de l'environnement.....	85
3.4.7	Risques.....	86
3.4.8	Synthèse.....	86
3.5	Traitements combinés .....	87
3.5.1	Description générale du processus .....	87
3.5.2	État de la technique.....	87
<b>4</b>	<b>Scénarios futurs de gestion et de traitement des déchets bitumineux en Suisse .....</b>	<b>88</b>
4.1	Vue d'ensemble quantités concernées et possibilités par catégories.....	88
4.2	Déchets bitumineux contaminés HAP > 250 mg/kg .....	89
4.2.1	Traitement dans une installation thermique dédiée à l'étranger (Pays Bas)	89
4.2.2	Traitement dans une ou plusieurs nouvelles installations thermiques dédiées en Suisse	90
4.2.3	Traitement en cimenterie en Suisse.....	91
4.2.4	Pyrolyse en Suisse.....	91
4.2.5	Traitements préalables envisageables afin de séparer les granulats minéraux	92
4.3	Déchets bitumineux potentiellement valorisable HAP < 250 mg/kg.....	93
4.4	Synthèse – scénarios à privilégier.....	95
4.4.1	Aspects généraux.....	95
4.4.2	Aspects économiques .....	95
4.4.3	Synthèse.....	97
<b>5</b>	<b>Conclusion / recommandations.....</b>	<b>101</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>106</b>

## Annexes

<b>Annexe A</b>	<b>Liste des entités contactées.....</b>	<b>110</b>
<b>Annexe B</b>	<b>Estimation des quantités de déchets à traiter par</b>	<b>112</b>
<b>canton</b>		
<b>Annexe C</b>	<b>Evaluation économique estimative.....</b>	<b>113</b>

## Figures

<i>Figure 1: Principes de récupération des déchets de chantier minéraux (source: OFEV, 2010).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 2: Exigences relatives à la qualité des matériaux de récupération (source: OFEV, 2010).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 3: Possibilités d'utilisation des six sortes de matériaux d'utilisation.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 4: Structure schématique de la superstructure routière (source : Modélisation des flux de bitume en Suisse, Energie- und Ressourcen-Management GmbH).....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 5: Ajout maximal possible d'asphalte recyclé.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 6 : Production totale d'enrobés à chaud et à tiède dans l'UE-28 (en vert) et l'UE-28 plus la Norvège, la Suisse et la Turquie (en bleu) au cours de la période 2008-2018 (données tirées de [8]).....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 7 : Application des enrobés en couche de roulement (Deckschicht), couche de liaison (Binderschicht) et couche de base (Tragschicht) en pourcentage de la production totale 2018 (données tirées de [8]).....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 8 : Production totale d'enrobés chauds et tièdes en Suisse et dans les pays voisins au cours de la période 2008-2018 (données tirées de [8]).....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 9: Production (Asphaltproduktion) et réutilisation des agrégats bitumineux (Asphaltgranulat) en Allemagne (Deutscher Asphaltverband, 2020).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 10: Proportion d'agrégats bitumineux recyclés en Allemagne (Deutscher Asphaltverband, 2020).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 11 : Production d'enrobés bitumineux aux Pays-Bas et disponibilité en agrégats bitumineux recyclés (extrait de [12]).....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 12: Synthèse des déchets bitumineux produits en Suisse pour la période 2018-2035.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 13: Déchets bitumineux non valorisés à l'horizon 2026-2035 selon les différents scénarios.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 14: Répartition des quantités à traiter par canton (pourcentage) sur la base du flux de production des routes.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 15 : Principe de séparation de la fraction minérale et du liant ou fraction riche en liant.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 16: Vue d'ensemble des flux entrants et sortants liés au processus de traitement thermique REKO.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 17: Schéma du processus de traitement thermique de REKO B.V. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 18 : Diagramme du flux massique des processus de traitement thermique de REKO (extrait de [16]).....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 19 : Nombre de navires pour le transport d'un même tonnage en fonction du niveau du Rhin [19].....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 20 : Niveaux d'eau Kaub et Maxau (01/2000 à 11/2020). Source des données : Administration des voies navigables et de la navigation (WSV).....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 21 : Hydrogrammes des niveaux d'eau de la jauge Kaub de 2002 et 2003 avec mention des incidents. Source des données : Administration des voies navigables et de la navigation (WSV).....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 22 : Résultats nets pour le domaine Changement climatique relatif à la comparaison entre la valorisation thermique aux Pays-Bas (orange) et de la valorisation comme matériau pour l'aménagement décharges en Allemagne (bleu) pour les scénarios le plus favorables (génération du déchet à Mannheim) et le plus défavorable (génération du déchet à Schönau) [16].....</i>	<i>63</i>

<i>Figure 23 : Résultats de l'analyse du cycle de vie comparative de l'Institut Fraunhofer entre la valorisation thermique aux Pays-Bas et la valorisation comme matériau pour l'aménagement de décharges en Allemagne [16] .....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 24 : Carte des cimenteries suisses [Source : Cemsuisse].....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 25 : Production de clinker de ciment en utilisant l'exemple d'un four de calcination [Source : GTZ-Holcim] .....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 26 : Représentation schématique d'une installation de pyrolyse .....</i>	<i>70</i>
<i>Figure 27 : Schéma de flux d'un traitement mécanique permettant une séparation des grains &gt; 8mm .....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 28 : Schéma de flux d'un traitement mécanique permettant une séparation des grains &gt; 2mm .....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 29: Aperçu du processus de traitement chimique de HEMO Recycling .....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 30: Processus de traitement physico-chimique des agrégats bitumineux et des matériaux broyés .....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 31: Vue d'ensemble de l'installation de nettoyage ARCA en 2D et 3D.. .....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 32.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 33 : Agrégats bitumineux 16/70 avant (à gauche) et après (à droite) le traitement chimique.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 34 : Rappel des quantités maximales de déchets bitumineux à traiter selon les scénarios .....</i>	<i>88</i>
<i>Figure 35 : Synthèse des bilans économiques des différentes filières de traitement.....</i>	<i>99</i>
<i>Figure 36 : Rappel des quantités maximales de déchets bitumineux à traiter selon les scénarios .....</i>	<i>102</i>

## Tableaux

<i>Tableau 1: Synthèse des filières de valorisation autorisées en Suisse (y c. évolutions prévues).....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 2 : Synthèse des filières de valorisation autorisées en France .....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 3 : Limite HAP pour utilisation comme matériau de construction (source :VLAREMA Annexe 2.3.2.A) ..</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 4 : Synthèse des filières de valorisation autorisées en région wallonne, Belgique (y c. évolutions prévues) .....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 5: Synthèse des filières autorisées en Italie .....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 6 : Classes de recyclage en Allemagne selon "RuVA-StB 01 (version 2005)", extrait traduit de [3].....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 7 : Synthèse des filières de valorisation autorisées en Allemagne .....</i>	<i>26</i>
<i>Tableau 8 : Synthèse des filières de valorisation autorisées en Autriche .....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 9 : Filières de valorisation autorisées selon la concentration en HAP aux Pays-Bas.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 10: Synthèse comparatives des filières autorisées pour la Suisse et l'UE .....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 11: Enrobés bitumineux, quantités admissibles d'agrégats d'enrobés en fonction des couches, des sortes et des types d'enrobés (SN 640 431-1b-NA) .....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 12 : Comparatif des teneurs maximales en agrégats de bitume recyclés admissibles en Suisse selon la norme VSS, le manuel OFROU et le futur guide en cours de rédaction .....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 13 : Teneurs maximales en agrégats recyclés autorisées en France .....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 14 : Teneurs maximales en agrégats recyclés autorisées en Belgique .....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 15 : Teneurs maximales en agrégats recyclés autorisées en Allemagne (extrait de [4]) .....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 16 : Teneurs maximales en agrégats recyclés autorisées aux Pays-Bas (extrait de [4]) .....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 17 : synthèse comparative des teneurs maximales en agrégats bitumineux recyclés admissibles pour la Suisse et l'UE.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 18: Bilan matière des déchets bitumineux par filière de valorisation (source: Rubli, 2020) .....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 19: Définition des scénarios en fonction des hypothèses de taux de valorisation dans la construction routière .....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 20: Synthèse des quantités excédentaires non valorisés à traiter .....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 21 : Synthèse simplifiée de la répartition granulométrique des différentes couches de revêtement. ....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 22 : Aperçu des installations de traitement thermique existantes aux Pays-Bas .....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 23 : Composition des frais d'exploitation pour l'installation de traitement de HEMO Recycling SA .....</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 24 : Coûts totaux de traitement pour les différentes filières d'évacuation .....</i>	<i>97</i>
<i>Tableau 25 : Synthèse de l'évaluation des caractéristiques des différentes filières de traitement .....</i>	<i>100</i>

## Liste des Abréviations

EAPA	European asphalt pavement association
EN	Normes européennes
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HAP < 250 mg/kg	Teneur en HAP inférieure à 250 mg/kg (ou ppm)
HAP > 250 mg/kg	Teneur en HAP supérieure à 250 mg/kg (ou ppm)
IDRRIM	Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (France)
LPE	Loi sur la protection de l'environnement
OLED	Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFROU	Office fédéral des routes
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement (équivalent anglophone des agrégats bitumineux)

## Définitions

Agrégats bitumineux ou agrégats d'enrobés	Matériaux triés et concassés provenant du fraisage ou de la démolition des chaussées bitumineuses et composés de bitume, granulats grossiers et fins, et filler (granulat très fins de diamètre inférieur à environ 0.1mm).
Bitume	Le bitume est un produit de la distillation du pétrole, il est constitué de composés hydrocarbonés avec seulement une très faible proportion d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [1].
Coût de revient	Dans la présente étude, on entend par coût de revient, le coût total que doit supporter l'exploitant pour la prise en charge d'une tonne de déchet. Ce coût total correspond à la somme des coûts fixes (y.c amortissement des investissements) et des coûts variables engendrés par l'installation de traitement.
Goudron	Le goudron est un produit obtenu après la cokéfaction (pyrolyse) du charbon et la distillation ultérieure du goudron brut. Il est presque entièrement constitué de composés d'hydrocarbures aromatiques avec de fortes proportions de HAP et de composés phénoliques. Sa présence dans les enrobés routiers en font un matériau de construction dangereux et critique pour l'environnement [1].
Valorisation à froid	Utilisation sous forme non liée à froid dans les fondations OU

Utilisation sous forme liée dans la production d'enrobés à froid (5°C – 30°) pouvant être réalisée en centrale ou sur place et dont les étapes principales sont les suivantes: fragmentation et éventuel rajout d'eau et de granulats vierges pour corriger la granulométrie, ajout d'un liant à froid : soit un liant bitumineux sous la forme d'une émulsion ou d'une mousse de bitume, soit un liant bitumineux additivé d'un liant hydraulique (ciment ou chaux hydratée) – liant composite.

Valorisation à chaud

Utilisation sous forme liée dans la production d'enrobés à chaud (> 140°C) pouvant être réalisée en centrale ou sur place – chauffage pour ramollir l'enrobé et régénération du bitume par l'apport d'adjuvants.

Le présent rapport suppose une interdiction du stockage en décharge de tous les déchets bitumineux à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2026. Ce délai a été repoussé au 1<sup>er</sup> janvier 2031 durant la phase de rédaction. Ceci s'applique aussi pour le rapport de la phase I « Modélisation des flux du bitume en Suisse » établi par le bureau Energie- und Ressourcen-Management GmbH en août 2020.

## 1 Introduction

### 1.1 Mandat

Dans le cadre l'application des nouvelles dispositions de l'OLED dès 2026, et notamment l'interdiction de la mise en décharge et de la valorisation dans la construction des déchets bitumineux présentant une teneur en HAP supérieure à 250 mg/kg, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) souhaite avoir une vision claire de la situation actuelle et des évolutions futures afin d'évaluer les opportunités de développement de nouvelles filières de traitement de ces déchets en Suisse.

Dans ce contexte, l'OFEV a mandaté CSD Ingénieurs SA en mai 2020 pour effectuer une analyse technique et économique de la situation de l'élimination des déchets bitumineux en Suisse et de son évolution et élaborer sur cette base des recommandations pour la planification nationale des installations de traitement nécessaires pour la période 2026 – 2035.

Plus précisément, le but de l'étude est d'établir un état de la technique des filières et installations de traitement des déchets bitumineux à l'échelle de la Suisse et de l'Europe afin d'identifier clairement les facteurs clé de la faisabilité technico-économique d'une (ou plusieurs) installation de traitement sur le sol national, et d'établir des recommandations concrètes pour l'avenir.

Le présent rapport constitue un document de référence sur l'état de la technique actuel et prospectif du traitement des déchets bitumineux de sorte à disposer des bases permettant de concrétiser la stratégie souhaitée et intégrant notamment les aspects suivants :

- Mettre en œuvre des principes du modèle d'économie circulaire avec une augmentation du taux de valorisation matière.
- Assurer la sécurité du désapprovisionnement dans le contexte de l'application des nouvelles dispositions de l'OLED dès 2026.
- Garantir la pertinence environnementale et économique des solutions préconisées, en identifiant le cas échéant les leviers ou mesures à mettre en œuvre au niveau des conditions cadre et du cadre réglementaire le cas échéant.

Sur cette base, le rapport est structuré comme suit :

- Problématique à résoudre – cadre et objectif (chapitre 2)
- État de la technique – installations de traitement (chapitre 3)
- Scénarios futurs de gestion et traitement des déchets bitumineux en Suisse (chapitre 4)
- Conclusion et recommandations (chapitre 5)

## 1.2 Bases de l'étude

---

La réalisation de l'étude a été effectuée en coordination et sur la base des résultats de l'étude parallèle menée par le bureau Energie- und Ressourcen-Management GmbH (M. Rubli) dont le but était d'établir une synthèse des quantités des déchets bitumineux actuelles et futures (2026-2035) selon 4 scénarios, en distinguant les 2 catégories - teneur en HAP supérieure et inférieure à 250mg/kg. Cette étude a fait l'objet d'un rapport final « Modélisation des flux du bitume en Suisse » édité en août 2020.

Par ailleurs, un travail bibliographique important a été effectué d'une part pour déterminer les principes de gestion des déchets bitumineux à l'échelle de la Suisse et de l'Union européenne et également en vue de faire l'état des lieux des différentes installations de traitement existantes ou en développement dans ces mêmes régions. Les documents de références sont disponibles dans la Bibliographie insérée à la fin du présent document.

En parallèle, différents organismes et entités actives dans le domaine de la gestion des déchets, de la production d'enrobés bitumineux ou tout autre domaine en lien avec la présente étude, tels que des associations faitières / professionnelles, des instituts de recherches / hautes écoles / universités, administrations ou entreprises, ont été contactés afin d'obtenir des informations les plus complètes possibles. Les entités, dont la liste est disponible en Annexe A, ont été contactées soit pour discuter de la thématique de manière générale soit pour aborder des points ponctuels spécifiques.

---

## 2 Problématique à résoudre – cadre et objectif

---

### 2.1 Problématique générale à résoudre

---

En Suisse, les matériaux bitumineux issus de la démolition des routes représentent un volume de déchets conséquent qui font l'objet de différentes filières d'élimination/valorisation en fonction de leur teneur en Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) selon les dispositions concernées de l'Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets.

Pour rappel, l'enrobé bitumineux est un mélange de liant bitumineux et de granulats dont les teneurs en HAP sont en réalité liées à la présence de goudron dans le liant. En effet, le mélange « Bitume-Goudron » a été utilisé jusqu'à son interdiction en Suisse dans les années 1985-1986. Depuis cette période, seuls les liants à base de bitume sont utilisés. Ce dernier est le résultat de la distillation du pétrole et ne contient que très peu de HAP, ce qui le rend beaucoup moins nocif que le goudron.

Dans le cadre d'une réflexion globale sur la gestion des déchets bitumineux et afin d'œuvrer au développement d'un modèle d'économie circulaire, il est nécessaire de mettre en place des nouvelles filières de valorisation/traitement des déchets bitumineux, notamment en lien avec les deux évolutions planifiées/envisagées suivantes :

- A partir du 1<sup>er</sup> janvier 2026, selon l'OLED les déchets bitumineux présentant une concentration en HAP supérieure à 250mg/kg ne pourront plus être valorisés directement dans la construction ni stockés en décharge.
- En raison de la pénurie des volumes de stockage disponibles dans plusieurs cantons et afin de développer le principe d'économie circulaire, l'OFEV prévoit d'interdire de manière générale au 1<sup>er</sup> janvier 2026 la mise en décharge des déchets bitumineux quelle que soit leur teneur en HAP.

Actuellement, l'unique filière de traitement possible pour les déchets à forte teneur en HAP (> 1'000 mg/kg selon la réglementation actuelle ; > 250mg/kg dès 2026) est le traitement en installation thermique dédiée aux Pays-Bas permettant de détruire le liant et les HAP qu'il contient et de récupérer les granulats minéraux, ce qui rend nécessaire d'aborder la question du traitement de ces déchets sur le sol national.

En ce qui concerne les déchets dont le contenu en HAP est inférieur à 250mg/kg, la filière de valorisation des agrégats bitumineux pour la construction routière est déjà bien en place, mais ne permet à l'heure actuelle pas d'absorber la quantité totale de déchets produits (exigences des normes routières ; technologie des centrales de production d'enrobés ; pratiques et habitudes des différents acteurs de la construction ; ...).

Sur cette base, les différents enjeux à considérer, qui seront développés plus en détail dans la suite du rapport, sont énumérés ci-dessous :

- D'un point de vue général, la quantité globale maximale valorisable des déchets bitumineux (en tant qu'agrégats) dans la construction routière dépend des éléments suivants:
  - La teneur maximale admissible dans chacune des couches (normes / pratiques concrètes)
  - L'extension de la surface asphaltée dans le futur qui conditionne le paramètre « offre vs demande » en agrégats recyclés. En effet, par le passé et jusqu'à un futur proche, une

extension relativement importante du réseau routier et des places asphaltées est à considérer, générant une demande importante en agrégats recyclés. Les orientations définies en matière d'aménagement du territoire et de mobilité vont fortement limiter la création de nouvelles routes ou places asphaltées à moyen terme, ce qui aura pour effet de limiter la demande potentielle en agrégats bitumineux recyclés. Afin d'éviter d'être confronté à des quantités importantes d'excédents d'agrégats bitumineux non valorisés, cette évolution implique d'augmenter significativement la proportion d'agrégats bitumineux recyclés utilisés lors des travaux de réfection du réseau routier existant et à venir.

- Ces différents éléments ont fait l'objet d'une modélisation dans le cadre de l'étude parallèle mandatée par l'OFEV "Modélisation des flux du bitume en Suisse" menée par Energie- und Ressourcen-Management GmbH (M. Rubli), qui a fait l'objet d'un rapport distinct édité en août 2020 et dont les principaux résultats sont résumés au chapitre 2.6.1
- Concernant les déchets dont le contenu en HAP est supérieur à 250mg/kg :
    - Compte tenu de l'interdiction de mise en décharge et de valorisation directe dans la construction, il sera nécessaire de mettre en œuvre des filières qui permettent d'éliminer les contaminants ou de séparer la fraction problématique (à éliminer dans tous les cas).
  - Concernant les déchets dont le contenu en HAP est inférieur à 250mg/kg :
    - Une quantité encore trop importante de ces déchets est aujourd'hui acheminée en décharge (type B). Il est donc nécessaire d'optimiser la valorisation des agrégats bitumineux recyclés dans le cadre de la construction routière en actionnant différents leviers : évolution du cadre normatif ; évolution de la technologie des centrales de production d'enrobés ; sensibilisation des différents acteurs du domaine de la construction, meilleure intégration de cet objectif dans les critères d'appels d'offres ; ...
    - Au cas où, malgré ces efforts de stimuler le recyclage des agrégats bitumineux dans la construction routière, un excédant non valorisés devrait subsister à moyen / long terme, d'autres filières de traitement devront être mises en œuvre et développées, permettant de valoriser sélectivement les différents composants des agrégats bitumineux (liant ou fraction riche en liant ; granulats minéraux).

## 2.2 Bases légales, réglementaires et normatives en Suisse

A partir des dispositions de la Loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE), la principale base légale en matière de gestion des déchets bitumineux en Suisse est l'**Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED)**. Outre les dispositions de l'OLED, d'autres directives sont à considérer telles que la *Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux, OFEV 2006, 2<sup>e</sup> édition actualisée 2010*, qui définit les principes et exigences de valorisation pour les déchets de chantier minéraux dont font partie les déchets bitumineux. Cette dernière est cependant amenée à être remplacée prochainement.

### **Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED) du 4 décembre 2015 (État au 1er janvier 2018)**

Au sens de l'OLED, les déchets bitumineux font partie des déchets de chantier, définis comme « les déchets produits lors de la construction, de la transformation ou de la déconstruction d'installations fixes ».

Les articles 20 et 52 cités ci-après définissent les conditions de valorisation des déchets provenant de la démolition d'ouvrages construits et en particulier des matériaux bitumineux. Par ailleurs, selon l'annexe 5 ch. 2.1, e. de l'OLED, « les matériaux bitumeux de démolition dont la teneur en HAP ne dépasse pas 250 mg par kg » font partie des déchets actuellement admis dans les décharges de type B.

- **OLED - Art. 20 Déchets minéraux provenant de la démolition d'ouvrages construits**

<sup>1</sup> Les matériaux bitumineux de démolition dont la teneur en HAP ne dépasse pas 250 mg par kg, les matériaux non bitumineux de démolition des routes, les matériaux de démolition non triés et les tessons de tuiles doivent autant que possible être valorisés intégralement comme matières premières pour la fabrication de matériaux de construction.

<sup>2</sup> Il est interdit de valoriser les matériaux bitumineux de démolition dont la teneur en HAP dépasse 250 mg par kg. [..]

- **OLED - Art. 52 Matériaux bitumineux de démolition**

<sup>1</sup> Les matériaux bitumineux de démolition dont la teneur en HAP dépasse 250 mg par kg peuvent être valorisés dans le cadre de travaux de construction jusqu'au 31 décembre 2025 :

- a. si les matériaux bitumineux contiennent au maximum 1000 mg de HAP par kg et sont mélangés à d'autres matériaux dans des installations appropriées de manière à ce qu'ils contiennent au plus 250 mg de HAP par kg dans les matériaux valorisés, ou
- b. si les matériaux bitumineux sont utilisés avec l'accord de l'autorité cantonale de façon à empêcher les émissions de HAP. L'autorité cantonale saisit la teneur exacte en HAP dans les matériaux bitumineux de démolition ainsi que les coordonnées du site de valorisation; elle conserve ces informations pendant au moins 25 ans.

<sup>2</sup> Les matériaux bitumineux de démolition dont la teneur en HAP dépasse 250 mg par kg peuvent être éliminés dans une décharge du type E jusqu'au 31 décembre 2025.

Sur cette base, les différentes filières d'élimination/valorisation autorisées en Suisse en fonction de leur teneur en Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), avec mise en évidence de l'évolution prévue au 1<sup>er</sup> janvier 2026, (y c. évolution), sont synthétisées dans le Tableau 1 ci-après.

Celui-ci intègre également les informations transmises par l'OFEV qui prévoit d'interdire la mise en décharge des déchets bitumineux de manière générale afin de développer le principe d'économie circulaire mais aussi en raison de la pénurie des volumes des stockages en décharges de type B et E dans plusieurs cantons.

Teneur en HAP	2020 - 2025 (OLED)	2026 et après (OLED et évolutions envisagées)
< 250 mg/kg	Valorisation routière à privilégier Mise en décharge possible (type B)	Valorisation routière à privilégier Interdiction de la mise en décharge envisagée par l'OFEV
250 – 1000 mg/kg	Valorisation routière possible sous conditions Mise en décharge possible (type E)	Valorisation interdite Mise en décharge interdite
> 1000 mg/kg	Valorisation interdite Élimination thermique Mise en décharge possible (type E)	

Tableau 1: Synthèse des filières de valorisation autorisées en Suisse (y c. évolutions prévues)

En plus des dispositions précitées qui établissent les conditions minimales à respecter pour la valorisation des déchets bitumineux bruts triés à la source, d'autres dispositions de l'OLED sont à prendre en compte pour la présente étude.

En particulier, les conditions de valorisation des matériaux d'excavation et de percement définies à l'article 19 et Annexe 3 de l'OLED, sont potentiellement à considérer pour déterminer les possibilités et limites de valorisation de la fraction de granulats minéraux contenue dans les déchets bitumineux qui aurait été séparée de la fraction riche en liant dans le cadre d'un processus de traitement.

La synthèse de ces dispositions peut être résumée de la manière suivante :

- Sont considérés comme matériaux d'excavation et de percement **non pollués**, les matériaux qui satisfont aux exigences de l'annexe 3 ch. 1 OLED, soit une composition d'au moins 99 % en poids de roches meubles ou concassées (le reste est constitué d'autres déchets de chantier minéraux) et en particulier une teneur en HAP de **3 mg/kg de matière sèche** (Benzo[a]pyrène) : 0.3 mg/kg). Ces matériaux doivent être valorisés comme matériaux de construction sur des chantiers ou dans des décharges, comme matières premières pour la fabrication de matériaux de construction, pour le comblement de sites de prélèvement de matériaux, ou pour des modifications de terrain autorisées. Les fractions non valorisables sont admises dans les décharges de type A (Annexe 5 ch. 1 OLED)
- Sont considérés comme matériaux d'excavation et de percement **faiblement pollués** les matériaux d'excavation et de percement qui satisfont aux exigences de l'annexe 3 ch. 2 OLED soit une composition d'au moins 95 % en poids de roches meubles ou concassées (le reste est constitué d'autres déchets de chantier minéraux) et en particulier une teneur en HAP de **12.5 mg/kg de matière sèche** (Benzo[a]pyrène) : 1.5 mg/kg). Ils doivent être valorisés en tant que matières premières pour la fabrication de matériaux de construction aux liants hydrauliques ou bitumineux, comme matériaux de construction dans des décharges des types B à E, comme matières premières pour la fabrication de clinker de ciment, dans les travaux de génie civil à l'endroit d'où proviennent les matériaux, pour autant que, si un traitement des matériaux est nécessaire, il ait lieu à l'endroit lui-même ou à proximité immédiate; est réservé l'art. 3 de l'ordonnance du 26 août 1998 sur les sites contaminés (OSites).

**Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux, OFEV**

Selon la Directive pour la valorisation des déchets de chantier (OFEV, 2005) les déchets bitumineux concernés par la présente étude sont définis comme suit : « **Le terme générique de matériaux bitumineux (de démolition des routes) désigne aussi bien les produits du fraisage à froid, couche par couche, d'un revêtement bitumineux que les morceaux résultant de la démolition de ce revêtement** ».

Les principes de valorisation des déchets de chantier minéraux jusqu'à l'utilisation des matériaux de récupération sont présentés à la Figure 1 ci-après.

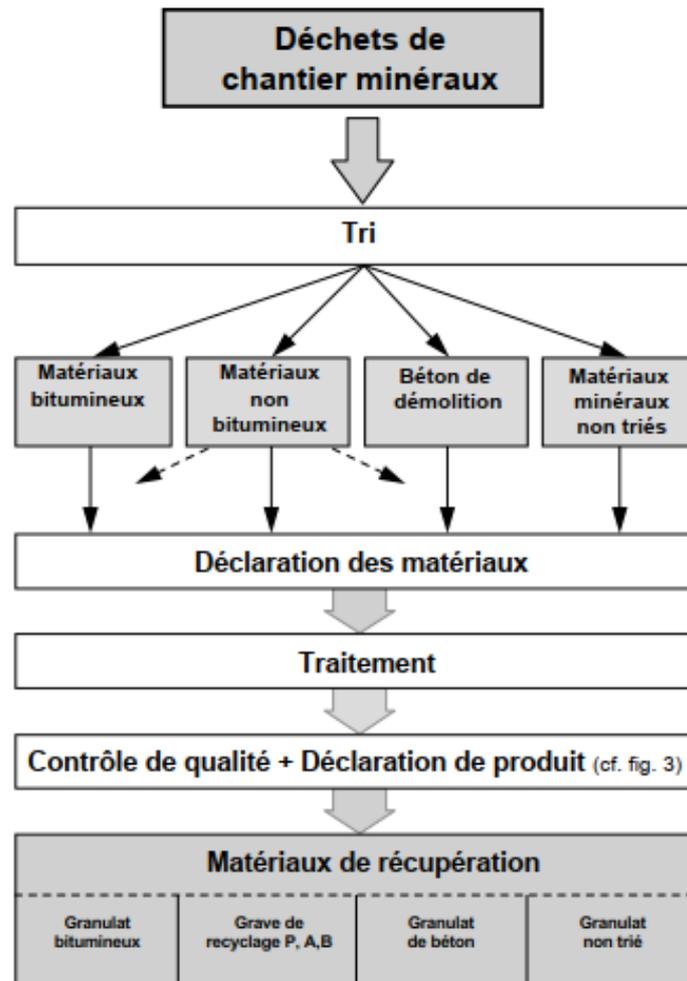


Figure 1: Principes de récupération des déchets de chantier minéraux (source: OFEV, 2010)

Sur les quatre catégories de matériaux de récupération définies par la directive présentées à la Figure 2 ci-après, les deux catégories suivantes concernent spécifiquement les agrégats bitumineux :

- Granulat bitumineux
- Grave de recyclage A

Catégories de déchets de chantier Matériaux de récupération	Matériaux bitumineux	Grave	Béton de démolition	Matériaux minéraux non triés	Corps étrangers
Granulat bitumineux	80	20		2	0.3*
Grave de recyclage P	4	95	4	1	0.3
Grave de recyclage A	20	80	4	1	0.3
Grave de recyclage B	4	80	20	1	0.3
Granulat de béton	3**		95	2	0.3
Granulat non trié	3		97		0.3% sans plâtre + 1% plâtre + 1% verre

	Constituants principaux: pourcentages massiques minimaux
	Constituants secondaires: pourcentages massiques maximaux
Corps étrangers	Pourcentage total maximal (bois, papier, plastique, métaux, plâtre...)
*	En cas de mise en œuvre à chaud: 0% (pour des raisons techniques)
* *	En cas d'utilisation pour béton normalisé: 0%

Figure 2: Exigences relatives à la qualité des matériaux de récupération (source: OFEV, 2010)

En ce qui concerne la Grave de recyclage A, il est interdit de mélanger du gravier à du granulat bitumineux pour obtenir de la grave de recyclage A. Cependant, « le service cantonal compétent peut, au cas par cas, autoriser une proportion de 30 % de matériaux bitumineux dans la grave de recyclage A, à condition toutefois qu'il soit certifié que ni matériaux ni granulat bitumineux ne lui ont été adjoints ». La pratique du mélange est toutefois encore utilisée dans certains cantons, en particulier dans les cantons romands.

La Figure 3 ci-après présente les usages possibles des matériaux de récupération qui présentent la qualité requise.

Utilisations admises Matériaux de récupération	Mise en œuvre sous forme non liée		Mise en œuvre sous forme liée	
	sans revêtement	avec revêtement	aux liants hydrauliques	aux liants bitumineux
Granulat bitumineux	*	**		
Grave de recyclage P				
Grave de recyclage A				
Grave de recyclage B				
Granulat de béton				
Granulat non trié				

	Utilisation admise
	Utilisation avec restriction: possible uniquement pour des planies sous un revêtement bitumineux
	Utilisation interdite
	Utilisation possible à condition que la couche ne dépasse pas 7 cm d'épaisseur et que le granulat bitumineux soit laminé

Figure 3: Possibilités d'utilisation des six sortes de matériaux d'utilisation

L'utilisation des **granulats bitumineux** recyclés est donc possible sous forme non liée pour autant qu'ils soient mis en œuvre comme planie sous un revêtement bitumineux (et éventuellement après laminage sans revêtement sur une épaisseur inférieure à 7 cm) et sous forme liée avec des liants bitumineux.

La **grave de recyclage A** peut être valorisée selon les mêmes exigences que les granulats bitumineux avec une possibilité d'utilisation plus importante dans les couches sous-jacentes (ensemble des couches de fondations ; remblais) sous un revêtement imperméable.

La pérennité de cette catégorie de matériaux de recyclage est potentiellement remise en cause, du fait du mélange entre agrégats bitumineux et grave qui peut être considérée comme problématique dans une perspective de gestion durable des ressources et des déchets.

En l'état, on peut considérer que les exigences de la Directive pour la valorisation des déchets de chantier (OFEV 2006), s'appliquent par analogie aux différentes fractions issues d'un traitement des agrégats bitumineux visant à séparer par exemple les granulats minéraux d'une fraction riche en liant bitumineux.

On peut donc considérer que la fraction de granulats minéraux issue d'un processus de traitement pourra au moins être valorisée selon les mêmes possibilités que celles définies pour la catégorie « Granulat Bitumineux » par cette Directive.

Pour des processus permettant d'abaisser la teneur résiduelle en liant dans le granulat minéral séparé à environ 1%, on peut admettre que les conditions d'utilisation de la Grave de recyclage A pourraient s'appliquer - possibilité d'utilisation sur l'ensemble des couches sous-jacentes protégées par un revêtement imperméable.

Ces éléments seront précisés dans le cadre de la nouvelle Aide à l'exécution de l'OFEV « Valorisation de matériaux minéraux de déconstruction » prévue prochainement et qui remplacera la Directive pour la valorisation des déchets de chantier, qui nécessite une mise à jour en plusieurs points. Selon les informations transmises, la notion de Grave A sera par exemple supprimée car elle ne correspond plus à l'état de la technique.

**Autres bases légales à considérer**

En complément des dispositions relatives à la gestion et au traitement des déchets précitées, d'autres bases légales peuvent s'appliquer, en particulier dans le cadre de la mise en œuvre des différentes filières de traitement de ces déchets. Notamment, l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) en ce qui concerne la gestion des fumées des installations de traitement, ou encore l'Ordonnance sur la taxe d'incitation sur les composés organiques volatils (OCOV) dans le cadre de traitement chimiques consommateur de solvants. De manière plus générales, les installations devront également respecter les différentes exigences applicables, notamment en matière de protection des eaux (Ordonnance sur la protection des eaux - OEaux) ou du bruit (Ordonnance de la protection contre le bruit - OPB).

## 2.3 Synthèse du cadre légal et réglementaire des pays voisins

Ce chapitre se concentre sur l'Union Européenne (UE) et en particulier la France, la Belgique, l'Italie, l'Allemagne, l'Autriche et les Pays-Bas, en identifiant les aspects règlementaires à l'échelle de l'UE et ceux laissés libres aux réglementations nationales.

En matière de gestion des déchets, les directives et réglementations européennes édictent les principes généraux à respecter en laissant une marge de manœuvre aux pays membres. La principale base légale concernant la gestion des déchets bitumineux dans l'Union européenne est la « Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives », entrée en vigueur dans les États membres le 12 décembre 2010.

Cette directive reprend et réaffirme les orientations majeures de la politique de gestion des déchets (hiérarchie des déchets, principe du pollueur-payeur, protection de l'environnement, ...) en **fixant notamment comme objectif de réutiliser au minimum 70 % en poids des déchets non dangereux issus de la déconstruction et de la démolition** (article 11. 2. B) dont font partie les déchets bitumineux.

Plus particulièrement concernant les HAP, la directive « 2003/33/CE : Décision du Conseil du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE » définit les installations de stockage par type de déchet. L'annexe III de la « Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives » définit les propriétés qui rendent les déchets dangereux.

Par ailleurs, selon la liste européenne de déchets (« 2001/118/CE : Décision de la Commission du 16 janvier 2001 modifiant la décision 2000/532/CE en ce qui concerne la liste de déchets »), les déchets bitumineux ou contenant du goudron sont classifiés en 3 catégories selon une numérotation identique à la liste des déchets selon l'ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD) (les numéros de déchets présentant un astérisque faisant partie des déchets dangereux) :

- 17 03 01\* : mélanges bitumineux contenant du goudron
- 17 03 02 : mélanges bitumineux autres que ceux visé à la rubrique 17 03 01
- 17 03 03\* : goudron et produits goudronnés

Sur cette base, les déchets contenant du goudron sont considérés comme des déchets dangereux et ne peuvent donc pas être valorisés à chaud. Cependant, la définition d'un agrégat bitumineux contenant du goudron diffère selon les pays. Par ailleurs, certains pays autorisent la valorisation à froid sous certaines conditions.

Pour ces raisons et également en lien avec les interprétations diverses de la notion de sortie du statut de déchet (principes généraux édictés par l'article 6 de la Directive cadre européenne qui définissent à partir de quand « certains déchets cessent d'être des déchets ») pour les déchets bitumineux dans les différents pays, **il n'existe pas à l'échelle de l'UE de réglementation uniforme concernant les limites autorisées de HAP pour les différentes filières**, ces dernières sont fixées par les États membres.

### Remarques relatives aux méthodes de quantification des teneurs en HAP

Il convient de mentionner que les teneurs en HAP spécifiées dans l'OLED sont basées sur la liste compilée par l'United States Environmental Protection Agency (EPA) qui énumère 16 composés de HAP individuels qui sont classés comme polluants environnementaux prioritaires et sont souvent testés dans des échantillons environnementaux en tant que substituts du groupe de HAP. Il s'agit des composés de HAP suivants: acénaphène, acénaphylène, anthracène, benzo[a]anthracène, benzo[a]pyrène, benzo[b]fluoranthène, benzo[g,h,i]pérylène, benzo[k]fluoranthène, chrysène, dibenzo[a,h]anthracène, fluoranthène, fluorène, indéno[1,2,3-cd]pyrène, naphthalène, phénanthrène et pyrène. Sur cette base, la teneur en HAP d'un solide est déterminée par l'addition de ces différents composés HAP [1]. Toutefois,

d'autres méthodes de mesure existent et se basent par exemple sur la somme de 10 HAP, ou uniquement sur la mesure du benzo[a]pyrène par exemple. Dans la suite du document, les limites de teneurs en HAP qui se basent sur une méthode différente de la somme des 16 HAP selon l'EPA seront spécifiées.

### 2.3.1 France

En France, les goudrons ne sont plus utilisés depuis 1993 et les dérivés houillers (autres produits issus de la distillation de la houille) depuis 2005. Contrairement à la réglementation suisse, la réglementation française distingue la valorisation à froid et la valorisation à chaud. Les différentes filières d'élimination/valorisation autorisées en France, en fonction de leur teneur en HAP, sont synthétisées dans le Tableau 2 ci-après sur la base de l'Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes. D'un point de vue réglementaire, les 3 filières suivantes sont donc possibles et a priori aucune évolution n'est envisagée : (1) valorisation à chaud, (2) valorisation à froid, (3) mise en décharge.

En plus de ce cadre légal général, plusieurs autres documents et directives encadrent la volonté d'augmenter le taux de recyclage des déchets bitumineux, dont les suivants :

- L'article 79 de la LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte définit des taux minimum d'utilisation de matériaux valorisés dans les couches de surfaces et les couches d'assise (voir paragraphe 2.4.2.1)
- La convention d'engagement volontaire : Cette convention a été signée en 2009 par les syndicats professionnels (USIRF, SPTF, SYNTEC, FNTP), l'État et l'Association des Départements de France. Cette convention fixe notamment comme objectif d'augmenter la réutilisation des agrégats d'enrobés.
- La circulaire du MEEDDM du 9 février 2009 : Cette circulaire demande au maître d'ouvrage Etat d'autoriser un minimum de 10 % d'agrégats d'enrobés recyclés dans les formulations, et d'ouvrir systématiquement les appels d'offres aux variantes, en établissant un critère de notation lié au taux de recyclage.
- Guide « Recyclage des agrégats d'enrobés dans les mélanges bitumineux à chaud » - en cours de rédaction : Traite du recyclage pour des taux allant jusqu'entre 30 et 40 %.

Teneur en HAP*	Réglementation actuelle
< 50 mg/kg	Valorisation tout usage Mise en décharge pour déchets inertes ISDI
50 - 500 mg/kg	Valorisation à froid uniquement Mise en décharge pour déchets non dangereux ISDND
500 - 1000 mg/kg	Valorisation interdite Mise en décharge pour déchets non dangereux ISDND
> 1000 mg/kg	Valorisation interdite Mise en décharge pour déchets dangereux ISDD

Tableau 2 : Synthèse des filières de valorisation autorisées en France

### 2.3.2 Belgique

---

La Belgique est constituée de 3 régions ayant des législations et expériences propres en matière de gestion des déchets. Il s'agit de la Région flamande, la Région wallonne et la Région de Bruxelles-Capitale. Sur la base des informations ayant pu être collectées, il **n'existe pas de réglementation nationale fixant les modalités d'évacuation/traitement/valorisation des déchets bitumineux en fonction de leur teneur en HAP**. Un extrait des dispositions d'intérêt pour la présente étude est présenté pour chacune des régions dans les paragraphes ci-après. De manière générale, il est difficile d'établir une comparaison avec la réglementation Suisse, en raison du fait que les teneurs en HAP ne sont pas mesurées de la même manière.

#### Région flamande

Les principales bases réglementaires sont le Règlement flamand relatif à la prévention et la gestion des déchets (VLAREA) et arrêtés en découlant (dont la dernière modification date du 13 février 2009) et le Règlement flamand pour la gestion durable des cycles de matériaux et des déchets (VLAREMA) entré en vigueur le 1er juin 2012.

Concernant les filières de prise en charge des déchets bitumineux, une distinction est faite entre les granulats d'asphalte (granulat provenant de la démolition ou du fraisage de revêtements d'asphalte) et le sable tamisé d'asphalte (sable provenant du tamisage, après le concassage de débris et après le tamisage préalable du sable de concassage tamisé).

1. Les matériaux d'asphalte contenant des HAP peuvent être utilisés comme matériaux de construction uniquement s'ils répondent aux conditions suivantes :
  - la quantité s'élève au moins à 1 500 mètres cubes;
  - l'application est inventoriée, la commune et la parcelle cadastrale devant au moins être indiquées;
  - ils sont utilisés à froid dans des fondations qui se composent de ciment de granulats d'asphalte
2. **Les granulats d'asphalte**, contiennent des HAP si le test HAP-spray (test de pulvérisation de marqueurs HAP) présente une coloration jaune<sup>1</sup>.
3. **Le sable de concassage d'asphalte ou le sable de concassage tamisé** contient des HAP en cas de dépassement de la norme d'un des hydrocarbures aromatiques polycycliques mentionnés dans le Tableau 3 ci-dessous.

---

<sup>1</sup> A la lumière du jour, la coloration jaune du produit « PAK-Marker » apparaît dès que la teneur en HAP du dépasse environ 13'000 mg/kg, soit environ 650 mg/kg ramené au déchet bitumineux global avec une teneur en liant de 5%.

HYDROCARBURES POLYCYCLIQUES AROMATIQUES	
PARAMETRES	CONCENTRATION TOTALE (3) (mg/kg subst. sèche)
Benzo(a)anthracène	35
Benzo(a)pyrène	8.5
Benzo(ghi)pérylène	35
Benzo(b)fluoranthène	55
Benzo(k)fluoranthène	55
Chrysène	400
Phénanthrène	30
Fluoranthène	40
Indeno(1,2,3cd)pyrène	35
Naphtalène	20

Tableau 3 : Limite HAP pour utilisation comme matériau de construction (source :VLAREMA Annexe 2.3.2.A)

Selon les principes de détection des HAP cités ci-avant, les déchets bitumineux ne contenant pas de HAP peuvent donc être valorisés sans conditions et ceux contenant des HAP seulement à froid. Selon l'état de nos connaissances, il n'y a à priori pas de base légale interdisant la mise en décharge.

#### Région wallonne

Les principales bases réglementaires sont l'Arrêté du Gouvernement wallon favorisant la valorisation de certains déchets du 14 juin 2001 et la Circulaire de mise en application du rapport final n° 2018-00762 de l'ISSeP relatif à la détermination d'un traceur permettant de mesurer la teneur en goudron d'un déchet en vue d'établir sa possible valorisation comme déchet autre que dangereux ou sa dangerosité du 13 juillet 2018. Le composant considéré pour définir les limites de teneurs en HAP pour la valorisation est le benzo(a)pyrène (alors que l'OLED définit les limitations sur la base de la somme des 16 HAP selon l'EPA).

Les différentes filières de valorisation ou de mise en décharge découlant de cette directive sont synthétisées dans le Tableau 4 ci-après.

Teneur en benzo(a)pyrène (HAP)	Filières
< 8.5 mg/kg	Valorisation sans conditions Mise en décharge possible (centre d'enfouissement technique CET de classe 3 ou 5.3)
8.5 - 50 mg/kg	Valorisation à froid Mise en décharge possible
> 50 mg/kg	Mise en décharge (CET de classe 1) ou traitement comme déchet dangereux

Tableau 4 : Synthèse des filières de valorisation autorisées en région wallonne, Belgique (y c. évolutions prévues)

### Région Bruxelles-Capitale

La région de Bruxelles-Capitale met actuellement en place des règles concernant la valorisation des déchets bitumineux, en s'inspirant des critères définis par la Flandre. Aucune information spécifique à ce sujet n'a pu être récoltée dans le cadre de cette étude.

#### 2.3.3 Italie

Concernant la gestion des déchets bitumineux en Italie, la réglementation la plus récente est le décret n° 69 du 28 mars 2018 qui régleme la sortie du statut de déchet pour les agrégats bitumineux au sens de l'article 184-ter, paragraphe 2 du décret législatif n° 152 du 3 avril 2006 et qui stipule :

Le "fraisat" cesse d'être un déchet lorsque, après avoir subi un processus de transformation, il devient un granulé qui respecte les deux conditions suivantes :

1. Il devient réutilisable :
  - pour la production de mélanges bitumineux à chaud
  - pour la production de mélanges bitumineux à froid,
  - pour la production de granulats liés hydrauliquement (c'est-à-dire avec du ciment ou de la chaux) et non liés, conformément à la norme UNI EN 13242.
2. Il fait l'objet d'un contrôle et respecte notamment les limites de concentration en HAP suivante :
  - **100 mg/kg** de HAP (somme des 10 HAP suivants : benzo[a]anthracène, benzo[a]pyrène, benzo[b]fluoranthène, benzo[k]fluoranthène, benzo[g,h,i]pérylène, chrysène, dibenzo[a,e]pyrène, dibenzo[a,l]pyrène, dibenzo[a,i]pyrène, dibenzo[a,h]pyrène, dibenzo[a,h]anthracène)

Sur la base des échanges avec l'organisation faitière SITEB (Strade italiane e bitumi), il ressort que la totalité des déchets bitumineux générés actuellement en Italie ont des teneurs inférieures en HAP à 100 mg/kg. Il n'y a donc pas de réglementation spécifique pour les déchets de routes contenant des quantités supérieures en HAP. En effet, en raison de l'absence de mines de charbon, l'Italie a toujours importé du pétrole et construit ses routes à base de liant bitumineux présentant de très faibles teneurs en HAP.

Lorsque ces déchets n'ont pas pu être valorisés, ceux-ci sont acheminés en décharge. A priori, aucune évolution particulière concernant le cadre réglementaire n'est planifiée à ce jour.

Teneur en HAP*	Réglementation actuelle
< 100 mg/kg	Valorisation routière possible Mise en décharge possible

Tableau 5: Synthèse des filières autorisées en Italie

### 2.3.4 Allemagne

En Allemagne, les déchets bitumineux sont divisés en trois catégories selon la directive «Richtlinie für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Strassenbau (RuVA-StB 01, version 2005)» (directive pour le recyclage compatible avec l'environnement des matériaux de construction routière contenant des composants de goudron et pour le recyclage des agrégats bitumineux dans la construction routière) en fonction de la teneur en HAP et de l'indice de phénol dans le lixiviat (voir Tableau 6) :

- A (HAP  $\leq$  25mg/kg et indice de phénol  $\leq$  0,1),
- B (HAP  $>$  25 mg/kg et indice de phénol  $\leq$  0,1)
- C (valeur des HAP à indiquer, indice de phénol  $>$  0,1).

Si la teneur totale en HAP du déchet bitumineux est inférieure à 25 mg/kg (= classe de recyclage A), le matériau peut être réutilisé sans aucune restriction dans la production d'enrobés bitumineux à chaud ou utilisé sous forme non liée comme matériau de construction routière (voir Tableau 7).

Les déchets bitumineux présentant une teneur en HAP supérieure à 25 mg/kg entrent dans la catégorie de résidus contenant des constituants goudronneux selon la directive susmentionnée [4]. Selon le niveau de l'indice de phénol du lixiviat, ces derniers sont classés dans les catégories de recyclage B ou C. Ces matériaux doivent être valorisés dans le respect de l'environnement selon les trois options possibles suivantes :

- Traitement thermique [2]
- Valorisation selon un procédé de mélange à froid pour la production de couches de base sous forme liée avec réintégration dans la structure de la route sous supervision des autorités [2]
- Valorisation (sous certaines conditions de l'ordonnance sur les décharges) en tant que matériaux de construction pour l'aménagement de décharges ou stockage définitif en décharge [2]

Classe de valorisation	Type de matériau de construction routière		Contexte <sup>1</sup>	Teneur totale en HAP selon l'EPA mg/kg	Indice de phénol dans l'éluat mg/l
A	Agrégats bitumineux ou agrégats d'enrobés		PT, PS, PE	$\leq 25$ <sup>2</sup>	$\leq 0,1$ <sup>2</sup>
B	Agrégats bitumineux contenant du goudron	à prédominance de goudron de houille	PT, PS, PE	$> 25$	$\leq 0,1$
C		à prédominance de goudron de lignite	PS, PE	Valeur à préciser	$> 0,1$

<sup>1</sup> PT = Protection du travail, PS = Protection des sols, PE = Protection de l'eau

<sup>2</sup> La preuve peut être omise s'il est prouvé hors de tout doute, dans des cas individuels, que seul du bitume ou des liants bitumineux ont été utilisés.

Tableau 6 : Classes de recyclage en Allemagne selon "RuVA-StB 01 (version 2005)", extrait traduit de [3]

Au-delà de la directive précitée, il n'existe pas d'exigence unifiée à l'échelle nationale pour les déchets bitumineux contenant du goudron. Des spécifications plus précises sont fixées par les différentes municipalités ou régions (Bundesland). Le traitement des agrégats bitumineux contenant du goudron est traité différemment d'un Land à l'autre.

Certaines régions, notamment dans l'ouest de l'Allemagne, ont décidé qu'au-delà d'une certaine teneur en HAP, seul le traitement thermique est autorisé ce qui implique d'acheminer les résidus concernés aux Pays-Bas, car il n'y a pas d'installations de ce type en Allemagne. Dans d'autres régions, notamment dans l'est de l'Allemagne, ces matériaux ont plutôt tendance à être valorisés comme matériau de construction ou stockés en décharge. Dans de rares cas, la valorisation de matériaux goudronnés sous forme liée dans les couches de base est encore autorisée pour les routes de certains Länder.

À l'avenir, la valorisation des déchets bitumineux chargés en goudron (HAP > 25 mg/kg) dans la construction routière et dans les décharges diminuera probablement, étant donné qu'une circulaire du Ministère fédéral des transports adressée en 2015 aux autorités en charge des travaux publics des différents Länder a recommandé que la valorisation de déchets bitumineux contenant du goudron ne soit plus autorisée à partir de 2018 et que le traitement thermique soit privilégié [2].

Il n'y aura cependant probablement pas d'interdiction dans un avenir proche en raison de l'opposition des exploitants de décharges qui font souvent recours à ce type de matériaux pour leurs propriétés constructives dans le cadre de l'aménagement constructif des décharges.

Classe	Teneur en HAP	Réglementation actuelle
A	≤ 25 mg/kg	La valorisation est possible sans aucune restriction dans la production d'enrobés bitumineux à chaud ou sous forme non liée en tant que matériau de construction routière
B	> 25 mg/kg (≤ 0.1 mg/l indice de phénol dans l'éluat)	La valorisation à chaud dans la production de nouveaux enrobés bitumineux n'est pas autorisée et il n'existe pas de spécification contraignante en matière de traitement. Les Länder sont responsables de la mise en œuvre de l'une des options suivantes :
C	> 25 mg/kg (> 0.1 mg/l indice de phénol dans l'éluat)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traitement thermique</li> <li>- Incorporation dans un procédé de mélange à froid pour produire une couche de base liée et réintégration dans la structure de la route (très rare, généralement non autorisé pour les routes fédérales ou les autoroutes)</li> <li>- Valorisation en tant que matériaux de construction de décharges ou stockage définitif en décharge</li> </ul>

Tableau 7 : Synthèse des filières de valorisation autorisées en Allemagne

### 2.3.5 Autriche

En Autriche, l'ordonnance sur le recyclage des matériaux de construction (« Recycling-Baustoffverordnung (RBV) ») définit les principes de base de la production, de l'utilisation et de l'élimination des matériaux de construction recyclés. Les Directives et règlements pour la construction des routes (« Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau (RVS) ») définissent les exigences techniques pour la conception et l'exécution des routes. En Autriche, les RVS sont juridiquement contraignantes pour les routes fédérales et régionales. En outre, il existe diverses normes (ÖNORMEN) qui définissent les exigences relatives à des types spécifiques de matériaux mélangés et d'applications.

En Autriche, les matériaux de construction recyclés sont classés en différentes classes de qualité sur la base de divers paramètres (dont la teneur en HAP), pour lesquels les utilisations possibles correspondantes sont ensuite définies. En principe, seuls les matériaux de construction recyclés des classes

de qualité U-A, U-B, U-E, B-B, B-C, B-D peuvent être utilisés pour la production d'enrobés bitumineux, les granulés d'asphalte recyclés devant répondre aux exigences de la « ÖNORM EN 13108-8 ». En outre, les dispositions « RVS 08.97.05 Anforderungen an Asphaltmischgut » (Exigences pour les mélanges d'asphalte) et « RVS 08.16.01 Anforderungen an Asphaltsschichten » (Exigences pour les couches d'asphalte) s'appliquent à la production d'enrobés bitumineux.

Les classes de qualité B-B, B-C, B-D et D avec une teneur maximale en HAP de 200 mg/kg ne peuvent de facto être valorisées que sous forme liée. Les classes de qualité U-A, U-B et U-E avec une teneur maximale en HAP de 12 mg/kg ou 20 mg/kg peuvent également être valorisées sous forme liée ou non liée dans la construction de routes, ou comme matériaux de remblayage. Les normes ÖNORM B 3132 « Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau » (granulats pour mélanges non liés et liés hydrauliquement pour le génie civil et la construction routière), « RVS 08.15.01 Ungebundene Tragschichten » (couches de base non liées) et « RVS 08.17.01 Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten » (couches de base stabilisées avec des liants) définissent les exigences et les applications possibles. Les types d'utilisation autorisés et les teneurs maximales en HAP des classes de qualité mentionnées sont indiqués dans le Tableau 8 ci-après.

Classe de qualité	∑16 HAP (EPA)	Réglementation actuelle des applications possibles
U-A	12 mg/kg	Sous forme non liée ou liée (liant hydraulique ou bitumineux)
U-B	20 mg/kg	Sous forme non liée ou liée (liant hydraulique ou bitumineux)
U-E	12 mg/kg	Sous forme liée par voie hydraulique ou bitumineuse ainsi que non liée en tant que couche de base dans du corps de la voie ferrée
B-B	20 mg/kg	Enrobés bitumineux ou production d'une couche de base non liée, si le résidu a été obtenu par fraisage (uniquement les routes fédérales A et S et les routes d'État B et L selon "RVS 08.15.02")
B-C	300* mg/kg	
B-D	20 / 300* mg/kg	

\* La valeur limite de 300 mg/kg s'applique aux granulats (en particulier les agrégats bitumineux) utilisés dans des centrales à chaud fermées avec captage et traitement des vapeurs générées. La collecte et le traitement des vapeurs doivent empêcher le rejet de polluants, en particulier le COT, les HC et les HAP, conformément à l'état de la technique. Le mélange d'asphalte doit être conforme à la valeur limite de 20 mg/kg de MS.

Tableau 8 : Synthèse des filières de valorisation autorisées en Autriche

### 2.3.6 Pays-Bas

En raison du manque de roches naturelles aux Pays-Bas, le recyclage des déchets minéraux constitue une priorité majeure. De plus, le gouvernement néerlandais a l'intention d'éliminer complètement le goudron de l'environnement. Depuis 2001, l'utilisation et l'exportation de tous les matériaux recyclés contenant du goudron sont totalement interdites. Pour les matériaux contenant du goudron, la seule option envisageable est le traitement thermique permettant la destruction complète de ces derniers.

La valeur limite à partir de laquelle un matériau est considéré comme « contenant du goudron » est basée sur la « Besluit Bodemkwaliteit » (Décret sur la qualité des sols) et s'élève à 75 mg/kg HAP-10.

En dessous de cette valeur limite, le mélange peut être réutilisé pour la production d'enrobés bitumineux. Le mélange de différents lots de granulés bitumineux pour diluer la teneur en HAP et atteindre cette limite est interdit.

Il convient de noter que la limite néerlandaise est basée sur une mesure de 10 HAP et non de 16 HAP selon l'EPA, comme c'est le cas en Suisse.

Les principales directives relatives à la construction routière et à la valorisation des déchets bitumineux aux Pays-Bas sont les suivantes:

- "Besluit Bodemkwaliteit" (Décret sur la qualité des sols) : Interdit la réutilisation des agrégats bitumineux contenant du goudron
- « CROW Standaard RAW Bepalingen 2020 » : Contrat standardisé utilisé par les autorités routières aux Pays-Bas
- Publication 210 du CROW « Richtlijn omgaan met vrijgekomen asfalt - teerhoudendheid, onderzoek en selectieve verwijdering » (Directive pour le traitement des déchets bitumineux- teneur en goudron, recherche et élimination sélective):

Cette publication de CROW fournit des lignes directrices uniformes pour la mise en œuvre pratique des lois et règlements existants. Sur la base de sept protocoles, toutes les étapes nécessaires sont énumérées, depuis la planification des travaux de construction jusqu'à la réception des agrégats bitumineux dans une installation de traitement thermique.

- « Code Milieuverantwoordelijk Wegbeheer » (Code pour une gestion des routes respectueuse de l'environnement) :

Code pour le traitement respectueux de l'environnement des déchets bitumineux, qui a été signé par les membres du groupe professionnel « Bitumineuze Werke von Bouwend Nederland » le 13 décembre 2016.

Étant donné que la réglementation relative aux résidus contenant du goudron est déjà très stricte aux Pays-Bas et que ce pays occupe une position de pointe dans le domaine du traitement thermique, il ne faut pas s'attendre à des changements dans un avenir proche en ce qui concerne les options de traitement. Comme les Pays-Bas ont également une grande expertise dans l'application des enrobés recyclés, il se pourrait que les restrictions qui ont été appliquées jusqu'à présent en la matière soient assouplies ou levées à un moment donné (voir également le Chapitre 2.4.2.6).

Contenu de HAP-10	Réglementation actuelle
≤ 75 mg/kg	Réutilisation directe dans la production d'enrobés bitumineux
> 75 mg/kg	Traitement thermique et réutilisation ultérieure des fractions minérales dans la production de revêtements routiers ou de béton

Tableau 9 : Filières de valorisation autorisées selon la concentration en HAP aux Pays-Bas

### 2.3.7 Synthèse

Sur la base des éléments présentés ci-avant, il apparaît que la réglementation concernant la gestion des déchets bitumineux est non uniforme à l'échelle de l'UE avec des exigences très variées selon les pays et méthodes de mesure des HAP différentes, ce qui rend la comparaison difficile. Le Tableau 10 synthétise les filières de valorisation/évacuation autorisées pour les différents pays considérés.

	Limite teneur HAP pour valorisation à chaud [mg/kg] <i>(somme des 16 HAP selon EPA)</i>	Limite teneur HAP pour valorisation à froid [mg/kg] <i>(somme des 16 HAP selon EPA)</i>	Mise en décharge	Traitement thermique
<b>Suisse</b>	250		HAP > 250 mg/kg: interdit dès 2026 HAP < 250 mg/kg: interdiction envisagée	HAP > 250 mg/kg: obligatoire dès 2026
<b>France</b>	50	500	Possible : unique filière alternative à la valorisation	possible
<b>Belgique (ex.Wallonie)</b>	8.5 <i>(uniquement benzo (a)pyrène)</i>	50 <i>(uniquement benzo (a)pyrène)</i>	possible	possible
<b>Italie</b>	100 <i>(somme 10 HAP)</i>		possible	pas envisagé
<b>Allemagne</b>	25		possible dans certains Bundesländer	HAP > 25 mg/kg: obligatoire dans certains Bundesländer
<b>Autriche</b>	300	20	possible	possible
<b>Pays-Bas</b>	75 <i>(somme des 10 HAP)</i>		pas disponible	obligatoire dès 75 mg/kg HAP <i>(somme 10 HAP)</i>

Tableau 10: Synthèse comparatives des filières autorisées pour la Suisse et l'UE

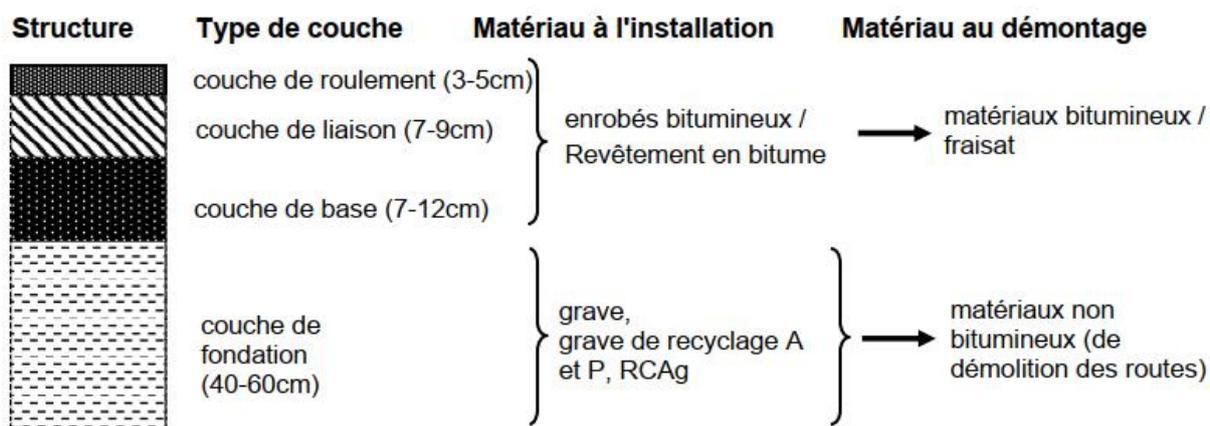
## 2.4 Teneurs maximales en agrégats de bitume recyclés admissibles selon les normes routières et l'état de la technique

### 2.4.1 Situation en Suisse

A l'heure actuelle, l'industrie de la construction routière n'absorbe pas la totalité des agrégats d'enrobés produits en lien avec les exigences normatives, des contraintes techniques liées à la configuration des centrales de production d'enrobés et certaines pratiques conservatives des acteurs de la construction, malgré des efforts concrets mis en œuvre au cours de ces dernières années afin de favoriser l'utilisation d'agrégats bitumineux.

Du point de vue des normes routières, les possibilités d'utilisation d'agrégats recyclés sont à considérer spécifiquement en fonction des exigences fixées aux quatre différentes couches de la superstructure routière, schématisées à la Figure 4 ci-après:

- Couche de roulement (Deckschicht)
- Couche de liaison (Binderschicht)
- Couche de base (Tragschicht)
- Couche de fondation (Fundationsschicht)



Remarque : Dans la construction et la rénovation des routes, une partie de la couche de fondation peut être remplacée par une fondation à froid (KMF) ou une fondation à chaud (ACF), qui peut être constituée de différentes proportions de granulats bitumineux recyclés (RCAg). Lors du renouvellement suivant, cette couche sera considérée comme du matériel bitumineux de démolition.

Figure 4: Structure schématique de la superstructure routière (source : Modélisation des flux de bitume en Suisse, Energie- und Ressourcen-Management GmbH)

En Suisse, la norme VSS SN 640 431-1 actuellement en vigueur fixe des teneurs relativement restrictives pour la teneur en agrégats d'enrobés dans les types de couches, pour une incorporation à froid et à chaud, tel que présenté dans le Tableau 11 ci-après.

Pour des raisons de qualité constructive, ces couches font l'objet de différentes normes, spécifiant les exigences requises en fonction des caractéristiques souhaitées. Pour chacune de ces couches il existe donc différents types d'enrobés bitumineux standardisés (AC F, AC T, AC B, AC EME, ..) qui répondent à des exigences et à des caractéristiques spécifiques.

<b>Asphaltbeton, zulässige Zugabemengen von Ausbauasphalt in Abhängigkeit der Schichten, Mischgutsorten und Mischgutttypen</b> <b>Enrobés bitumineux, quantités admissibles d'agrégats d'enrobés en fonction des couches, des sortes et des types d'enrobés</b>		
Mischgutsorten und Mischgutttypen für Schichten <i>Sortes et types d'enrobés pour couches</i>	Anteil Ausbauasphalt <i>Teneur en agrégats d'enrobés</i>	
	Kaltzugabe <i>Incorporation à froid</i>	Warmzugabe <i>Incorporation à chaud</i>
	[Masse-%] [% massique]	
<b>Deckschichten / Couches de roulement</b>		
Asphaltbeton für Deckschichten AC S, AC H und AC MR <i>Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC S, AC H et AC MR</i>	0	0
Asphaltbeton für Deckschichten AC N und AC L <i>Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC N et AC L</i>	≤ 15	≤ 30
<b>Binderschichten und Hochmodul-Asphaltbeton / Couches de liaison et enrobés bitumineux à module élevé</b>		
Asphaltbeton für Binderschichten AC B, Hochmodul-Asphaltbeton AC EME <i>Enrobés bitumineux pour couches de liaison AC B, enrobés bitumineux à module élevé AC EME</i>	≤ 15	≤ 30
<b>Trag- und Sperschichten im Gleisbau / Couches de base et d'étanchéité pour voies ferrées</b>		
Asphaltbeton für Tragschichten AC T, Asphaltbeton für Sperschichten im Gleisbau AC RAIL <i>Enrobés bitumineux pour couches de base AC T, enrobés bitumineux pour couches d'étanchéité pour voies ferrées AC RAIL</i>	≤ 25	≤ 60
<b>Fundationsschichten / Couches de fondation</b>		
Asphaltbeton für Foundationsschichten AC F <i>Enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F</i>	≤ 30	≤ 70

Tableau 11: Enrobés bitumineux, quantités admissibles d'agrégats d'enrobés en fonction des couches, des sortes et des types d'enrobés (SN 640 431-1b-NA)

Une révision de la norme VSS SN 640 431 est en cours. Aucune tendance claire ne se dégage a priori à ce stade quant à l'adaptation des proportions maximales d'utilisation d'agrégats recyclés.

En ce qui concerne la construction des routes nationales, l'OFROU propose dans son manuel technique (« Trasse / Umwelt ») de l'année 2020, un profil type de couches avec des pourcentages de matériaux recyclés plus élevés que dans la VSS pour la couche de liaison et la couche de fondation (cf. Tableau 11).

Des travaux conséquents relatifs à la valorisation des agrégats recyclés ont été effectués dans le cadre du paquet de recherche VSS « Recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans les enrobés à chaud » qui ont fait l'objet des 6 publications suivantes éditées en 2013 :

- VSS 2005/452 EP1: Teneur optimale en matériaux bitumineux de démolition des routes
- VSS 2005/453 EP2: Recyclage répété des revêtements routiers
- VSS 2005/454 EP3: Évaluation des flux de matières et de la durabilité
- VSS 2005/455 EP4: Appréciation de la durabilité des revêtements routiers à base de matériaux bitumineux de démolition des routes
- VSS 2005/456 EP5: Optimisation des enrobés des revêtements recyclés
- VSS 2005/457 VP6 : Validation in situ du comportement des couches d'enrobés à chaud innovantes avec de l'asphalte de finition

Sur la base des exigences de qualité actuelles, un taux d'agrégats recyclés de 0 – 50% est envisageable pour la couche de roulement, de 30 – 60% pour la couche de liaison et de 80 à 100% pour la couche de base et de fondation.

Les limitations des teneurs maximales en agrégats bitumineux recyclés peuvent également être liées à la configuration technique des centrales d'enrobés. En résumé :

- Dans le cas d'une incorporation à froid de l'agrégat recyclé directement dans le mélangeur, la quantité maximale est limitée à 20 – 30%
- Dans le cas d'une incorporation à chaud dans un tambour parallèle qui permet de chauffer et sécher préalablement l'agrégat bitumineux recyclé jusqu'à une température de 130°C, la proportion maximale d'adjonction de ce dernier peut être portée à 70%.
- La technologie récente de tambour parallèle à contre-courant permet de chauffer l'agrégat recyclé jusqu' à une température de 165°C équivalente à la température de production de l'enrobé et permet ainsi de réaliser des revêtements constitués à 100% d'agrégats recyclés. Six installations de ce type sont actuellement en exploitation en Suisse.

Par ailleurs, sur la base des informations transmises par le professeur Bueche de la HES Burgdorf, un guide de bonnes pratiques d'utilisation des agrégats bitumineux recyclés est en cours d'élaboration par un groupe de travail du projet « Kies für Generationen » (Gravier pour des Générations) qui regroupe neuf cantons et la ville de Zürich et devrait être publié au début 2021.

Le but de ce groupe de travail est de fournir un appui en vue d'une augmentation de la teneur en agrégats d'enrobés et promotion des enrobés tièdes, ceci par la création d'un code de bonnes pratiques.

Les axes de travail portent notamment sur une synthèse des connaissances actuelles (définition de l'agrégat, du processus d'obtention des granulats bitumineux et des différents types d'enrobés), un état des lieux du cadre normatif, des facteurs entravant le développement et des expériences en la matière en Suisse et à l'Étranger; et des recommandations concrètes pour promouvoir les enrobés recyclés et enrobés tièdes dans le cadre de projets (valeurs minimales d'enrobés recyclés à titre de recommandation, critères de pondération dans le cadre des appels d'offres publics pour favoriser un recyclage maximal sans exclure d'emblée des entreprises qui ne disposent pas de la technologie adéquate, ...).

Les valeurs proposées par ce guide, tirées de la présentation finale de l'étude du 19.01.2021 « Guide des bonnes pratiques – Recyclage des agrégats d'enrobés et recours aux enrobés tièdes » sont mentionnées dans le tableau de synthèse ci-dessous, comparativement avec les exigences de la norme VSS SN 640 431-1 et du manuel OFROU :

	Norme VSS SN 640 431-1	Manuel OFROU (« Tracé/Environnement », 2020))	Futur guide "Kies für Generationen"
Couche de roulement (AC S, AC H, AC MR)	0%	0%	AC N : 0 - 50% AC S/H : 0 - 30%
Couche de roulement (AC N, AC L)	0 - 30%		
Couche de liaison et enrobés bitumineux à module élevé (AC B, AC EME)	0 - 30%	AC 22 EME C1 : 0 - 40% AC B 22 H: 0 - 60%	AC B : 20 - 60% AC EME: 10 - 50%
Couche de base (AC T)	0 - 60%	AC 22 EME C2 : 0 - 50% AC T 22 H: 0 - 60%	50 - 90%
Couche de fondation (AC F)	0 - 70%	0 - 90%	60 - 100%

Tableau 12 : Comparatif des teneurs maximales en agrégats de bitume recyclés admissibles en Suisse selon la norme VSS, le manuel OFROU et le futur guide en cours de rédaction

En outre, l'incorporation d'agrégats bitumineux recyclés sous forme liée dans les couches de fondation, de manière ciblée et justifiée en fonction d'exigences constructives spécifiques, présente un potentiel de valorisation à considérer de manière attentive pour des perspectives de développement futures.

La valorisation est à envisager sous forme liée, selon la technique de couche de fondation à chaud (couche de fondation renforcée AC F 22 ou AC F 32 selon SN 640'430a, qui constitue également une option préconisée par l'OFROU) ou également à froid (KMF) dans certaines conditions spécifiées par les recommandations de certains cantons ou organisations faitières

Cette option permet d'élargir les possibilités de valorisation qui auront un impact sur l'estimation de la quantité résiduelle à diriger vers les filières de traitement et pourrait constituer un débouché quantitatif non négligeable.

## 2.4.2 Situation dans l'Union européenne

---

Dans l'UE, les exigences relatives à la teneur en agrégats bitumineux recyclés dans les enrobés sont définies par la série EN13108 qui comprend des normes harmonisées (de la partie 1 à la partie 7) et des normes non harmonisées (parties 8, 20 et 21), qui sont toutes obligatoires pour le marquage CE des différents enrobés bitumineux produits à chaud et destinés aux chaussées routières. Ces normes, qui sont obligatoires dans tous les États membres de l'UE, n'imposent aucune limite à l'utilisation du conglomerat bitumineux de récupération (Ra).

L'extrait EN 13108-8 spécifie que « les exigences concernant les mélanges bitumineux sont les mêmes avec ou sans agrégats d'enrobés, de ce fait, le niveau d'homogénéité du matériau détermine la quantité maximale d'agrégats d'enrobés pouvant être utilisée. »

Selon ces normes, l'utilisation de Ra en quantités inférieures à 10 % dans les conglomerats destinés aux couches de surface et à 20 % dans les conglomerats destinés aux couches de base et de liaison (liant) nécessite la détermination de la distribution granulométrique et de la teneur en liant ajouté. Toutefois, pour les dosages plus élevés, il faut également déterminer la consistance des liants utilisés (bitume Ra et bitume d'addition) et évaluer les propriétés de résistance mécanique du mélange.

Ce chapitre constitue un aperçu des différentes normes en vigueur dans les pays sélectionnés (France, Belgique, Italie, Allemagne, Autriche, Pays-Bas) sur la base des données rendues disponibles et des contacts ponctuels ayant pu être établis. Il ne prétend pas être un état des lieux exhaustif des différentes normes existantes qui s'appliquent à la construction routière.

### 2.4.2.1 France

La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte définit des taux minimum d'utilisation de matériaux valorisés à son article 79 :

- A partir de 2017 : pour les matériaux utilisés pendant l'année dans les chantiers de construction et d'entretien routiers parmi ces matériaux, au moins 10 % en masse des matériaux utilisés dans les couches de surface et au moins 20 % en masse des matériaux utilisés dans les couches de base (assise) sont issus du réemploi, de la réutilisation ou du recyclage de déchets ;
- A partir de 2020 : pour les matériaux utilisés pendant l'année dans les chantiers de construction et d'entretien routiers parmi ces matériaux, **au moins 20 % en masse des matériaux utilisés dans les couches de surface et au moins 30 % en masse des matériaux utilisés dans les couches d'assise** sont issus du réemploi, de la réutilisation ou du recyclage de déchets.

Concernant les enrobés bitumineux, les adaptations françaises des normes européennes en vigueur sont traitées dans le Guide technique Utilisation des normes enrobés à chaud GUNE (Sétra, 2008), qui devrait probablement être remplacé en 2021 par le guide IDRIM recyclage à moyen et fort taux actuellement en cours de rédaction. Selon le guide actuel, les quantités maximales d'agrégats recyclés

pouvant être utilisées dépendent des caractéristiques des matériaux exigées (granularité, teneur en liant, ...) pour les différentes classes définies, mais **s'élève à maximum 40% pour les différentes couches**, comme présenté dans le tableau ci-après.

Dans le cadre de la mise à jour du guide technique, il est prévu d'augmenter les exigences à respecter en lien avec les teneurs autorisées, mais aussi **d'augmenter la teneur maximale** dans les différentes couches **à 60%**.

Couche	Teneur maximale (incorporation à chaud) – selon guide actuel	Teneur maximale (incorporation à chaud) – selon mise à jour prévue
Couche de roulement	0 - 40%	0 – 60%
Couches de liaison	10 - 40%	
Couche de base (assise)		

Tableau 13 : Teneurs maximales en agrégats recyclés autorisées en France

#### 2.4.2.2 Belgique

En Belgique, les agrégats d'enrobés bitumineux (*terme collectif de matériaux granuleux issus des débris bitumineux et qui après traitement éventuel (ex. concassage, tamisage, etc.) répondent aux exigences de qualité spécifiques posées pour être utilisés comme granulats dans la production d'enrobé ≠ débris bitumineux*) doivent respecter les prescriptions des cahiers des charges types définis pour chacune des régions (Flandre, Wallonie, Bruxelles-Capitale).

Sur cette base, les teneurs maximales autorisées d'agrégats bitumineux admissibles dans la construction routière peuvent être synthétisées pour l'ensemble du pays comme suit :

Couche	Teneur maximale (incorporation à chaud)
Couche de roulement	0%
Couches de liaison et couches de base	20% - 50% (agrégats homogène – cas particuliers)

Tableau 14 : Teneurs maximales en agrégats recyclés autorisées en Belgique

#### 2.4.2.3 Italie

En complément des normes européennes, l'Italie a élaboré sa propre norme de référence UNI TS 11688 dans laquelle sont définis les caractéristiques et critères d'utilisation des agrégats bitumineux dans les mélanges bitumineux à chaud et à froid. Aucune information relative aux teneurs maximales autorisées n'a pu être collectées dans le cadre de la présente étude, malgré les différents contacts pris.

#### 2.4.2.4 Allemagne

S'ils sont utilisés pour la production de nouveaux enrobés, les agrégats bitumineux recyclés doivent être classés conformément à la réglementation technique « Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL SA-StB 09) » (Conditions techniques de livraison des granulés d'asphalte). La directive « TL SA-StB 09 » précise notamment les conditions de mise en œuvre de la norme européenne DIN EN 13108 « Mélanges bitumineux – Spécifications des matériaux – Partie 8: Agrégats bitumineux » en Allemagne.

Les proportions maximales d'agrégats recyclés pouvant être mis en oeuvre sont définies par les « Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07/13) » (Spécifications techniques de livraison des mélanges d'asphalte pour la construction de chaussées de zones de circulation) et le « Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt » (code de pratique pour la réutilisation de l'asphalte, M WA, édition 2009). Dans la « TL Asphalt-StB 07/13 », la teneur maximale est déterminée par deux formules, une pour les couches de base et de fondation et l'autre pour les couches de liaison et de roulement (voir Figure 5). Afin de pouvoir calculer la teneur maximale selon la « TL Asphalt-StB 07/13 », un échantillon doit être prélevé toutes les 500 tonnes produites, avec un minimum de 5 échantillons au total [1].

Plus les résultats des mesures sont homogènes, plus la teneur maximale autorisée est élevée. Dans la « M WA », la teneur maximale est déterminée par la technologie de l'installation et les spécifications techniques de la machine. C'est la plus faible des deux valeurs qui détermine la teneur finale maximale autorisée. Les formules et les valeurs à utiliser sont indiquées dans la Figure 5.

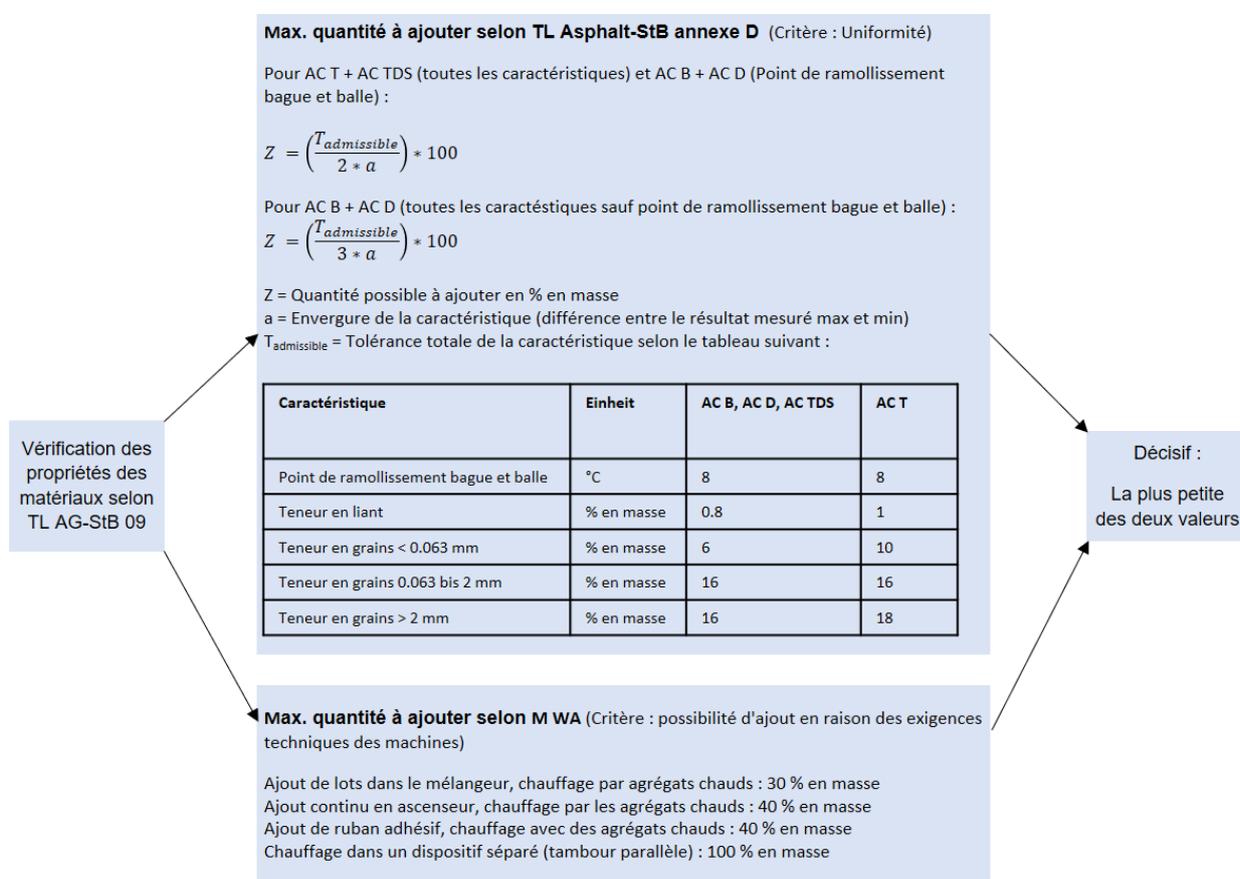


Figure 5: Ajout maximal possible d'asphalte recyclé

Couche	Teneur maximale (application à chaud)
Couche de roulement	20%
Couche de liaison et couche de base	20-100%

Tableau 15 : Teneurs maximales en agrégats recyclés autorisées en Allemagne (extrait de [4])

#### 2.4.2.5 Autriche

La teneur maximale en agrégats bitumineux est spécifiée dans la norme ÖNORM EN13108-8, les exigences en matière de mélange bitumineux étant les mêmes pour les mélanges avec et sans agrégats recyclés. Le degré d'homogénéité et les propriétés qualitatives déterminent la quantité maximale à ajouter.

Si des agrégats bitumineux recyclés sont utilisés comme couche de base non liée, la proportion de matériaux recyclés ne doit pas dépasser 50 % poids pour toutes les classes de charge [5].

#### 2.4.2.6 Pays-Bas

La teneur admissible en agrégats bitumineux recyclés dépend des exigences d'homogénéité des matériaux. Pour les couches de roulement, un maximum de 30% de matériaux recyclé est autorisé selon la "Standard RAW Bepalingen 2020" [6]. Pour les couches de roulement en Stone Mastic Asphalt (SMA), aucun agrégats recyclés (0%) ne peut être utilisé et il existe également des restrictions pour la production d'asphalte poreux [7]. L'utilisation agrégats bitumineux recyclés pour les couches de roulement poreuses n'est généralement autorisée qu'après des essais approfondis, intégrant la mise en œuvre de sections tests [7].

Le NRA Rijkswaterstaat (Département du ministère néerlandais de l'infrastructure et de la gestion de l'eau et responsable de la conception, de la construction, de la gestion et de la maintenance des principales infrastructures aux Pays-Bas) a fixé l'objectif que l'industrie de l'asphalte réponde à 100 % aux exigences de l'économie circulaire et de la neutralité carbone en 2030 [7].

Selon BAM Infra Asphalt, afin d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur le climat, toutes les restrictions légales aux Pays-Bas concernant la réutilisation des agrégats bitumineux devraient être levées dans les prochaines années [7].

Couche	Teneur maximale (application à chaud)
Couche de roulement	30% selon le "CROW Standaard RAW Bepalingen 2020", 0% pour le SMA, des pourcentages plus bas sont également à considérer pour l'asphalte poreux.  Certaines autorités routières peuvent formuler d'autres restrictions.
Couche de liaison et couche de base	0-80%

Tableau 16 : Teneurs maximales en agrégats recyclés autorisées aux Pays-Bas (extrait de [4])

### 2.4.2.7 Synthèse

	Teneur maximale agrégats recyclés % (incorporation à chaud)			
	Couche de roulement	Couches de liaison	Couche de base	Couche de fondation
<b>Suisse</b>	30% (15% à froid)	30% (15% à froid)	60% (25% à froid)	80% (30% à froid)
<b>France</b>	0 - 40 %	10 – 40 (60%)		
<b>Belgique</b>	0%	20% - 50% (agrégats homogène – cas particuliers)		
<b>Italie</b>	<i>Informations non disponibles</i>			
<b>Allemagne</b>	20%	20-100%		
<b>Autriche</b>	<i>Informations non disponibles</i>			
<b>Pays-Bas</b>	30% (autres valeurs possibles)	0-80%		

Tableau 17 : synthèse comparative des teneurs maximales en agrégats bitumineux recyclés admissibles pour la Suisse et l'UE

## 2.5 État des lieux actuel des filières de valorisation, traitement et élimination en Suisse et à l'étranger

### 2.5.1 Situation en Suisse

En Suisse, la production de déchets bitumineux s'élève à environ 2.74 mio de tonnes par année pour l'année 2018 dont 2.2 mio de tonnes avec des teneurs en HAP inférieures à 250 mg/kg et 0.54 mio de tonnes avec des teneurs supérieures à 250 mg HAP/kg selon l'étude «Modélisation des flux du bitume en Suisse, Rübli, 2020 » qui s'est basée sur les données transmises par asphaltuisse.

Les déchets bitumineux suisses sont pris en charge selon 3 filières, soit (1) Valorisation dans la construction routière, (2) Mise en décharge et (3) Traitement thermique au Pays-Bas. Pour l'année 2018, le taux de valorisation s'élève à environ 89%, environ 3.8% sont traités thermiquement au Pays-Bas et les 7.2% restants sont acheminés en décharge. Le détail est présenté dans le Tableau 18 ci-après.

Matériaux bitumineux produits	Source des données	Quantité de matériaux en tonnes	Quantité de matériaux CH <sup>(1)</sup> en tonnes	Parts en pourcentage
Matériaux bitumineux avec une teneur en HAP <250ppm	ASR et ASGB	2'060'895	2'205'158	80.4
Matériaux bitumineux avec une teneur en HAP >250ppm	Statistiques sur les déchets dangereux	539'168	539'168	19.6
<b>Total</b>		<b>2'600'063</b>	<b>2'744'326</b>	<b>100.0</b>
<b>Filière d'élimination et quantités des matériaux bitumineux/granulats</b>				
Granulats bitumeux sous forme non-liée	ASR et ASGB	399'195	427'139	15.4
Granulats bitumeux dans les graves de recyclage A	ASR et ASGB	130'087	139'193	5.0
Granulats bitumeux sous forme liée	ASR et ASGB	1'443'335	1'544'368	55.5
Granulats bitumeux HAP >250ppm valorisés en CH	Statistiques sur les déchets spéciaux	336'374	336'374	12.1
Stockage intermédiaire	ASR et ASGB	123'056	131'670	4.7
Exportation pour traitement à l'étranger HAP >250ppm	Statistiques sur les déchets spéciaux	105'533	105'533	3.8
Mise en décharge en CH HAP >250ppm	Statistiques sur les déchets spéciaux	97'261	97'261	3.5
Mise en décharge en CH HAP <250ppm		non connu	non connu	
<b>Total</b>		<b>2'634'841</b>	<b>2'781'539</b>	<b>100.0</b>
<b>Différence matériaux produits - matériaux éliminés</b>		<b>-34'778</b>	<b>-37'213</b>	

(1) Extrapolation établie à partir des proportions des longueurs de route pour les cantons d'AR, BS, GL, NE et TI

Tableau 18: Bilan matière des déchets bitumineux par filière de valorisation (source: Rubli, 2020)

Par ailleurs, la quantité totale d'enrobés produite annuellement est d'environ 5 mio (a varié entre 4.7 et 5.3 mio tonnes/an entre 2010 et 2019) selon les données transmises par Asphaltuisse.

## 2.5.2 Situation dans l'Union européenne

Selon l'European Asphalt Pavement Association, la production d'enrobés chaud et tiède en Europe s'est élevée à un peu moins de 300 millions de tonnes en 2018. Par rapport à l'année précédente, il n'y a eu qu'une légère augmentation de la quantité produite, mais la production a augmenté pour la quatrième fois consécutive depuis 2014. En comparaison, la production annuelle a eu tendance à diminuer en moyenne entre 2008 et 2014.



Figure 6 : Production totale d'enrobés à chaud et à tiède dans l'UE-28 (en vert) et l'UE-28 plus la Norvège, la Suisse et la Turquie (en bleu) au cours de la période 2008-2018 (données tirées de [8])

Plus de la moitié (60 %) de la production totale d'enrobés à chaud a été utilisée pour la construction de couches de roulement en 2018, 21% pour les couches de base et 19% pour les couches de liaison [8]. Ces chiffres montrent que les enrobés ont principalement été utilisés pour le renouvellement des couches de roulement et donc pour l'entretien plutôt que pour la construction de nouvelles routes [8].

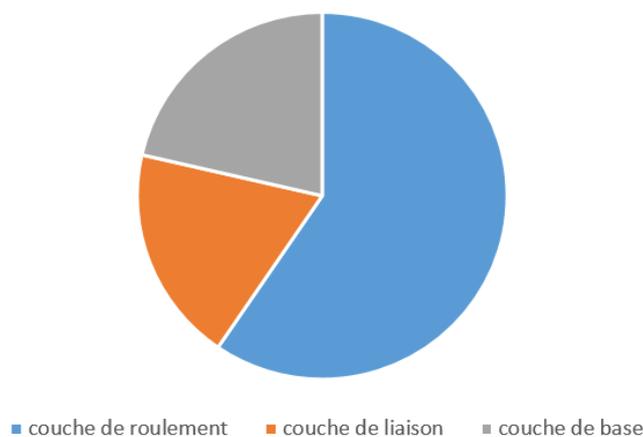


Figure 7 : Application des enrobés en couche de roulement (Deckschicht), couche de liaison (Binderschicht) et couche de base (Tragschicht) en pourcentage de la production totale 2018 (données tirées de [8])

Si l'on examine la production annuelle moyenne d'enrobés chauds et tièdes dans les pays voisins sur la période 2008-2018, on constate que les plus gros volumes ont été produits en Allemagne avec 41 millions de tonnes, suivie par la France avec 35 millions de tonnes [8].

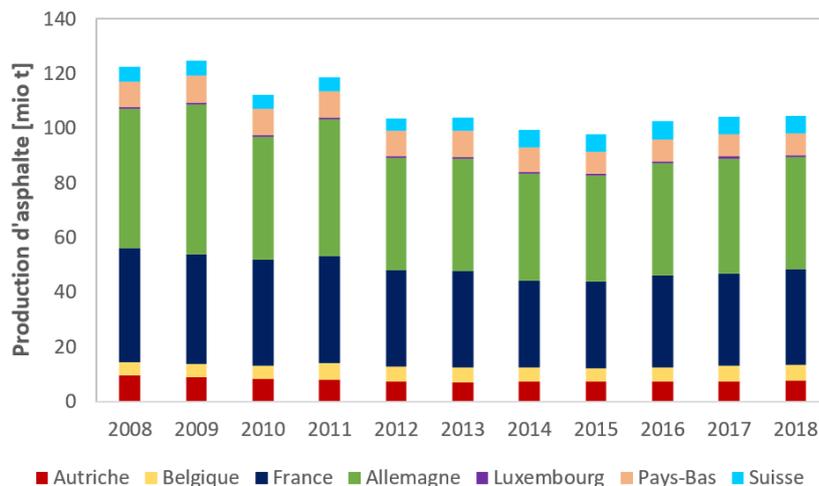


Figure 8 : Production totale d'enrobés chauds et tièdes en Suisse et dans les pays voisins au cours de la période 2008-2018 (données tirées de [8])

L'industrie européenne de l'asphalte présente des enjeux importants en termes de durabilité et d'économie circulaire et est déjà active dans divers domaines pour s'efforcer de tendre vers la neutralité carbone [9]. Par exemple, l'industrie de l'asphalte travaille à la réduction des émissions liées à la production par l'utilisation de carburants alternatifs ou d'enrobés à basse température. [9].

L'impact le plus important peut toutefois être atteint par la réutilisation et le recyclage des agrégats bitumineux dans la construction et l'entretien des routes permet d'avoir l'impact le plus important. Il a déjà été démontré qu'il est possible de construire certains types de routes en utilisant intégralement des agrégats recyclés à 100 % [9].

Selon les statistiques de l'EAPA pour 2018, la quantité d'agrégats bitumineux générée en Europe est d'environ 49.5 millions de tonnes par an, dont environ 76 % ont été réutilisés dans la production de nouveaux enrobés à chaud, 20 % comme agrégats non liés dans la construction de routes ou d'autres applications, et les 4 % restants ont été mis en décharge [9]. Cette répartition est cependant basée sur des données partiellement incomplètes suivant les pays.

Les paragraphes 2.5.2.1 à 2.5.2.6 ci-après présentent plus en détail les statistiques disponibles pour les pays étudiés dans cette étude.

### 2.5.2.1 France

Selon le bilan environnemental 2018 de l'organisation faitière « Routes de France », la France a produit un total de 36.3 mio de tonnes d'enrobés bitumineux en 2018 avec un taux réel moyen d'introduction des agrégats dans les enrobés bitumineux (chaud + tiède) d'environ 18.1%.

Selon les informations transmises par l'IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité), pour l'année 2018 les déchets bitumineux produits en France s'élèvent à environ 7.8 mio tonnes, dont environ 83% sont réutilisés dans la production d'enrobés. Les 17% restants sont quant à eux acheminés en décharge.

L'objectif fixé des acteurs du secteur est d'aboutir à un recyclage de 100% du stock produit d'agrégats bitumineux recyclables. L'ensemble des déchets présentant des seuils de HAP trop élevés sont évacués dans les installations de stockage adaptées (stockage de déchets non dangereux ou dangereux selon le seuil) et il n'y pas d'installations de traitement envisagée pour prendre en charge ce type de déchets.

Selon les informations transmises par les installations de traitement thermiques au Pays-Bas, il semblerait qu'une petite fraction de déchets français soit acheminée dans ces installations. Aucune indication de quantité n'a pu cependant être récoltée.

Par ailleurs, une filière visant à réutiliser les matériaux bitumineux pollués sur place en les retraitant sous forme d'un massif rigidifié par un liant d'apport qui fixe les polluants est actuellement en cours de développement. Cependant, cette solution se contente d'immobiliser les polluants et n'est donc pas conforme par rapport aux principes de gestion définis par la législation suisse.

### **2.5.2.2 Belgique**

Selon la publication « Asphalt in figures 2018 » de l'EAPA (European Asphalt Pavement Association), la Belgique a produit environ 5.8 mio de tonnes d'enrobés bitumineux en 2018. La quantité d'agrégats bitumineux produits s'élèvent quant à elle à environ 1.7 mio tonnes, dont la totalité est réutilisée dans la production d'enrobés.

Cependant, il semblerait que ces chiffres ne tiennent compte que des quantités ayant des teneurs en HAP qui permettent effectivement une valorisation. En effet, selon les informations transmises par les installations de traitement thermiques au Pays-Bas, une partie des déchets bitumineux belges contaminés en HAP est a priori acheminée dans ces installations. Aucun chiffre détaillé n'a pu être collecté dans le cadre de cette étude.

### **2.5.2.3 Italie**

Selon la publication « Asphalt in figures 2018 » de l'EAPA (European asphalt pavement association), l'Italie a produit environ 26 mio de tonnes d'enrobés bitumineux en 2018. La quantité d'agrégats bitumineux produits s'élèvent quant à elle à environ 9 mio tonnes par année. En raison de l'absence d'utilisation de goudron historiquement dans la construction des routes, ces matériaux ont des teneurs faibles en HAP.

Cependant, seulement 20 % de tous les matériaux bitumineux de récupération ont été utilisés dans la production de nouveau enrobés bitumineux en 2018, ce qui constitue un taux de valorisation particulièrement bas par rapport aux autres pays de l'UE. Selon les informations transmises par l'association faitière SITEB, ceci est principalement dû au fait que la loi en vigueur jusqu'en 2018 ne favorisait pas la revalorisation des déchets bitumineux. Le taux de valorisation a d'ailleurs augmenté à 25% en 2019.

Actuellement, les déchets non valorisés sont acheminés en décharge et, à notre connaissance, il n'y a pas de volonté de développer de nouvelles installations de traitement. En effet, en raison notamment de l'absence de problématique liée aux teneurs en HAP, l'enjeu principal de l'Italie est d'augmenter le taux de valorisation et développer les installations de recyclage.

### **2.5.2.4 Allemagne**

La Figure 9 présente la production annuelle d'enrobés bitumineux en Allemagne et la proportion d'agrégats recyclés valorisée à cette fin. La production d'enrobés bitumineux en Allemagne a atteint son point culminant en 1994 avec une production annuelle de près de 70 millions de tonnes. Dans les années suivantes, jusqu'en 2012, la production est tombée à 40 millions de tonnes par an. Entre 2012 et 2019, la production s'est stabilisée à ce niveau avec de légères fluctuations. La quantité d'agrégats bitumineux recyclés a augmenté régulièrement pour atteindre 10 millions de tonnes entre 1982 et 1994. Cette quantité n'a que légèrement changé jusqu'à aujourd'hui, avec une tendance légèrement à la baisse à partir de 2014. En Allemagne, à partir de 2012, environ 20 à 25 % en moyenne des matières premières ont été remplacées par des agrégats bitumineux recyclés.

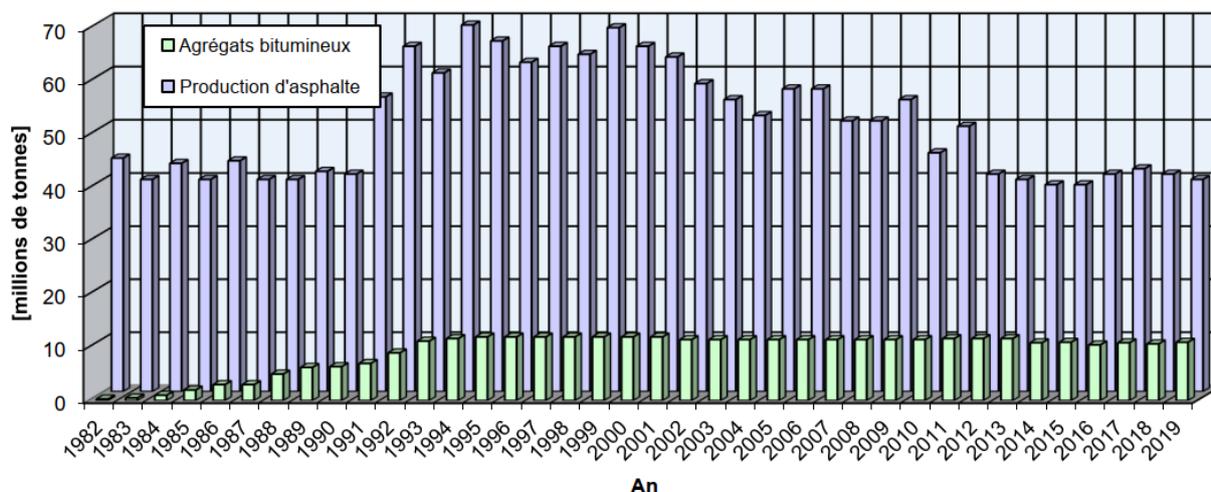


Figure 9: Production (Asphaltproduktion) et réutilisation des agrégats bitumineux (Asphaltgranulat) en Allemagne (Deutscher Asphaltverband, 2020)

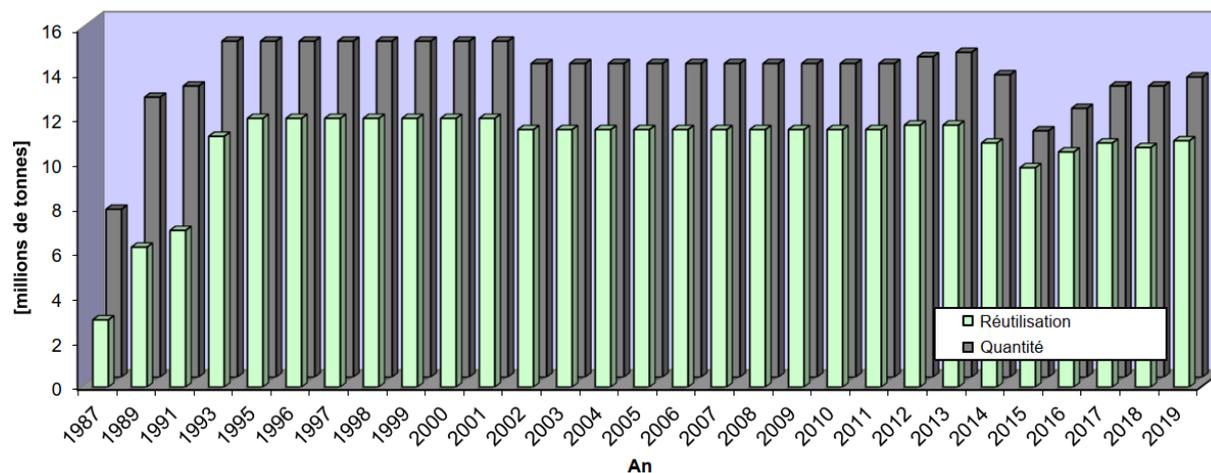


Figure 10: Proportion d'agrégats bitumineux recyclés en Allemagne (Deutscher Asphaltverband, 2020)

Sur le total des d'agrégats bitumineux produits (14 millions de tonnes en 2019), comme le montre la Tableau 10 environ 11,5 millions (82 %) sont réutilisés pour la production de nouveaux enrobés [10] ; les quelque 2,5 millions de tonnes restantes (20 %) sont, soit valorisées en couche de base à liant hydraulique avec un processus de mélange à froid, soit traitées thermiquement ou mises en décharge conformément aux options énumérés au chapitre 2.3.4 [2].

La Deutsche Asphaltverband n'a pas été en mesure de quantifier précisément la quantité d'agrégats bitumineux transportée d'Allemagne vers les Pays-Bas. Selon les déclarations des quatre entreprises de traitement néerlandaises REKO BV, ATM Renewi, Jansen Recycling et Theo Pouw, les quantités réceptionnées annuellement depuis l'Allemagne s'élèvent probablement à environ 500-600'000 tonnes. L'utilisation d'agrégats bitumineux contenant du goudron dans une couche de base à liant hydraulique n'est que très rarement autorisée et est totalement exclue pour les routes fédérales ou les autoroutes. On peut donc supposer que les 2 millions de tonnes restantes par an sont mises en décharge.

### 2.5.2.5 Autriche

En Autriche, entre 7 et 7,5 millions de tonnes d'enrobés bitumineux ont été produits par an entre 2012-2018 (voir Figure 8). En 2018, la quantité d'agrégats bitumineux recyclés était de 1.9 million de tonnes, dont 70 % ont été utilisés pour la production d'enrobés tièdes et chauds et 30 % pour des couches non

liées, le recyclage à froid ou d'autres applications [8]. Par conséquent, la proportion d'agrégats recyclés dans la production d'enrobés est d'environ 25 %.

Selon l'association autrichienne de recyclage des matériaux de construction, environ 50'000 tonnes d'agrégats bitumineux sont mises en décharge chaque année et seules de petites quantités sont acheminées aux Pays-Bas pour y être traitées thermiquement.

### 2.5.2.6 Pays-Bas

La production d'enrobés bitumineux aux Pays-Bas s'est élevée en moyenne à environ 8-9 millions de tonnes par an ces dernières années, avec une légère augmentation constante depuis le minimum observé en 1985 (voir Figure 8 et Figure 11). Comme il n'y a pratiquement pas de roches naturelles aux Pays-Bas, le pays doit importer chaque année environ 20 millions de tonnes de matières premières primaires telles que le sable et le gravier, notamment pour la production d'enrobés bitumineux [11]. En raison de la situation géologique particulière, le gouvernement néerlandais a accordé la plus haute priorité au recyclage des déchets minéraux, et 99 % de tous les déchets de démolition aux Pays-Bas sont actuellement recyclés [11]. En outre, les déchets minéraux contaminés aux HAP sont importés de l'étranger, traités thermiquement aux Pays-Bas, la fraction minérale étant ensuite vendue aux producteurs néerlandais d'enrobés bitumineux ou de béton afin de pallier le déficit en agrégats primaires.

La disponibilité en agrégats bitumineux recyclés a augmenté parallèlement à la production d'asphalte depuis 1985 pour atteindre actuellement environ 4.5 millions de tonnes par an (voir Figure 11). Ainsi, environ 50 % des enrobés bitumineux des Pays-Bas est actuellement produit à partir d'agrégats recyclés. Une quantité importante est notamment utilisée comme couche de base pour les autoroutes [11]. Les matériaux recyclés sont également de plus en plus utilisés comme substitut de haute qualité au sable, gravier ou agrégat minéral pour les centrales d'enrobés ou de béton, conformément au principe du « cradle-to-cradle » (du berceau au berceau) [11].

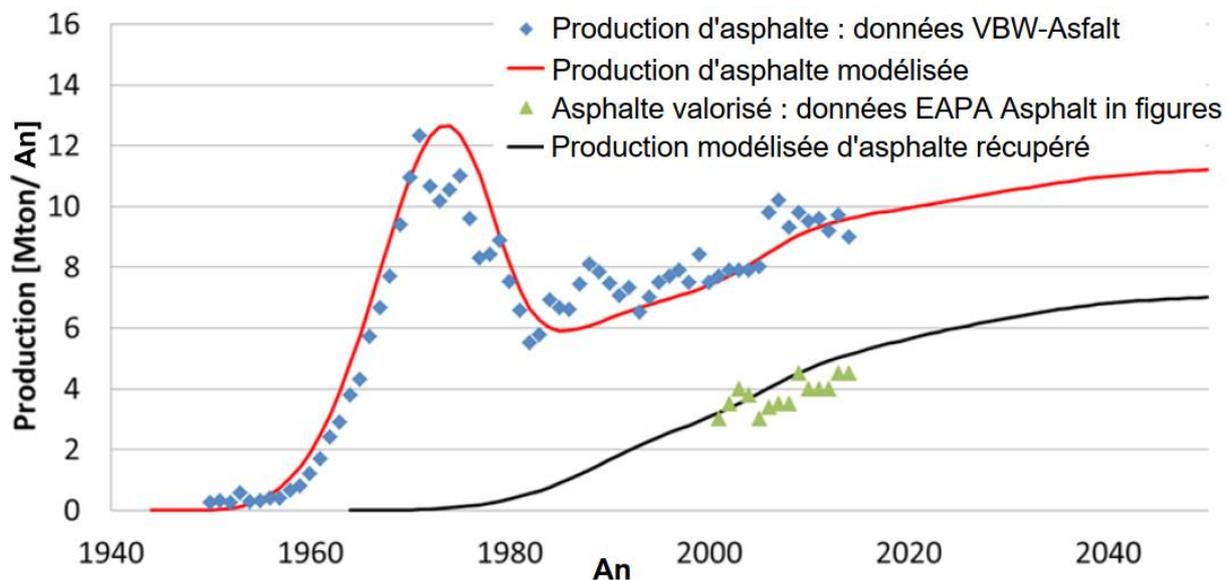


Figure 11 : Production d'enrobés bitumineux aux Pays-Bas et disponibilité en agrégats bitumineux recyclés (extrait de [12])

### 2.5.2.7 Synthèse

<b>Pays</b>	<b>Enrobés bitumineux produit</b> [mio tonnes/année]	<b>Agrégats bitumineux produits</b> [mio tonnes/année]	<b>Taux de valorisation</b>
<b>Suisse</b>	5	2.74	89%
<b>Allemagne</b>	40	11.5	82%
<b>France</b>	36.3	7.8	83%
<b>Belgique</b>	5.8	1.7	100%
<b>Italie</b>	26	9	20%
<b>Pays-Bas</b>	8.5	4.5	95-99%
<b>Autriche</b>	7.5	1.9	ca. 90%

## 2.6 Estimation des quantités futures de déchets bitumineux produits en Suisse et excédents non valorisés

### 2.6.1 Résultats de l'étude « Modélisation des flux du bitume en Suisse »

L'étude menée par Energie- und Ressourcen-Management GmbH (M. Rubli) qui fait l'objet du rapport "Modélisation des flux du bitume en Suisse" édité en août 2020 a permis de modéliser et d'établir une estimation étayée des quantités de déchets bitumineux actuelles et futures (2018-2035) produites à l'échelle de la Suisse, tel que présenté dans la Figure 12 ci-après.

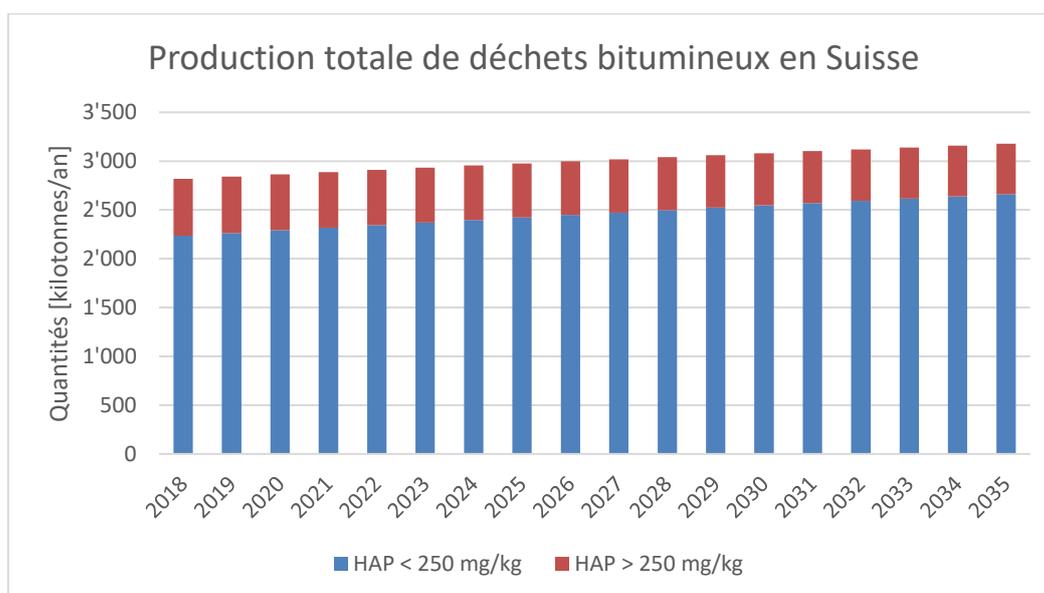


Figure 12: Synthèse des déchets bitumineux produits en Suisse pour la période 2018-2035

Sur cette base, on constate une augmentation lente de la production de déchets bitumineux jusqu'en 2035. Pour la période entre 2026 et 2035, l'augmentation est d'environ 6%. Par ailleurs, la répartition entre les déchets avec des teneurs en HAP supérieures et inférieures à 250 mg/kg reste relativement stable avec une proportion majoritaire de déchets avec de teneurs en HAP inférieures à 250 mg/kg. En réalité la proportion des déchets HAP < 250 mg/kg augmente légèrement, passant de 81% en 2018 à 85 % en 2035.

Un des enjeux majeurs de ces projections est la répartition des quantités en fonction de la teneur en HAP (inférieure et supérieure à 250 mg/kg). Pour rappel, des teneurs élevées en HAP sont liées à la présence de goudron dans les routes et la pratique du mélange « bitume-goudron » a été interdite en Suisse dans les années 1985-1986.

Les quantités des matériaux bitumineux ayant une teneur en HAP >250 kg/mg qui ont été produites en Suisse entre 2014 et 2018 et servent de base au modèle sont tirées des données statistiques pour les déchets spéciaux de l'OFEV. Ces quantités passent d'environ 305'000 t/an en 2014 à environ 540'000 t/an en 2018. Les raisons de cette augmentation ne sont pas clairement établies, elles pourraient être liées à une intensification des réfections d'anciennes routes en prévision de l'interdiction de la mise en décharge prévue selon l'OLED en 2026.

En outre, il est possible que ces quantités englobent également des flux de déchets bitumineux dont les teneurs en HAP sont indéterminées et donc assimilées à la catégorie de déchets la plus contraignante

en matière d'exigences d'élimination et que le flux effectif de déchets bitumineux ayant une teneur en HAP >250 ppm soit en réalité moindre.

L'évolution temporelle des stocks et des flux de déchets bitumineux ayant une teneur en HAP >250 ppm dans la période 1960-2035 est basée sur les paramètres du modèle de l'étude Rubli 2013, eux-mêmes basés sur les données d'une publication de l'OFEV sur les émissions de polluants atmosphériques sur les chantiers (OFEV, 2001) et ses propres estimations des proportions de liants contenant du goudron utilisés au fil du temps. Ces estimations étaient notamment basées sur des résultats de campagnes conséquentes de carottages et d'analyse en laboratoire réalisées dans les cantons de la Suisse orientale et d'échanges de données avec l'OFROU. Ces données ont ensuite été légèrement ajustées pour être représentatives sur le plan national en tenant compte du fait que la présence de revêtements chargés en HAP serait très limitée dans certaines régions, en particulier en Suisse romande, selon les indications de l'étude "Modélisation des flux du bitume en Suisse".

Il convient cependant de mentionner qu'il subsiste une certaine incertitude en ce qui concerne les teneurs effectives en HAP des déchets bitumineux. En effet, la limite entre les catégories est souvent floue, et les opérations de réfection de chaussées peuvent dans certains cas regrouper différentes catégories de teneurs en HAP en impliquant de gérer la quantité globale de déchets produits selon les exigences de la catégorie la plus contaminée.

A partir de l'estimation des quantités de déchets bitumineux produits annuellement pour les 2 catégories de teneur en HAP, les flux de matière ont été modélisés dans le cadre de l'étude précitée en privilégiant en première priorité la valorisation des déchets bitumineux dans la construction routière dans les limites fixées par le cadre réglementaire et les besoins effectifs en matériaux secondaires, liés aux besoins totaux en revêtement bitumineux pour les différentes couches constitutives (construction de nouvelles routes et réfection de chaussées existantes) et la prise en compte de différents scénarios d'incorporation d'agrégats bitumineux recyclés.

Les quatre scénarios considérés sont présentés dans le tableau ci-dessous, les 3 premiers mentionnés dans le rapport "Modélisation des flux du bitume en Suisse", le quatrième constituant un scénario complémentaire pris en compte pour la présente étude afin d'évaluer l'incidence d'une valorisation des granulats bitumineux recyclés en tant que couche de fondation à chaud (ACF 22 ou AC F 32 selon norme SN 640'340a) – ou éventuellement à froid dans certaines conditions spécifiques– qui sont promues dans les recommandations de certains cantons ou organisations faitières

Année	SZ Referenz	SZ Ref, nF	SZ nF, max REC	SZ Max Recycling + 15% Fund
	Scénario de référence – reflet de la situation actuelle extrapolée à 2035	Scénario de référence sans utilisation de grave RC A, ni de granulats d'asphalte (forme libre ou liée)	Pas de réutilisation dans les fondations (grave RC A et granulats) et recyclage maximum de RC dans la production d'asphalte	Recyclage maximum de RC dans la production d'asphalte et valorisation de 15% dans les fondations (couche de fondation à chaud)
<b>Deckschicht – Couche de roulement</b>				
2025/26	5%	5%	30%	30%
2035	5%	5%	30%	30%
<b>Binderschicht – Couche de liaison</b>				
2025/26	30%	30%	60%	60%
2035	30%	30%	60%	60%
<b>Tragschicht – Couche de base</b>				
2025/26	60%	60%	80%	80%
2035	60%	60%	80%	80%
<b>Fundationschicht – Couche de fondation</b>				
2025/26	11%	0%	0%	15%
2035	11%	0%	0%	15%

Tableau 19: Définition des scénarios en fonction des hypothèses de taux de valorisation dans la construction routière

## 2.6.2 Synthèse de la problématique à résoudre et des quantités non valorisées à traiter

Sur la base des résultats du modèle et de l'intégration de l'entrée en vigueur en 2026 des nouvelles dispositions de l'OLED concernant la gestion des déchets contenant plus de 250 mg/kg de HAP (interdiction de mise en décharge et de valorisation), l'évolution future des quantités d'agrégats bitumineux excédentaires non valorisés dans la construction routière ont été synthétisées et sont présentées dans la Figure 13 ci-après pour les différents scénarios.

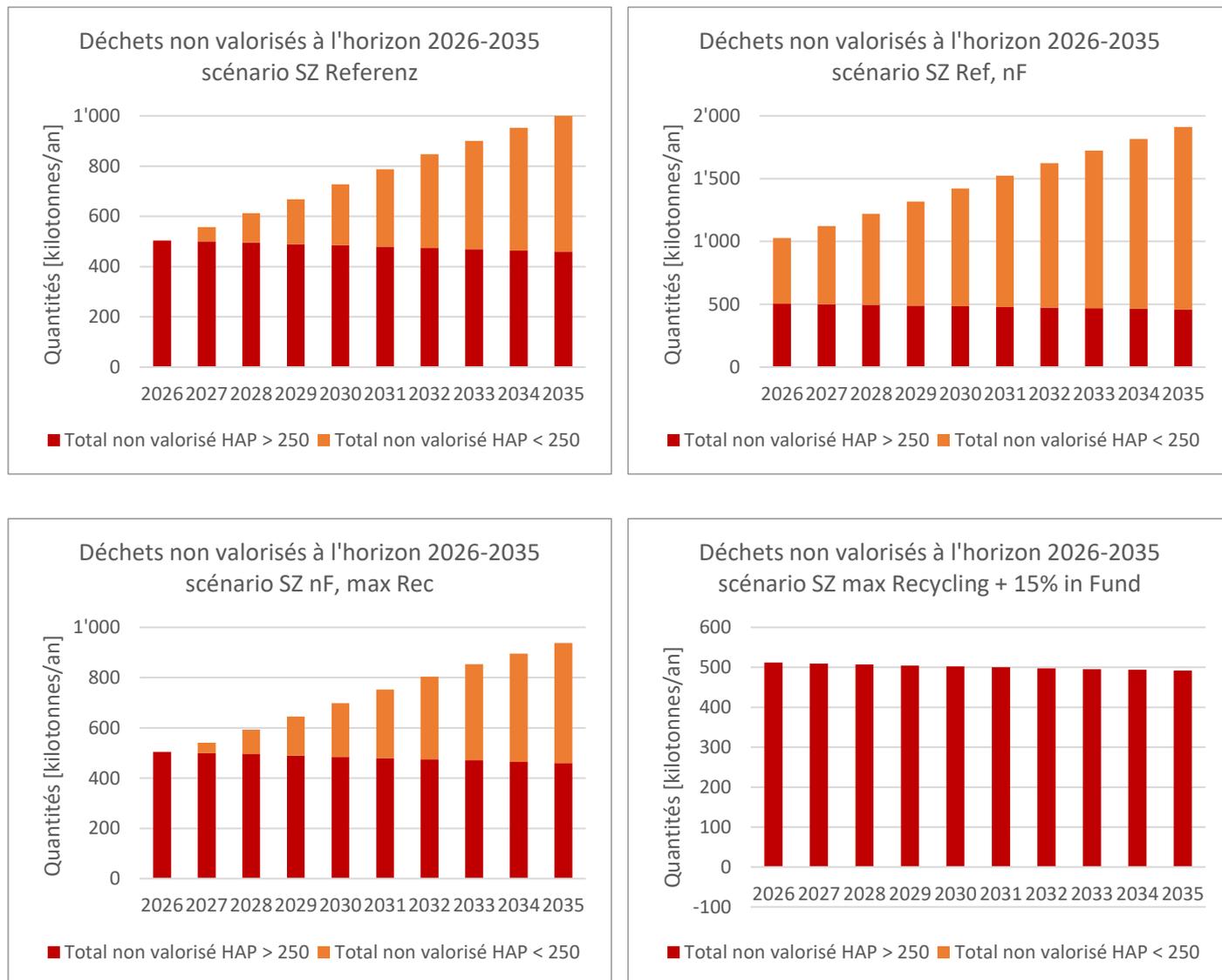


Figure 13: Déchets bitumineux non valorisés à l'horizon 2026-2035 selon les différents scénarios

Le Tableau 20 ci-après synthétise les quantités de déchets bitumineux non valorisés à traiter selon les quatre scénarios considérés pour les années 2026, 2030 et 2035.

Synthèse des quantités de déchets bitumineux non valorisés à traiter												
Année	HAP > 250 mg/kg Quantités incompressibles à traiter [t/an]				HAP < 250 mg/kg Quantités à traiter interdiction de mise en décharge [t/an]				Total maximal à traiter si interdiction mise en décharge HAP < 250 mg/kg [t/an]			
	SZ Referenz	SZ Ref, nF	SZ nF, max REC	SZ Max Recycling + 15% Fund	SZ Referenz	SZ Ref, nF	SZ nF, max REC	SZ Max Recycling + 15% Fund	SZ Referenz	SZ Ref, nF	SZ nF, max REC	SZ Max Recycling + 15% Fund
2026	500'000		510'000	0	520'000	0	0	500'000	1'030'000	500'000	510'000	
2030	490'000		500'000	240'000	940'000	210'000	0	730'000	1'420'000	700'000	500'000	
2035	460'000		490'000	540'000	1'450'000	480'000	0	1'000'000	1'910'000	940'000	490'000	

Tableau 20: Synthèse des quantités excédentaires non valorisés à traiter

Selon les bases réglementaires actuellement définies, les **quantités de la catégorie HAP > 250 mg/kg constituent le minimum incompressible qui devra être acheminé dans des installations de traitement adéquates dès l'année 2026.**

Cette quantité n'est pas influencée par les scénarios de recyclage considérés et reste relativement constante sur l'ensemble de la période considérée. Elle est estimée selon le résultat de la modélisation **à 500'000 t/an pour l'année 2026, à 490'000 t/an pour l'année 2030 et à 460'000 t/an pour l'année 2035** (les quantités légèrement supérieures obtenues pour le scénario « SZ Max Recycling + 15% Fundation » ne sont pas représentatives et liées à un effet de bord du modèle).

En ce qui concerne la **catégorie HAP < 250 mg/kg**, les quantités à traiter varient en fonction du scénario de valorisation considéré. Elles tiennent en outre compte de la concrétisation de l'interdiction de la mise en décharge envisagée par l'OFEV dès 2026.

Les scénarios les plus vertueux en terme de taux de valorisation dans la construction routière, se caractérisent par des excédents à traiter nuls ou relativement limités :

- En 2026 : aucun excédent à traiter pour les 2 scénarios « Sz nF mx REC » et « SZ Max Recycling + 15% Fundation »
- En 2030 : excédent de 210'000 t/an à traiter pour le scénario « Sz nF mx REC » et aucun excédent à traiter pour le scénario « SZ Max Recycling + 15% Fundation »
- En 2035 : excédent de 480'000 t/an à traiter pour le scénario « Sz nF mx REC » et aucun excédent à traiter pour le scénario « SZ Max Recycling + 15% Fundation »

On constate donc que le scénario « SZ Max Recycling + 15% Fund » permet d'éviter complètement les excédents de la catégorie HAP < 250 mg/kg sur la toute la période considérée (2026-2035). Selon le modèle et les calculs complémentaires, la valorisation intégrale des déchets bitumineux HAP < 250 mg/kg serait en fait déjà être atteinte à l'horizon 2035 avec une incorporation d'agrégats bitumineux dans les couches de fondation (fondation renforcée sous forme liée) correspondant à environ 10% de la quantité totale de couches de fondation mises en œuvre.

Les scénarios de référence (SZ Referenz et SZ Ref nF) qui prévoient le maintien des taux de valorisation actuels et qui ne constituent donc pas des options à privilégier du point de vue de la gestion durable

des ressources et des déchets se caractérisent par des excédents nettement plus importants, compris entre 0 et 520'000 t/an en 2026 et entre 540'000 et 1'450'000 t/an en 2035.

Sur cette base et en considérant les scénarios de valorisation les plus vertueux à privilégier, la synthèse des quantités excédentaires totale à traiter, toutes concentrations en HAP confondues, est la suivante :

- 2026 : 500'000 t/an
- 2035 : entre 490'000 t/an et 940'000 t/an

La répartition géographique de la quantité totale des déchets bitumineux excédentaires produits à l'échelle de l'ensemble de la Suisse constitue également un point crucial pour l'évaluation des conditions de faisabilité des futures installations de traitement à prévoir.

Une première estimation de la répartition par canton a été effectuée sur la base de la répartition du flux de production des routes (Masse d'asphalte, 2013) et est illustrée à la Figure 14. Les données chiffrées par canton sont présentées à l'Annexe B en fonction des différents scénarios.

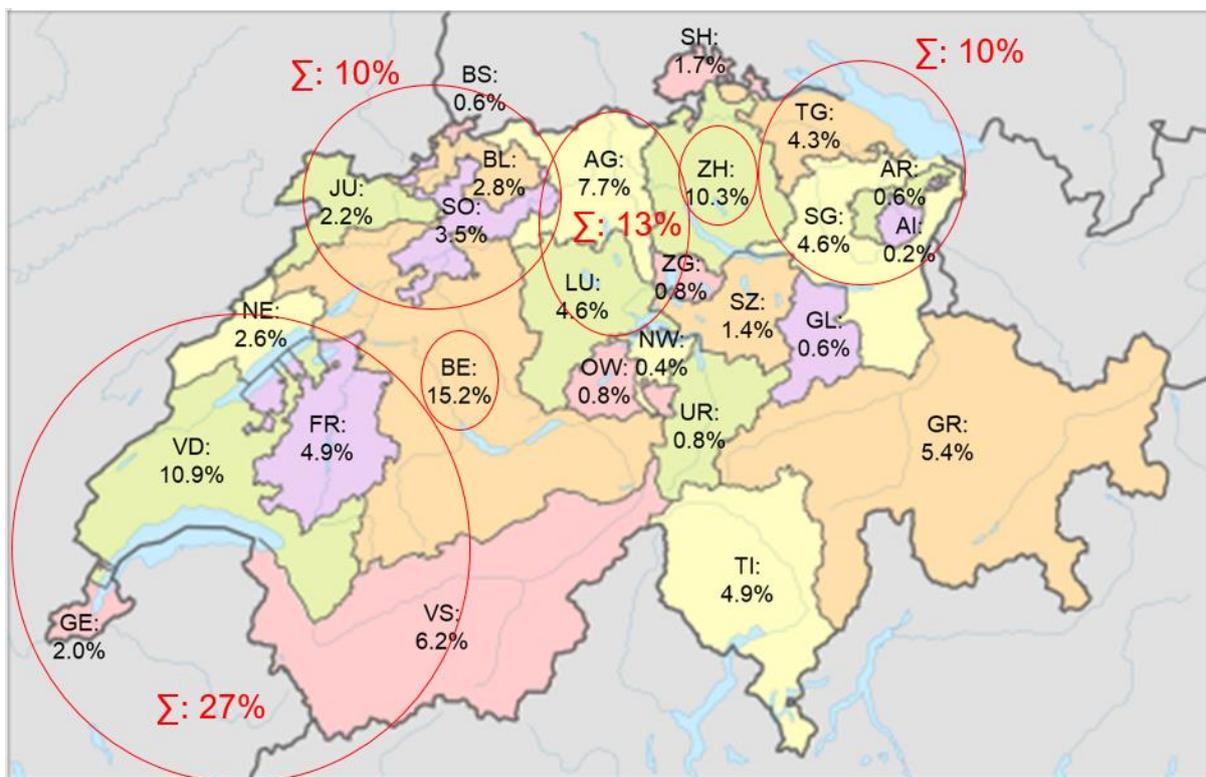


Figure 14: Répartition des quantités à traiter par canton (pourcentage) sur la base du flux de production des routes

Par ailleurs, la répartition des quantités à traiter par couche de revêtement et en particulier la granulométrie y relative est un élément relativement important en lien avec les possibilités de recyclage.

Des données précises à ce sujet n'étant pas disponibles, une estimation préliminaire a été effectuée à titre indicatif basée sur les deux hypothèses suivantes :

- pourcentages massiques moyens des différentes catégories granulométriques par type de couche de revêtement, tel que présenté dans le Tableau 21 ci-après ;
- répartition uniforme des quantités d'agrégats bitumineux produits, soit 1/3 issu des couches de roulement, 1/3 issu des couches de liaison et 1/3 issu des couches de base.

Couches	Pourcentage massique [%] supérieur à			
	>16 mm	>11 mm	>8 mm	>2 mm
<b>Roulement</b>	<i>0</i> <b>0</b>	<i>0 – 10</i> <b>3%</b>	<i>0 – 60</i> <b>10%</b>	<i>40 – 90</i> <b>70%</b>
<b>Liaison</b>	<i>0 – 10</i> <b>3%</b>	<i>0 – 10</i> <b>5%</b>	<i>10 -40</i> <b>20%</b>	<i>45 -80</i> <b>60%</b>
<b>Base</b>	<i>0 -40</i> <b>20%</b>	<i>10 -40</i> <b>30%</b>	<i>10 – 70</i> <b>40%</b>	<i>50 – 80</i> <b>70%</b>

**X – Y :** Plage de variation

**X :** Valeur moyenne considérée pour les bilan de flux dans la présente étude

Tableau 21 : Synthèse simplifiée de la répartition granulométrique des différentes couches de revêtement.

---

## 3 État de la technique – installations de traitement

---

### 3.1 Vue d'ensemble – vision générale

---

La position et le rôle des installations de traitement des déchets bitumineux doivent être mis en perspective avec les principes et objectifs de la gestion des déchets en Suisse, définis en particulier par l'article 30 de la Loi fédérale sur la protection de l'environnement, avec les priorités suivantes :

a. *La production de déchets doit être limitée dans la mesure du possible*

⇒ Pour les déchets bitumineux, cet objectif est à concrétiser par des développements techniques et matériaux permettant d'améliorer la durabilité des revêtements et d'espacer les fréquences de renouvellement des différentes couches.

b. *Les déchets doivent être valorisés dans la mesure du possible*

⇒ Pour les déchets bitumineux, cet objectif doit se concrétiser en premier lieu par la valorisation des agrégats bitumineux dans le cadre de la production de nouveaux revêtements selon les éléments et principes décrits aux chapitres 2.4 du présent rapport, en créant des conditions cadre permettant d'atteindre les scénarios les plus ambitieux en termes de parts valorisées présentés au chapitre 2.6.1 (évolution du cadre normatif et des pratiques des professionnels ; évolution technologique des centrales d'enrobés et des modes de gestion).

Pour les quantités excédentaires non valorisées comme agrégats recyclés, il s'agit de favoriser dans toute la mesure du possible les processus de traitement permettant d'optimiser la valorisation matière des différents constituants des déchets bitumineux après passage par les installations de traitement.

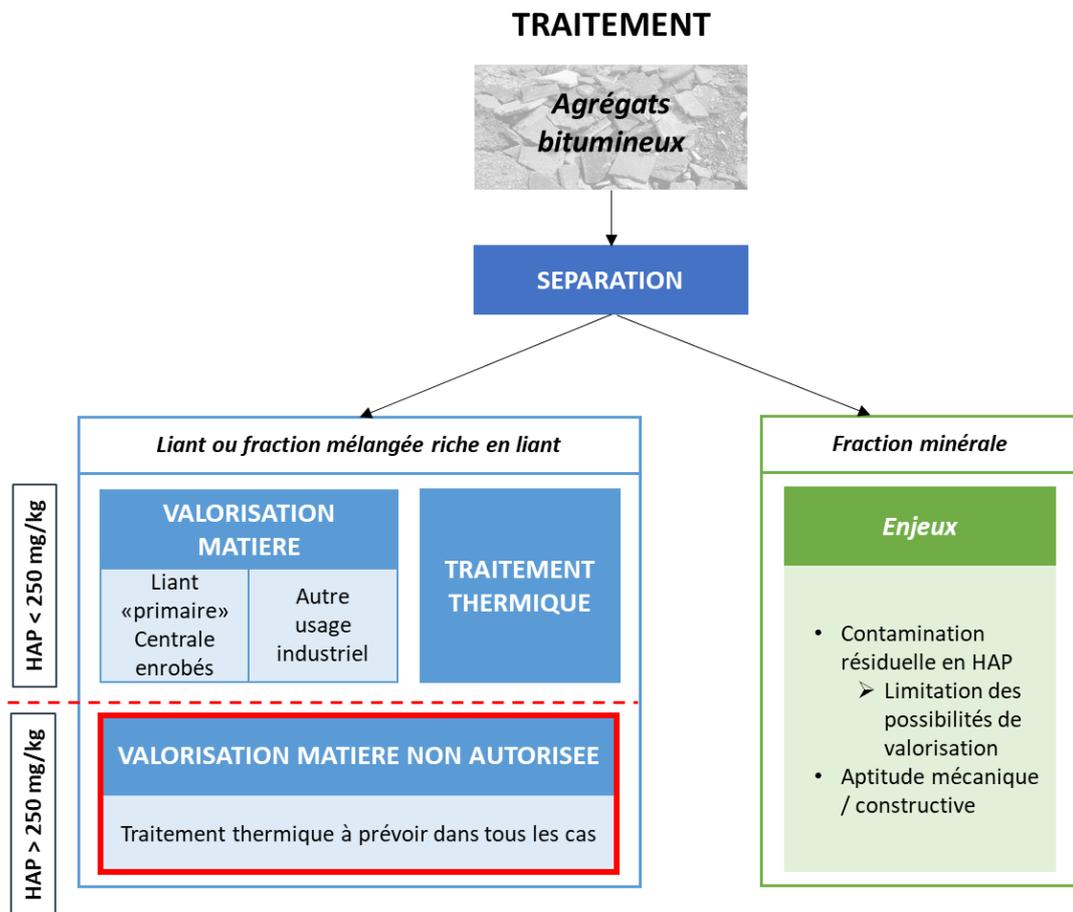
L'optimisation environnementale de ces processus doit être appréhendée dans une perspective élargie de durabilité, associant outre les questions liées à la gestion des ressources et des déchets, les enjeux énergétiques et climatiques en particulier.

c. *Les déchets doivent être éliminés d'une manière respectueuse de l'environnement et, pour autant que ce soit possible et approprié, sur le territoire national*

⇒ L'élimination respectueuse de l'environnement est à prévoir, pour les quantités ou fractions qui ne peuvent rationnellement faire l'objet d'une valorisation matière sur la base de l'état actuel de la technique et des développements envisagés dans le futur.

Pour les déchets bitumineux, l'élimination est à prévoir dans tous les cas en qui concerne les agrégats contaminés aux HAP (>250 mg/kg), pour le liant ou la fraction riche en liant de ces derniers.

Au-delà de la valorisation des agrégats bitumineux pour la construction routière, les différentes options de traitement qui seront développées dans le présent chapitre impliquent une séparation entre le liant bitumineux ou une fraction mélangée riche en bitume d'une part et la fraction minérale d'autre part, comme représenté dans le schéma de la Figure 15 ci-dessous.



HAP < 250 mg/kg

HAP > 250 mg/kg

Figure 15 : Principe de séparation de la fraction minérale et du liant ou fraction riche en liant

Dans le cas d'un traitement thermique, la séparation s'effectue par destruction du liant. Le traitement thermique est à prévoir dans tous les cas pour la catégorie de déchets bitumineux présentant une concentration en HAP supérieure à 250 mg/kg, soit comme traitement primaire de l'ensemble du flux de déchets concernés ou soit comme traitement spécifique de la fraction riche en liant issue d'une étape de traitement préalable.

La description et l'évaluation des différents types de traitements envisageables sont présentées aux paragraphes ci-après en distinguant les traitements suivants :

- Thermique
- Mécanique
- Physico-chimique
- Mixte

## 3.2 Traitement thermique

Selon l'article 3 de l'OLED, le traitement thermique des déchets est défini en tant que « ...traitement des déchets à des températures suffisamment élevées pour détruire les substances dangereuses pour l'environnement ou pour les lier physiquement ou chimiquement par minéralisation. »

Les possibilités de traitement thermique suivantes peuvent être envisagées pour les agrégats bitumineux :

- Traitement thermique dans une installation dédiée au traitement des déchets de construction et de démolition minéraux contaminés aux Pays-Bas ;
- Traitement thermique dans une cimenterie en Suisse ;
- Pyrolyse

### 3.2.1 Traitement thermique dans une installation dédiée

#### 3.2.1.1 Description générale du processus

- Désagrégation

Les déchets bitumineux sont tout d'abord désagrégés à la bonne granulométrie préalablement au traitement thermique proprement dit. Le grain maximal à considérer dépend du type d'installation et de son mode d'exploitation. Dans le cas où les agrégats bitumineux sont traités conjointement avec des sols organiques contaminés, ils doivent être désagrégés jusqu'à un diamètre de 40 mm. Dans le cas où ils sont traités comme monofraction, une désagrégation jusqu'à un diamètre de 100 mm est suffisante.

- Traitement thermique

L'incinération dans une usine dédiée des agrégats bitumineux permet d'éliminer le liant contenant les polluants organiques et de récupérer les granulats minéraux à l'issue du processus de combustion. Les déchets minéraux sont traités dans un four rotatif à des températures comprises entre 850°C et 1050°C. A ces températures, les composants organiques sont quasiment intégralement éliminés, les concentrations résiduelles en HAP non significatives (< 0,5 mg/kg) [13].

- Refroidissement

A la sortie du four rotatif, les résidus minéraux présentent encore une température comprise entre 500°C et 750°C. Ils transitent ensuite par un refroidisseur à grille insufflant de l'air froid par le bas. L'air chauffé est acheminé vers les systèmes de combustion et d'épuration des gaz de combustion pour la récupération de la chaleur.

- Traitement des fumées

Après le refroidisseur à grille, les fumées peuvent encore contenir de faibles quantités de substances organiques imbrûlées et transitent donc par un étage de post-combustion thermique qui permet de détruire intégralement les composants organiques au moyen d'un temps de séjour d'au moins 2 secondes à 850°C. La chaleur résiduelle de la post-combustion est injectée dans un générateur de vapeur et une turbine afin de produire de l'électricité et est valorisée en parallèle dans un réseau de chauffage à distance. Après la post-combustion les fumées sont traitées dans une installation à quatre niveaux comprenant deux filtres à manche, une unité DeNOx, où les NOx réagissent avec l'ammoniac pour se transformer en N<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O, et une unité de désulfuration DeSOx, où du gypse est produit pour la désulfuration par l'ajout de carbonate de calcium et d'oxyde de calcium dans un épurateur à contre-courant. Ce dispositif permet de garantir que les gaz rejetés

par la cheminée respectent intégralement les normes d'émission fixées par la Communauté Européenne. Recyclage

Après le traitement thermique et le passage par le refroidisseur à grille, les granulats minéraux sont récupérés sous forme de sable, de gravier, de gypse et de filler. Les différentes fractions sont séparées par un crible à jet d'air et peuvent ensuite être valorisées après tamisage comme matériau secondaire par l'industrie néerlandaise de la construction.. Les analyses chimiques effectuées par IMP Bautest SA ont montré que les concentrations résiduelles de HAP après traitement thermique sont inférieures à 0,5 mg/kg et qu'elles respectent donc sans problème les valeurs limites de matériaux non pollués fixées par les réglementations suisse et néerlandaise. [13]. Outre la valorisation des agrégats minéraux, le traitement thermique permet de produire de l'électricité et de la chaleur valorisées et injectées dans le réseau d'électricité et de chauffage urbain [14].

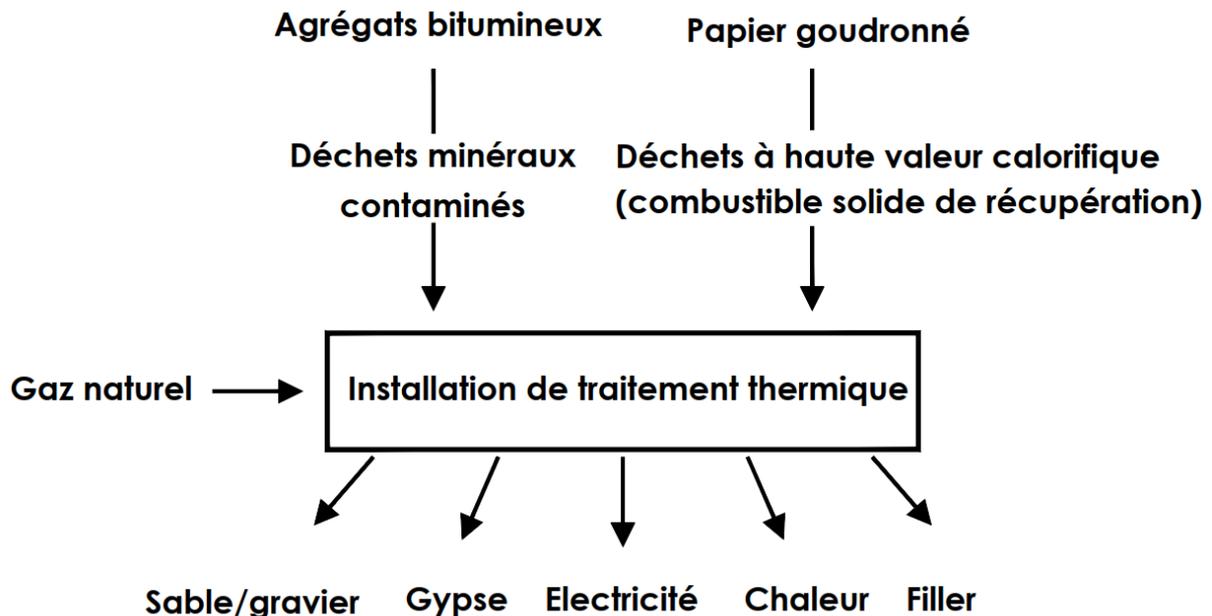


Figure 16: Vue d'ensemble des flux entrants et sortants liés au processus de traitement thermique REKO

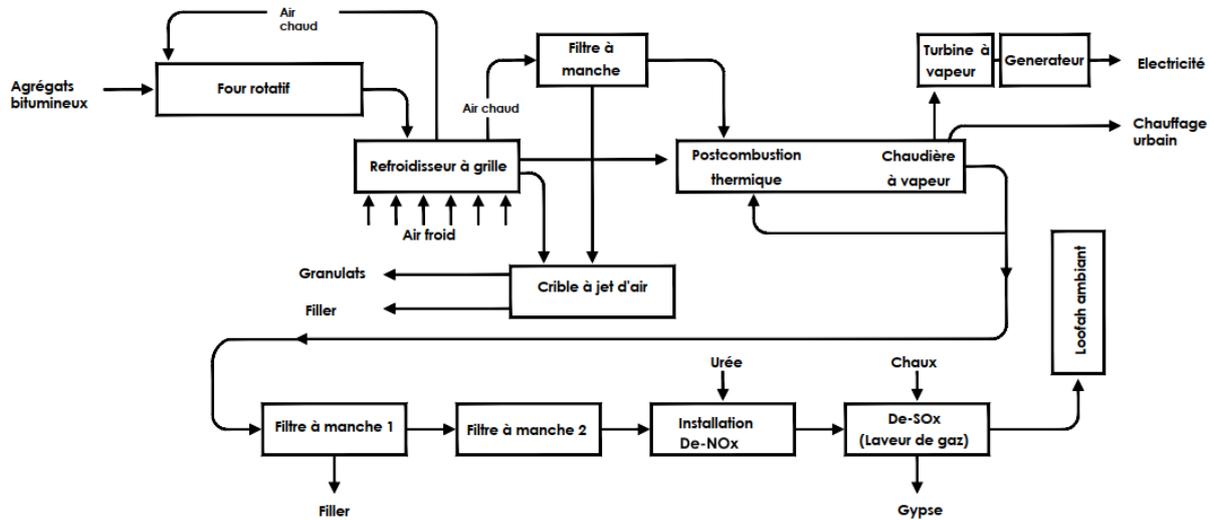


Figure 17: Schéma du processus de traitement thermique de REKO B.V.

### 3.2.1.2 Etat de la technique et développement

Les Pays-Bas sont le principal nœud névralgique en Europe pour le traitement thermique des agrégats bitumineux. Au total, quatre entreprises néerlandaises (REKO B.V., ATM Renewi, Theo Pouw, Jansen Recycling) exploitent avec succès depuis plusieurs années des installations techniques à grande échelle pour le traitement thermique des déchets minéraux. Ces quatre entreprises disposent d'une capacité de traitement cumulée de 3'900'000 tonnes par an, ce qui représente une quantité largement supérieure à la production annuelle d'agrégats bitumineux aux Pays-Bas, qui est d'environ 1'100'000 tonnes par an [15]. La capacité de traitement disponible est donc majoritairement utilisée pour le traitement d'agrégats bitumineux provenant des pays environnants, soit en particulier d'Allemagne, de France, de Suisse, de Belgique, du Luxembourg, de Grande-Bretagne et du Danemark. Au total, environ 1'000'000 tonnes par an d'agrégats bitumineux sont probablement acheminés de ces pays vers les Pays-Bas, où elles sont ensuite valorisées comme matériau de construction secondaires après traitement thermique sous forme de gravier, sable, filler et de gypse.

Dans les installations de la société REKO, les agrégats bitumineux sont traités thermiquement en tant que mono-fraction. Avec la mise en service d'une deuxième installation à l'automne 2020, d'une capacité de 1.2 million de tonnes par an, la capacité totale de la société REKO est passée de 0.65 à 1.85 million de tonnes par an (voir Tableau 22). Au cas où la croissance en besoins en traitement thermique d'agrégats bitumineux se maintiendrait à l'avenir à l'échelle européenne, REKO prévoit de construire à terme une troisième installation de traitement qui pourrait être implantée aux Pays-Bas ou en Allemagne.

L'usine de la société ATM Renewi dispose d'une capacité de 1.2 million de tonnes par an, qui permet de traiter conjointement des terres polluées par des substances organiques et des agrégats bitumineux. En outre, il existe deux usines de taille inférieures, exploitées par Theo Pouw et Jansen Recycling, qui présentent une capacité de 550'000 et 300'000 tonnes par an, respectivement (voir Tableau 22).

Des réflexions ont également été menées en Allemagne et en Suisse pour réaliser une usine de traitement thermique de ce type. Cependant, en l'état actuel des connaissances, toutes les tentatives ont été abandonnées, car elles ne permettaient pas d'offrir une alternative concurrentielle aux installations de traitement existantes aux Pays-Bas.

	REKO BV	ATM Renewi	Theo Pouw	Jansen Recycling	Total
<b>Nombre d'installations</b>	2	1	1	1	5
<b>Capacité totale [t/an]</b>	1'850'000	1'200'000 (traitement prioritaire des sols pollués par des substances organiques)	550'000	300'000	3'900'000

Tableau 22 : Aperçu des installations de traitement thermique existantes aux Pays-Bas

### 3.2.1.3 Schémas de flux

La Figure 18 présente le diagramme de flux massique du traitement thermique dans les centrales REKO I et REKO II. Selon l'usine, 300 ou 320 MJ de gaz naturel sont respectivement nécessaires pour la combustion de 1 tonne d'agrégats bitumineux. En outre, 0.5 L d'urée, 2.5 kg de chaux et 145 L d'eau sont nécessaires par tonne traitée pour l'épuration des gaz de combustion afin de détruire les oxydes d'azote et de soufre. Les produits finaux générés par 1 t d'agrégats bitumineux sont constitués de 505 kg de gravier, 300 kg de sable, 40 kg de filler, 5 kg de gypse, 200 kg de vapeur, 91 MJ d'électricité et 90 MJ de chaleur pour l'installation REKO I. Dans le cas de REKO II, la valorisation énergétique a été optimisée pour atteindre des valeurs de 600 MJ pour l'électricité et de 650 MJ pour la chaleur. A l'issue du processus, 85 % poids du flux à traiter entrant est donc récupéré sous forme de gravier, sable, filler et de gypse. Les 15 % poids restants constitués du liant organique (4-7%), et de l'eau (5-8%), sont détruits ou évaporés lors de la combustion.

En optimisant le concept de récupération de chaleur, REKO a pu réaliser des progrès significatifs dans le rendement énergétique de la deuxième centrale. Dans le cadre de REKO II, le processus permet de récupérer plus d'énergie nette que celle qui injectée, car la combustion du liant libère beaucoup d'énergie qui peut être récupérée de manière efficace dans la chaudière à vapeur. Les agrégats bitumineux sont composés d'environ 5 % de liant, qui présente un pouvoir calorifique d'environ 40 MJ par kg. Les agrégats bitumineux présentent donc un pouvoir calorifique d'environ 2'000 MJ par tonne [16].

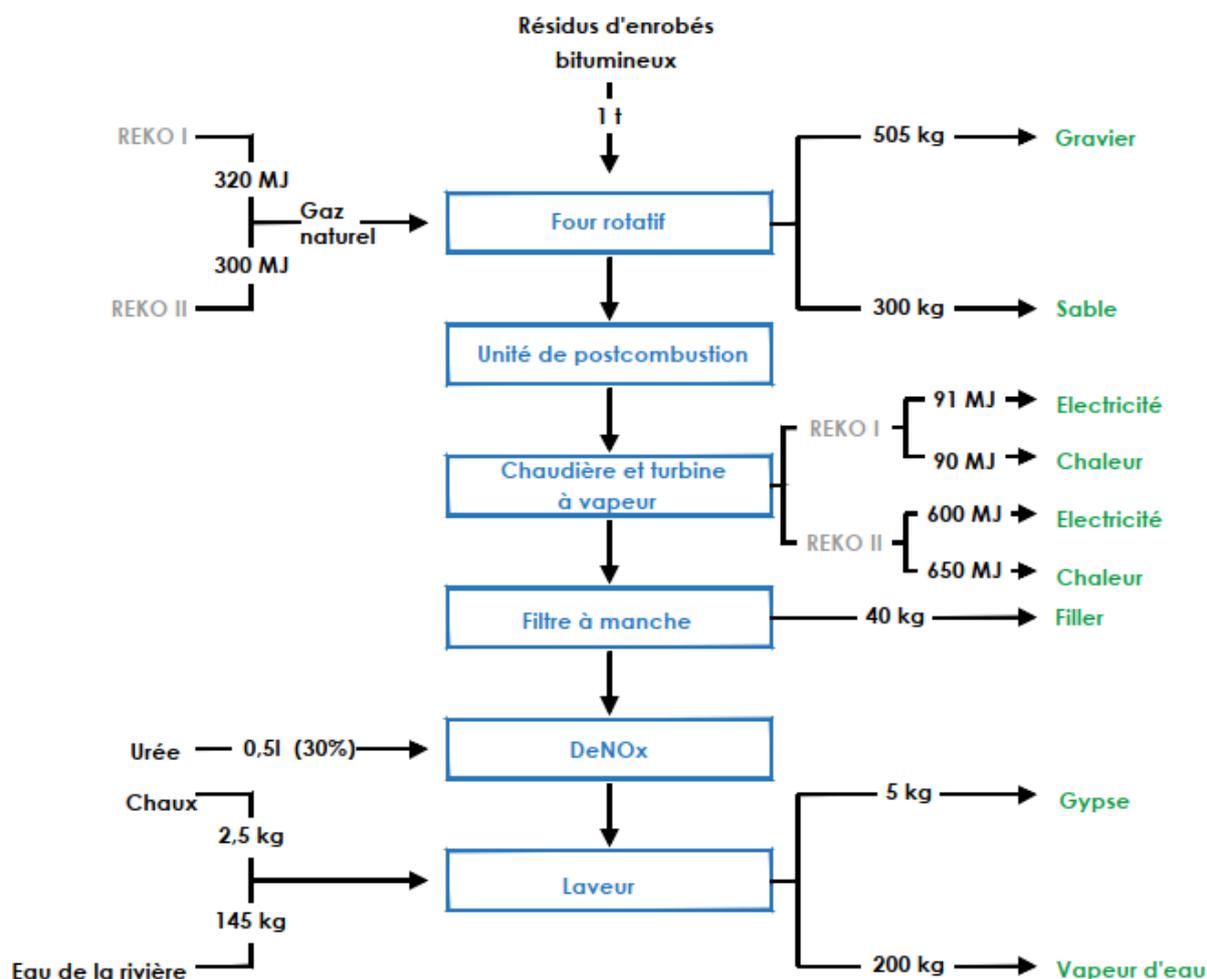


Figure 18 : Diagramme du flux massique des processus de traitement thermique de REKO (extrait de [16])

### 3.2.1.4 Qualité des fractions issues du traitement

Une étude sur les agrégats bitumineux traités thermiquement, mandatée par l'OFEV, a mis en évidence que les propriétés mécaniques des granulats minéraux issus des installations de traitement néerlandaises étaient significativement altérées par le recyclage thermique selon les procédés utilisés aux Pays-Bas [13]. Bien que les teneurs en HAP soient quasiment intégralement détruites (< 0,5 mg/kg) et que le granulat répond aux critères de matériaux non pollués au sens de l'OLED, les granulats et le sable récupérés ne présentent pas une aptitude suffisante pour être valorisés pour la production de nouveaux enrobés bitumineux [13]. A l'issue du traitement thermique, les granulats minéraux étaient partiellement recouverts de couches carbonisées et de résidus de réaction et se sont désintégrés lors de la poursuite des manipulations [13]. Selon IMP Bautest, des microfissures sont probablement induites dans les granulats lors du traitement thermique, ce qui entraîne lors de chaque sollicitation mécanique ultérieure une réduction de la taille des grains. Globalement, la proportion de grains poreux, compressibles et donc inadaptés a augmenté massivement (augmentation jusqu'à 8,1 % m selon la fraction granulométrique considérée). De plus, les températures élevées ont provoqué une transformation de la calcite qui constitue un bon liant, en chaux cassante et non liante, qui recouvrait les granulats comme une couche de combustion. Comme la chaux est très hydrophile, le pouvoir adhérent après traitement thermique était plus élevé qu'avec les agrégats naturels. IMP Bautest SA conclut que les

granulats traités thermiquement ne sont pas aptes pour être utilisés pour la confection de nouveaux revêtements bitumineux en Suisse, car le matériau est considérablement altéré pour pratiquement toutes ses propriétés essentielles. Dans certaines conditions, ces granulats pourraient être valorisés pour les couches de fondation ou pour la confection de béton, mais cela devrait être confirmé par des analyses complémentaires [13]. En tout état de cause, les granulats minéraux issus du traitement ne peuvent être valorisés en Suisse uniquement pour des applications moins spécifiques, ce qui engendre une diminution des recettes provenant de la vente de ce produit du traitement.

Aux Pays-Bas, ces granulats minéraux sont en revanche pleinement valorisés pour la fabrication de revêtements bitumineux routiers et de béton, et répondent aux exigences de qualité fixées par les normes de la Communauté Européenne. Ces matériaux ne sont cependant pas utilisés pour les couches de roulement, car ils ne répondent pas aux exigences d'adhérence.

### 3.2.1.5 Aspects économiques

- Capacité critique

En principe, plus la capacité d'une usine de traitement thermique est importante, plus le traitement est rentable. En ce qui concerne la capacité minimale, les indications des exploitants d'installations néerlandaises varient entre 300'000 t et 1'200'000 t par an. En Suisse, avec les quantités prévues d'agrégats bitumineux à traiter (500'000 – 1'000'000 t/an selon le scénario considéré), cela implique d'envisager la mise en œuvre d'une seule installation centralisée, d'autant plus les investissements et coûts d'exploitation en Suisse sont plus élevés qu'aux Pays-Bas.

- Coûts d'investissements

Les coûts d'investissement pour une usine de traitement thermique sont très élevés. Pour les usines de REKO BV, les coûts d'investissement s'élevaient à 85 millions d'euros pour l'usine REKO I d'une capacité de 650'000 tonnes par an et à 125 millions d'euros pour l'usine REKO II d'une capacité de 1.2 million de tonnes par an. Pour une implantation en Suisse, les investissements nécessaires s'élèveraient à un minimum estimé à CHF 100 millions, respectivement CHF 200 millions pour une capacité de traitement de 500'000 à 1'000'000 t/an.

- Coûts de transport

- Transport du lieu de génération au port du Rhin

Le transport en Suisse vers les ports de Bâle ou de Birsfelden se fait presque exclusivement par camion, car le point de génération du déchet est rarement implanté à proximité d'un point de chargement ferroviaire. Le transport est effectué par des entreprises de transport régionales et s'élève généralement à 5-15 CHF par tonne (le prix se réfère à la région du nord-ouest de la Suisse).

- Transport par bateau de Bâle / Birsfelden aux Pays-Bas

Le transport des agrégats bitumineux est effectué par bateau depuis les ports de Bâle ou Birsfelden. Les coûts de transport par bateau s'élèvent en moyenne à environ 15 € par tonne. Comme la Suisse importe nettement plus de marchandise par le Rhin qu'elle n'en exporte, le transport des agrégats bitumineux vers les Pays-Bas bénéficie de conditions économiques favorables puisqu'il permet d'éviter des retours de bateaux « à vide ». En outre, le transport vers les Pays-Bas s'effectuant dans le sens du courant, il bénéficie d'une faible consommation de diesel. Les prix dépendent de la taille du bateau et des niveaux d'eau pendant le transport, selon les mesures des stations de Maximiliansau (Maxau) et à Coblenze (Kaub) qui sont déterminantes pour le calcul. [17]. À partir d'un niveau d'eau inférieur à 4.50 m à Maxau et inférieur à 2 m à Kaub des surtaxes d'étiage s'appliquent, entraînant un surcoût d'environ 10 % par palier de 10 cm de diminution. [17] [18].

Lorsque le niveau d'eau est bas, la profondeur utile du canal de navigation diminue et les navires peuvent transporter moins de marchandises ou doivent réduire leur vitesse. Jusqu'à un niveau d'eau mesuré à la jauge Kaub d'environ 250 à 260 cm, les porte-conteneurs peuvent être chargés à leur pleine capacité [19]. La charge maximale autorisée diminue ensuite continuellement en fonction de la baisse du niveau d'eau, comme l'illustre la Figure 19 [19]. Cependant, aucune interdiction de naviguer sur le

Rhin n'est prononcée par les autorités en raison des basses eaux. Aussi longtemps que le capitaine peut le justifier d'un point de vue nautique, la navigation est possible [19].

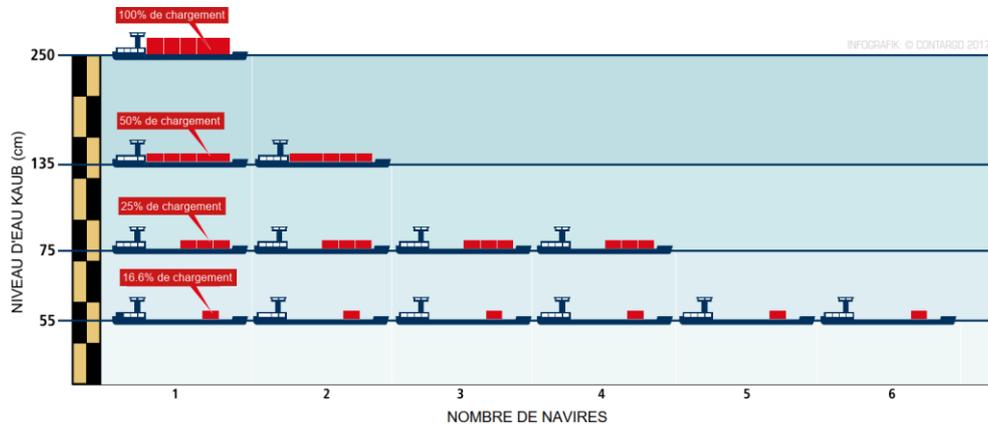


Figure 19 : Nombre de navires pour le transport d'un même tonnage en fonction du niveau du Rhin [19]

Depuis le début du millénaire, le niveau d'eau du Rhin a été très bas, surtout en 2003, 2011, 2015 et 2018 (voir Figure 20). En 2018, le niveau de l'eau était par moment inférieur de 2 m au niveau normal [20], de sorte que les navires de transport d'agrégats bitumineux ne pouvaient naviguer dans ces conditions qu'avec 1/7 à 1/8 de la capacité usuelle, c'est-à-dire avec une charge utile environ 400-600 t au lieu des 2'500-3'000 t habituelles [21]. En outre, la Waterways and Shipping Administration (WSV) a pu établir une corrélation entre le niveau de l'eau et la fréquence des accidents, les incidents se produisant principalement à des niveaux d'eau très bas, à des niveaux d'eau moyens et à des niveaux d'eau en baisse (voir Figure 21).

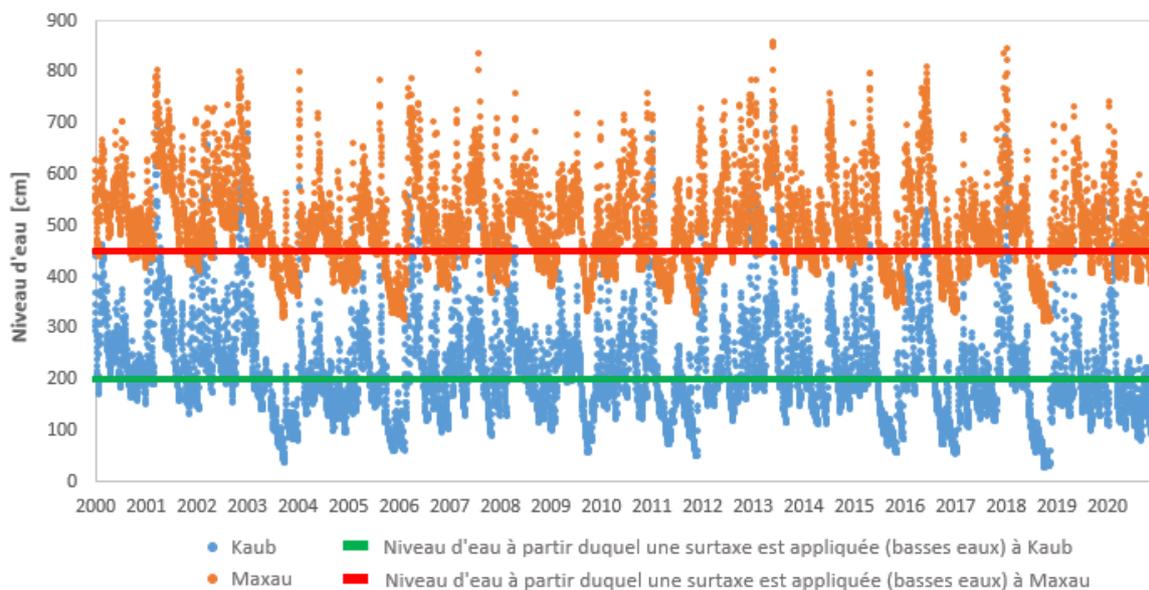


Figure 20 : Niveaux d'eau Kaub et Maxau (01/2000 à 11/2020). Source des données : Administration des voies navigables et de la navigation (WSV)

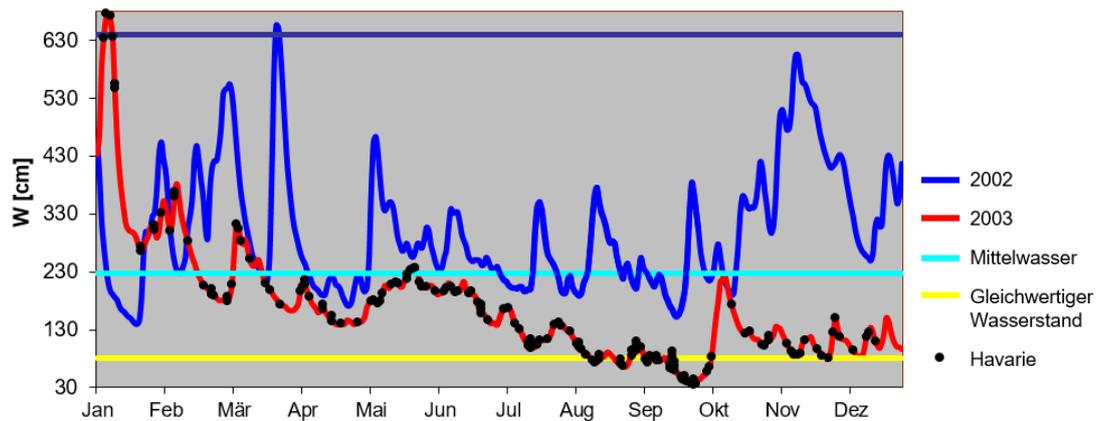


Figure 21 : Hydrogrammes des niveaux d'eau de la jauge Kaub de 2002 et 2003 avec mention des incidents. Source des données : Administration des voies navigables et de la navigation (WSV)

Au total, 20 des 22 années les plus chaudes depuis le début des relevés météorologiques sont intervenues au 21<sup>e</sup> siècle (en 2018) [22]. Les experts en climatologie supposent que la tendance à la sécheresse extrême et aux températures élevées en été va se poursuivre en raison du réchauffement climatique en cours. En raison de la fonte des glaciers en Suisse, les changements concernant le Rhin devraient cependant être moins prononcés que pour d'autres fleuves [19].

- Frais de stockage et de manutention

Les frais de manutention en Suisse, y compris le stockage, s'élèvent à environ 10-15 CHF par tonne.

Les frais de déchargement aux Pays-Bas s'élèvent à environ 3-4 € par tonne. Les coûts de stockage aux Pays-Bas sont déjà inclus dans les coûts de traitement.

- Coûts de traitement

Le coût de traitement des agrégats bitumineux livrés et déchargés s'établit entre, 32-36 € par tonne (niveau de prix 2020)

Les prix du traitement thermique aux Pays-Bas sont probablement influencés par les coûts de mise en décharge, qui constituent une référence et permettent aux entreprises néerlandaises d'ajuster leurs coûts effectifs en conséquence.

- Revenus liés aux produits du traitement (confidentiel)

Les prix de vente des produits aux Pays-Bas dépendent du marché et sont soumis à des fluctuations correspondantes. Les graviers de différents diamètres issus du traitement thermique peuvent être vendus à environ 9.50 euros/tonne. La reprise des pierres et du filler ne génère en revanche aucun revenu, mais des coûts de reprise. Les résidus solides du traitement des fumées de l'installation thermique font l'objet d'un stockage en décharge souterraine qui implique un coût pouvant atteindre 100 euros par tonne.

Le processus de la société REKO permet de générer des produits qui peuvent tous être valorisés (gravier, sable, matériaux de remplissage, gypse, électricité, chaleur valorisée par un réseau de chauffage urbain). ).

### 3.2.1.6 Protection de l'environnement

En relation avec la valorisation thermique des agrégats bitumineux aux Pays-Bas, les processus suivants ont un impact potentiellement significatif sur le changement climatique :

- Le transport des agrégats bitumineux du lieu de génération jusqu'à l'usine de recyclage thermique ;

- Le processus de traitement thermique des agrégats bitumineux et leur transformation en une matière première secondaire non contaminée ;
- La diminution d'émissions liée à la production évitée des matériaux substitués par les agrégats bitumineux traités (gravier, sable, gypse, fille et de l'énergie (énergie électrique et chaleur) ;
- La diminution d'émissions liées au transport évité des granulats minéraux substitués.

Une analyse du cycle de vie établie par l'Institut Fraunhofer, a conclu que la valorisation thermique des agrégats bitumineux s'avère plus favorable que la valorisation pour l'aménagement la construction de décharges en Allemagne en termes d'impact environnemental attendu. La variante REKO I a donné de meilleurs résultats dans sept des onze catégories d'impact par rapport à la valorisation dans la construction de décharges (voir Figure 23), tandis que les résultats de la variante REKO II étaient meilleurs dans dix des onze catégories d'impact [16].

Même si le transport des agrégats bitumineux vers les Pays-Bas ne paraît pas écologique à première vue, il permet de produire des matières premières secondaires et d'éliminer les composants cancérigènes du goudron du cycle des matériaux. Comme il n'existe pratiquement pas de ressources minérales exploitables aux Pays-Bas, on peut admettre que les matériaux secondaires produits remplacent effectivement des matières premières primaires qui auraient dû être importées de l'étranger. Lors du stockage définitif ou de la valorisation dans le cadre de l'aménagement de décharges, les polluants sont simplement confinés, c'est pourquoi un rejet ultérieur par lixiviation ou lors de la déconstruction de la décharge est possible. Le traitement thermique engendre également une valorisation de l'énergie, car le pouvoir calorifique du goudron couvre une partie des besoins énergétiques du traitement thermique. Avec l'installation REKO II optimisée, la quantité d'énergie valorisée sous forme d'électricité et de chaleur est supérieure à l'énergie du combustible supplémentaire nécessaire, car la combustion du goudron libère de grandes quantités d'énergie.

Le transport d'une tonne d'agrégats bitumineux (camion et bateau) du point de génération en Allemagne jusqu'à l'installation de traitement thermique de Rotterdam génère une émission d'environ 30 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> dans le cas le plus favorable (point de génération à Mannheim) et d'environ 73 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> dans cas le plus défavorable (point de génération à Schönau). L'émission évitée liée au transport des matières premières primaires substituées s'établit à environ 24 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> pour tous les scénarios. Le processus thermique produit environ 6.2 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> pour l'installation REKO I et environ 4.2 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> par tonne d'agrégats bitumineux pour l'installation REKO II.

De grandes différences entre la valorisation thermique et la mise en décharge peuvent être observées dans les crédits d'émissions attribués à chaque filière. Les crédits d'émission les plus élevés sont obtenus par l'installation REKO II, du fait des 600 MJ d'électricité et 650 MJ de chaleur valorisés grâce au processus. Pour l'installation REKO I, les crédits liés à la substitution de matières premières primaires sont plus faibles. Au total, les crédits d'émissions relatifs à la production de matériaux primaires et

d'énergie évitée s'élèvent à environ 41 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> pour REKO I et à environ 246 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> pour REKO II 2020.

Pour le domaine du changement climatique, les résultats nets pour la valorisation thermique aux Pays-Bas s'élèvent à -31 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> (REKO I) et à -236 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> (REKO II) contre +6 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> pour la valorisation pour la construction d'une décharge allemande.

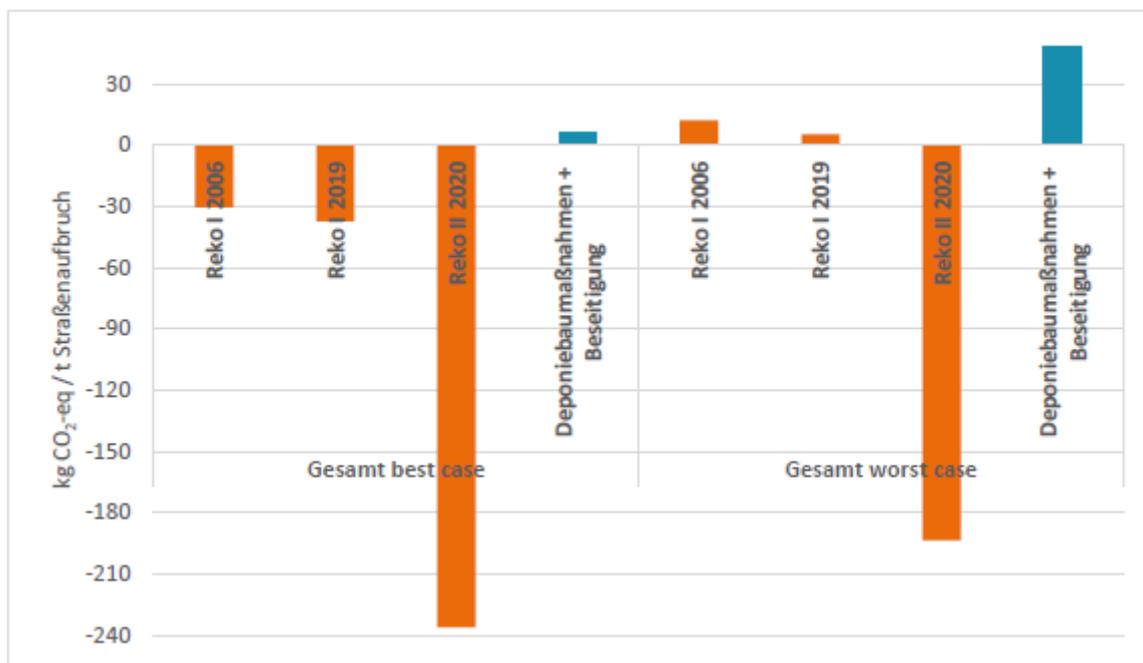


Figure 22 : Résultats nets pour le domaine Changement climatique relatif à la comparaison entre la valorisation thermique aux Pays-Bas (orange) et de la valorisation comme matériau pour l'aménagement décharges en Allemagne (bleu) pour les scénarios le plus favorables (génération du déchet à Mannheim) et le plus défavorable (génération du déchet à Schönau) [16]

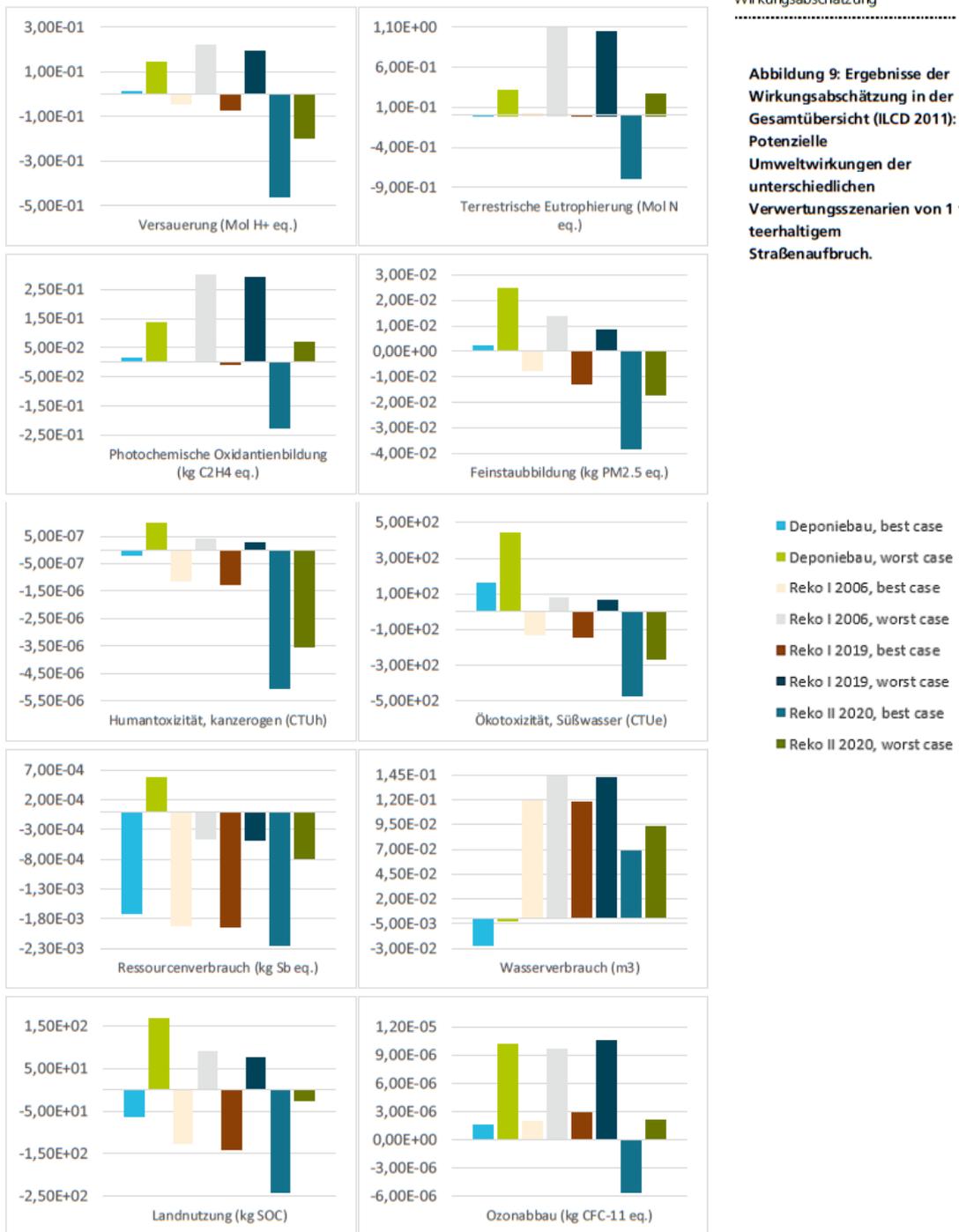


Figure 23 : Résultats de l'analyse du cycle de vie comparative de l'Institut Fraunhofer entre la valorisation thermique aux Pays-Bas et la valorisation comme matériau pour l'aménagement de décharges en Allemagne [16]

Les résultats d'une autre analyse du cycle de vie réalisée par l'Institut de recherche sur l'énergie et l'environnement Heidelberg ont mis en évidence que la valorisation thermique aux Pays-Bas donne des résultats plus favorable que la valorisation dans une décharge allemande uniquement dans le cas où la distance de transport fluvial n'excède pas 460 km. [23].

### 3.2.1.7 Possibilités et risques pour le traitement futur

#### A. Réalisation d'une usine de traitement thermique en Suisse

La réalisation d'une installation de traitement thermique dédiée aux agrégats bitumineux en Suisse permettrait d'éviter les longues distances de transport jusqu'aux Pays-Bas. Cependant, différents facteurs pourraient rendre la réalisation d'une telle installation extrêmement difficile, voire impossible :

##### - Capacité critique

Les installations de traitement thermique de déchets minéraux impliquent des capacités critiques élevées afin de permettre une exploitation rentable. Les capacités des installations de traitement thermique néerlandaises se situent entre 300'000 et 1'200'000 tonnes par an. Sur cette base et en considérant les conditions cadre spécifiques, on peut admettre qu'une installation de traitement thermique en Suisse ne pourrait être envisagée qu'à partir d'une capacité de 500'000 à 1'000'000 t/an. Sur la base des scénarios présentés au Chapitre 2.6.2, cette capacité correspond à la réalisation d'une installation centralisée pour le traitement des quantités d'agrégats bitumineux à l'échelle de l'ensemble de la Suisse..

##### - Débouchés pour les matériaux issus du traitement

Aux Pays-Bas, les granulats minéraux issus du traitement thermique sont valorisés pour la construction routière et la production de béton et permettent de pallier le déficit de matériaux minéraux primaires en lien avec les caractéristiques géologiques du pays. Les Pays-Bas sont donc contraints d'importer chaque année environ vingt millions de tonnes de matières premières primaires telles que le sable et le gravier [11]. Du fait de cette configuration particulière, le gouvernement des Pays-Bas a accordé une grande priorité au recyclage optimal des déchets minéraux. La valorisation des granulats minéraux issus du traitement thermique de déchets minéraux s'inscrit dans cette politique.

##### - Exigences de qualité

En Suisse, des exigences de qualité plus strictes s'appliquent à l'utilisation des granulats pour la confection de revêtements bitumineux. Les granulats minéraux issus du traitement thermique sont agréés aux Pays-Bas, sur la base des normes de la Communauté Européenne, hormis en ce qui concerne la couche de roulement, mais ne répondent pas aux exigences en vigueur en Suisse en matière de propriétés mécaniques, selon l'étude réalisée pour l'OFEV par IMP Bautest SA [13]. Les altérations constatées sont dues aux températures élevées auxquelles sont soumises les granulats minéraux, mais qui sont justement nécessaires pour obtenir la destruction des HAP. Il ne sera donc probablement pas possible d'optimiser la qualité du produit par des ajustements du processus. Par conséquent, la réalisation d'une installation de traitement thermique en Suisse se heurte au potentiel limité de valorisation des granulats minéraux générés, qui ne répondent pas aux exigences spécifiques fixées pour les revêtements bitumineux et dont la valorisation ne peut être envisagée que pour des utilisations moins spécifiques. Le potentiel économique de valorisation des granulats minéraux générés est donc nettement plus limité en Suisse, qui dispose d'un gisement important de granulats minéraux primaires et de granulats secondaires non altérés par un processus de traitement thermique, qu'aux Pays-Bas, avec des prix de revente significativement plus bas.

##### - Exigences relatives au site d'implantation et aux infrastructures et d'emplacement

La recherche d'un site d'implantation adapté pour une installation de traitement thermique dédiée d'une capacité égale ou supérieure à 500'000 tonnes par an devrait s'avérer très difficile. Le site recherché doit être une parcelle de grande superficie implantée en zone industrielle, bénéficier d'une localisation centrale à l'échelle de la Suisse et être raccordé au rail. Le site doit également être implanté dans un secteur caractérisé par une forte demande en chaleur, constante tout au long de l'année, afin de permettre la valorisation optimale de l'énergie thermique produite. Sur la base du bilan énergétique de la nouvelle centrale REKO II (voir Figure 18), une installation de traitement thermique d'une capacité de

500'000 tonnes devrait produire 84 millions de kWh d'électricité et 91 millions de kWh de chaleur à valoriser au moyen d'une conduite de chauffage à distance (CAD). A titre indicatif la chaleur produite, correspond à un quartier d'habitation de 25'000 ménages selon le standard Minergie.

En outre, le traitement des agrégats bitumineux n'est pas soumis à zone d'apport et est donc géré selon les principes de l'économie de marché. L'alimentation adéquate de l'installation devra donc se fonder sur des conditions de prise en charge économiques et logistiques favorables. Dans ce contexte, l'organisation de la construction des routes en Suisse, largement décentralisée à l'échelle cantonale ou communale, pourrait constituer un obstacle supplémentaire à l'implantation d'une usine centralisée sur le territoire national.

#### - **Logistique**

La logistique constitue un point important à considérer pour envisager l'implantation d'une installation de traitement thermique centralisée en Suisse. Les distances et coûts de transport ont une influence importante sur la rentabilité de la filière de traitement ainsi que son bilan environnemental. L'installation de traitement centralisée doit être en mesure de prendre en charge et de regrouper les agrégats bitumineux générés sur l'ensemble du territoire national. Dans ce contexte, il est indispensable que les transports à grande distance soient effectués par le rail auquel l'usine projetée devra être raccordée. La mise en œuvre d'un transport combiné route-rail avec l'utilisation de quais de chargement décentralisés à l'échelle de l'ensemble du territoire est nécessaire.

En comparaison, les conditions de desserte des installations existantes aux Pays-Bas, qui bénéficient toutes d'un raccordement direct au transport fluvial par le Rhin sont idéales, elles permettent d'assurer un transport direct entre Bâle et l'installation concernée sans rupture de charge ou transbordement. En outre, ce transport bénéficie d'un coût attractif, étant donné qu'il valorise le retour de péniches ayant acheminé des matières premières de Rotterdam vers Bâle qui autrement s'effectueraient à vide.

Les installations thermiques existantes aux Pays-Bas présentent en outre l'avantage de pouvoir valoriser de manière optimale la chaleur produite du fait de leur raccordement à de vastes réseaux de chauffage à distance raccordé à des preneurs de chaleur industriels qui ont des besoins significatifs tout au long de l'année.

#### - **Estimation des investissements et des coûts de traitement**

Les coûts d'investissement pour une usine de traitement thermique sont très élevés et associés à des risques importants (l'apport des déchets n'est pas assuré par un mécanisme de zone d'apport) et à de longues durées d'amortissement. Pour une implantation en Suisse, les investissements nécessaires s'élèveraient à un minimum estimé à CHF 100 millions, respectivement CHF 200 millions pour une capacité de traitement de 500'000 à 1'000'000 t/an.

Par rapport au traitement dans une installation existante aux Pays Bas, l'implantation d'une nouvelle installation de traitement au centre de la Suisse permettrait de réduire les coûts de transport de l'ordre de CHF 15/t en moyenne. En revanche, les possibilités de valorisation plus réduites des granulats minéraux générés, limitée à des utilisations non spécifiques, engendreront une augmentation du prix de prise en charge des déchets, estimée entre 15 à 20 CHF/t. Comme l'expérience montre que les coûts d'investissement et d'exploitation sont également plus élevés en Suisse, le coût de traitement des agrégats bitumineux dans une installation centralisée en Suisse peut être estimé à un minimum de CHF 130 CHF, et ce pour autant que des conditions de valorisation de la chaleur générée aussi favorables qu'aux Pays-Bas puissent être mise en œuvre (raccordement à un vaste réseau de chauffage existant avec des besoins industriels significatifs tout au long de l'année).

- **Risques liés à l'investissement**

Il se pourrait que les entreprises néerlandaises réagissent à la mise en œuvre d'une nouvelle installation en Suisse en réduisant leurs prix. Plusieurs usines existantes sont en effet déjà en activité depuis plusieurs années et sont susceptibles d'être amorties. Par conséquent, les investissements dans une usine de traitement thermique en Suisse sont associés à des risques élevés.

- **Procédures d'autorisation**

Les différentes procédures d'autorisation, qui seraient nécessaires pour une usine de traitement thermique d'une capacité égale ou supérieure à 500'000 tonnes par an, seraient longues et coûteuses avec des risques d'oppositions ou de blocage non négligeables. Ces démarches devraient être engagés bien avant que l'usine ne soit rentable et sans aucune garantie de réussite.

**B. Poursuite de l'exportation vers des installations étrangères**

La poursuite de l'exportation des agrégats bitumineux pour leur valorisation thermique aux Pays-Bas comporte certains risques résiduels qui peuvent cependant potentiellement être maîtrisés.

- **Sécurité de l'élimination**

L'exportation d'agrégats bitumineux suisses vers les Pays-Bas comporte des risques réglementaires. La sécurité à moyen et long terme d'élimination n'est pas garantie en toutes circonstances, car il n'existe pas actuellement de contrats de prise en charge à long terme avec les entreprises de traitement néerlandaises.

Afin de minimiser ce risque, des contrats à moyen et long terme pourraient être conclus avec les entreprises de transformation aux Pays-Bas. Etant donné que l'activité de la construction aux Pays-Bas dépend à l'inverse des importations de matériaux minéraux pollués afin de pallier le déficit en agrégats minéraux primaires et disposent de grandes capacités de traitement, cette filière d'élimination ne risque pas d'être mise en péril dans un avenir prévisible, d'autant plus que plusieurs installations exploitées par des entreprises différentes sont disponibles..

- **Dépendance économique**

En ce qui concerne le prix d'élimination, il dépend de l'évolution de la capacité disponible de traitement disponible aux Pays-Bas ramené aux quantités futures d'agrégats bitumineux à traiter en provenance des pays de l'Union Européenne. Le prix d'élimination est fixé par les entreprises néerlandaises qui exploitent les installations de traitement concernées. Toutefois, comme quatre entreprises différentes se font concurrence pour des matériaux provenant notamment de Suisse et d'autres pays européens, le risque de fluctuations arbitraires des prix de traitement dans le futur sont faibles.

- **Risques liés au transport**

Même si des incidents peuvent se produire plus fréquemment en période d'étiage, le transport fluvial reste très sûr et économique, comparativement aux autres modes de transport. Comme décrit au 3.2.1.5, le changement climatique ne devrait avoir que des conséquences mineures sur la navigabilité du Rhin au cours des 65 prochaines années [19]. Le Rhin sera en effet probablement moins affecté par les sécheresses extrêmes que d'autres fleuves, car les températures élevées provoquent simultanément une augmentation des eaux de fonte [19].

Lors d'étés très secs, la navigation sur le Rhin peut être interrompue sur de courtes périodes, en particulier du fait des surtaxes importantes à payer en période d'étiage. Cependant, il n'y a pas d'interdiction officielle de la navigation sur le Rhin lors de basses eaux [19]. En conséquence, même pendant l'été sec de 2018, le transport fluvial des agrégats bitumineux a pu être maintenu, avec toutefois des réductions temporaires importantes des charges utiles.

### 3.2.2 Traitement thermique en cimenterie

Il existe actuellement six cimenteries avec production de clinker en Suisse (Figure 24). Toutes ses installations utilisent des combustibles alternatifs afin de substituer partiellement les combustibles fossiles. En 2019, le taux d'utilisation de combustibles de substitution était de 68.1 %.

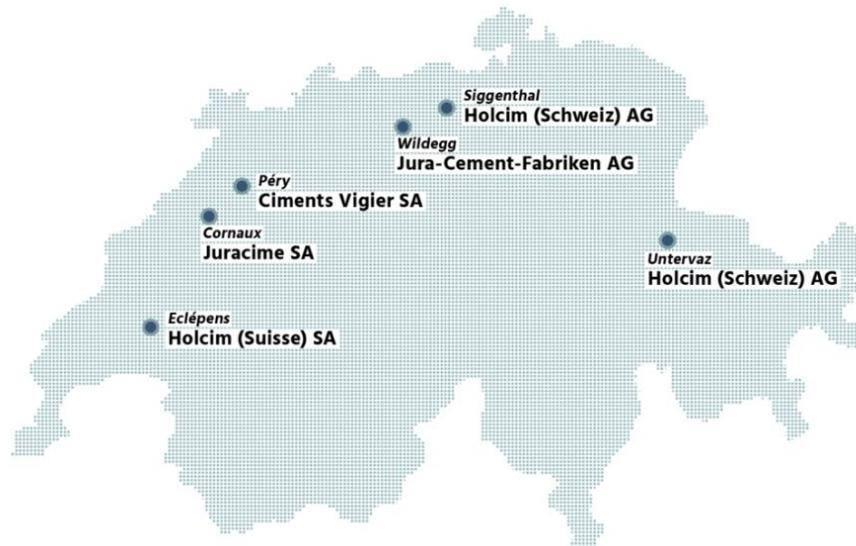


Figure 24 : Carte des cimenteries suisses [Source : Cemsuisse]

Les combustibles de substitution sont introduits dans le four à ciment soit au niveau du brûleur principal, soit à l'entrée du four rotatif, soit (s'il y en a un) au niveau du précalcinateur, comme représenté sur la Figure 25 ci-après. En raison des températures de combustion élevées et des longs temps de séjour, les substances organiques sont complètement détruites.

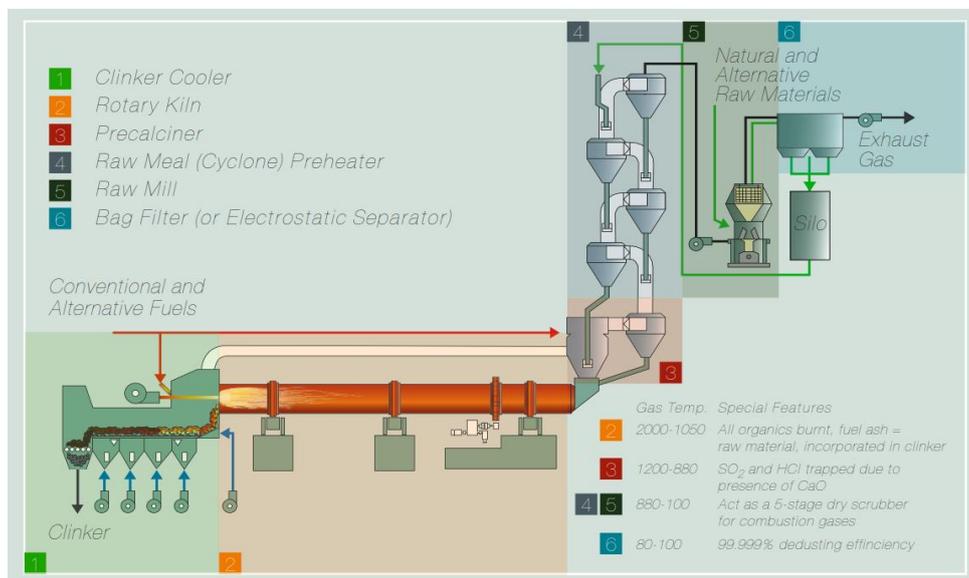


Figure 25 : Production de clinker de ciment en utilisant l'exemple d'un four de calcination [Source : GTZ-Holcim]

Outre les combustibles de substitution tels que les pneus usagés, les plastiques ou les farines animales, les déchets minéraux contaminés par des substances organiques peuvent également être utilisés dans les fours à ciment sous certaines conditions. Ceux-ci sont incorporés dans le clinker de ciment, c'est-à-dire qu'il ne reste aucun résidu.

Les conditions principales pour envisager la prise en charge d'agrégats bitumineux dans un four à ciment sont les suivantes :

- Afin de garantir une combustion adéquate des composants organiques, les agrégats bitumineux doivent être introduits directement dans le four à ciment ou le précalcinateur. Une introduction avec la matière première à l'extrémité froide du processus n'est pas possible pour des raisons d'émission. Une exception est possible si le système d'épuration des gaz de combustion est équipé pour le post-traitement des émissions qui en résultent.
- Le contenu minéral des agrégats bitumineux n'a pas la composition chimique requise pour la production de ciment. En outre, ils sont trop grossiers pour réagir complètement avec la matière première lors de la production de clinker dans le four. Cela limite l'utilisation des agrégats bitumineux dans le four à ciment. Il n'est en outre pas possible de broyer les agrégats bitumineux avec la matière première dans le moulin à farine brute, car le bitume entraînerait un colmatage dans l'installation.

Actuellement, aucun agrégat bitumineux n'est utilisé dans les cimenteries suisses. Toutefois, l'industrie du ciment est en mesure de proposer des solutions à l'avenir et souhaite le faire.

La possibilité la plus simple d'utiliser des agrégats bitumineux dans l'industrie du ciment consiste en l'alimentation directe du four à ciment mentionnée ci-dessus, c'est-à-dire l'utilisation des infrastructures existantes. Une estimation approximative du potentiel des fours à ciment suisses peut être effectuée selon les hypothèses ci-dessous :

- Production annuelle actuelle de clinker dans les systèmes de fours présentant le meilleur potentiel d'alimentation (fours à échangeur de chaleur et à précalcination) : 3 millions de tonnes. Ce calcul ne tient pas compte du fait que la production de clinker continuera à diminuer à l'avenir en raison d'une substitution toujours plus grande dans l'industrie du ciment.
- Adjonction maximale théorique de matériaux minéraux dans le système de four par rapport au clinker : 2 %. Les facteurs limitants locaux tels que la composition chimique de la matière première naturelle et l'utilisation déjà existante d'autres déchets minéraux ne sont pas pris en compte.

Ces hypothèses très simplifiées aboutissent à une prise en charge maximale théorique d'agrégats bitumineux dans les fours à ciment suisses de **60'000 t/a**. Cette capacité est donc loin d'être suffisante pour traiter la quantité totale de 500'000 t/a d'agrégats bitumineux contaminés par les HAP.

En ce qui concerne le prix d'élimination des fines fractions d'agrégats bitumineux dans les cimenteries, un ordre de grandeur de +/- 100 CHF/t peut être articulé.

Une combinaison avec un traitement mécanique décentralisé préalable paraît rationnelle afin d'extraire les granulats minéraux supérieurs à 8mm, permettrait de limiter les quantités à soumettre en traitement en cimenterie aux seules fractions fines riches en liant. Un tel concept permet également de réduire les coûts de transport.

Même avec ce traitement mécanique préalable, la capacité théorique des fours à ciment de 60'000 t/a n'est pas suffisante pour prendre en charge la totalité du flux d'agrégats bitumineux contaminés en HAP produits en Suisse.

La prise en charge de plus grandes quantités d'agrégats bitumineux par les cimenteries en grandes quantités, ne peut uniquement être envisagée dans le cas où les agrégats broyés ne sont pas mélangés au clinker de ciment. Certaines cimenteries étrangères disposent déjà d'un réacteur thermique implanté en parallèle du four à ciment destiné au traitement thermique de déchets minéraux contaminés par des polluants organiques. Les flux gazeux produits par ce réacteur spécifique sont traités par l'installation de traitement des fumées de la cimenterie. La concrétisation de cette option impliquerait des investissements importants, qui se chiffrent en dizaines de millions de francs.

### 3.2.3 Pyrolyse

#### 3.2.3.1 Description générale du processus

La pyrolyse est un processus thermochimique dans lequel le liant est décomposé en gaz énergétique à des températures d'environ 500-550°C en l'absence d'oxygène. Comme le processus se déroule en l'absence d'oxygène, le bitume n'est pas brûlé et son contenu énergétique peut être utilisé comme gaz de pyrolyse pour maintenir un processus totalement autonome. Pour que la pyrolyse fonctionne sans carburant supplémentaire, il faut qu'au moins 4.6 % de bitume soit présent dans l'asphalte broyé [24]. L'énergie générée peut être utilisée pour sécher l'agrégat, pour préchauffer l'agrégat d'asphalte ou pour réduire la consommation de carburant du séchoir traditionnel. Outre les gaz de pyrolyse énergétique, le but de ce processus est de produire des agrégats minéraux exempts de HAP, qui peuvent être valorisés dans la construction.

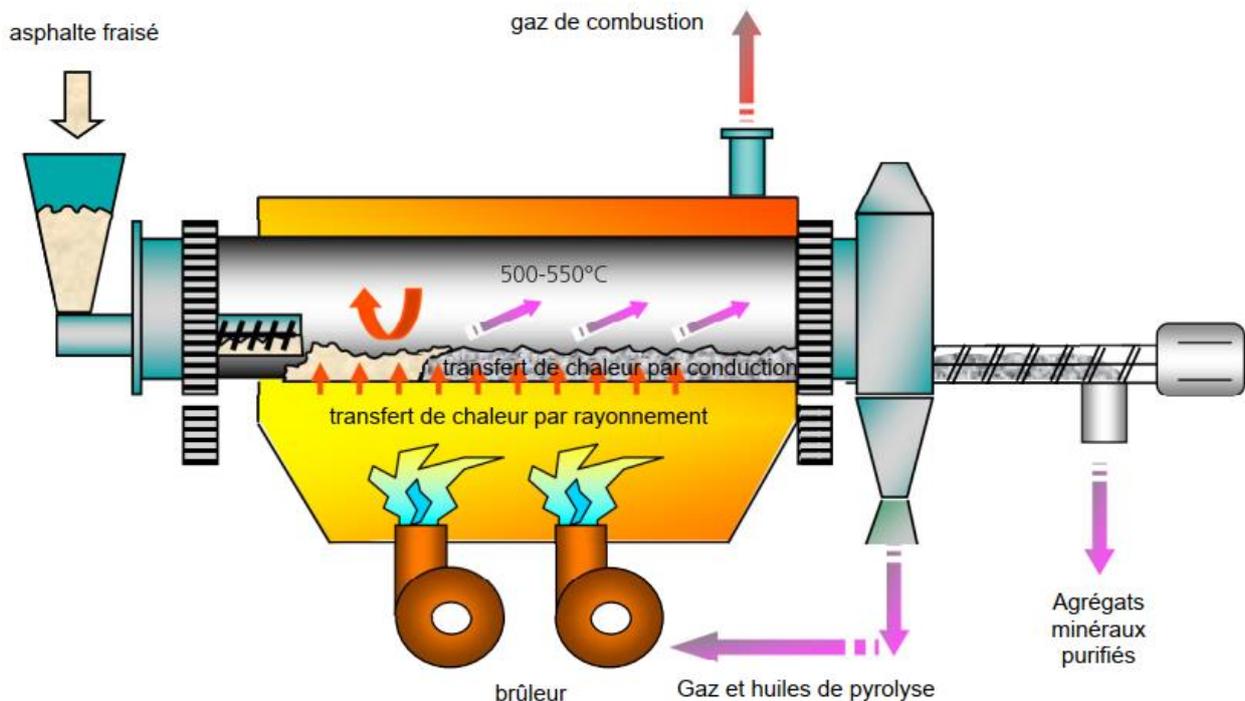


Figure 26 : Représentation schématique d'une installation de pyrolyse

##### 3.2.3.1.1 Etat de la technique et développement

En Allemagne, l'aptitude du procédé de pyrolyse pour le traitement thermique des agrégats bitumineux contenant du goudron a été testée par la société Eisenmann, un constructeur d'installations de traitement thermique spéciales [25]. Ces tests ont cependant montré que la pyrolyse ne constitue pas un procédé approprié pour le traitement des agrégats bitumineux contenant du goudron. Après la pyrolyse, la fraction minérale obtenue contenait encore des résidus d'hydrocarbures. En outre, la fraction minérale obtenue ne se distinguait pas visuellement du déchets bitumineux de départ de couleur noire, ce qui ne permettait pas d'envisager son acceptation comme matériau minéral recyclé. [25].

Par ailleurs, la société Solenia a exploité une installation pilote en Italie d'une capacité de 100 kg/h, dans laquelle la pyrolyse pouvait fonctionner de manière autonome grâce au pouvoir calorifique du liant avec destruction des contaminants organiques. Entre-temps, l'entreprise n'existe plus. L'idée de Solenia était de vendre aux producteurs d'enrobés bitumineux une installation de pyrolyse modulable qui pourrait être exploitée en parallèle à une centrale de production d'enrobés. La taille de l'installation devait pouvoir être adaptée aux besoins du client et à la configuration de l'installation.

### 3.3 Traitement mécanique

Le contenu de ce chapitre est basé sur des connaissances générales de ce type de traitement, des données issues de la littérature, sur la visite de l'installation BHZ RZO AR Recycling Züri Oberland à Volketswil en septembre 2020 suivie d'une séance de travail avec GIPO SA – constructeur et concepteur d'installations et BHZ (Mr Kunz) ainsi qu'une téléconférence avec la société BAM Infra Nederland en octobre 2020.

#### 3.3.1 Description générale du processus

Les agrégats bitumineux sont soumis à un traitement comportant différentes étapes de criblage et de scalpage « grains sur grains » à sec avec des installations spécifiques visant à limiter l'altération mécanique et l'éclatement des granulats avec comme objectif de séparer les 2 fractions suivantes :

- Fraction minérale la plus propre possible et présentant des propriétés mécaniques aussi peu altérées que possible afin de pouvoir être valorisée pour la construction routière,
- Fraction contenant les liants bitumineux la plus concentrée possible, c'est à dire contenant un minimum de fraction minérale et de granulométrie la plus fine possible (filler et sable), pouvant si possible être valorisée comme constituant de nouveaux revêtement bitumineux ou soumise à un traitement thermique (obligatoire en cas de concentration en liant > 5'000 mg/kg).

#### 3.3.2 Etat de la technique

En **Suisse**, quelques installations fonctionnent. Une des plus performantes est l'installation BHZ RZO AR Recycling Züri Oberland à Volketswil.

La chaîne de traitement peut être décrite de la manière suivante :

- Les agrégats sont chargés dans des unités de criblage / scalpage à plusieurs niveaux de granulométrie 22 puis 16, 11 et le cas échéant 8 mm avec des installations qui favorisent le scalpage et le frottement grain sur grain afin de minimiser l'altération mécanique liée au concassage (installations de marque GIPO SA).
- En l'état actuel un second passage dans l'installation permet de récupérer une fraction minérale supérieure à 8 mm avec une teneur résiduelle en liant inférieure à 1%, après lavage de la fraction minérale à l'eau afin de séparer et décanter les fines.
- La fraction inférieure à 8mm, qui représente environ 70% de la quantité traitée selon l'exploitant de l'installation est actuellement soit valorisée comme agrégats recyclés dans la construction routière ou mise en décharge en fonction des disponibilités et des teneurs en HAP.
- La limite de concentration en HAP fixée pour l'acceptation des déchets entrants est de 1'000 mg/kg. Il n'y a actuellement pas de prise en charge différenciée pour les concentrations à plus ou moins de 250 mg/kg.

La quantité maximale traitée par l'installation est de 800 – 1'000 t/jour. L'activité implique de disposer de très gros volumes de stockage tampon (>> 200'000 m<sup>3</sup>) afin de pouvoir équilibrer et tamponner les flux de déchets à traiter et les débouchés de valorisation des matériaux recyclés.

Le stockage des agrégats bitumineux à traiter peut s'effectuer à ciel ouvert. Le stockage des différentes fractions issues du traitement est en revanche à prévoir sous couvert afin de gérer et éviter une humidité trop élevée préjudiciable à la valorisation optimale.

L'installation est incluse dans le site global de l'entreprise BHZ qui comprend également une centrale de production d'enrobés.

Selon l'entreprise BHZ et le fournisseur d'installations GIPO il existe encore un potentiel non négligeable d'optimisation global de l'installation.

L'enjeu porte notamment sur l'augmentation de la plage granulométrique de la fraction minérale récupérée jusqu'à une valeur de 5, voire idéalement 2 mm. Il n'y a actuellement aucune certitude que cet objectif puisse être atteint mais le processus d'optimisation se poursuit.

L'abaissement de la granulométrie minimale récupérée dans la fraction minérale jusqu'à 2 mm permettrait d'augmenter de manière significative la quantité de granulats concernée et permettrait d'autre part de disposer d'un « mortier de bitume » constitué d'un mélange de bitume, de filler et de sable pouvant potentiellement être valorisé comme composant de base dans les centrales d'enrobés après mélange, homogénéisation et adjonction d'additifs le cas échéant.

En ce qui concerne les agrégats bitumineux présentant une teneur en HAP supérieure à 250 mg/kg, la fraction non récupérée riche en liant (concentration spécifique > 5'000 mg/kg) devrait dans tous les cas être soumise dès 2026 à un traitement thermique.

A l'**échelle européenne**, les recherches effectuées ont permis d'identifier un processus de traitement mécanique mis en œuvre par société **Royal BAM Group aux Pays-Bas** (Entité BAM Infra Nederland) qui constitue une des plus grandes entreprises de construction et de travaux publics des Pays-Bas.

Cette société a développé un concept global de production d'enrobés bitumineux répondant aux exigences de la durabilité et de l'économie circulaire en intégrant les volets énergétiques et de protection du climat qu'ils souhaitent intégralement mettre en œuvre d'ici 2030.

Ce projet, intitulé LE2AP (Low Emission Asphalt Pavement - 2 pour le double objectif de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> et de bruit), intègre notamment les volets suivants :

- Revêtement produits à basse température < 105°C ; constitués de 80% de matériaux recyclés et diminution du bruit de > 7 dB(A) avec amélioration de la qualité pour être également utilisé pour les couches de roulement (tronçon test de 2,3 km de chaussées en bi-couche avec 82 à 93% de matériaux recyclés produits à une température de 105 °C).
- Séparation des agrégats au moyen d'un procédé de séparation mécanique – avec crible vibrant à haute fréquence qui permet de séparer par éclatement la pellicule de liant qui entoure les grains minéraux sans chauffage ou adjonction d'adjuvants. Cette technique limite le concassage des grains qui altère les propriétés mécaniques des granulats. Cette étape de traitement est suivie d'un lavage à l'eau de la fraction minérale. L'eau de lavage est recyclée en circuit fermé.

Le procédé de traitement mécanique permet d'obtenir :

- **Différentes fractions de grains minéraux** avec des teneurs en liant inférieures à 1%. Selon l'entreprise BAM, le processus de séparation est actuellement bien au point jusqu'à une granulométrie de 5 mm. Des tests et optimisations sont actuellement en cours afin de récupérer également la fraction entre 2 et 5mm. Les répondants de BAM sont relativement confiants quant à l'aboutissement favorable de cette optimisation.
- Un **mortier de sable et filler riche en bitume** destiné à être valorisé comme constituant de base en centrale de production d'enrobé. Dans ce contexte, le mortier de bitume est chauffé à environ 170°C et homogénéisé avec adjonction de bitumes primaires (« soft bitumen ») et d'additifs, avec un brassage en continu sans contact avec des flammes ou de l'air, pour l'obtention d'une mousse de bitume pouvant être valorisée comme constituant de bitume de qualité dans les centrales d'enrobés.

Ce liant recomposé est ensuite destiné à être mélangé avec une fraction minérale recyclée chauffée, dont la composition est intégralement contrôlée, dans le but d'obtenir un revêtement de haute qualité.

- Une faible quantité de boues issues du lavage de la fraction minérale, riche en liant, deshydratées au moyen d'un système de filtres-presses.

Dans ce cadre, BAM développe une méthode de production de revêtement à température réduite (105°C) sans altération des propriétés, avec incorporation d'une mousse de bitume mélangé avec la fraction minérale recyclée. Les tests effectués montrent des performances mécaniques et de durabilité équivalentes aux revêtements confectionnés à partir de matériaux primaires.

Le statut réglementaire de la fraction minérale récupérée a fait débat et l'objet de procédures juridiques entre BAM et l'administration, qui ont été tranchées favorablement et confirmé les possibilités d'utilisation dans le cadre de la construction routière.

L'objectif de la société BAM est de développer progressivement le concept global LE2AP, avec en particulier des essais à large échelle, afin qu'il soit intégralement opérationnel à l'horizon 2030.

### **3.3.3 Schémas de flux et qualité des fractions issues du traitement**

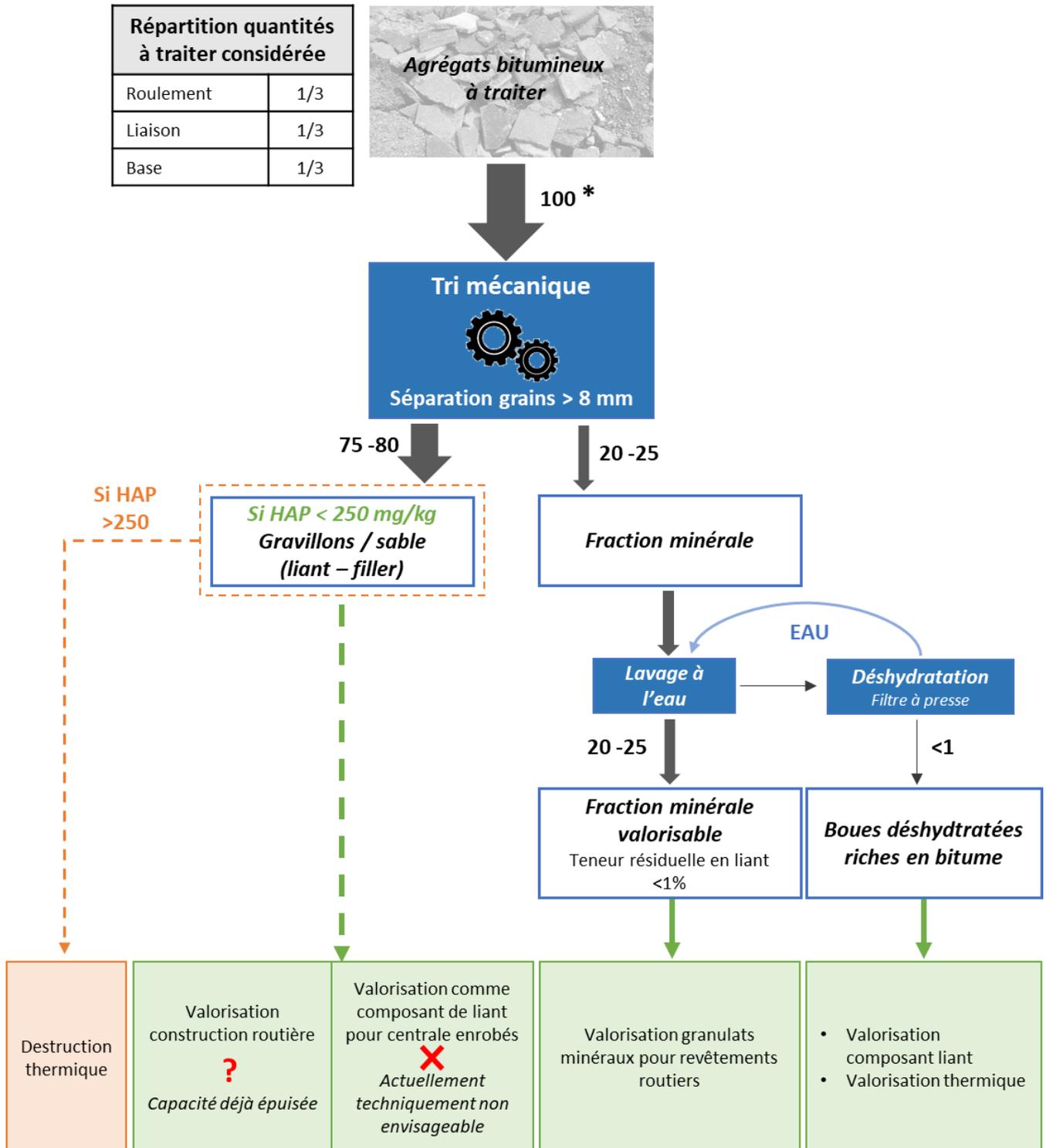
---

Comme déjà mentionné, le processus mécanique génère les 3 flux suivants :

- a. Fraction de granulats minéraux la plus propre et la plus étendue possible vers le bas de la courbe granulométrique (granulats de petite taille) et présentant des propriétés mécaniques aussi peu altérées que possible afin de pouvoir être valorisée pour la construction routière en respectant les critères de qualité fixés aux granulats primaires
- b. Mortier de bitume, contenant sous une forme aussi concentrée que possible les liants bitumineux, le filler (< 0,125 mm) et du sable dans des quantités et une granulométrie aussi réduite que possible.
- c. Boue riche en fines et en bitume, comme sous-produit du lavage à l'eau des granulats, à sécher / déshydrater au moyen d'une installation de filtres-presse permettant de faire recirculer l'eau de lavage.

Les flux massiques dépendent de la finesse du grain minimal pouvant être récupéré dans la fraction minérale et de la répartition des différentes couches et types spécifiques de revêtement pris en charge par l'installation de traitement. Ce dernier point influence en effet de manière importante la granulométrie des matériaux à traiter.

Les schémas de flux estimatifs sont présentés ci-dessous pour les 2 configurations de limite inférieure du tri granulométrique à respectivement 8 mm et 2 mm, à partir des granulométries moyennes estimées pour les trois couches de revêtement (roulement / liaison / base) présentées au chapitre 2.6 et d'une hypothèse de répartition du tonnage traité équivalente entre les 3 couches.



\* valeurs: % poids (estimation)

Figure 27 : Schéma de flux d'un traitement mécanique permettant une séparation des grains > 8mm

Un tri mécanique avec une granulométrie minimale de 8 mm permet de récupérer une fraction de granulats minéraux représentant 20 à 25 % de la quantité entrante traitée selon les hypothèses précitées.

Cette fraction pourra être valorisée comme granulats minéraux d'enrobés liés. Du point de vue de la pollution, les concentrations résiduelles en liant sont de l'ordre ou inférieures à 1.0% selon les analyses effectuées par BHZ, correspondant à des teneurs globales de HAP de l'ordre de 25-30 mg/kg. Les autres polluants ne présentent aucune concentration significative en lien avec les valeurs limites à considérer.

Du point de vue mécanique, les analyses faites selon les normes VSS relatives à la qualité des granulats confirment que les granulats récupérés répondent aux exigences fixées, sans altération significative liée à la sollicitation mécanique.

Avec un tri limité à un diamètre minimal de 8 mm, la fraction riche en bitume représenterait 75 à 80% du flux entrant. Cette fraction est actuellement valorisée comme agrégats recyclés dans la construction routière. La mise en décharge n'est pas envisageable en raison d'une teneur en matière organique de cette fraction supérieure à 5%.

Les possibilités de valorisation de cette fraction de granulométrie étendue **au-delà de l'horizon 2026** doivent encore être précisées. Dans la mesure où le potentiel de recyclage d'agrégats bitumineux est épuisé, il n'est pas acquis que cette fraction puisse être valorisée comme constituant de base ou substitut au liant dans des centrales de revêtement, selon les technologies actuelles et en développement.

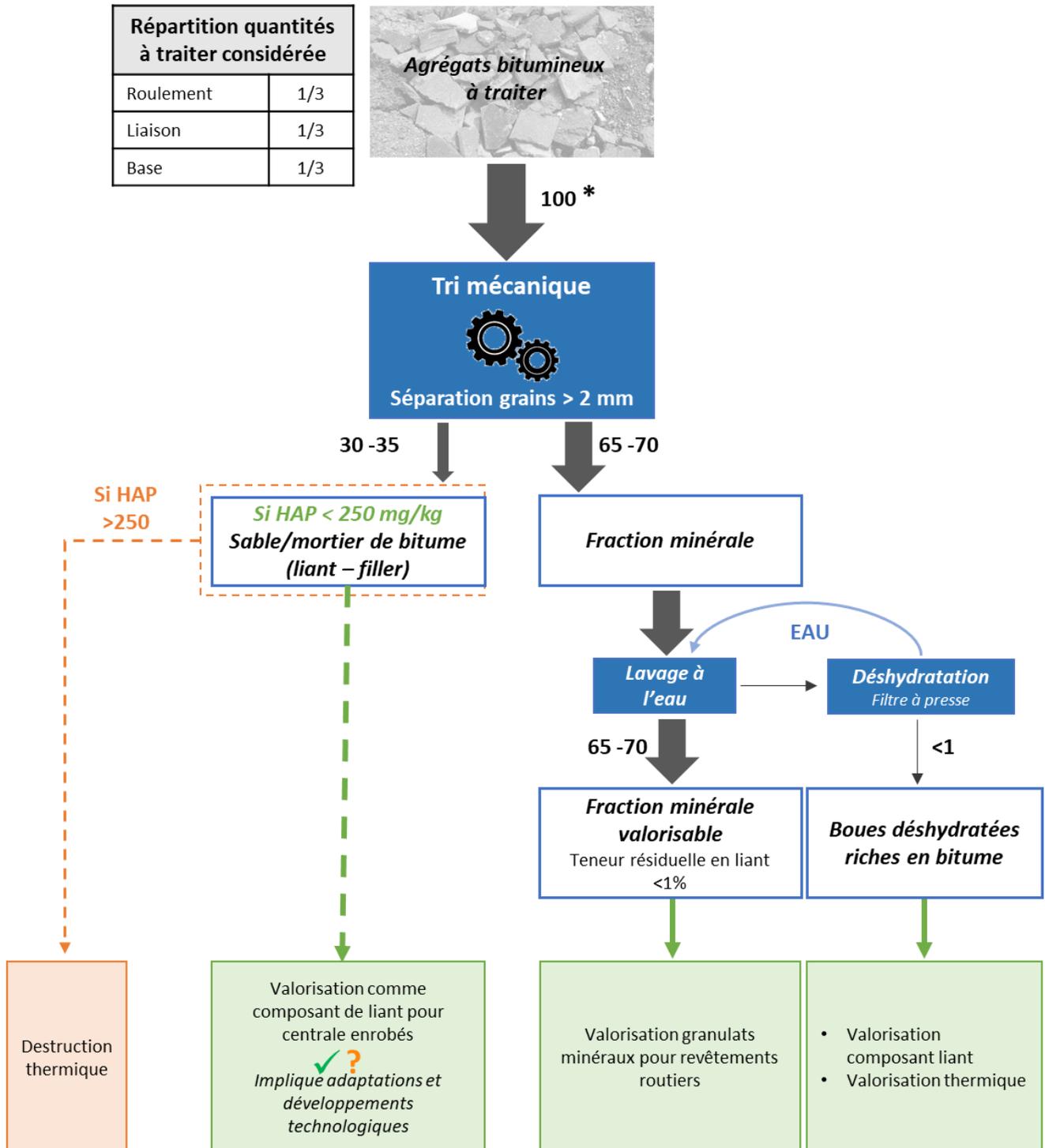
Dans le cas du traitement mécanique d'agrégats présentant une concentration en HAP supérieure à 250 mg/kg, le traitement thermique de cette fraction est à prévoir dans tous les cas.

Les boues générées par le lavage représentent moins de 1% de la masse entrante. Elles sont actuellement traitées thermiquement. En lien avec l'amélioration de leur siccité (déshydratation par filtre presse) une valorisation de cette fraction riche en bitume pourrait être envisagée.

L'amélioration du traitement mécanique en cours d'optimisation avec un **abaissement de la granulométrie minimale récupérée dans la fraction minérale jusqu'à 2 mm** permettrait d'augmenter de manière significative la fraction minérale qui représenterait alors entre 65 et 70 % de la quantité traitée entrante selon les hypothèses considérées et comme représenté à la Figure 28 ci-après.

La fraction riche en bitume représenterait alors entre 30 et 35% du flux entrant et se présenterait sous la forme d'un « mortier de bitume » constitué d'un mélange de bitume, de filler et de sable pouvant potentiellement être valorisé comme composant de base dans les centrales d'enrobés après mélange et homogénéisation.

Cette possibilité nécessite néanmoins des adaptations de la configuration des centrales (p.ex. augmentation du nombre de trémies et réservoirs d'alimentation distincts) et des recherches complémentaires en matière de composition spécifique du liant (mélange avec bitume primaire ; adjonction d'additifs ; technique de mousse de bitume ;...)



\* valeurs: % poids (estimation)

Figure 28 : Schéma de flux d'un traitement mécanique permettant une séparation des grains > 2mm

### 3.3.4 Aspects économiques

---

Les données de base relatives à l'évaluation économique du procédé de traitement mécanique peuvent être résumées comme suit :

#### Infrastructures et installations:

- Besoin d'une emprise relativement importante implantée en zone industrielle, pour les aires de traitement, de stockage des déchets à traiter et matériaux produits et pour les circulations. Pour une capacité indicative de 200'000 t/an une capacité de stockage tampon totale de 6-9 mois est à considérer afin de disposer d'une souplesse d'exploitation suffisante entre opportunités d'apports de granulats bitumineux à traiter d'une part, capacité de traitement et opportunités de valorisation d'autre part. Sur cette base, l'emprise nécessaire peut être grossièrement estimée à un ordre de grandeur de 2 à 3 hectares<sup>2</sup>.
- Couvert de stockage pour les différentes fractions produites par le traitement
- Raccordement au réseau d'alimentation en eau, et au réseau d'évacuation des eaux pluviales, dispositif de lavage, récupération des boues et déshydratation (filtres-presses)
- Raccordement au réseau électrique et tableau/réseau de distribution
- Pesage et locaux pour le personnel et atelier/maintenance
- Parc d'engins de la chaîne de traitement impliquant 4-5 installations de criblage/concassage/scalpage et 3-4 pelles /chargeuses fortement sollicités (durée d'amortissement de 8 ans).

L'implantation de l'installation de traitement en synergie avec une centrale de production d'enrobés permet de rationaliser l'emprise disponible (mutualisation des volumes de stockage ;..) et de faciliter la logistique en rationalisant les flux et limitant les distances de transport.

Avec la configuration susmentionnée, le montant des investissements peut grossièrement être estimé à 15 – 18 millions CHF, répartis comme suit :

- Engins et installations : 4,0 à 5,0 mio CHF
- Aménagements et infrastructures (dont 6'000 m<sup>2</sup> de couvert de stockage) : 5,0 à 7,0 mio CHF
- Terrain (3 ha à CHF 200/m<sup>2</sup>): 6,0 mio CHF

Ce coût estimatif préliminaire se réfère à une configuration d'installation telle qu'elle existe actuellement en Suisse avec une aptitude à séparer les granulats minéraux de diamètre supérieur à 8 mm. Des économies sont potentiellement envisageables dans le cas où cette activité de traitement est implantée sur le site d'une centrale d'enrobé et de valorisation d'agrégats bitumineux.

Ce type d'installation ne présente pas de capacité critique élevée, une exploitation économiquement rationnelle est envisageable dès une quantité minimale de l'ordre de 100'000 t/an,

Des valeurs précises pour des installations plus sophistiquées, telles qu'elles sont actuellement développées par la société BAM aux Pays-Bas ayant pour objectif d'étendre la granulométrie de la fraction minérale récupérée jusqu'à 2 mm ne sont pas disponibles.

L'atteinte de cet objectif implique la mise en œuvre d'installations plus sophistiquées actuellement en phase de développement et de tests qui devrait renchérir de manière significative le poste « Engins et installations » par rapport à l'estimation présentée ci-dessus

#### Coûts d'exploitation et coût de revient :

Outre l'amortissement des investissements estimés ci-dessus, le coût de revient implique des frais fixes (personnel ; entretien et réparations ; divers ; redevances ;..) et des frais variables essentiellement liés à la consommation énergétique.

---

<sup>2</sup> Estimation basée sur une densité apparente d'environ 1.7 t/m<sup>3</sup> et d'une hauteur moyenne de 4 à 6 m.

Sur cette base, le coût de revient du traitement selon la configuration actuelle en Suisse peut être estimé à un ordre de grandeur compris entre 15 et 20 CHF/t, desquels environ 30 à 40% est liée à la consommation énergétique.

Le coût de revient prévisionnel d'une installation de traitement mécanique plus sophistiquée, ayant pour objectif d'étendre la granulométrie de la fraction minérale récupérée jusqu'à 2 mm, ne peut être estimé de manière précise à ce stade.

En admettant un coût du poste « Engins et installations » majoré à respectivement 10 ou 20 mio CHF par rapport à l'estimation ci-dessus, le coût de revient estimé serait augmenté respectivement à un ordre de grandeur de 25-30 ou 40-50 CHF/t.

Le bilan économique global de cette filière de traitement est estimé globalement au chapitre 4.4. en intégrant les gains en matière de vente de la fraction minérale, les économies de substitution par rapport à un enrobé constitué de matériaux primaires et les coûts additionnels liés à la valorisation ou au traitement des différentes fractions.

### **3.3.5 Protection de l'environnement**

---

Le traitement mécanique est un procédé simple qui ne génère aucun effluent gazeux et qui ne nécessite pas de réactifs ou d'intrants problématiques du point de vue environnemental ou toxicologique.

Les enjeux se situent au niveau des émissions de polluants et de CO<sub>2</sub> liées à l'alimentation en énergie des installations et des émissions de poussières et de bruit liées à l'exploitation de l'installation.

Dans ce cadre, les recommandations suivantes peuvent être formulées afin d'assurer la conformité et optimiser le bilan environnemental de ce type d'installation :

- Favoriser l'alimentation énergétique des engins et installations depuis le réseau électrique (en privilégiant le recours à des sources d'électricité renouvelables) au détriment d'une alimentation par moteur diesel ou groupes électrogènes source d'émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants (particules fines ; oxydes d'azote ;...).
- Limitation à la source des émissions de poussières et de bruit au niveau de l'installation, à adapter en fonction de la sensibilité du site d'implantation
- Limitation et optimisation des distances de transport sur l'ensemble du cycle « génération des agrégats bitumineux => traitement => valorisation » en exploitant les synergies entre installations de traitement et centrales de production d'enrobés. Favoriser le transport ferroviaire pour l'acheminement des agrégats bitumineux à traiter, en particulier pour des transferts excédant le rayon local.

### 3.4 Traitement physico-chimique

La société HEMO Recycling SA a mis au point un procédé de traitement physico-chimique pour les agrégats et des fraisâts bitumineux, à partir d'une technologie appliquée depuis plus de 20 ans pour le traitement de pièces industrielles. Lors de ce processus de traitement comportant plusieurs étapes, un solvant à base d'hydrocarbures est injecté sous vide au-dessus de son point éclair dans un tambour pour être mélangé et brassé avec les agrégats bitumineux désagrégés. Selon le fournisseur, le processus de nettoyage à base de solvant permet de dissoudre rapidement le liant et de le séparer de la fraction minérale constituée de sable et gravier [26].

#### 3.4.1 Description générale du processus

Le processus peut être subdivisé en quatre étapes avec une prise en charge différenciée des agrégats bitumineux présentant une teneur en HAP respectivement inférieure ou supérieure à 250 mg/kg. :

- Désagrégation et tri granulométrique
- Lavage physico-chimique
- Distillation pour récupérer le solvant
- Valorisation / incinération des fractions géénrées par le traitement

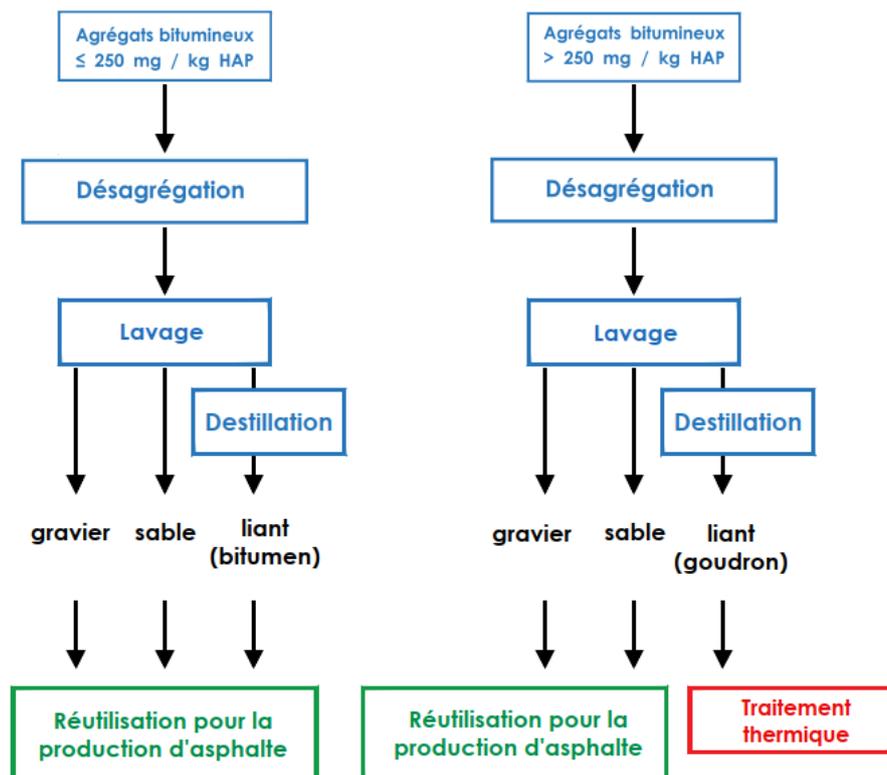


Figure 29: Aperçu du processus de traitement chimique de HEMO Recycling

- **Désagrégation et tri granulométrique**

Les agrégats bitumineux sont désagrégés puis classés en 2 fractions 0/16 et 16/70 mm et introduits de manière dosée dans le tambour de traitement. Les fraisâts de bitume sont directement introduits dans le tambour de traitement sans conditionnement préalable.

- **Lavage physico-chimique**

Au cours du processus de lavage, un solvant, désigné ARCA-solv, à base de différents alcanes (n-alcanes, iso-alcanes, alcanes cycliques dans la gamme C<sub>10</sub>-C<sub>14</sub>) est injecté dans le tambour de traitement, selon un principe en batch, à une température d'environ 90°C avec une pression de système de  $\leq 100$  mbar afin d'être mélangé et brassé avec les agrégats bitumineux pendant environ 60-70 minutes avec le granulats d'asphalte [27]. Outre le processus de dissolution chimique et les conditions de vide, le brassage mécanique favorise l'efficacité du lavage.

Le processus de lavage se déroule en trois étapes, au cours desquelles un solvant contaminé, puis un solvant moins contaminé et enfin une vapeur de solvant purifié sont utilisés pour dissoudre le liant et nettoyer le sable et le gravier. Les réservoirs d'alimentation et les évaporateurs ont un volume d'environ 2 x 3 m<sup>3</sup> et 2 x 0.7 m<sup>3</sup>, respectivement (conception de l'installation à deux lignes). Après le nettoyage chimique, le tambour est mis en dépression avec une pression de système  $\leq 10$  mbar, qui permet d'évaporer le solvant et de sécher la fraction minérale. Le tambour est ensuite ventilé et ouvert lorsque la pression ambiante est atteinte.

Le lavage permet de réduire la pollution résiduelle en HAP de la fraction minérale à une teneur de l'ordre de 20-30 mg/kg. En présence d'une teneur en sable élevée, une durée de traitement légèrement plus longue est à considérer pour atteindre ces résultats.

La mise sous vide du dispositif permet a priori de s'affranchir de l'exigence d'une certification ATEX (protection contre les explosions). ARCA-solv a un point éclair  $> 60^\circ\text{C}$  et est classé en classe de danger pour l'eau 1 (WGK1) selon la réglementation allemande (substances faiblement dangereuses pour les eaux). Il est utilisé au-dessus du point éclair afin d'atteindre la performance de lavage requise. ARCA-solv est produit par mélange de divers solvants chimiques disponibles dans le commerce.

- **Distillation en plusieurs étapes**

Le mélange liant/solvant est pompé à travers une installation multi-cyclones et traité par un processus de distillation à plusieurs étapes qui se déroule parallèlement au processus de lavage des agrégats bitumineux. Les deux cuves de distillation ont un volume d'environ 0.4 m<sup>3</sup> chacune. Pour le traitement d'un lot d'agrégats bitumineux ( $\approx 10$  t), l'utilisation de 3'000 litres de solvants est nécessaire, desquels 99.8 % sont récupérés après distillation. Selon HEMO Recycling SA, aucune altération du solvant n'est à considérer, notamment parce qu'un maximum de 5 litres de solvant est à ajouter pour chaque charge de traitement afin de compenser les pertes de 0.2% et maintenir l'efficacité du traitement.

- **Valorisation / Incinération des fractions issues du traitement**

Pour les agrégats bitumineux présentant une teneur en HAP  $\leq 250$  mg/kg, le liant est reconditionné afin d'être valorisé ; pour les agrégats bitumineux de teneur en HAP  $> 250$  mg/kg, le liant est éliminé par traitement thermique dans une installation existante.

L'ensemble du processus est présenté en détail dans la Figure 30 ci-après, la colonne de gauche se référant aux agrégats bitumineux de teneur en HAP  $\leq 250$  mg/kg et celle de droite de teneur en HAP  $> 250$  mg/kg.

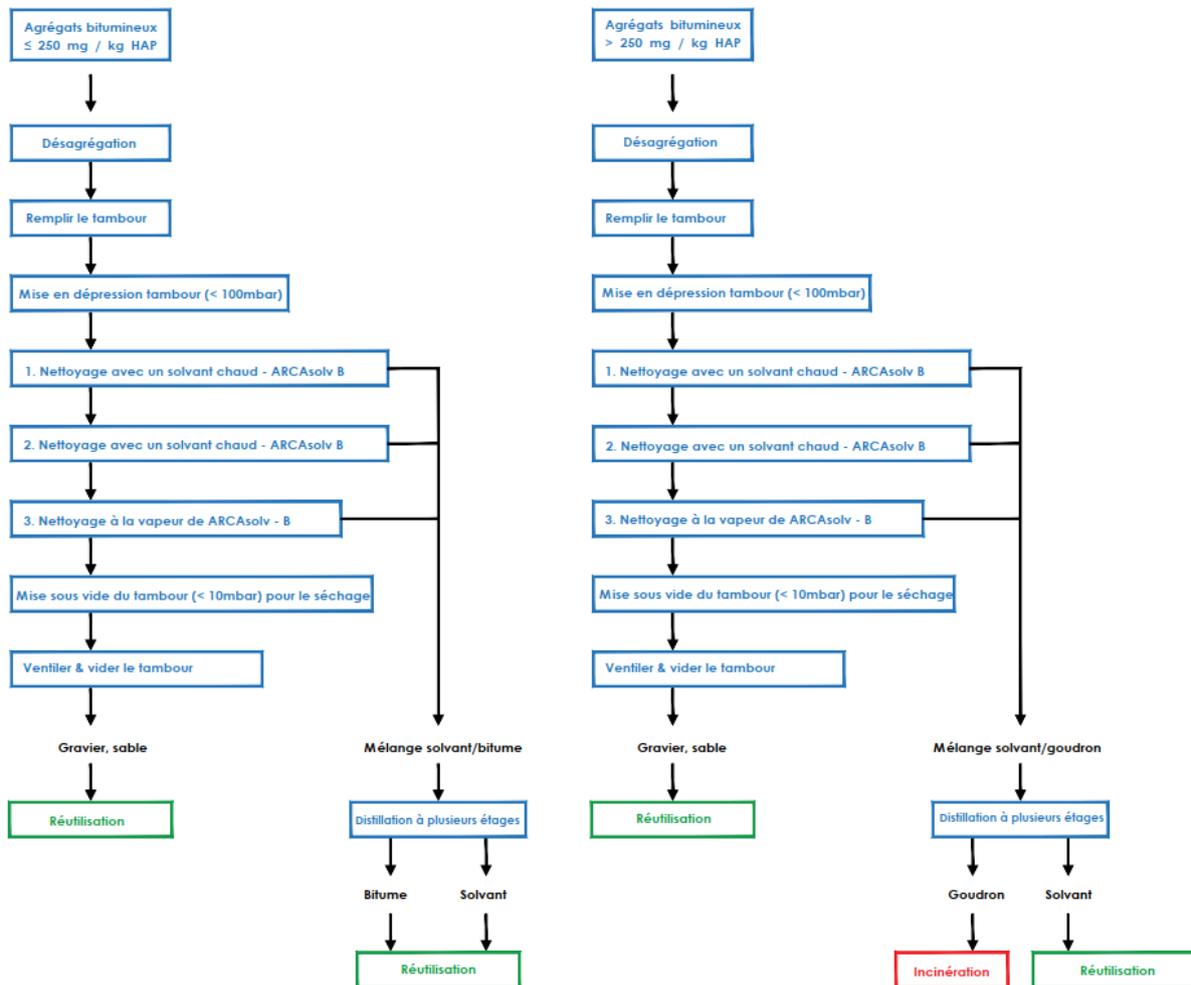


Figure 30: Processus de traitement physico-chimique des agrégats bitumineux et des matériaux broyés

### 3.4.2 Etat de la technique

Ce procédé est utilisé depuis plus de 20 ans pour le lavage de pièces industrielles. De nouvelles installations testent actuellement son application pour le traitement d'agrégats bitumineux et plus largement pour le traitement de déchets de construction minéraux. Selon HEMO Recycling SA, ce processus de traitement est facilement modulable, en effet les paramètres de fonctionnement peuvent être adaptés selon les caractéristiques et quantités du matériau à traiter. L'installation pilote actuelle, d'une capacité de 200-300 kg/h, comporte toutes les étapes du processus. La société HEMO Recycling SA développe actuellement un concept d'installation standard avec des exploitants et a préparé une offre pour une mise en œuvre à grande échelle en 2021 [28]. Il devrait alors être possible de traiter 10 à 20 t/h soit 50'000 tonnes de déchets par an.

Selon HEMO Recycling SA, trois clients suisses seraient déjà intéressés à mettre en œuvre une installation de traitement dédiée aux agrégats bitumineux sous le nom d'ARCAone. Un investisseur potentiel serait également présent en Allemagne, mais selon HEMO Recycling SA, le principal marché cible est la Suisse. En effet en Suisse les prix de vente des produits finaux, à savoir le sable, le gravier et le liant, permettent de rentabiliser un installation à partir d'une capacité de traitement d'environ 30'000 t/an.

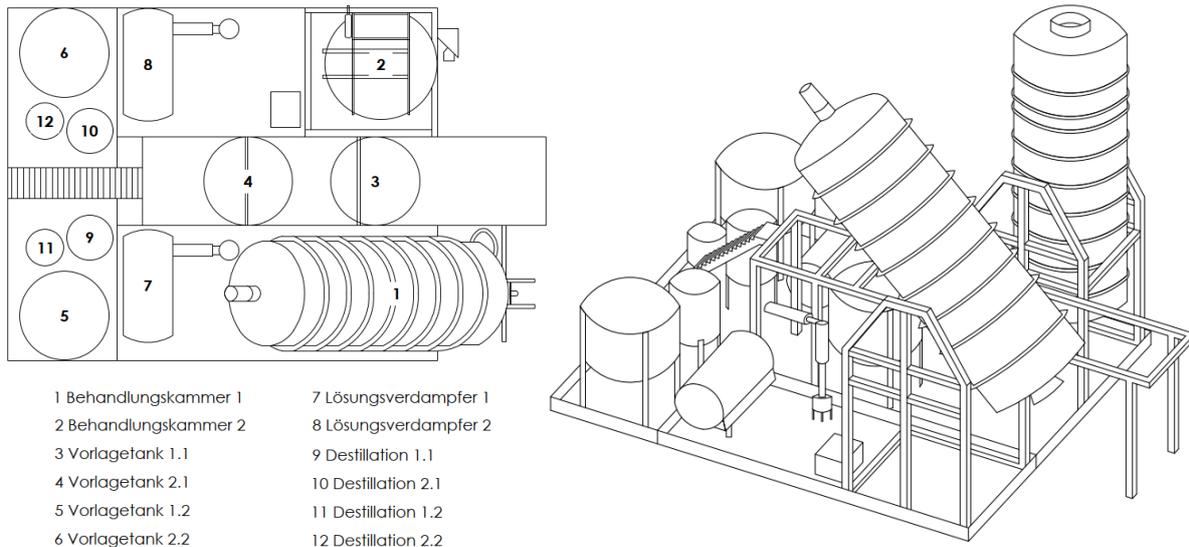


Figure 31: Vue d'ensemble de l'installation de nettoyage ARCA en 2D et 3D..

Selon HEMO Recycling SA, l'espace nécessaire pour une installation de nettoyage à grande échelle de 60 000 à 120 000 t/an devrait être de 20 x 30 mètres. [28]

### 3.4.3 Schémas de flux

Le diagramme de flux massique du procédé de recyclage chimico-physique de HEMO Recycling SA est représenté sur la Figure 32. La séparation du liant des granulats minéraux nécessite l'utilisation de 3'000 litres de solvant pour 20 tonnes d'agrégats bitumineux récupérés et broyés. Lors du processus de distillation, 2'995 litres de solvant peuvent être récupérés et réutilisés, les 5 litres restants sont absorbés dans le liant. Pour 20 tonnes d'agrégats bitumineux récupérés et broyés, ce processus produit environ 1'000 litres de liant, dont 5 litres de solvant, 18.8 tonnes de sable et de gravier de fraction 0/22 et, dans certains cas, des granulats de taille plus importante de d'une fraction 16/32. Selon HEMO Recycling SA, le processus nécessite, lors du chauffage de la chambre de traitement, l'extraction d'un maximum de 200 kg d'eau. Cette eau est extraite sous forme de vapeur, puis condensée pour être éliminée.

Le traitement de 20 tonnes d'agrégats bitumineux récupéré et broyé implique une consommation énergétique de 600 kWh, dont seulement 250 kWh sont issus de sources énergétiques externes au processus.

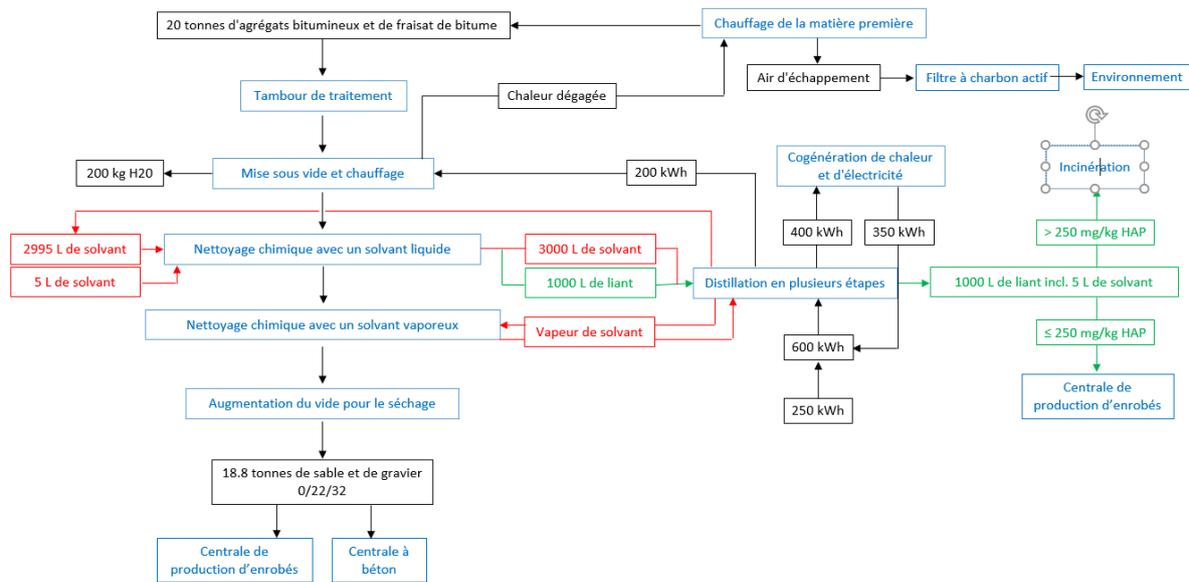


Figure 32 : Diagramme de flux massique du processus de nettoyage physico-chimique selon HEMO Recycling AG

### 3.4.4 Qualité des fractions issues du traitement

Les produits issus du traitement sont le sable, le gravier et le liant. Les granulats minéraux obtenus semblent visuellement propres et ne présentent aucun résidu de traitement (voir Figure 33). Selon HEMO Recycling SA, plusieurs analyses ont été effectuées par des laboratoires accrédités pour les matériaux de construction et ont mis en évidence que la qualité des granulats minéraux obtenus répond aux exigences qualitatives relatives à la production de revêtements routiers et de béton. Toutefois, les résultats de ces analyses n'ont pas été mis à disposition dans le cadre de la présente étude, car selon HEMO Recycling SA, il existe un accord de confidentialité entre les parties intéressées. Les produits finaux sont un mélange de granulats minéraux concassés et ronds, qui peuvent être utilisés dans la couche de base du revêtement et les couches de fondation de la construction routière ainsi que pour la production de béton. Pendant le processus de nettoyage, les agrégats bitumineux doivent être traités de manière à ce qu'il n'y ait pas de réduction de la granulométrie par rapport à la courbe des granulats entrants.

Selon HEMO Recycling SA, les exigences en matière de pollution résiduelle aux HAP peuvent être respectées sans problème. Des analyses ont déjà été effectuées avec des matériaux fortement contaminés (50'000-100'000 mg/kg de HAP dans le liant) et la quantité résiduelle moyenne d'HAP était inférieure à 30 mg/kg (0.03 – 0.06% du matériau entrant).

Après le traitement, le solvant est séparé du liant par un processus de distillation en plusieurs étapes. Le liant obtenu présente une teneur résiduelle en solvant inférieure à 0.5 % et des teneurs en filler minéral dans des proportions non précisées. Ces éléments ont une légère influence sur la consistance et la résistance du liant. Les valeurs du point de ramollissement, déterminé selon la méthode d'essai de l'anneau et de la bille, présentant aussi de légères variations entre 39 et 55°C, avec une valeur moyenne de 46.8°C selon les indications fournies par HEMO Recycling SA, Les résultats détaillés n'ont pas été mis à disposition pour la présente étude.

Selon HEMO Recycling SA, pour la catégorie d'agrégats bitumineux présentant une teneur en HAP inférieure à 250 mg/kg, le liant récupéré est apte à être valorisé en centrale d'enrobés en mélange avec d'autres types de liants bitumineux.

Pour la catégorie d'agrégats bitumineux présentant une teneur en HAP supérieure à 250mg/kg, le liant obtenu en fin de traitement chimique doit être soumis à un traitement thermique.



Figure 33 : Agrégats bitumineux 16/70 avant (à gauche) et après (à droite) le traitement chimique

### 3.4.5 Aspects économiques

Les différents coûts et éléments d'évaluation économique présentés ci-après sont basés sur des informations transmises par HEMO Recycling SA.

- Capacité critique

Une capacité de traitement minimale de 30'000 t/an est nécessaire pour assurer la rentabilité de l'installation. La capacité traitement optimale d'un point de vue économique s'élève à 80'000-100'000 t/an.

- Coûts d'investissement

Les investissements pour la mise en œuvre d'une installation de traitement de type ARCAcore avec la variante d'alimentation minimale est estimé à environ 9 millions de francs suisses. L'installation complète de traitement ARCAone (y compris le stockage intermédiaire, les silos de stockage des produits sortants, le système de traitement de l'air, l'enceinte, etc.) nécessitent un investissement estimé à environ 16 millions CHF. La durée d'amortissement pour une mise en œuvre de ce système à grande échelle en Suisse serait inférieur à 5 ans.

- Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation du processus proprement dit sont estimés à un maximum de 10 CHF/t, selon les indications transmises par HEMO Recycling AG présentées dans le Tableau 23. Il convient toutefois de noter que la taxe d'incitation pour les composés organiques volatils (COV) et les frais d'élimination de la fraction fine contaminée par les HAP n'ont pas été considérés dans cette évaluation.

La consommation énergétique liée au processus de distillation et à l'entretien de l'installation constitue une part importante des coûts d'exploitation. Un fonctionnement de la centrale en continu, permettrait de réduire les coûts. En effet, la mise en marche et l'arrêt de la centrale consomment beaucoup d'énergie en relation avec les importants changements de température nécessaires à l'exploitation en batch. La centrale est monitorée par plusieurs capteurs qui lui permettent de fonctionner de manière autonome

et sans personnel présent en permanence. Les coûts liés à la consommation de solvants sont relativement faibles, et sont estimés à 0.20-0.30 CHF/t, en considérant que 99.8 % du solvant peut être récupéré et réutilisé.

Coûts	Coûts d'exploitation
<b>Energie</b>	3.50 – 4.60 CHF/t
<b>Solvant*</b>	0.20 – 0.30 CHF/t *
<b>Entretien/Service</b>	3.50 – 5.00 CHF/t
<b>Total par tonne (≤ 250mg HAP/kg)</b>	<b>7.20 – 9.90 CHF/t</b> (pas de coût d'élimination pour le liant)
<b>Taxe d'incitation sur les COV</b>	3 CHF par kg COV (proportion de COV dans le solvant non connue et incluse)
<b>Coûts d'élimination de la fraction fine contaminée par les HAP</b> <b>(coûts d'élimination estimés à 100 CHF/t de matériaux fins contaminés)</b>	env. 5.00 CHF/t ** **selon l'hypothèse d'une teneur en liant de 5% (Figure 32)
<b>Total par tonne (&gt; 250mg HAP/kg)</b>	<b>12.20 – 14.90 CHF/t</b>

Tableau 23 : Composition des frais d'exploitation pour l'installation de traitement de HEMO Recycling SA

Pour une analyse des coûts totaux, les frais de personnel pour le contrôle de l'exploitation ainsi que l'amortissement des investissements doivent être pris en compte en plus des frais d'exploitation indiqués par HEMO Recycling SA.

Le coût de revient total peut être estimé à environ 50 à 70 CHF/t.

### 3.4.6 Protection de l'environnement

Un bilan de CO<sub>2</sub> a été établi pour le processus à l'attention des autorités environnementales allemandes et autrichiennes ; les résultats de ce bilan n'ont pas été mis à disposition dans le cadre de la présente étude. Selon HEMO Recycling SA, un point d'attention est constitué par la valorisation des rejets de chaleur générés par le processus. Les émissions sonores répondent aux exigences du niveau de sensibilité I, selon la réglementation allemande, du fait de l'isolation de l'enveloppe prévue. L'air évacué des réservoirs du liant récupéré et de l'aspiration du tambour de traitement sera intégralement traité par des filtres à charbon actif.

Les éventuelles émissions nocives pour l'environnement et la santé dues à l'utilisation du solvant à base d'hydrocarbures ARCA-solv doivent encore être étudiées en détail. Selon la définition de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les hydrocarbures constituent la majorité des COV, qui sont potentiellement nuisibles à l'environnement et à la santé, et qui font l'objet en Suisse de la taxe incitative selon l'OCOV. [27] [29].

Ces éléments devront au plus tard être précisés et confirmés dans le cadre de la procédure d'autorisation d'exploiter qui sera soumise à l'étude d'impact sur l'environnement selon l'OEIE, afin de vérifier le respect des prescriptions de l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPAir).

### 3.4.7 Risques

---

Le procédé de traitement chimique n'est pas encore disponible à grande échelle. Selon HEMO Recycling SA, la capacité de l'installation est facilement modulable, mais une mise en œuvre à grande échelle est susceptible d'entraîner certains risques.

Le processus nécessite l'utilisation de produits chimiques, comme des hydrocarbures, qui peuvent avoir un impact sur l'environnement et les personnes en lien notamment avec la manipulation de COV.

Les informations relatives aux coûts d'exploitation sont sujettes à des incertitudes et sont basées uniquement sur les données fournies par HEMO Recycling SA. Ces coûts de fonctionnement n'ont pas encore été confirmés à grande échelle. En particulier, les coûts de maintenance doivent encore être confirmés pour une mise en œuvre à grande échelle.

En outre, le processus physico-chimique est une technologie complexe qui doit être transférée du traitement de pièces industrielles à l'industrie du recyclage des déchets minéraux, où dominant des processus autrement plus robustes. La compatibilité doit encore être confirmée à grande échelle sur le plan opérationnel.

### 3.4.8 Synthèse

---

Le procédé de traitement chimique est utilisé depuis plus de 20 ans pour le traitement des pièces industrielles et représente une solution potentiellement intéressante pour le traitement d'agrégats bitumineux. Si les coûts d'exploitation à grande échelle sont effectivement aussi bas que ceux indiqués par HEMO Recycling SA, le procédé devrait être intéressant à la fois pour la catégorie d'agrégats bitumineux contaminés aux HAP (> 250 mg/kg) et pour les quantités excédentaires de la catégorie avec des teneurs en HAP inférieures à 250 mg/kg non directement valorisées dans la construction routière, car il permet une bonne séparation du liant et des granulats minéraux, quelle que soit leur teneur en HAP.

En outre, les résultats complets des essais relatifs à la qualité des granulats minéraux doivent être publiés. Visuellement, les matériaux semblent non altérés et très propres. Selon les concepteurs, les teneurs résiduelles en HAP présentes après traitement chimique s'élèvent en moyenne à moins de 30 mg/kg. Selon HEMO Recycling SA, la conformité des granulats minéraux issus du traitement a déjà été analysée et respecte les exigences requises pour la production d'enrobés bitumineux. Des essais complémentaires restent cependant à effectuer (p.ex. densité apparente ; absorption d'eau ; pourcentage de grains concassés ; test de Los Angeles ; résistance au polissage, résistance statique ; minéralogie ; pétrographie ; ...).

Des informations importantes sur l'impact environnemental du processus doivent également encore être précisées. Lors de la visite de l'installation pilote, de faibles émissions d'odeurs ont été détectées, a priori causées par des COV. Ces émissions résiduelles devront être mesurées qualitativement et quantitativement afin de pouvoir confirmer leur conformité à la réglementation en vigueur et l'absence d'impact ou de risques pour l'environnement et la santé humaine.

Avec des capacités comprises entre 50'000 et 100'000 t/an, la demande en Suisse serait couverte par environ 5 à 10 installations de nettoyage physico-chimique de ce type, selon les scénarios du Chapitre 2.6.2. En conséquence, ce processus se prêterait à une solution régionale, qui éviterait également la nécessité de longues distances de transport.

## 3.5 Traitements combinés

---

### 3.5.1 Description générale du processus

---

Les recherches effectuées ont permis de mettre en évidence un autre procédé de traitement des déchets bitumineux (HAP > 250mg/kg et HAP < 250mg/kg) en cours de développement en Suisse romande. Il s'agit d'un procédé basé sur l'utilisation d'un biosolvant non toxique et non dangereux pour l'environnement. Le concept envisagé intègre également une unité de pyrolyse destinée à traiter thermiquement la fraction fine riche en liant issue du processus. Les détails techniques de ce procédé sont de nature confidentielle.

Le procédé comprend une désagrégation mécanique des agrégats bitumineux puis l'utilisation d'un biosolvant. Cette mise en contact vise à dissoudre l'asphalte contenu dans les agrégats permettant ainsi de le séparer des matériaux minéraux par un mécanisme basé sur les propriétés polaires de la liqueur et des HAP, sans modifications chimiques. Afin d'améliorer l'efficacité du procédé, le mélange peut être légèrement chauffé.

Ce procédé vise à obtenir une fraction minérale propre et une liqueur chargée de résidus de bitume dissous qui est ensuite distillée afin de séparer les résidus de bitume solubilisés de la dite liqueur. Une fois régénérée, cette dernière peut alors être réutilisée dans le cadre du processus de traitement, et le bitume récupéré pour une valorisation future.

Ce concept a fait l'objet d'installations pilotes et de brevets. La mise en œuvre prochaine d'une installation pilote de capacité opérationnellement est envisagée par les développeurs de ce concept.

### 3.5.2 État de la technique

---

Ce procédé n'a été développé à ce jour uniquement au stade de l'essai pilote avec des résultats qui sont de nature confidentielle.

La faisabilité opérationnelle à l'échelle d'une installation pilote s'approchant d'une capacité d'exploitation doit encore être confirmée.

## 4 Scénarios futurs de gestion et de traitement des déchets bitumineux en Suisse

### 4.1 Vue d'ensemble quantités concernées et possibilités par catégories

Afin de définir les différents scénarios de gestion et de traitement des déchets bitumineux produits en Suisse au-delà de l'horizon 2026 à partir des différentes filières de traitement potentiellement envisageables décrites au chapitre 3, il est utile de rappeler les estimations des quantités totales de déchets à traiter entre les horizons 2026 et 2035 et leur répartition entre les deux catégories de teneur en HAP inférieure et supérieure à 250 mg/kg (cf. Figure 34).

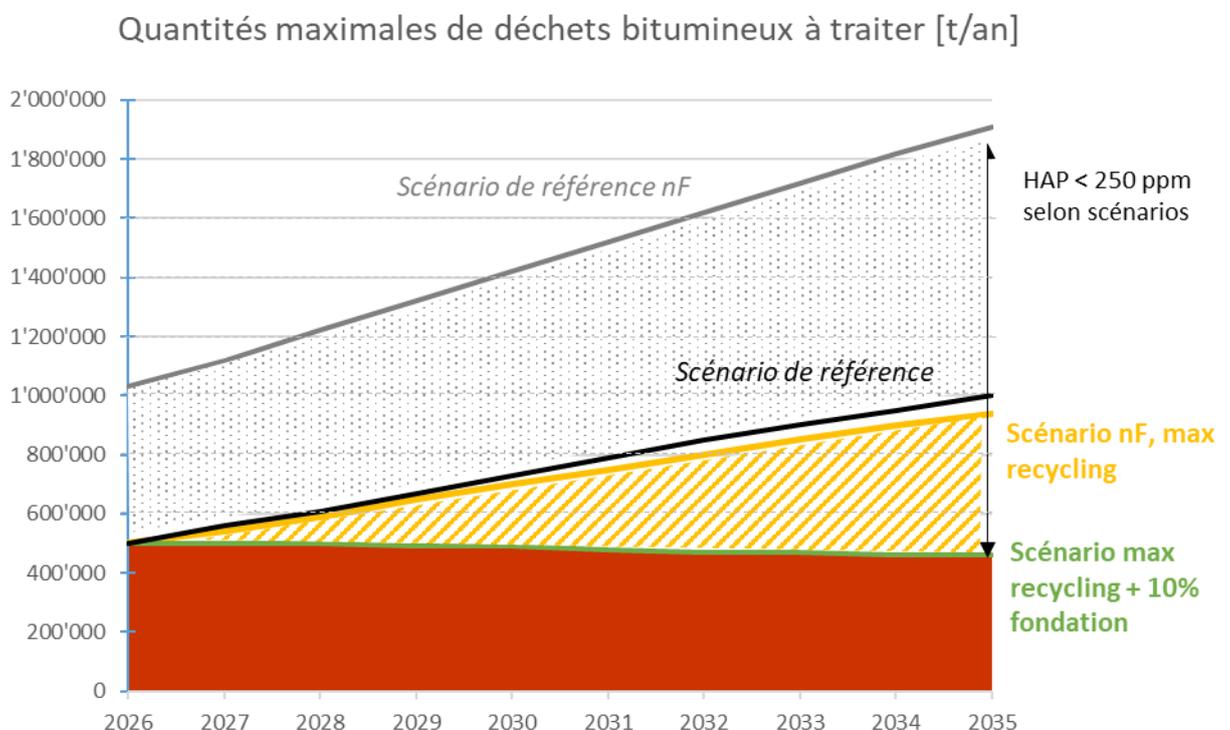


Figure 34 : Rappel des quantités maximales de déchets bitumineux à traiter selon les scénarios

L'élaboration des scénarios doit donc distinguer :

- **La catégorie de déchets bitumineux contaminés avec des teneurs en HAP > 250 mg/kg :**  
Quantité stable d'environ 500'000 tonnes/an en 2026 et qui diminue faiblement à 460'000 t/an à l'horizon 2035. Ce gisement constitue la quantité incompressible devant être soumise à un traitement thermique. Ce traitement peut être réalisé soit directement, soit après un prétraitement permettant de réduire la quantité à traiter, pour autant que celui-ci soit conforme d'un point de vue environnemental et intéressant économiquement.
- **La catégorie de déchets bitumineux présentant des teneurs en HAP < 250 mg/kg :**  
Gisement pouvant être valorisé comme agrégats recyclés et dont la quantité varie fortement entre les différents scénarios. Dans le cadre du scénario de recyclage maximal sans utilisation

dans les fondations « nF, max recycling » la quantité d'excédent à traiter en 2026 est nulle, elle s'élève à environ 200'000 t/an en 2030 et à environ 500'000 t/an à l'horizon 2035. Cette quantité d'excédent pourrait être maintenue à zéro jusqu'en 2035 en valorisant 10% dans les fondations sous forme liée. Pour le scénario de référence, qui conserve le taux de recyclage actuel, (sans utilisation dans les fondations) les quantités non valorisées restantes seraient d'environ 500'000 t/an en 2026 et 1'000'000 en 2035.

Par ailleurs, la concrétisation des différents scénarios devra intégrer les incertitudes liées aux éléments suivants :

- Données relatives à la répartition entre les 2 catégories de teneurs en HAP (< et > 250 mg/kg). En effet, actuellement il est probable qu'une partie des déchets avec des teneurs indéterminées ou mélangées soit intégrée à la catégorie la plus fortement contaminée, ce qui aurait pour conséquence une surestimation du gisement de déchets HAP > 250 mg/kg. Cependant, la traçabilité de ce type de déchets devrait s'améliorer dans le futur. Ces fractions devront faire l'objet d'un tri plus conséquent dès l'horizon 2026 en lien avec les dispositions plus contraignantes de l'OLED et des surcoûts plus importants qui s'appliqueront à la catégorie de teneurs en HAP > 250.
- Données relatives à la granulométrie des granulats minéraux présents dans les déchets bitumineux. En effet, ce paramètre influence les flux et potentiels de valorisation, notamment pour tous les traitements ou prétraitements autres que thermiques.

## 4.2 Déchets bitumineux contaminés HAP > 250 mg/kg

**Les déchets bitumineux contaminés aux HAP à plus de 250 mg/kg représentent environ 500'000 t/an.** Ils doivent obligatoirement faire l'objet d'un traitement thermique. Cependant les quantités à traiter pourraient être réduites par la mise en œuvre d'un prétraitement ( traitement mécanique, mixte ou chimique). Ces possibilités de traitement préalable sont décrites dans le paragraphe 4.2.5 ci-après.

Les quatre filières de traitement thermique suivantes peuvent potentiellement être envisagées, soit pour l'agrégat bitumineux global ou la fraction riche en liant issue d'un prétraitement :

- Traitement dans une installation thermique dédiée à l'étranger (Pays-Bas)
- Traitement dans une ou plusieurs nouvelles installations de traitement thermiques dédiées en Suisse
- Traitement en cimenterie en Suisse
- Traitement dans une ou plusieurs installations de pyrolyse à créer en Suisse

Les possibilités concrètes de mettre en œuvre ces filières, selon l'état de la technique et en tenant compte des risques, limites et autres éventuels points à éclaircir sont résumées ci-après selon les éléments développés au chapitre 3.2.

### 4.2.1 Traitement dans une installation thermique dédiée à l'étranger (Pays Bas)

Les Pays-Bas disposent actuellement de quatre installations de traitement thermique dédiées aux déchets bitumineux ou autres matériaux minéraux de composition analogue, d'une capacité actuelle de 4 millions de tonnes par an, dont les trois-quarts sont mis à contribution pour traiter des déchets provenant de l'étranger.

La pérennité globale à long terme de cette activité avec une prépondérance de déchets traités provenant de l'étranger semble a priori établie du fait des conditions cadre spécifiques aux Pays-Bas (nécessité d'importer des granulats minéraux de l'étranger du fait de la quasi absence de gisements naturels de sable et gravier ; écosystème industriel spécifique de la région de Rotterdam qui permet une valorisation optimale de l'énergie et des autres sous-produits tels que le gypse (lié au processus d'épuration des

gaz d'échappement utilisant de la chaux mis en œuvre dans l'installation REKO) ; prix de transport fluvial attractif en lien avec les trajets de retour d'acheminement de marchandises).

Le coût de traitement (yc transport par bateau) depuis Bâle actuel s'élève à environ 70 à 80 CHF / tonne et peut atteindre environ 120 CHF / tonne depuis d'autres lieux de Suisse éloigné du Rhin.

Néanmoins, une dépendance vis-à-vis d'installations situées à l'étranger exploitées par des entreprises privées s'accompagne toujours d'un certain nombre de risques potentiels.

Dans ce cas, les risques financiers peuvent être considérés comme limités, ils se situent néanmoins au niveau des fluctuations du prix de traitement fixé selon la loi de l'offre et de la demande. Par ailleurs, les risques institutionnels sont également limités mais ne peuvent être exclus, p.ex. sous la forme d'une décision de l'Union Européenne demandant de réserver l'accès à cette filière pour ces états membres en cas de capacité de traitement limitée.

Les risques liés au transports sur le Rhin sont également limités (les transporteurs d'asphalte ont également pu opérer pendant les étés secs, mais avec des taux de fret plus bas et donc des coûts de transport plus élevés) avec une problématique liée aux bases eaux qui ne devrait pas évoluer négativement d'ici à 2085 malgré les changements climatiques attendus.

Sur cette base, le traitement des déchets bitumineux présentant une concentration en HAP supérieure à 250 mg/kg en installation de traitement dédiée aux Pays-Bas est une filière à maintenir dans la palette des filières potentielles pour la période future 2026 – 2035 considérée. Afin de limiter les risques de dépendance, il est néanmoins souhaitable d'une part de développer en parallèle des filières spécifiques pour ce type de déchets en Suisse, et d'autre part de préciser dans quelles mesures la sécurité contractuelle et institutionnelle pourrait être améliorée le cas échéant (contrats à long terme avec entreprises concernées, ...).

#### **4.2.2 Traitement dans une ou plusieurs nouvelles installations thermiques dédiées en Suisse**

L'opportunité et la faisabilité de réalisation d'une ou de plusieurs installations de traitement thermique dédiées aux agrégats bitumineux a été abordée au chapitre 3.2.1.7. qui a mis en évidence les contraintes et obstacles suivants relatifs à la concrétisation de cette option :

- Elle ne pourrait être potentiellement envisagée moyennant la mise en œuvre d'une installation d'une capacité annuelle de 500'000 à 1'000'000 t/an, qui correspond à la capacité critique minimale permettant d'envisager une exploitation rationnelle d'une telle installation ; ce qui équivaut à la mise en œuvre d'une seule installation sur le territoire national ;
- Elle se heurte au potentiel limité de valorisation des granulats minéraux générés, dont les propriétés sont altérées par le traitement thermique à haute température et qui ne répondent pas aux exigences spécifiques fixées pour les revêtements bitumineux et dont la valorisation ne peut être envisagée que pour des utilisations moins spécifiques avec un prix de vente nettement plus faible ;
- Elle implique la mise à disposition d'une parcelle de grande superficie implantée en zone industrielle, bénéficiant d'une localisation centrale à l'échelle de la Suisse et raccordée au rail, avec un concept de transport combiné route-rail à mettre en œuvre à l'échelle nationale. Le site doit également être implanté dans un secteur caractérisé par une forte demande en chaleur, constante tout au long de l'année, afin de permettre la valorisation optimale de l'énergie thermique produite
- Elle implique des investissements très importants, s'élevant à un minimum estimé à CHF 100 millions, pour une capacité de traitement de 500'000 t/an, associés à des risques importants - l'apport des déchets n'étant pas assuré par un mécanisme de zone d'apport et de longues durées d'amortissement.
- Le coût de traitement peut être estimé à un minimum de CHF 130 CHF, et ce pour autant que des conditions de valorisation de la chaleur générée aussi favorables qu'aux Pays-Bas puissent être mise en œuvre, soit un prix significativement supérieur aux filières de traitement actuelles et futur en développement.

Sur cette base, la réalisation d'une installation de traitement thermique dédiée aux agrégats bitumineux en Suisse ne constitue pas une option à envisager concrètement.

#### 4.2.3 Traitement en cimenterie en Suisse

---

Le traitement thermique des agrégats bitumineux (en particulier des fractions fines riches en liant) dans les cimenteries suisses est une alternative intéressante au recyclage thermique à l'étranger. L'industrie suisse du ciment n'utilise pas encore d'agrégats bitumineux, mais elle étudie des solutions techniques à cet effet.

Le traitement thermique dans le four à ciment lui-même est limité par les exigences de qualité du ciment. Le potentiel total théorique de toutes les usines suisses n'est que d'environ 60 000 t/a. Des coûts d'élimination de l'ordre de 100 CHF/t sont à considérer en première approximation.

La prise en charge de plus grandes quantités d'agrégats bitumineux par les cimenteries en grandes quantités, ne peut uniquement être envisagée dans le cas où les agrégats broyés ne sont pas mélangés au clinker de ciment. Certaines cimenteries étrangères disposent déjà d'un réacteur thermique implanté en parallèle du four à ciment destiné au traitement thermique de déchets minéraux contaminés par des polluants organiques. Les flux gazeux produits par ce réacteur spécifique sont traités par l'installation de traitement des fumées de la cimenterie.

Les capacités possibles de tels réacteurs spécifiques dépendent fortement des caractéristiques du four à ciment en parallèle duquel il sera implanté. D'un point de vue économique, il s'agit de privilégier une capacité de réacteur qui n'engendre pas d'adaptations importantes du système du four à ciment. Afin de traiter la quantité totale d'agrégats bitumineux contaminés, ou même uniquement la fraction fine de ces derniers, plusieurs cimenteries devraient probablement être équipées de tels réacteurs. L'intérêt économique de cette solution dépend fortement de l'évolution des prix de l'élimination à l'étranger ainsi que des prix relatifs au traitement d'autres déchets qui pourraient également être pris en charge par les cimenteries. Les coûts d'élimination de ce processus devraient également être d'un ordre de grandeur de 100 CHF par tonne en première approximation.

Afin d'examiner ces options et d'autres options possibles pour le traitement des agrégats bitumineux dans l'industrie du ciment, il conviendrait de définir les futures conditions-cadres, notamment pour la sécurité de planification de ces investissements à hauteur de dizaines de millions. Toutefois, l'industrie du ciment confirme qu'il est a priori possible en principe de mettre en œuvre des solutions techniques à grande échelle d'ici 2026.

#### 4.2.4 Pyrolyse en Suisse

---

La pyrolyse est un processus thermo-chimique souvent considéré comme une alternative à l'incinération pour le traitement des déchets, elle ne s'est toutefois jamais pleinement imposée en tant que technique éprouvée à large échelle, quel que soit le déchet considéré. Contrairement à l'incinération, la pyrolyse produit un gaz combustible qui peut être utilisé dans un processus en aval. En outre, la matière première n'est pas incinérée. Il en résulte une matière résiduelle qui peut être régénérée à d'autres fins. Un exemple est la pyrolyse du bois en charbon de bois.

La technologie de la pyrolyse est bien développée. Le procédé a été testé pour le traitement des agrégats bitumineux par un constructeur renommé d'installations de traitement thermiques spéciales. Il a été constaté que la fraction minérale obtenue n'était pas suffisamment purifiée du liant et des hydrocarbures qu'il contient. Les développements ultérieurs ont ensuite été interrompus. Une entreprise en Italie qui avait développé ce procédé au stade de l'essai pilote n'existe plus aujourd'hui. Il n'existe donc aucune expérience d'application à l'échelle opérationnelle de ce processus au traitement des agrégats bitumineux.

Au cas où la faisabilité de la pyrolyse pour le traitement des agrégats bitumineux dans leur totalité, ou la fraction fine riche en liant de ces derniers devait être confirmée, des installations avec une large

gamme de capacités pourrait être envisagées. Les coûts d'investissement et d'exploitation seraient probablement plus élevés que pour une installation d'incinération de même capacité, car la technologie de la pyrolyse est plus complexe. Une estimation des coûts étayée n'est pas possible actuellement en raison de l'absence de solutions technologiques éprouvées à l'échelle opérationnelle.

En ce qui concerne les aspects environnementaux et techniques, le gaz de pyrolyse revêt une importance primordiale. La gestion sûre et respectueuse de l'environnement du gaz de pyrolyse inflammable doit être maîtrisée de manière adéquate afin de garantir la sécurité de l'installation.

#### **4.2.5 Traitements préalables envisageables afin de séparer les granulats minéraux**

---

Les prétraitements envisageables afin de séparer préalablement les granulats minéraux en vue de soumettre au traitement thermique uniquement le liant ou une fraction fine riche en bitume sont les traitements chimique, mixtes et mécanique, décrits au chapitre 3.

Dans le cas d'un **prétraitement mécanique**, la part granulats récupérée et donc de la fraction restante à traiter thermiquement dépend du grain minimal pouvant être séparé. Avec un prétraitement permettant d'extraire les granulats minéraux de diamètre supérieur à 2 mm (encore en développement), le flux à traiter thermiquement serait réduit de 65 à 70% selon les hypothèses de répartition granulométrique décrites au chapitre 3.3 et ramené ainsi à une quantité estimée entre 150 et 175'000 t/an.

Dans le cas où seuls les granulats de diamètre supérieur à 8 mm pourraient être extraits (performance atteinte par les installations existantes, la réduction du flux serait limitée à 25%, ramenant la quantité à traiter thermiquement à environ 350'000 à 380'000 t/an.

Dans le cas du traitement chimique par solvant, les granulats pourront être quasiment intégralement séparés du liant, ce qui permet de réduire d'un facteur 15 à 20 la quantité à soumettre à un traitement thermique qui serait ainsi réduite entre 25 et 35'000 t/an.

Le traitement mixte avec lavage préalable au biosolvant devrait permettre de réduire à un maximum de 15 à 25% (dépend de la quantité de filler mélangée au liant) la proportion à soumettre au traitement thermique.

### 4.3 Déchets bitumineux potentiellement valorisable HAP < 250 mg/kg

**Pour cette catégorie de déchets bitumineux, la priorité est de favoriser au maximum la valorisation en tant que granulats recyclés** avec l'objectif de tendre vers un recyclage intégral de cette fraction. En effet, la valorisation matière est à privilégier selon la LPE et l'OLED et présente par ailleurs une évaluation économique favorable.

Dans cette optique, le scénario « max recycling, nF » qui ne présente aucun excédent en 2026 et une quantité d'environ 200'000 t/an en 2030 et 500'000 t/an en 2035 constitue un objectif réaliste à atteindre. Comme mis en évidence au chapitre 2.6 une légère augmentation des taux de recyclage dans les trois couches de revêtement ou une valorisation sous forme liée dans les fondations selon le scénario « max recycling + 10% fondation » permettrait d'atteindre un recyclage intégral de cette fraction.

Dans un deuxième temps et en parallèle de ces considérations, les trois filières de traitement développées dans le chapitre 3 hormis le traitement thermique pourraient être envisagées selon les modalités décrites ci-après. Ces trois techniques sont à des stades de maturité différents mais impliquent toutes soit des développements soit des optimisations.

#### Traitement mécanique

Le traitement mécanique actuel permet de récupérer les granulats minéraux supérieurs à 8 mm, soit environ 25% de la quantité totale à traiter selon les hypothèses de répartition granulométrique des différentes couches de revêtement à traiter. Avec cette configuration, le traitement mécanique constitue un complément intéressant à la valorisation des agrégats dans la circulation routière, mais ne permet pas d'assurer un débouché à la fraction fine (< 8mm) riche en liant, représentant 75% du flux à traiter, au cas où les possibilités de valorisation en centrale comme agrégats bitumineux seraient déjà épuisées.

Le traitement mécanique optimisé, selon une technique actuellement en développement par la société BAM aux Pays-Bas, permettrait de récupérer les granulats minéraux jusqu'à une granulométrie de 2 mm, cette fraction représentant alors entre 65 à 70% du flux entrant traité. Le solde est destiné à être valorisé sous la forme d'un mortier riche en bitume (>2mm) en tant que constituant d'un liant recomposé en centrale d'enrobés. Cependant, la mise au point de cette technique implique des développements complémentaires au niveau de la technologie de tri d'une part et d'autre part, des possibilités de valorisation du mortier de bitume récupéré en centrale avec adjonction de bitume primaire et d'adjuvants le cas échéant.

En ce qui concerne les granulats minéraux récupérés, leur teneur résiduelle en liant est soit inférieure à 1 %, ce qui permet d'envisager une valorisation sous forme liée (confection de nouveaux revêtements bitumineux), soit sous une forme non liée sous un revêtement étanche, en considérant les dispositions de la Directive pour la valorisation des déchets minéraux.

Ce traitement peut être réalisé dans des entités décentralisées d'environ 100-200'000 t/an.

#### Traitement chimique

La mise en œuvre d'un traitement chimique à base de solvant requiert le développement d'une installation industrielle d'une capacité minimale de 50'000 t/an – avec un optimum a priori compris entre 80 et 100'000 t/an.

Ce traitement permettrait d'obtenir des granulats lavés et un bitume qui pourrait être valorisés.

La contamination résiduelle en liant des granulats récupérés devrait être a priori similaire ou inférieure au résultat obtenu avec le traitement mécanique (< 1%) Cependant, la contamination effective des produits sortants reste à préciser.

Ce type de traitement n'existe actuellement qu'à l'échelle de pilote et doit être encore être développé à échelle industrielle. Un projet concret est a priori prévu pour une installation de 50'000 t/an. Le caractère

« très sophistiqué » du procédé non encore appliqué à l'échelle opérationnelle pour des déchets de construction minéraux et la maîtrise des émissions de solvants constituent des enjeux importants pour le traitement des déchets bitumineux en grande quantité.

### **Traitement mixte**

Ce traitement est basé sur un lavage au biosolvant chauffé à basse température des déchets bitumineux destiné à séparer intégralement les granulats minéraux supérieurs à 2mm lavés et un mortier de bitume contenant encore du filler pouvant a priori être valorisé comme constituant d'un liant « neuf » en centrale d'enrobés et/ou soumis à un traitement par pyrolyse (notamment pour assurer le besoin en énergie thermique lié au chauffage du biosolvant).

Ce traitement n'est cependant actuellement développé qu'au stade de brevet et d'installation pilote de très faible capacité. En outre, les expériences de pyrolyse, mais s'appliquant à la totalité des agrégats bitumineux, n'ont apparemment encore jamais été couronnées de succès.

Afin de pouvoir mettre en œuvre ce type de traitement, il est nécessaire de préciser les conditions cadre et de favoriser le cas échéant le développement d'une installation pionnière à l'échelle industrielle.

## 4.4 Synthèse – scénarios à privilégier

### 4.4.1 Aspects généraux

A partir des différents éléments développés aux paragraphes précédents les éléments et principes d'une stratégie globale de gestion et de traitement des déchets bitumineux intégrant les modifications réglementaires prévues dès 2026 peuvent être énoncés comme suit.

En **première priorité**, il s'agit de favoriser au maximum la valorisation de la catégorie HAP < 250 mg/kg en tant que granulat recyclé dans les couches liées des routes. Le scénario « max recycling, nF » qui permet de valoriser l'intégralité de cette catégorie en 2026 et présente un excédent estimé à 500'000 t/an en 2035 constitue un objectif réaliste à atteindre. Comme mis en évidence au paragraphe 2.6 une légère augmentation des taux de recyclage dans les trois couches de revêtement ou une valorisation sous forme liée dans les fondations selon le scénario « max recycling + 10% fondation » permettrait d'atteindre un recyclage intégral de cette fraction.

Ce mode de valorisation correspond aux priorités fixées par la LPE et l'OLED et présente une évaluation économique favorable, tel que mis en évidence dans Figure 35 ci-après.

Le **deuxième axe consiste à développer des filières de traitement spécifique sur le territoire national**, à même de prendre en charge les déchets bitumineux de la catégorie HAP > 250 mg/kg ainsi que le cas échéant la fraction excédentaire de la catégorie HAP < 250 mg/kg n'ayant pu être valorisée pour la construction routière.

Ces filières, dont la plupart d'entre elles permettent moyennant une prise en charge différenciée de traiter les 2 catégories de teneur en HAP, sont présentées dans le tableau de synthèse ci-après (Tableau 25) conjointement avec l'option de traitement thermique aux Pays-Bas.

### 4.4.2 Aspects économiques

L'analyse comparative des aspects économiques et financiers fait pour sa part l'objet des tableaux présentés en Annexe C et à la Figure 35 ci-après.

Ces éléments présentent pour chacune des filières de traitement considérées, ainsi qu'à titre comparatif de mise en décharge, le coût du traitement ainsi que l'économie réalisée le cas échéant par la valorisation de matériaux recyclés ramenée au coût de fabrication du même matériau à partir de matières premières primaires.

Les principales bases et hypothèses considérées pour ces calculs sont résumées ci-après. Les trois volets de coûts ou de revenus suivants peuvent être distingués :

#### **A. Coûts liés à l'installation de traitement proprement dite**

- L'estimation des investissements liés à la réalisation de l'installation de traitement de chaque filière considérée est indiquée sur la base des éléments mentionnés au chapitre 3 avec indication de la capacité de traitement prise en compte.
- Le coût de revient du traitement, ramené à la tonne entrante de matériaux traités, est estimée en intégrant les amortissements, les coûts fixes et les coûts variables.

Les valeurs indiquées sont à considérer à titre indicatif, elles devront être précisées et confirmées dans le cadre des étapes de concrétisation ultérieures des différentes filières considérées. Les indications relatives aux filières n'ayant pas encore fait l'objet d'installation à l'échelle opérationnelle (p.ex. traitement mécanique optimisé amélioré ; traitement au moyen d'un biosolvant ;..) sont en particulier affectées d'une grande incertitude et ne sont à considérer uniquement en tant qu'ordres de grandeurs plausibles.

## **B. Coûts liés au conditionnement, traitement et élimination des fractions issues du traitement**

Ce volet considère les coûts à prendre en compte à l'aval de l'installation de traitement proprement dite pour soit conditionner des fractions à valoriser ou traiter et éliminer les fractions non valorisables. Les coûts correspondants doivent être intégrés au coût total au prorata du %-massique de la fraction concernée ramené à la tonne d'agrégats bitumineux à traiter entrante.

Ces coûts concernent en particulier :

- Élimination thermique des fractions riches en liant et des boues : 100 – 120 CHF/t
- Reprise des fractions minérales fines riches en liant issues du traitement mécanique pour valorisation comme agrégats recyclés dans une centrale d'enrobé, y.c. amortissement des installations spécifiques : 3 – 5 CHF/t

## **C. Revenus liés à la vente de matériaux secondaires / substitution de matériaux primaires**

Ce volet considère les recettes liées à la vente de matériaux secondaires et/ou aux économies réalisées grâce à la substitution de matériaux primaires correspondants.

Les recettes correspondantes doivent être intégrées au bilan économique global au prorata du %-massique de la fraction valorisée concernée ramené à la tonne d'agrégats bitumineux à traiter entrante.

Ces revenus ou économies de substitution ont été estimés selon les bases suivantes, avec prise en compte de fourchettes liées aux variations potentielles de la qualité des fractions générées et des incertitudes liées au potentiel de valorisation effectif pour certaines utilisations spécifiques (p.ex du liant régénéré en centrale d'enrobés) :

- Valeur d'un enrobé constitué matériaux primaire : env 70/ CHF/t (95% granulats minéraux à 40/t + 5% liant bitumineux à 600-800/to) [30]
- Valeur des granulats minéraux d'enrobés : base 40 CHF/t, minoré pour la fourchette basse à 25 - 30 CHF/t afin de considérer moins-value potentielle liée à la légère altération des propriétés mécaniques et/ou des contraintes liées à pollution résiduelle (< 1 % liant)
- Valeur du liant ou de la fraction riche en liant récupérée : base 600 CHF /t, minoré jusqu'à 200 CHF/t, en lien avec les incertitudes de valorisation en centrales susmentionnées – ou jusqu'à 40 CHF/t dans le cas le plus défavorable, correspondant à la valeur énergétique

Les valeurs indiquées sont à considérer à titre indicatif, elles devront être précisées et confirmées dans le cadre des étapes de concrétisation ultérieures des différentes filières de traitement et d'optimisation des possibilités de valorisation des différentes fractions générées.

Ces différents éléments de coûts et de revenus/économies liés à la valorisation /substitution permettent d'établir le bilan économique global de chaque filière de traitement, exprimé en CHF/t sous la forme de fourchettes intégrant les différentes incertitudes mentionnées.

Les coûts totaux de traitement, soit la somme des coûts liés à l'installation (A) et au conditionnement / traitement / élimination (B) sont synthétisés pour les différentes filières dans le Tableau 24.

Filière d'évacuation	HAP < 250 mg/kg	HAP > 250 mg/kg <i>(intégrant dans tous les cas le traitement thermique pour la fraction riche en liant)</i>
Valorisation dans la construction routière	15.- / t	N/A dès 2026
Décharge	60.- / t (DTB)	120.- / t (DTE)
Traitement mécanique actuel optimisé	25-35.- / t	90 – 120.- / t
Traitement mécanique amélioré <sup>(1)</sup>	35 – 55.- / t	60 – 90.- / t
Traitement chimique aux solvants <sup>(1)</sup>	50 – 70.- / t	55 – 80.- / t
Traitement chimique au biosolvant <sup>(1)</sup>	50 – 70.- / t	60 – 90.- / t
Traitement thermique NL	80 – 120.- / t <sup>(2)</sup>	80 – 120.- / t <sup>(2)</sup>
Traitement thermique CH (cimenterie ou pyrolyse <sup>(1)</sup> )	≥100.- / t	≥100.- / t

<sup>(1)</sup> faisabilité opérationnelle et possibilités de concrétisation à confirmer

<sup>(2)</sup> fourchette de prix liée à la distance de transport jusqu'à Bâle

Tableau 24 : Coûts totaux de traitement pour les différentes filières d'évacuation

#### 4.4.3 Synthèse

L'analyse effectuée met en évidence que les traitements mécaniques et chimiques constituent des options à privilégier, à la fois pour le traitement intégral des déchets bitumineux de la catégorie HAP < 250 mg/kg et pour le prétraitement de la catégorie HAP > 250 mg/kg, puisqu'elles présentent pour cette deuxième catégorie qui devrait constituer la part prépondérante des déchets à traiter à l'état futur, une évaluation technico-économique plus favorable que le traitement thermique intégral.

Les filières de traitement mécanique et chimique n'impliquent en outre pas de capacité critique de traitement très élevée et pourraient donc être mises en œuvre selon un principe d'installations décentralisées avec une capacité minimale par installation de l'ordre de 50'000 à 100'000 t/an.

Le développement de ces filières mécaniques et chimiques permettrait ainsi de disposer d'une alternative à l'exportation des déchets de la catégorie HAP > 250 mg/kg en installation de traitement dédiée aux Pays-Bas, qui reste une filière à considérer pour la gestion future mais pour laquelle il est vivement souhaitable de s'affranchir d'une dépendance intégrale.

Le traitement thermique en cimenterie présente pour sa part une capacité très limitée dans la configuration actuelle des installations (env. 60'000 t/an à l'échelle de l'ensemble de la Suisse) et l'intérêt de l'option de mise en œuvre de réacteurs parallèles spécifiques à ce type de déchets reste à établir, les coûts de traitement estimés étant vraisemblablement supérieurs au coût des filières de traitement mécanique et chimique.

Le traitement en cimenterie reste cependant une option intéressante pour le traitement thermique du liant ou de la fraction fine riche en liant de la catégorie HAP > 250 mg/kg issue d'un prétraitement mécanique et chimique, dont la quantité est estimée entre 30'000 et 170'000 t/an suivant l'efficacité et les caractéristiques du prétraitement effectivement mis en œuvre.

Les processus de traitements mécanique et chimique sont cependant encore en cours de développement ou d'optimisation. Le temps disponible jusqu'à l'entrée en vigueur des modifications prévues par l'OLED en 2026 peut permettre de confirmer ou non la faisabilité de ces méthodes à l'échelle industrielle et d'optimiser les processus ainsi que les possibilités de valorisation des différentes fractions issues du traitement.

Pour le **traitement mécanique**, il s'agit de vérifier si l'état actuel de la technique permettant de séparer les granulats minéraux jusqu'à un diamètre minimal de 8 mm peut être optimisé et développé en abaissant le grain minimal jusqu'à 2 mm afin d'élargir les possibilités de valorisation de la fraction fine riche en liant en tant que constituant d'un liant bitumineux reconstitué moyennant des adaptations technologiques.

Pour le **traitement chimique ou mixte**, méthodes actuellement développées au stade de la recherche ou d'installations pilotes de faible capacité, il s'agit de les concrétiser à l'échelle d'une installation pilote de taille industrielle. Ceci permettra de confirmer ou non la faisabilité opérationnelle et économique, de valider ou non la qualité technique et environnementale des produits issus du traitement et d'évaluer la conformité environnementale.

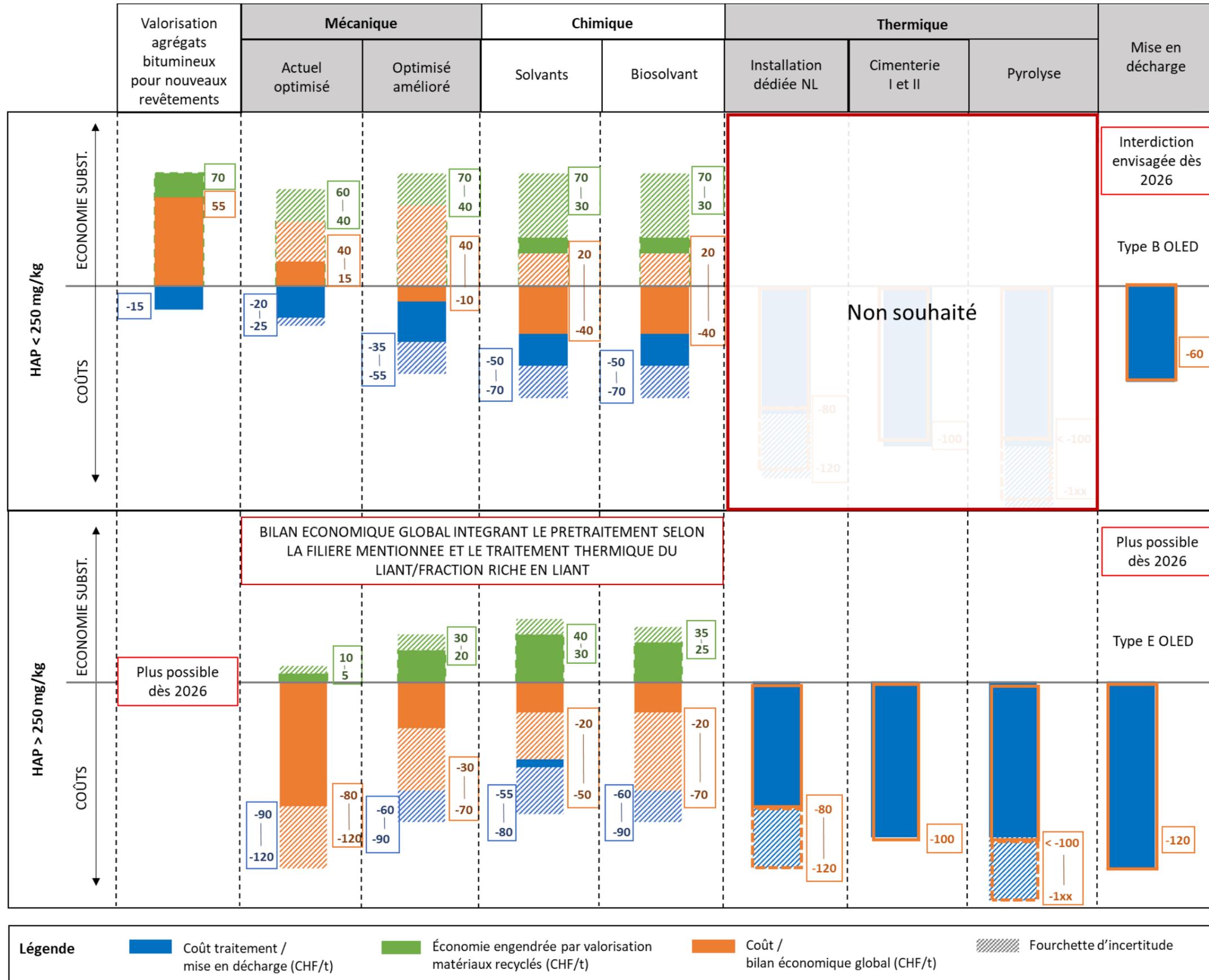


Figure 35 : Synthèse des bilans économiques des différentes filières de traitement

Process	MECANIQUE		CHIMIQUE / MIXTE		THERMIQUE				
	Actuel optimisé	Optimisé amélioré	Lavage au solvant	Lavage au biosolvant	Traitement en installation dédiée au Pays-Bas	Traitement en cimenterie en Suisse		Pyrolyse	
						Configuration actuelle	Réacteur parallèle		
<b>Evaluation Caractéristiques</b>									
<b>Description</b>	Traitement mécanique permettant de séparer les granulats > 8mm des granulats fins (<8mm) riche en liant	Traitement mécanique amélioré (crible vibrant haute fréquence) permettant de séparer les granulats > 2mm d'un mortier de bitume <2mm	Lavage aux solvants (alcanes) avec distillation permettant de séparer les granulats du liant	Lavage au biosolvant chauffé permettant d'obtenir des granulats propres >2mm, une fraction fine et du bitume chargé en filler	Traitement thermique (T> 850°C) avec destruction du liant et récupération des granulats minéraux	Introduction directe dans le four	Création d'un réacteur de traitement spécifique	Traitement thermique en absence d'oxygène (T>500°C) avec combustion du gaz pyrolytique et du liant	
<b>Etat de la technique</b>	✓ Installation industrielle – en cours d'optimisation	? Installation pilote en cours de développement (NL) - faisabilité industrielle à confirmer	? Installation pilote (0.2-0.3 t/h) – faisabilité industrielle reste à confirmer	? Brevet et installation pilote (1t/h)r	✓ Installations industrielles en exploitation	? Installations existantes – capacité limitée	? Installation spécifique à créer	?? Installation pilote appliquée sans succès à ce jour aux déchets bitumineux	
<b>Capacité critique d'une installation</b>	50'000 - 100'000 t/an	~ 100'000 t/an	60'000 - 80'000 t/an	~50'000 t/an ? A préciser	> 500'000 t/an	Capacité totale limitée (~60'000 t/an pour toute la Suisse)	~100'000 t/an ? A préciser	Min. 10'000 t/an A préciser	
<b>Coût de revient estimé</b>	~15 - 20 CHF/t	~30 - 50 CHF/t A préciser	~50 - 70 CHF/t ? A préciser	~50 - 70 CHF/t ? A préciser	~ 80 - 120 CHF/t	~100 CHF/t ? A préciser	~100 CHF/t ? A préciser	> 100 CHF/t ? A préciser	
<b>Aptitude à prendre en charge les différentes catégories de teneurs en HAP</b>	<b>Prise en charge commune des deux catégories</b>	NON	NON	NON	NON	OUI	OUI	OUI	
	<b>HAP &gt; 250 mg/kg</b>	Traitement préalable avant traitement thermique				Traitement préalable avant traitement thermique (par pyrolyse – module intégré)	Capacité de traitement en principe disponible à long terme. Alternatives et mesures d'accompagnement à définir pour éviter dépendance exclusive	Traitement thermique limité à 60'000 t (Σ total) – fraction minérale incorporée dans klinker	Traitement thermique avec fraction minérale a priori altérée – propriétés mécaniques à préciser
		~ 25% Granulats minéraux > 8mm (1% liant) VALORISABLE ?✓	~ 75% Fraction < 8mm riche en liant TRAITEMENT THERMIQUE ✓	~ 65-70% Granulats minéraux > 2mm (1% liant) VALORISABLE ?✓	~ 30-35% Fraction < 2mm riche en liant TRAITEMENT THERMIQUE ✓	~ 95% Granulats minéraux (1% liant) VALORISABLE ?✓			
<b>HAP &lt; 250 mg/kg</b>	~ 25% Granulats minéraux > 8mm (1% liant) VALORISABLE ?✓	~ 75% Valorisation limitée si potentiel de recyclage déjà épuisé ??	~ 65-70% Granulats minéraux > 2mm VALORISABLE ?✓	~ 30-35% Valorisation pour fabrication liant reconstitué (centrale enrobés) ??	~ 95% Granulats minéraux (1% liant) VALORISABLE ?✓	~ 5% Valorisation (centrale enrobés) pour fabrication liant reconstitué ??	~ 70-90% Granulats minéraux > 2mm (non altérés) ✓	~ 10-30% Valorisation (centrale enrobés) pour fabrication liant reconstitué ??	Non indiqué (sauf éventuellement en combinaison avec lavage au biosolvant)

Légende	Process	Valorisation fractions issues du traitement
	✓	Faisabilité éprouvée à l'échelle industrielle
?	Faisabilité établie à l'échelle d'installation pilote / technique en développement - Mise en œuvre industrielle à confirmer	Établie moyennant clarification points spécifiques
??	Process développé au stade de laboratoire / brevet - Faisabilité à l'échelle d'une installation pilote puis industrielle reste à établir	Envisageable – développement technique nécessaire

Tableau 25 : Synthèse de l'évaluation des caractéristiques des différentes filières de traitement

---

## 5 Conclusion / recommandations

---

Dans le cadre d'une réflexion globale sur la gestion des déchets bitumineux et afin d'œuvrer au développement d'un modèle d'économie circulaire, il est nécessaire de mettre en place des nouvelles filières de valorisation/traitement des déchets bitumineux, notamment en lien avec les deux évolutions planifiées/envisagées du cadre réglementaire suivantes :

- A partir du 1<sup>er</sup> janvier 2026, selon l'OLED les déchets bitumineux présentant une concentration en HAP supérieure à 250mg/kg ne pourront plus être valorisés directement dans la construction ni stockés en décharge.
- En raison de la pénurie des volumes de stockage disponibles dans plusieurs cantons, l'OFEV prévoit d'interdire de manière générale à l'horizon 2026 la mise en décharge des déchets bitumineux quelle que soit leur teneur en HAP.

Actuellement, l'unique filière de traitement possible pour les déchets à forte teneur en HAP (> 1'000 mg/kg selon réglementation actuelle ; > 250mg/kg dès 2026) est le traitement en installation thermique dédiée aux Pays-Bas permettant de détruire le liant et les HAP qu'ils contiennent et de récupérer les granulats minéraux, ce qui rend nécessaire d'aborder la question du traitement de ces déchets sur le sol national.

En ce qui concerne les déchets dont le contenu en HAP est inférieur à 250mg/kg, la filière de valorisation des agrégats bitumineux pour la construction routière est déjà bien en place, mais ne permet à l'heure actuelle pas d'absorber la quantité totale de déchets produits (exigences des normes routières ; technologie des centrales de production d'enrobés ; pratiques et habitudes des différents acteurs de la construction ;...).

L'estimation des quantités futures de déchets bitumineux à traiter au-delà de l'horizon 2026 est basée sur les résultats de l'étude «Modélisation des flux du bitume en Suisse » du bureau Energie- und Ressourcen-Management GmbH, édité en août 2020 et dont les résultats sont représentés dans le graphique ci-dessous.

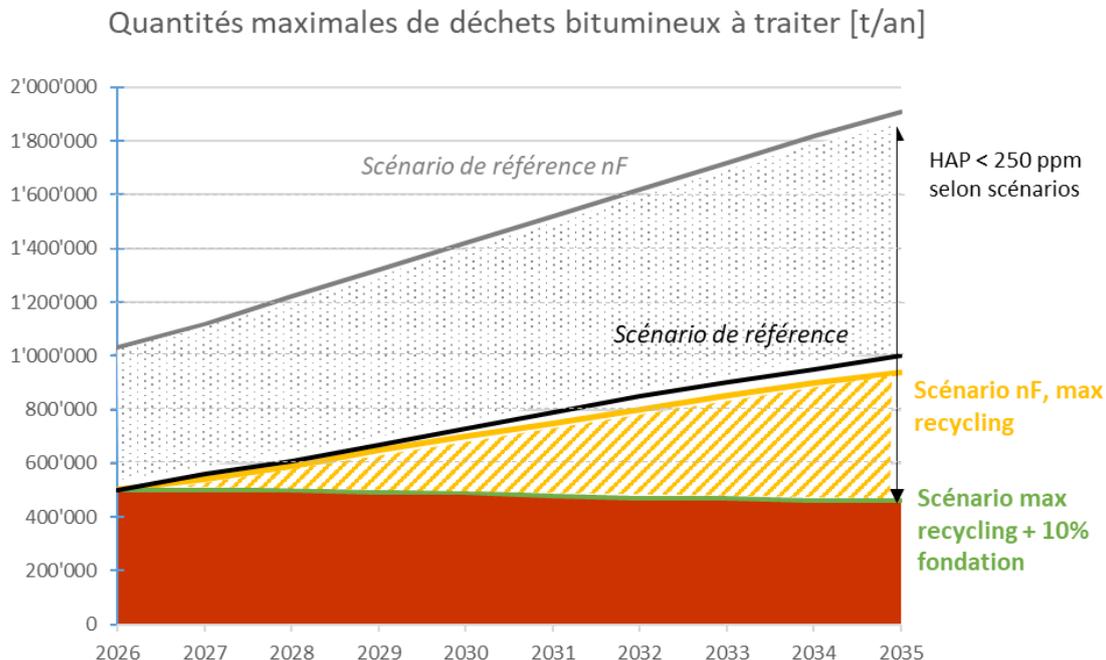


Figure 36 : Rappel des quantités maximales de déchets bitumineux à traiter selon les scénarios

Sur cette base, l'élaboration des scénarios futurs de gestion et de traitement doit donc distinguer:

- **La catégorie avec des teneurs en HAP > 250 mg/kg** qui présente une quantité stable d'environ 500'000 tonnes/an en 2026, et diminuant faiblement à 460'000 t/an à l'horizon 2035. Ce gisement constitue la quantité incompressible devant être soumise à un traitement thermique. Ce traitement peut être réalisé soit directement, soit après un prétraitement permettant de réduire la quantité à traiter, pour autant que celui-ci soit conforme d'un point de vue environnemental et intéressant économiquement.
- **La catégorie avec des teneurs en HAP < 250 mg/kg** qui peut être valorisée comme agrégats recyclés et dont la quantité varie fortement entre les différents scénarios. Dans cette optique, le scénario « max recycling, nF » qui ne présente aucun excédent en 2026 et une quantité d'environ 200'000 t/an en 2030 et 500'000 t/an en 2035 constitue un objectif réaliste à atteindre. Comme mis en évidence au chapitre 2.6, une légère augmentation des taux de recyclage dans les trois couches de revêtement ou une valorisation sous forme liée dans les fondations selon le scénario « max recycling + 10% fondation » permettrait d'atteindre un recyclage intégral de cette fraction. En revanche, pour le scénario de référence sans utilisation dans les fondations, qui constitue un scénario non souhaité, les quantités seraient d'environ 500'000 t/an en 2026 et 1'000'000 en 2035.

Par ailleurs, la concrétisation des différents scénarios devra intégrer les incertitudes liées aux éléments suivants :

- Données relatives à la répartition entre les 2 catégories de teneurs en HAP (< et > 250 mg/kg). En effet, actuellement il est probable qu'une partie des déchets avec des teneurs indéterminées ou mélangées soit intégrée à la catégorie la plus fortement contaminée, ce qui aurait pour conséquence une surestimation du gisement de déchets HAP > 250 mg/kg.

- Données relatives à la granulométrie des granulats minéraux présents dans les déchets bitumineux. En effet, ce paramètre influence les flux et potentiels de valorisation, notamment pour tous les traitements ou prétraitement autres que thermiques.

La position et le rôle des installations de traitement des déchets bitumineux doivent être mis en perspective avec les principes et objectifs de la gestion des déchets en Suisse, définis par la LPE et concrétisés par l'OLED :

- *La production de déchets doit être évitée et limitée à la source dans la mesure du possible*

Pour les déchets bitumineux cet objectif est à concrétiser par développement techniques et matériaux permettant d'améliorer la durabilité des revêtements et d'espacer les fréquences de renouvellement des différentes couches des revêtements.

- *Les déchets minéraux provenant de la démolition d'ouvrages construits doivent autant que possible être valorisés intégralement comme matières premières pour la fabrication de matériaux de construction*

Cette exigence fixée par l'article 20 de l'OLED s'applique aux matériaux bitumineux de démolition dont la teneur en HAP ne dépasse pas 250 mg/kg. Elle doit se concrétiser en premier lieu par la valorisation des agrégats bitumineux dans le cadre de la production de nouveaux revêtements selon les éléments et principes décrits au chapitre 2 du présent rapport, en créant des conditions cadre permettant d'atteindre les scénarios les plus ambitieux en termes de parts valorisées (évolution du cadre normatif et des pratiques des professionnels ; évolution technologique des centrales d'enrobés et des modes de gestion).

Pour les quantités excédentaires non valorisées comme agrégats recyclés, il s'agit de favoriser dans toute la mesure du possible les processus de traitement pour optimiser la valorisation matière des différents constituants des déchets bitumineux.

L'optimisation environnementale de ces processus doit être appréhendée dans une perspective élargie de durabilité, associant outre les questions liées à la gestion des ressources et des déchets, les enjeux énergétiques et climatiques en particulier.

- *Les déchets doivent être éliminés d'une manière respectueuse de l'environnement et, pour autant que ce soit possible et approprié, sur le territoire national*

L'élimination respectueuse de l'environnement doit être assurée pour les quantités ou fractions qui ne peuvent faire l'objet d'une valorisation matière sur la base de l'état actuel de la technique et des développements envisagés dans le futur.

Pour les déchets bitumineux, l'élimination par traitement thermique est à prévoir dans tous les cas pour le liant ou la fraction riche en liant des agrégats contaminés aux HAP (>250 mg/kg).

Sur cette base, les éléments et principes d'une stratégie globale de gestion et de traitement des déchets bitumineux intégrant les modifications réglementaires prévues dès 2026 peuvent être énoncés comme suit.

En **première priorité**, il s'agit de favoriser au maximum la valorisation en tant que granulats recyclés dans la construction routière de la catégorie HAP < 250 mg/kg avec comme objectif stratégique optimal de tendre vers un recyclage intégral de cette fraction, et dans tous les cas de limiter les excédents non valorisés selon le scénario « max recycling, nF » présenté au chapitre 2.

Le **deuxième axe consiste à développer des filières de traitement spécifique sur le territoire national**, à même de prendre en charge les déchets bitumineux de la catégorie HAP > 250 mg/kg ainsi que le cas échéant la fraction excédentaire de la catégorie HAP < 250 mg/kg n'ayant pu être valorisée pour la construction routière.

L'analyse effectuée dans la présente étude met en évidence que les traitements mécaniques et chimiques constituent des options à privilégier, à la fois pour le traitement intégral des déchets bitumineux de la catégorie HAP < 250 mg/kg et pour le prétraitement de la catégorie HAP > 250 mg/kg. Elles

présentent, pour cette deuxième catégorie, qui devrait constituer la part prépondérante des déchets à traiter à l'état futur, une évaluation technico-économique plus favorable que le traitement thermique intégral.

Les filières de traitement mécanique et chimique n'impliquent en outre pas de capacité critique de traitement très élevée et pourraient donc être mises en œuvre selon un principe d'installations décentralisées avec une capacité minimale par installation de l'ordre de 50'000 à 100'000 t/an. Une dizaine d'installations seraient nécessaires.

Le développement de ces filières mécaniques et chimiques permettrait ainsi de disposer d'une alternative à l'exportation des déchets de la catégorie HAP > 250 mg/kg en installation de traitement dédiée aux Pays-Bas, qui reste une filière à considérer pour la gestion future mais pour laquelle il est vivement souhaitable de s'affranchir d'une dépendance intégrale.

Le traitement thermique en cimenterie présente pour sa part une capacité très limitée dans la configuration actuelle des installations (env. 60'000 t/an à l'échelle de l'ensemble de la Suisse) et l'intérêt de l'option de mise en œuvre de réacteurs parallèles spécifiques à ce type de déchets reste à établir, les coûts de traitement estimés étant vraisemblablement supérieurs au coût des filières de traitement mécanique et chimique.

Le traitement en cimenterie reste cependant une option intéressante pour le traitement thermique du liant ou de la fraction fine riche en liant de la catégorie HAP > 250 mg/kg issue d'un prétraitement mécanique et chimique, dont la quantité est estimée entre 30'000 et 170'000 t/an suivant l'efficacité et les caractéristiques du prétraitement effectivement mis en œuvre.

Les processus de traitements mécanique et chimique sont cependant encore en cours de développement ou d'optimisation. Le temps disponible jusqu'à l'entrée en vigueur des modifications prévues par l'OLED en 2026 peut permettre de confirmer ou non la faisabilité de ces méthodes à l'échelle industrielle et d'optimiser les processus ainsi que les possibilités de valorisation des différentes fractions issues du traitement.

Pour le traitement mécanique, il s'agit de vérifier si l'état actuel de la technique permettant de séparer les granulats minéraux jusqu'à un diamètre minimal de 8 mm peut être optimisé et développé en abaissant le grain minimal jusqu'à 2 mm afin d'élargir les possibilités de valorisation de la fraction fine riche en liant en tant que constituant d'un liant bitumineux reconstitué moyennant des adaptations technologiques.

Pour le **traitement chimique ou mixte**, méthodes actuellement développées seulement au stade de la recherche ou d'installations pilotes de faible capacité, il s'agit de les concrétiser à l'échelle d'une installation pilote de taille industrielle. Ceci permettra de confirmer ou non la faisabilité opérationnelle et économique, de valider ou non la qualité technique et environnementale des produits issus du traitement et d'évaluer la conformité environnementale.

**CSD INGÉNIEURS SA**



Eric Säuberli  
Directeur de succursale



pp. Alexander Flacher  
Responsable « waste to energy »

Genève, le 15 février 2021.

**Autres collaborateurs chargés de l'étude :**

- *Johanna Fernandez, ingénieure en environnement dipl. EPFL*
- *Milena Kessler, ingénieure en environnement dipl. EPFZ*
- *Cédric Egolf, ingénieur civil dipl. EPFL*
- *Antoine Indaco, Responsable de domaine déchets et dépollution*

---

## 6 Bibliographie

---

- [1] Deutscher Asphaltverband, «Wiederverwenden von Asphalt,» Bonn, 2014.
- [2] EU-Recycling, «Teerhaltiger Straßenaufbruch wird in Deutschland zum Problem,» 2017.
- [3] Arbeitsgruppe der Umweltallianz Sachsen unter Federführung der IHK Chemnitz, «Wiederverwendung und Verwertung von Ausbauasphalt, Leitfaden Stand 2020,» Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 2020.
- [4] N. Büche et S. Nibuxs , *Augmentation de la teneur en fraïsat dans les enrobés bitumineux*, Lausanne: Conférence Journée d'Etude de la Route et des Infrastructures, 2018.
- [5] Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, «Asphalt Recycling: Situation in Österreich,» Wien, 2020.
- [6] Bouwend Nederland Vakgroep Bitumineuze Werken, «Asphalt Recycling in den Niederlanden,» Zoetermeer, 2020.
- [7] BAM Infra Asfalt (Rien Huurman), *Asphalt legal regulations in the Netherlands*, Culemborg, 2020.
- [8] European Asphalt Pavement Association, «Asphalt in Figures,» Brüssel, 2018.
- [9] European Asphalt Pavement Association EAPA, «Asphalt and Circular Economy,» EAPA, 2020. [En ligne]. Available: <https://eapa.org/recycling>. [Accès le 11 12 2020].
- [10] D. Sandra, «Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung,» Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute VSS, Schlieren, 2013.
- [11] D. Heijkoop, «Thermische Verwertung von teerhaltigem Asphalt,» TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2017.
- [12] BAM Infra Asfalt, «LE2AP Low Emission Asphalt Pavement,» BAM Infra Asfalt, Culemborg.
- [13] IMP Bautest AG, «Schlussbericht: Wiederverwendung von Gesteinskörnungen aus thermisch behandeltem Asphalt,» Oberbuchsitzen, 2016.
- [14] REKO B.V., «Präsentation REKO,» Rotterdam, 2020.
- [15] Baunetzwerk, «Zweite Aufbereitungsanlage für Teer,» 22 04 2020. [En ligne]. Available: <https://www.baunetzwerk.biz/zweite-aufbereitungsanlage-fuer-teer>. [Accès le 24 11 2020].
- [16] Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, «Konsequenzen verschiedener Verwertungsoptionen für teerhaltigen Straßenaufbruch,» Rhein-Main Umwelt GmbH, Würzburg, 2019.
- [17] Kooship GMBH, «Asphalttransport NL - CH,» Gummersbach, 2020.
- [18] ATM Entsorgung Deutschland GmbH, *Telefonat M. Hennes*, 2020.

- [19] Contargo GmbH & Co. KG, «Kleinwasser,» Contargo GmbH & Co. KG, 07 2017. [En ligne]. Available: [https://www.contargo.net/assets/pdf/Kleinwasser\\_Info-2017-DE.pdf](https://www.contargo.net/assets/pdf/Kleinwasser_Info-2017-DE.pdf). [Accès le 05 12 2020].
- [20] Hannoversche Allgemeine Zeitung, «Rhein-Pegel so niedrig wie seit Jahrzehnten nicht,» Hannover, 2018.
- [21] R. R. A. Oliver Mickley, Interviewee, *Asphalttransport von der Schweiz in die Niederlande*. [Interview]. 04 11 2020.
- [22] World Meteorological Organization, «WMO climate statement: past 4 years warmest on record,» World Meteorological Organization, 29 11 2018. [En ligne]. Available: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-climate-statement-past-4-years-warmest-record>. [Accès le 11 12 2020].
- [23] F. Knappe et J. Reinhardt, «Entsorgung von teerhaltigem Straßenaufbruch aus ökologischer Sicht,» Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg, 2017.
- [24] Solenia, «Energetical Value of Milled Asphalt Bitumen».
- [25] U. Neumann, «Nachhaltiges Recycling von PAK-haltigem Straßenaufbruch,» TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2017.
- [26] HEMO GmbH, «HEMO Reinigungstechnologien,» Hemo GmbH, [En ligne]. Available: <https://hemo-gmbh.de/technologien.php>. [Accès le 03 12 2020].
- [27] R. Koppmann, *Volatile Organic Compounds in the Atmosphere*, Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- [28] HEMO Recycling AG, «ARCA: AsphaltReCyclingAnlage,» Ötisheim, 2020.
- [29] Bundesamt für Umwelt BAFU, «VOC-Lenkungsabgabe,» 20 08 2020. [En ligne]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/massnahmen-zur-luftreinhaltung/voc-lenkungsabgabe.html>. [Accès le 04 12 2020].
- [30] D. (. V. 2. a. A. d. S. V. d. S.-. u. Verkehrsfachleute, «Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans les enrobés à chaud : EP3 - Evaluation du flux de matière ainsi que de la durabilité,» Novembre 2013.
- [31] Deutscher Asphaltverband, «Asphalt Recycling Stand 2019 in Deutschland,» Bonn, 2020.
- [32] R. Plass, «REKO: Thermische Verwertung von teerhaltigem Asphalt,» Rotterdam, 2020.
- [33] M. Zaumanis, M. Arraigada, S. Wyss, K. Zeyer, M. Cavalli et L. Poulikakos, «Performance-based design of 100% recycled hot-mix asphalt and validation using traffic load simulator,» *Journal of Cleaner Production* 237, 2019.
- [34] R. C. West et A. Copeland, «High RAP Asphalt Pavements: Japan Practica - Lessons Learnt,» National Asphalt Pavement Association, Lanham, 2015.
- [35] Straßen.NRW, «Verwertung teer-/pechhaltiger Ausbaustoffe in NRW,» Willingen, 2019.
- [36] ATM Renewi, *Telefonat K. De Ridder*, 2020.

- [37] BAM Infra BV, «Towards sustainable horizontal asphalt recycling,» Utrecht, 2016.
- [38] H. R. A. Werner Jost, Interviewee, *ARCA Reinigungsverfahren*. [Interview]. 21 09 2020.
- [39] Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, «Asphalt Recycling: Situation in Österreich,» Wien, 2020.
- [40] A. S. REMEX Recycling, Interviewee, *Deponierung von Asphalt in Deutschland*. [Interview]. 24 11 2020.
- [41] R. Huurman et J. Qiu, Interviewees, *BAM Infra Asphalt: Dutch asphalt producers*. [Interview]. 13 10 2020.
- [42] Weltgesundheitsorganisation, «WHO Leitlinien für Innenraumluftqualität: ausgewählte Schadstoffe,» Kopenhagen, 2011.
- [43] FLB Lieferbeton GmbH & Co. KG, «KWZ-Erläuterungen,» 10 11 2017. [En ligne]. Available: <http://www.flb-frankfurt.de/files/kwzdok.pdf>. [Accès le 05 12 2020].
- [44] M. Mauermann, «Havarien auf dem Rhein,» Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) , Mainz, 2017.
- [45] E.-. u. R.-M. G. (M.Rubli), *Modélisation des flux de bitume en Suisse*, 2020.
- [46] O. f. d. l'environnement, *Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux. L'environnement pratique n° 3106.*, Berne, 2006.
- [47] B. f. S. ASTRA, *Fachhandbuch Trasee / Umwelt (FHB T/U)*, 2020.
- [48] Nibuxy Sàrl, «Augmentation de la teneur en fraisat dans les enrobés bitumineux,» chez *Journée d'Etude de la Route et des Infrastructures*, 2018.
- [49] C. d. Valais, *Guide technique d'application pour l'utilisation de matériaux minéraux de recyclage*, 2016.
- [50] L. Poulikakos, M. Zaumanis, M. C. Cavalli, M. M. Fernandez et N. Heeb, «Sustainable fully recycled asphalt concrete,» EMPA, Dübendorf, 2018.
- [51] ASTRA, «Häufige Fragen,» Bundesamt für Strassen ASTRA, [En ligne]. Available: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/baustellen/wissenswertes/haeufige-fragen.html>. [Accès le 09 12 2020].
- [52] Bundesamt für Umwelt (BAFU) , «Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle,» BAFU, Bern, 2006.
- [53] REKO BV, «Telefonkonferenz mit David Heijkoop und Remco Plass,» Zürich / Rotterdam, 2020.
- [54] M. Mauermann et Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), Interviewees, *Anfrage Pegelstände Maxau und Kaub*. [Interview]. 04 12 2020.



**Annexe A Liste des entités contactées**

Nom
<b>Suisse</b>
Associations faitières / professionnelles
Asphaltsuisse
ASR/ARV
Administrations
Etat de Genève - Service de géologie, sols et déchets
Canton de Vaud - Division géologie, sol et déchets
Tiefbauamt Zürich
Instituts de recherches / hautes écoles / universités
Hochschule für Technik Rapperswil
EMPA
Berner Fachhochschule
Entreprises
Eberhard
GIPO SA
Ammann
Walo Bertschinger SA
Implenia
Colas
WMA Transport SA
Habö SA
BHZ
REMEX Recycling SA
Holcim SA
Jura Cement

<b>Nom</b>
<b>Europe</b>
Associations faitières / professionnelles
Eurobitume
European asphalt pavement association
Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM)
Deutscher Asphaltverband
Österreichischer Baustoff-Recycling Ver-band
Bouwend Nederland Vakgroep Bitumineuze Werken
Instituts de recherches / hautes écoles / universités
Institut für Energie- und Umweltforschung
Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)
<b>Entreprises</b>
HEMO Recycling SA
REKO
ATM Renewi
BAM Infra Asphalt LE2AP (Pays Bas)
Jansen Recycling
VBW-Asfalt
SITEB
Theo Pouw
ATM Entsorgung Deutschland GmbH
Koozand B.V.

**Annexe B Estimation des quantités de déchets à traiter par canton**

	Canton	Masse d'asphalte [t]	Pourcentage	Année	SZ Referenz [kt/an]		SZ Ref, nF [kt/an]		SZ nF, max REC [kt/an]		SZ Max Recycling + 15% Fund [kt/an]	
					HAP > 250	HAP < 250	HAP > 250	HAP < 250	HAP > 250	HAP < 250	HAP > 250	HAP < 250
1	Zürich	16'984'750	10.3%	2026	51'537	0	51'537	53'599	51'537	0	52'568	0
				2035	47'414	55'660	47'414	149'459	47'414	49'476	50'507	0
2	Bern	25'060'669	15.2%	2026	76'042	0	76'042	79'084	76'042	0	77'563	0
				2035	69'959	82'126	69'959	220'523	69'959	73'001	74'522	0
3	Luzern	7'613'147	4.6%	2026	23'101	0	23'101	24'025	23'101	0	23'563	0
				2035	21'253	24'949	21'253	66'992	21'253	22'177	22'639	0
4	Uri	1'259'406	0.8%	2026	3'821	0	3'821	3'974	3'821	0	3'898	0
				2035	3'516	4'127	3'516	11'082	3'516	3'669	3'745	0
5	Schwyz	2'381'149	1.4%	2026	7'225	0	7'225	7'514	7'225	0	7'370	0
				2035	6'647	7'803	6'647	20'953	6'647	6'936	7'081	0
6	Obwalden	1'315'948	0.8%	2026	3'993	0	3'993	4'153	3'993	0	4'073	0
				2035	3'674	4'312	3'674	11'580	3'674	3'833	3'913	0
7	Nidwalden	736'145	0.4%	2026	2'234	0	2'234	2'323	2'234	0	2'278	0
				2035	2'055	2'412	2'055	6'478	2'055	2'144	2'189	0
8	Glarus	1'042'096	0.6%	2026	3'162	0	3'162	3'289	3'162	0	3'225	0
				2035	2'909	3'415	2'909	9'170	2'909	3'036	3'099	0
9	Zug	1'352'921	0.8%	2026	4'105	0	4'105	4'269	4'105	0	4'187	0
				2035	3'777	4'434	3'777	11'905	3'777	3'941	4'023	0
10	Fribourg	8'008'534	4.9%	2026	24'301	0	24'301	25'273	24'301	0	24'787	0
				2035	22'357	26'245	22'357	70'472	22'357	23'329	23'815	0
11	Solothurn	5'687'299	3.5%	2026	17'257	0	17'257	17'947	17'257	0	17'602	0
				2035	15'877	18'638	15'877	50'046	15'877	16'567	16'912	0
12	Basel-Stadt	932'203	0.6%	2026	2'829	0	2'829	2'942	2'829	0	2'885	0
				2035	2'602	3'055	2'602	8'203	2'602	2'715	2'772	0
13	Basel-Landschaft	4'640'283	2.8%	2026	14'080	0	14'080	14'643	14'080	0	14'362	0
				2035	12'954	15'207	12'954	40'833	12'954	13'517	13'799	0
14	Schaffhausen	2'804'717	1.7%	2026	8'510	0	8'510	8'851	8'510	0	8'681	0
				2035	7'830	9'191	7'830	24'680	7'830	8'170	8'340	0
15	Appenzell Ausserrhoden	927'557	0.6%	2026	2'815	0	2'815	2'927	2'815	0	2'871	0
				2035	2'589	3'040	2'589	8'162	2'589	2'702	2'758	0
16	Appenzell Innerrhoden	322'568	0.2%	2026	979	0	979	1'018	979	0	998	0
				2035	900	1'057	900	2'838	900	940	959	0
17	St. Gallen	7'580'533	4.6%	2026	23'002	0	23'002	23'922	23'002	0	23'462	0
				2035	21'162	24'842	21'162	66'705	21'162	22'082	22'542	0
18	Graubünden	8'952'277	5.4%	2026	27'164	0	27'164	28'251	27'164	0	27'708	0
				2035	24'991	29'337	24'991	78'776	24'991	26'078	26'621	0
19	Aargau	12'650'126	7.7%	2026	38'385	0	38'385	39'920	38'385	0	39'152	0
				2035	35'314	41'456	35'314	111'316	35'314	36'849	37'617	0
20	Thurgau	7'011'700	4.3%	2026	21'276	0	21'276	22'127	21'276	0	21'701	0
				2035	19'574	22'978	19'574	61'700	19'574	20'425	20'850	0
21	Ticino	8'109'711	4.9%	2026	24'608	0	24'608	25'592	24'608	0	25'100	0
				2035	22'639	26'576	22'639	71'362	22'639	23'623	24'115	0
22	Vaud	17'952'567	10.9%	2026	54'474	0	54'474	56'653	54'474	0	55'564	0
				2035	50'116	58'832	50'116	157'975	50'116	52'295	53'385	0
23	Valais	10'190'069	6.2%	2026	30'920	0	30'920	32'157	30'920	0	31'538	0
				2035	28'446	33'394	28'446	89'668	28'446	29'683	30'302	0
24	Neuchâtel	4'308'630	2.6%	2026	13'074	0	13'074	13'597	13'074	0	13'335	0
				2035	12'028	14'120	12'028	37'914	12'028	12'551	12'812	0
25	Genève	3'323'885	2.0%	2026	10'086	0	10'086	10'489	10'086	0	10'288	0
				2035	9'279	10'893	9'279	29'249	9'279	9'682	9'884	0
26	Jura	3'631'787	2.2%	2026	11'020	0	11'020	11'461	11'020	0	11'240	0
				2035	10'138	11'902	10'138	31'958	10'138	10'579	10'800	0
	<b>Total Suisse</b>	<b>164'780'677</b>		2026	<b>500'000</b>	<b>0</b>	<b>500'000</b>	<b>520'000</b>	<b>500'000</b>	<b>0</b>	<b>510'000</b>	<b>0</b>
				2035	<b>460'000</b>	<b>540'000</b>	<b>460'000</b>	<b>1'450'000</b>	<b>460'000</b>	<b>480'000</b>	<b>490'000</b>	<b>0</b>

**Annexe C** Evaluation économique estimative

Annexe C.1 Evaluation économique estimative - Traitements mécaniques

Traitement mécanique									
	HAP < 250 mg/kg					HAP > 250 mg/kg			
	Actuel optimisé (> 8mm)		Optimisé sophistiqué (> 2mm)			Actuel optimisé (> 8mm)		Optimisé sophistiqué (> 2mm)	
<b>A Installation de traitement</b>									
Investissements	15 - 18 MIO CHF		25 - 35 MIO CHF (?)			15 - 18 MIO CHF		25 - 35 MIO CHF (?)	
Capacité considérée	200'000 t/an		200'000 t/an			200'000 t/an		200'000 t/an	
<b>Coût de revient estimé</b>	<b>15 - 20 CHF/t</b>		<b>30 - 50 CHF/t</b>			<b>15 - 20 CHF/t</b>		<b>30 - 40 CHF/t</b>	
<i>dont coûts fixes y.c amortissements</i>	75%		75%			75%		75%	
<i>dont coûts variables</i>	25%		25%			25%		25%	
<b>B Conditionnement / traitement / élimination fractions issues du traitement</b>									
	Coût CHF / t	% massique fraction concernée	coût CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	coût CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	coût CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	coût CHF / t entrante à traiter
B1 Reprise fraction fine, gravillon / sable + liant et valorisation pour construction routière	3 - 5	75% - 80%	2 - 4	30% - 35%	1 - 2				
B2 Traitement thermique fraction fine riche en liant contaminé en HAP	100 - 120					75% - 80%	75 - 96	30% - 35%	30 - 42
B3 Elimination boues	100 - 120	1%	1	1%	1	1%	1	1%	1
<b>TOTAL COUT DE TRAITEMENT</b>	<b>20 - 25 CHF/t</b>		<b>35 - 55 CHF/t</b>			<b>90 - 120 CHF/t</b>		<b>60 - 90 CHF/t</b>	
<b>C Recettes - vente matériaux secondaires / substitution matériaux primaires</b>									
	Valeur CHF / t	% massique fraction concernée	valeur CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	valeur CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	valeur CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	valeur CHF / t entrante à traiter
C1 Granulats minéraux	30 - 40	20% - 25%	6 - 10	65% - 70%	20 - 28	20% - 25%	6 - 10	65% - 70%	20 - 28
C2 Fraction gravillon/sable/filler/liant	40 - 70	75% - 80%	30 - 50						
C3 Fraction sable/filler riche en liant	70 - 120			30% - 35%	21 - 42				
<b>TOTAL RECETTE</b>	<b>40 - 60 CHF/t</b>		<b>40 - 70 CHF/t</b>			<b>6 - 10 CHF/t</b>		<b>20 - 30 CHF/t</b>	
<b>BILAN ECONOMIQUE TOTAL</b>	<b>15 - 40 CHF/t</b>		<b>-10 - 40 CHF/t</b>			<b>-110 - -80 CHF/t</b>		<b>-70 - -30 CHF/t</b>	

Annexe C.2 Evaluation économique estimative - Traitements chimiques / mixtes

Traitement chimique / mixte									
	Traitement aux solvants					Traitement par biosolvant			
	HAP < 250 mg/kg		HAP > 250 mg/kg			HAP < 250 mg/kg		HAP > 250 mg/kg	
<b>A Installation de traitement</b>									
Investissements	16 MIO CHF (?)					15 - 30 MIO CHF (??)			
Capacité considérée	50'000 t/an					50-100'000 t/an			
<b>Coût de revient estimé</b>	<b>50 - 70 CHF/t</b>					<b>50 - 70 CHF/t (?)</b>			
dont coûts fixes y.c amortissements	75%					75% (?)			
dont coûts variables	25%					25% (?)			
<b>B Conditionnement / traitement / élimination fractions issues du traitement</b>									
	coût CHF / t	% massique fraction concernée	coût CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	coût CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	coût CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	coût CHF / t entrante à traiter
B1 Traitement thermique fraction fine riche en liant contaminé en HAP	100 - 120			5% - 10%	5 - 12			10% - 20%	10 - 24
<b>TOTAL COUT DE TRAITEMENT</b>		<b>50 - 70 CHF/t</b>		<b>55 - 80 CHF/t</b>		<b>50 - 70 CHF/t</b>		<b>60 - 90 CHF/t</b>	
<b>C Recettes - vente matériaux secondaires / substitution matériaux primaires</b>									
	Valeur CHF / t	% massique fraction concernée	valeur CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	valeur CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	valeur CHF / t entrante à traiter	% massique fraction concernée	valeur CHF / t entrante à traiter
C1 Granulats minéraux	30 - 40	90% - 95%	27 - 38	90% - 95%	27 - 38	90% - 95%	27 - 38	80% - 90%	24 - 36
C2 Liant ou fraction riche en liant	120 - 300	5% - 10%	6 - 30			5% - 10%	6 - 30		
<b>TOTAL RECETTE</b>		<b>30 - 70 CHF/t</b>		<b>30 - 40 CHF/t</b>		<b>30 - 70 CHF/t</b>		<b>25 - 35 CHF/t</b>	
<b>BILAN ECONOMIQUE TOTAL</b>		<b>-40 - 20 CHF/t</b>		<b>-50 - -20 CHF/t</b>		<b>-40 - 20 CHF/t</b>		<b>-70 - -20 CHF/t</b>	