

LENVI2119 : Stage Professionnel

VERSION PUBLIQUE

Elaboration, mise en place et suivi de chantiers de dépollution de sols
par désorption thermique

Rapport de stage présenté par
Makoudi Maël

en vue de l'obtention du grade de master en
Sciences et gestion de l'environnement

Maitre de Stage
Nathalie Kruyts

Accompagnateur local
Jonathan de Grunne

Lecteur
Yannick Agnan

Remerciements

Je remercie tout particulièrement Jonathan de Grunne, qui a pu m'accueillir et me guider à mon arrivée chez Haemers Technologies. Son expérience et son soutien m'ont été d'une grande aide au cours de ces 6 mois de stage.

Je remercie également ma Maitre de stage, la Professeure Nathalie Kruyts, qui a su faire preuve de patience et d'indulgence envers moi. Ses bons conseils et son expertise m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie toute l'équipe de NOH d'avoir rendu facile de me lever chaque jour pour aller travailler. La bonne humeur et l'ambiance au sein de la boîte ont rendu mes journées de stage particulièrement agréables.

Je remercie également Aurélien, Willian, Christian, Achal, Raph et le reste de l'équipe de Singapour, pour tous les moments passés sur le terrain, tout le savoir qu'ils ont pu me transmettre et la solidarité dont ils ont fait preuve dans les moments difficiles.

Je remercie l'équipe du projet au Vietnam, Aline, Jo, Mathieu et Alex pour toute la sueur qu'ils ont fait couler en ma compagnie. Une pensée toute particulière à Tchi Tcho dont la bonne humeur et le dynamisme ont été le véritable moteur de notre travail sur place.

Un grand merci également à Pierre, sans qui nous n'aurions pas pu aller jusqu'au bout de notre travail de recherche.

Finalement, je remercie le professeur Yannick Agnan qui a accepté d'être le lecteur et juge du fruit de mon travail.

Résumé du rapport

Le présent rapport de stage s'inscrit dans le cadre du Master en Sciences et Gestion de l'Environnement proposé à l'UCLouvain. Il se base sur la réalisation d'un stage de 6 mois au sein de Haemers Technologies S.A., entreprise spécialisée en technologies de désorption thermique, et le développement d'une problématique spécifique : *l'Etude de la dépollution des sols par l'application de la technologie de désorption thermique telle que développée par Haemers Technologies.*

Dans le **premier chapitre** du rapport est tout d'abord présentée la **méthodologie** appliquée pour répondre à la question de recherche. Celle-ci n'est autre que les bases théoriques de la technologie de désorption thermique développée par l'entreprise. Le principe est simple : un réseau de tubes de chauffe, placés dans la masse de terre polluée, transmet, par conduction, de l'énergie thermique au sol contaminé. L'augmentation de la température permet la volatilisation des contaminants, qui sont ensuite extraits via un réseau d'extraction (création de zones de dépressions).

Dans la suite de ce chapitre est présentée l'étude de la problématique, qui s'articule autour de trois projets réalisés dans le cadre du stage : deux projets pratiques de mise en œuvre, et un troisième projet de recherche réalisé au département de recherche et développement de l'entreprise. La fin du chapitre présente des résultats de projets antérieurs de dépollution menés par l'entreprise.

Le premier projet illustre l'application de la désorption thermique sous sa première forme de mise en œuvre, l'**ISTD**. Celle-ci consiste à ne pas excaver les terres polluées, et à placer *in situ* les réseaux de tubes de chauffages et d'extraction. Le projet en question, situé à Singapour, a pour but la dépollution de plus de 30 000 m² de terres polluées aux hydrocarbures, pour des profondeurs allant jusque 5 m.

Le deuxième projet illustre l'application de la désorption thermique sous sa deuxième forme de mise en œuvre, l'**ESTD**. Celle-ci consiste à excaver les terres, les placer sous formes de piles dans lesquelles sont insérées les réseaux de tubes de chauffe et d'extraction. Les piles sont généralement directement montées sur site. Le projet en question est un projet pilote situé au Vietnam, et consiste en la dépollution de 250 m³ de terres polluées au dioxines et furanes.

Le projet de recherche présente un moyen d'optimiser le bilan énergétique d'une pile thermique (de taille standard) telle qu'installée lors de l'application ESTD de la technologie. Il s'agit de la modélisation d'un système d'échangeurs de chaleurs à tubes coaxiaux. Il permet de récupérer l'énergie thermique contenue dans les gaz de combustion à la sortie des tubes de chauffe et de la transmettre à l'air d'appoint nécessaire à la combustion et injectée au niveau des brûleurs. Au vu des résultats de l'étude, la mise en place d'un tel système semble prometteuse tant sur le plan énergétique que financier. La récupération d'énergie réalisée permettrait ainsi de fournir près de 10 % des besoins énergétiques nécessaires à la chauffe, et de diminuer de manière significative les besoins de l'installation en carburant. Ce projet de recherche illustre d'une part la recherche perpétuelle de l'entreprise à optimiser ses procédés et montre d'autre part à quel point la problématique étudiée est complexe et soulève de nombreuses problématiques sous-jacentes.

Au travers de ces trois projets, et de la présentation des résultats de projets antérieurs, la technologie est présentée et son efficacité à atteindre un haut degré de décontamination dans certains cas bien précis est démontrée.

La fin du premier chapitre présente une **approche plus critique**. Cette dernière passe dans un premier temps par la définition du domaine d'applicabilité de la technologie (i.e. les contaminants traités et les types de sols compatibles). Les procédés ESTD et ISTD sont ensuite comparés et la question de la durabilité de la désorption thermique est finalement abordée.

Un **deuxième chapitre** présente les acquis et enseignements tirés de la réalisation du stage, que ce soit au niveau des « soft skills » et « hard skills », et autre enseignement personnel acquis par l'étudiant. Le rapport se clôture finalement sur un **troisième chapitre**, qui contient quelques suggestions destinées à l'organisation d'accueil.

Summary of the report

This internship report is part of the Master in Environmental Sciences and Management organized at UCLouvain. It is based on the completion of a 6-month internship within Haemers Technologies SA, a company specializing in thermal desorption technologies and on the development of a specific issue: *Study of soil remediation through the application of thermal desorption technology as developed by Haemers Technologies*.

The **methodology** applied to answer the research question is presented in the **first chapter** of the report, this being the theoretical bases of the thermal desorption technology developed by the company. The principle is indeed simple: a network of heating tubes placed in the polluted earth mass passes on thermal energy by conduction to the contaminated soil. The temperature increase allows the volatilization of contaminants which are then extracted through an extraction network (creation of depression zones).

The issue's study is presented in the continuation of the chapter and focuses on three projects carried out during the internship: two practical implementation projects and a third research project carried out in the company's research and development department. The end of the chapter presents the results of previous remediation projects conducted by the company.

The **first project** illustrates the application of thermal desorption in its first implementation form, **ISTD**. This consists in not excavating polluted soil and in placing heating and extraction tubes networks *in situ*. The project itself is located in Singapore and aims to clean up more than 30,000 m² of soil polluted with hydrocarbons, to depths of up to 5 m. The **second project** illustrates the application of thermal desorption in its second implementation form, **ESTD**. This consists in excavating soil and placing it in piles in which the heating and extraction tubes networks are inserted. Most of the time the piles are assembled on site. The project itself is a pilot project located in Vietnam and consists in remediation of 250 m³ of soil polluted with dioxins and furans.

The research project represents a way to optimize the energy balance of a thermal pile (of standard size) as installed during the ESTD application of the technology. This is the modeling of a coaxial tubes heat exchanger system. It makes it possible to recover thermal energy contained in the combustion gases at the outlet of heating tubes and to transmit it to the make-up air necessary for combustion and injected into the burners. Considering the study's results, the implementation of such a system seems promising both in energy and financial terms. The energy recovery achieved would thus provide nearly 10% of energy needs for heating and significantly reduce the fuel installation's needs. On one hand this research project shows the company's constant search to optimize its methods and on the other hand illustrates how complex the problematic studied is and raises many underlying issues.

Through these three projects and the result's presentation of previous projects, the technology is presented and its efficiency in achieving a high degree of remediation in certain specific cases is demonstrated. The next section of the chapter details a more critical approach which addresses among other things the question of types of pollutants effectively removed, which compares ESTD and ISTD processes and finally addresses the question on durability of thermal desorption.

The end of the first chapter displays a **more critical approach**. The latter starts with defining the field of applicability of the technology (i.e. the contaminants treated and the types of compatible soil). The ESTD and ISDT processes are then compared and the issue of thermal desorption durability is finally addressed.

A **second chapter** introduces the achievements and lessons learned from the internship's completion whether in terms of soft and hard skills and other personal education acquired by the student. The report eventually ends with a **third chapter** which contains some suggestions for the host organization.

Table des matières

Remerciements.....	ii
Résumé du rapport.....	iv
Summary of the report.....	vi
Lexique et Table des abréviations	x
Introduction	1
Chapitre 1 : Contenu du stage	5
1 Méthodologie	5
1.1 Technologie SMART BURNER™	5
1.2 Mise en œuvre	6
2 Présentation de l'étude et des résultats.....	7
2.1 Projet de remédiation ISTD	7
2.1.1 Description de la technologie ISTD	7
2.1.2 Spécificités du projet	8
2.1.3 Rôles sur place	8
2.2 Projet de remédiation ESTD	10
2.2.1 Description de la technologie ESTD (pile thermique)	10
2.2.2 Spécificités du projet	11
2.2.3 Rôles sur place	12
2.3 Projet de recherche- Optimisation de bilan énergétique en ESTD.....	13
2.3.1 Présentation du projet de recherche.....	13
2.3.2 Présentation des systèmes envisagés	14
2.3.3 Modélisation	15
2.3.4 Résultats de la modélisation	17
2.3.5 Conclusion de l'étude	17
2.4 Résultats de projets antérieurs.....	19
3 Analyse critique	21
3.1 Applicabilité- Contaminants traités.....	21
3.2 Comparatif des technologies ISTD et ESTD	22
3.2.1 Avantages et inconvénients communs aux deux technologies	22
3.2.2 Tableau comparatif des technologies ISTD et ESTD	24
3.3 Evaluation de la durabilité du procédé.....	26
3.3.1 Définition de la durabilité	26
3.3.2 Le concept de la durabilité appliqué à la désorption thermique	28
Chapitre 2 Analyse des acquis du stage.....	31
Chapitre 3 Suggestions à l'institution d'accueil.....	35
Conclusion.....	37
Table des illustrations et liste des tableaux	39
Table des illustrations	39
Liste des tableaux	39
Liste des références bibliographiques	40

Annexe 1 : Calendrier de stage	41
Annexe 2 : Calendrier des contacts avec la maître de stage UCL.....	44
Annexe 3 : Liste des différents « stake holders » contactés	45

Lexique et Table des abréviations

HT	Haemers Technologies
SMART BURNER™	Procédé du traitement par désorption thermique, procédé inventé par HT.
ESTD	Ex-Situ Thermal Desorption : traitement par désorption thermique de terres excavées. Ces terres excavées prennent alors la forme d'une pile trapèze.
ISTD	In-situ Thermal Desorption : traitement par désorption thermique des terres sur site, sans excavation.
Bruleur	Élément composé d'un injecteur gaz, une électrode et un système de régulation. Le bruleur crée et maintient une combustion dans le tube de chauffe.
Air primaire	Air d'appoint pour la combustion du bruleur. Un apport en excès d'air est nécessaire pour la bonne combustion, pour éviter une présence trop importante de CO.
Tube de chauffe	Ensemble de 2 tubes concentriques utilisés pour le chauffage du sol.
Tube vapeur :	Tube perforé utilisé pour l'extraction de la vapeur produite dans le sol.
Tube Thermocouple	Tube mesurant la température dans une pile ESTD à plusieurs profondeurs.
Points froids	Points dans la terre à traiter les plus éloignés des tubes de chauffe/échangeurs.
Points chauds	Points dans la terre à traiter en contact avec les tubes de chauffe/échangeurs.
Hot Sampling	Procédé d'échantillonnage de terres en fin de traitement pour s'assurer de l'atteinte des objectifs de dépollution.
Hydrocarbure/CxHy	Composé d'hydrogène et de carbone.
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.
SVE	Soil Vapor Extraction : système d'extraction des vapeurs du sol. Il comprend également l'unité de traitement des vapeurs polluées.
Technologie Reburn	Technologie qui consiste à renvoyer les vapeurs de polluants combustibles extraites vers la flamme du bruleur, et ainsi les traiter (destruction des polluants) tout en diminuant les besoins énergétiques du procédé.
PEP	Project Execution Plan : Document destiné au client présentant le projet de dépollution, et détaillant la manière dont seront réalisés les travaux de dépollution.

Introduction

Du 9 septembre 2019 au 9 mars 2020, j'ai effectué un stage de 6 mois au sein de l'entreprise Haemers Technologies S.A., entreprise spécialisée en technologies de désorption thermique, basée sur la chaussée de Vilvoorde à Bruxelles.

La réalisation de ce stage s'inscrit dans le cadre du Master en Sciences et Gestion de l'Environnement de l'UCLouvain et avait pour objectif d'impliquer l'étudiant dans les étapes menant à la résolution d'une problématique environnementale que se pose l'institution d'accueil. Le but était que la collaboration entre l'étudiant et l'entreprise fasse l'objet d'une réelle synergie et conduise l'étudiant à mettre en pratique les connaissances théoriques acquises en suivant les cours du Master. La réalisation du stage avait également pour objectif de mettre en valeur le caractère interdisciplinaire du Master, et de donner à l'étudiant l'occasion d'entrer en contact avec les différentes « parties prenantes » (stakeholders) concernées par la problématique du stage.

Haemers Technologies étant une entreprise à finalité environnementale, le but même de son existence, à savoir mener à bien des projets de dépollution de sols par l'application de la technologie de désorption thermique qu'elle a développée, n'est autre que la problématique environnementale principale que se pose quotidiennement l'entreprise.

Ainsi, la **problématique environnementale étudiée** au travers de la réalisation de mon stage et du présent rapport peut s'écrire de la sorte :

Etude de la dépollution des sols par l'application de la technologie de désorption thermique telle que développée par Haemers Technologies.

Le rapport présentera

- i) Le **contenu du stage** : Un rappel de la problématique étudiée, la méthodologie utilisée pour répondre à cette problématique, la présentation de l'étude (aux travers des différents projets réalisés) ainsi qu'une analyse plus critique de la technologie, son caractère durable et les conditions d'applicabilité de cette dernière ;
- ii) Une **analyse des acquis du stage** ;
- iii) Des **suggestions à l'institution d'accueil**.

Présentation de l'entreprise

Haemers Technologies est une entreprise innovante dans le secteur de la dépollution des sols. Créée en 2015, elle compte sur l'expertise de plus de 30 ans de ses fondateurs Jan Haemers et Hatem Saadaoui. Basée à Bruxelles en Belgique, elle compte en 2020 une cinquantaine d'employés.

L'activité de HT est articulée autour de 7 pôles : Administration, Marketing, Operation Support, Customer Support, Engineering (Bureau d'Etudes), Innovation (R&D), Instrumentation & IT (Informatique).

HT a de nombreux brevets à son actif et dépollue des sols par désorption thermique à l'aide de sa technologie **SMART BURNER™**. Actuellement, HT a des projets en Belgique, France, Italie, Groenland, Singapour et Vietnam.

Comme pour les traitements par désorption thermique conventionnels, les terres contaminées sont

d'abord chauffées à une température suffisante pour que les polluants volatils et semi-volatils s'évaporent (phase de désorption). Ces polluants, une fois en phase vapeur, sont extraits par aspiration et sont soit détruits ou recyclés sur place, soit récupérés sous forme de produits et traités hors site.

Le procédé SMART BURNER™ représente la dernière génération de traitement par désorption thermique on-site et in-situ. Il est basé sur deux principes fondamentaux :

- Le sol est chauffé par conduction, ce qui permet de s'affranchir des hétérogénéités inhérentes au sous-sol.
- Les polluants contenus dans les terres sont soit récupérés et recyclés, soit réutilisés comme source de chaleur, contribuant très favorablement au bilan énergétique du procédé.

La technologie SMART BURNER™ a été conçue de manière à pouvoir être appliquée in-situ (sans excavation- **ISTD**) ou ex-situ (avec excavation mais sur le site même- **ESTD**).

Vue d'ensemble du déroulement du stage

On peut découper le déroulement du stage en 3 phases distinctes.

La première partie comporte l'étude des différents aspects théoriques de la désorption thermique, ainsi que les spécificités de la technologie telle que proposée par Haemers Technologies. Elle comprend également les formations pratiques concernant la mise en marche et de réglage de la technologie que j'ai pu suivre, ainsi que des formations concernant la sécurité et les différents aspects à risque de la technologie.

La deuxième phase s'est déroulée au sein du bureau d'étude et du département de recherche et développement. J'y ai pu prendre part à différents projets de recherches ainsi qu'à la participation à la réalisation de différentes offres techniques, **PEPs** (Projects Execution Plan) et à la transmission d'autres documents et informations aux différents stake holders impliqués dans les nombreux projets en cours chez Haemers Technologies.

La troisième phase consiste en une mise en application des différents concepts théoriques, en me rendant sur le site de différents projets afin de participer à leur bon déroulement.

Ainsi, le 8 novembre, j'ai finalement été envoyé à Singapour pour un premier projet de décontamination (terres polluées aux hydrocarbures). Le rôle de Haemers Technologies au sein de ce projet est d'apporter les connaissances scientifiques, technologiques et techniques nécessaires au bon déroulement du projet. Mon rôle a donc été, au sein d'une équipe, d'assurer la bonne mise en œuvre du design proposé par **HT**, d'imaginer et proposer des solutions aux différents problèmes rencontrés et de communiquer avec les différents stake holders impliqués.

Le 27 janvier, j'ai quitté Singapour pour me rendre sur un projet au Vietnam. Ce projet consiste en la décontamination de 250 m³ de terres polluées à la dioxine et aux furanes. Il s'agit là d'un projet pilote pouvant éventuellement mener à une dépollution à plus grande échelle. Pour ce projet, Haemers Technologies est à la fois le concepteur et opérateur du projet. Mon rôle là-bas était donc plus technique et dépassait le stade de supervision puisque nous avons dû également monter et mettre en place la technologie (le « scope of work » de la campagne dépend des différents projets).

Principales références aux connaissances théoriques acquises durant les cours

Le poste d'Assistant Ingénieur Projet (poste que j'ai pu assumer pendant la durée du stage) requiert la participation à la modélisation des projets (engineering : génie des procédés, thermodynamique, mécanique, environnement), à la rédaction de manuels opératoires ainsi qu'au suivi de traitement d'un chantier. La réalisation du stage a fait, entre autres, appel aux connaissances acquises lors des cours de Pollution de l'environnement- LENVI2012 – et plus particulièrement la partie dépollution des sols, Méthodes d'évaluation et de gestion environnementale- LENVI2011, Risques technologiques majeurs en industrie- LMECA2645, Atelier en communication- LENVI2004. Les compétences développées au travers de ce dernier cours ont notamment été utiles dans la mise en place de dialogues appropriés avec les équipes de terrains.

Caractère interdisciplinaire de la problématique

Outre un certain nombre d'aspects scientifiques (chimie des sols, thermodynamique, procédés de séparation), la problématique concerne également des disciplines plus techniques (génie des procédés, modélisation des installations, gestion de risques). De plus, la dépollution des sols s'inscrit dans un cadre juridique qu'il convient de connaître et de respecter, et tout projet de dépollution de sol passe par des aspects plus économiques, tels que la réalisation de budgets et d'offres techniques. La problématique soulève également des aspects plus pratiques, telle que la mise en place et le suivi des chantiers. Finalement, la gestion et la communication sont également importantes, notamment au travers du contact client, de la rédaction de rapports de suivi et du management d'équipes de terrains.

Chapitre 1 :

Contenu du stage

La problématique étudiée par la réalisation du stage est la dépollution de sols contaminés par l'application la technologie de désorption thermique telle que conçue par Haemers Technologies S.A. La présente section vise dans un premier temps à présenter la méthodologie utilisée pour répondre à cette problématique, c'est-à-dire les bases théoriques de la désorption thermique et de la technologie SMART BURNER™ et des différents aspects spécifiques de son application. Dans un deuxième temps sera présentée l'étude de la problématique en question, au travers des différents projets sur lesquels j'ai eu l'occasion de travailler pendant la durée du stage. Dans un troisième temps sera développée une analyse plus critique de la problématique, comprenant notamment un comparatif des différentes technologies utilisées par Haemers Technologies ainsi qu'une étude du caractère durable des conditions d'applicabilité de la désorption thermique.

1 Méthodologie

1.1 Technologie SMART BURNER™

Le procédé consiste d'abord à placer, selon un maillage prédéfini, un réseau de tubes de chauffe dans la masse de terres polluées à traiter, excavées ou non. Un schéma de principe de la technologie SMART BURNER™ est présenté à la Figure 1.

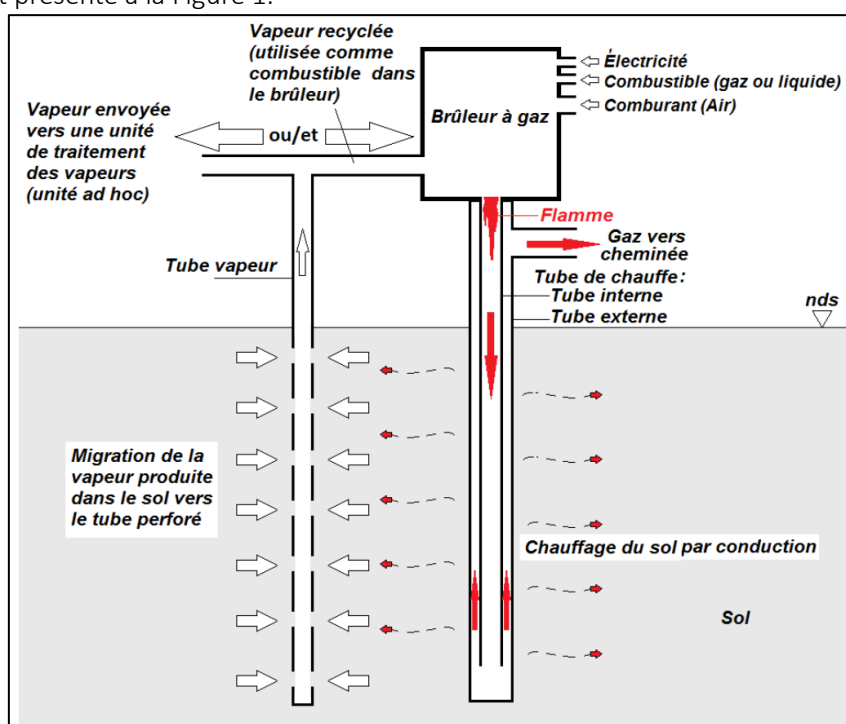


Figure 1 : SMART BURNER™ - Schéma de principe¹

Ces tubes de chauffe sont constitués de deux tubes coaxiaux en acier. Lors du fonctionnement de l'installation, les tubes coaxiaux (appelés **tubes de chauffe**) sont parcourus par des gaz à haute

¹ Schéma réalisé par HT.

température (700-750°C), résultant de la combustion de carburants avec un excès d'oxygène, en provenance d'un **bruleur** situé à l'extrémité du tube en surface.

Ces gaz circulent dans les tubes de chauffe et transmettent leur chaleur par conduction au sol sans jamais y pénétrer : les gaz chauffants restent à l'intérieur des tubes. Ce transfert de chaleur au sol par conduction provoque la vaporisation des polluants volatils et semi-volatils. Un tube supplémentaire (appelé **tube vapeur**) perforé permet la récupération des vapeurs polluées.

Les polluants sont désorbés grâce à la montée progressive en température de la masse de terres polluées. Ils migrent vers les tubes perforés séparés mis en dépression et sont collectés à la surface. Ce transfert se fait par diffusion et convection. En surface, ces flux sont soit dirigés vers la flamme du bruleur à proximité (pour les polluants combustibles- **technologie reburn**), soit acheminés vers une unité de traitement ad hoc (appelée **SVE**).

Le réseau de bruleurs et ses éléments chauffants est placé en configuration triangulaire équilatérale (voir Figure 2). Cette configuration permet d'avoir un rayon d'action constant pour chaque élément chauffant et donc un temps de traitement prévisible pour l'ensemble de la zone.

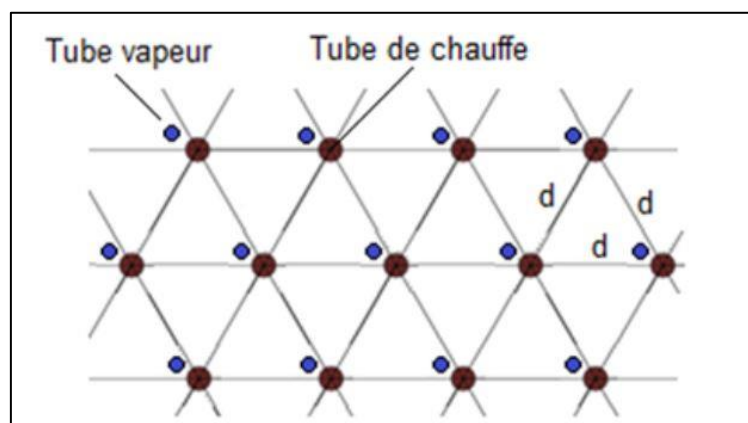


Figure 2: Configuration en triangles équilatéraux (tubes de chauffe/ tubes vapeur)²

1.2 Mise en œuvre

La mise en œuvre de la technologie s'effectue selon deux configurations, sélectionnées en fonction des caractéristiques du projet : excavation possible ou non, présence ou non d'une nappe phréatique, profondeur de la pollution, etc.

- **ISTD**, de l'anglais In Situ Thermal Desorption. Cette méthode consiste à réaliser le traitement sans excaver les terres, ou uniquement de manière partielle dans certains cas pour des raisons d'optimisation (profondeurs variables de la pollution).
- **ETSD**, de l'anglais Ex Situ Thermal Desorption. Il s'agit dans ce cas d'excaver les terres et de les traiter en piles, sur le site même ou sur un autre site.

² Schéma réalisé par HT.

2 Présentation de l'étude et des résultats

L'étude de la problématique s'est faite autour des trois projets principaux sur lesquels j'ai eu l'occasion de travailler au cours de mes 6 mois de stages chez Haemers Technologies. Ils seront présentés dans cette section :

- **Projet de remédiation par ISTD** : sols contaminés aux hydrocarbures variés (principalement des hydrocarbures polycycliques aromatiques tels que le naphtalène). (Singapour)
- **Projet de remédiation par ESTD** : sols contaminés aux dioxines et furanes. (Vietnam).
- **Projet de recherche** : Optimisation de bilan énergétique en ESTD - récupération d'énergie des gaz de combustion.

Ainsi, les deux premiers projets présentés permettront d'aborder les deux méthodes de mise en œuvre de la technologie de désorption thermique de l'entreprise (à savoir ISTD et ESTD). Le troisième projet présenté est un projet de recherche, et permet d'illustrer la volonté de l'entreprise à sans cesse se renouveler et optimiser ses procédés.

Les projets de remédiation par désorption thermique (procédé SMART BURNER™) étant des projets de grande envergure, qui demandent temps et grande mobilisation de moyens, je n'ai pu les voir être menés à leur terme durant la période de stage. Ainsi, les résultats de projets antérieurs préalablement réalisés seront également présentés dans cette section.

2.1 Projet de remédiation ISTD

Le projet porté par HT à Singapour consiste en l'application de la technologie ISTD dans le but de mener à la dépollution de terres contaminées (dans le cas présent aux hydrocarbures). Il est également l'occasion d'investiguer plus en profondeur ladite technologie.

Dans cette section, la technologie ISTD sera d'abord décrite afin de permettre au lecteur de l'appréhender correctement. Ensuite, les spécificités du projet ainsi que les rôles que j'ai pu endosser sur place seront détaillés.

2.1.1 Description de la technologie ISTD

L'ISTD consiste à appliquer la technologie SMART BURNER™ (cfr section 1.1) sans devoir excaver ou déplacer les terres. Ainsi, il devient possible de dépolluer les sols même difficiles d'accès, tels que sous un bâtiment existant.

Les éléments chauffants peuvent être placés verticalement (pour des profondeurs importantes, allant jusqu'à 15 m) ou horizontalement selon les impératifs de la situation. La Figure 3 présente un exemple d'application de la technologie ISTD, tubes de chauffe placés à la verticale, dans un bâtiment (projet réalisé à Bruxelles).

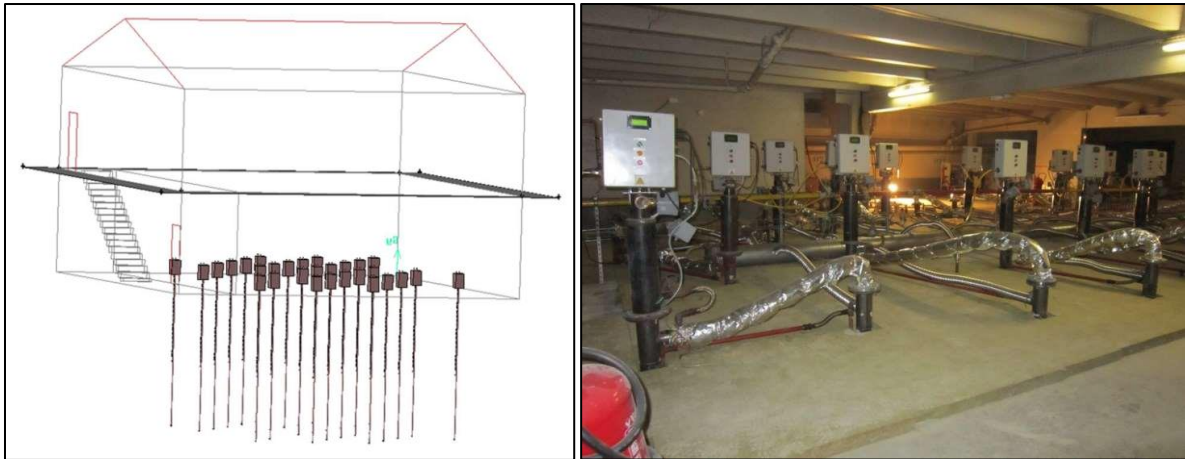


Figure 3 : Exemple d'application de la technologie ISTD, tubes de chauffe placés à la verticale, dans un bâtiment (projet réalisé à Bruxelles)³

La mise en œuvre se déroule en plusieurs étapes :

- Forage des puits à la profondeur de la pollution ;
- Installation des éléments chauffants, des tubes vapeur et des thermocouples/tubes pression, dans les puits ;
- Placement d'une couche de propreté en béton sur toute la zone traitée ;
- Installation des brûleurs ;
- Installation des circuits aériens (carburant, électricité, réseau d'échappement, instruments de suivi, ...) ;

2.1.2 Spécificités du projet

La présente section présente une version abrégée des spécificités du projet. Celles-ci étant plus explicitement décrites dans la **version confidentielle** du rapport.

Le projet est situé à Singapour, sur le site d'une ancienne usine à gaz, désaffectée depuis la fin des années 90. Les sols pollués, principalement aux hydrocarbures polycycliques aromatiques (**HAP**), s'étendent sur une aire d'environ 30 000 m², à des profondeurs qui varient selon la localisation, pouvant atteindre cinq mètres par endroits.

2.1.3 Rôles sur place

Le rôle de **HT** sur ce projet est celui d'expert et détenteur de la technologie de désorption thermique SMART BURNER™. Ainsi, **HT** fournit les connaissances théoriques et techniques nécessaires afin de mener à bien le projet de dépollution, et apporte son assistance d'expert tout au long du projet. Le rôle d'**HT** au sein du projet comprend donc :

- Le design de la technologie ;
- La production de plans techniques ;
- La supervision et assistance lors de l'installation (afin de ne pas dévier des conditions d'applicabilité de la technologie) ;
- La formation d'équipes d'opérateurs ;

³ Schéma et photo réalisés par HT.

- La participation à la réflexion collective sur l'avancement du projet (en collaboration avec les différents « stakeholders » impliqués dans le projet) ;
- La supervision des opérateurs et l'assistance durant la phase de traitement ;
- Le monitoring de l'installation et de l'état d'avancement de la décontamination ;
- La production régulière de rapports d'avancement et de monitoring ;
- La proposition de solutions aux différents challenges et situations se présentant tout au long du projet (notamment concernant la mitigation des nuisances) ;

Mon rôle, en tant que membre de l'équipe **HT** présente sur place, a été d'apporter mon assistance sur l'ensemble des points présentés ci-dessus. J'ai pu ainsi effectuer des tâches extrêmement variées au cours des trois mois que j'ai passés sur place.

2.2 Projet de remédiation ESTD

Le projet auquel j'ai pu participer, porté par HT au Vietnam, consiste en l'application de la technologie ESTD dans le but de mener à la dépollution de terres contaminées (dans le cas présent à la dioxine et aux furanes). Il est également l'occasion d'investiguer plus en profondeur ladite technologie.

Dans cette section, la technologie ESTD sera d'abord décrite afin de permettre au lecteur de l'appréhender correctement. Ensuite, les spécificités du projet ainsi que les rôles que j'ai pu endosser sur place seront détaillés.

2.2.1 Description de la technologie ESTD (pile thermique)

L'ESTD consiste à excaver les terres polluées et à les monter en une pile trapèze, en y insérant progressivement :

- Les **tubes de chauffe** connectés à des brûleurs (non représentés) qui chauffent la pile ;
- Les **tubes échangeurs** qui continuent la chauffe de la pile à partir de gaz chauds étant déjà passé par des tubes de chauffe. Chaque tube échangeur est connecté à trois tubes de chauffe ;
- Les **tubes vapeur** pour l'extraction des contaminants volatilisés ;
- Les **tubes thermocouples** pour le suivi des températures dans la pile ;
- Les **tubes pression** pour le suivi de la dépression dans la pile ;
- Les **tubes hot sampling** pour les échantillons de fin de traitement.

La Figure 4 présente deux étapes du montage d'une pile.

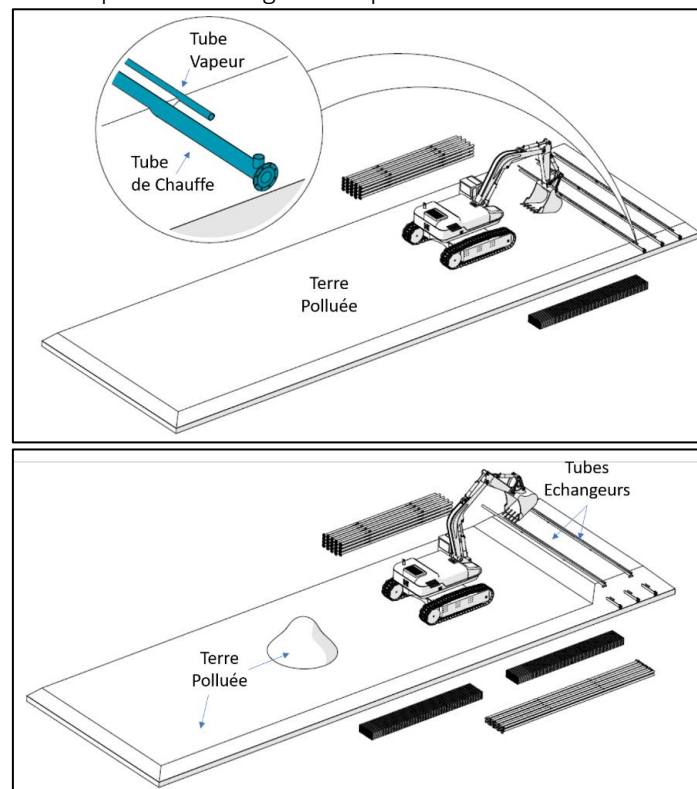


Figure 4: Montage d'une pile ESTD (2 étapes)⁴

⁴ Schémas réalisés par HT.

La Figure 5 présente le schéma d'une pile ESTD montée.

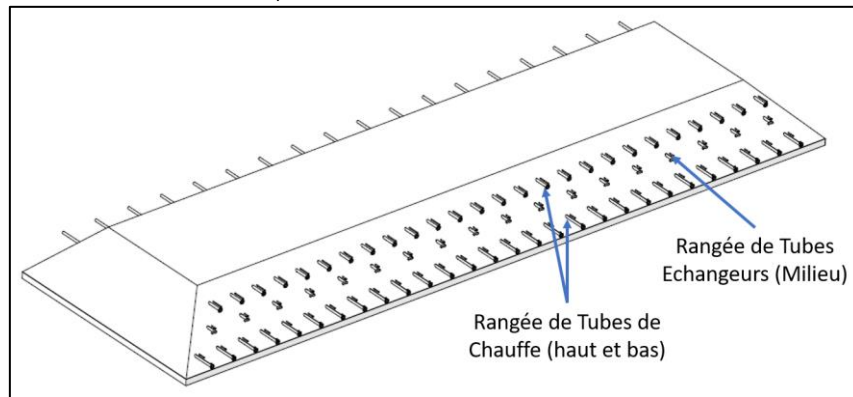


Figure 5 : Schéma d'une pile montée⁵

Une telle pile mobilise également durant toute la durée du traitement le matériel suivant :

- Un circuit d'évacuation des gaz de combustion à l'aide d'extracteurs (à côté de la pile) ;
- Des circuits de combustibles (généralement propane ou gaz naturel), circuit électrique
- Un circuit d'extraction des vapeurs polluées.
- Un isolant thermique et une couche de béton pour isoler la pile ;
- Un système de monitoring (thermocouples, un analyseur de gaz (CO, CO₂, ...) et un ordinateur équipé).

La Figure 6 présente un meilleur visuel d'une pile ESTD montée et de ses équipements essentiels.

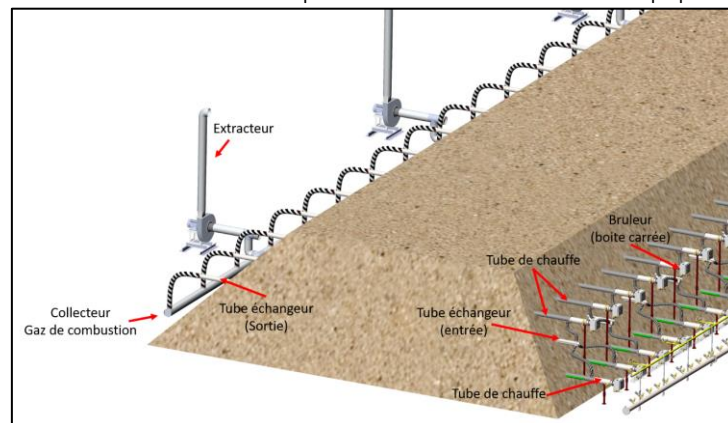


Figure 6: Pile ESTD montée et équipée⁶

2.2.2 Spécificités du projet

La présente section présente une version abrégée des spécificités du projet. Celles-ci étant plus explicitement décrites dans la **version confidentielle** du rapport.

Le projet est situé au Vietnam. Les sols sont pollués à la dioxine et aux furanes⁷, et représentent un volume de 250 m³ (il s'agit là d'un projet pilote, pouvant éventuellement mener à l'application de la technologie à plus grande échelle).

⁵ Schéma réalisé par HT

⁶ Schéma réalisé par HT

⁷ Les dioxines et furanes sont une famille des composés chimiques, considérés comme polluants organiques persistants (POP). Leur toxicité est variable, certains d'entre eux étant considérés hautement toxiques et

2.2.3 Rôles sur place

Pour ce projet, HT est à la fois concepteur et opérateur de la décontamination. Ainsi, son « scope of work » est plus large que pour le projet d'ISTD présenté dans la section précédente, et passe d'un rôle plus axé sur la supervision et l'expertise à un rôle comprenant à la fois le design, la construction et la mise en place de la technologie mais également l'opération de décontamination à proprement parler.

Ainsi, le rôle d'HT au sein du projet comprend donc :

- Le design de la technologie ;
- La production de plans techniques ;
- L'installation de la technologie ;
- La gestion de l'avancement du projet ;
- La phase de traitement ;
- Le monitoring de l'installation et de l'état d'avancement de la décontamination ;
- La production régulière de rapports d'avancement et de monitoring ;
- La mise en place de solutions aux différents challenges et situations se présentant tout au long du projet (notamment concernant la mitigation des nuisances) ;

cancérogènes. Cette toxicité, allié à leur caractère persistant, en font des substances particulièrement dangereuses. [17]

2.3 Projet de recherche - Optimisation de bilan énergétique en ESTD

Cette section présente un projet de recherche sur lequel j'ai eu l'occasion de travailler et de développer en collaboration avec Pierre Dienot, également stagiaire chez HT. La décision de le présenter au sein de ce rapport découle de 3 raisons principales :

- Cela permet d'illustrer la volonté de l'entreprise à sans cesse se renouveler et optimiser ses procédés ;
- Cela montre également que la problématique étudiée est complexe et soulève de nombreuses problématiques sous-jacentes (l'optimisation du bilan énergétique en ESTD étant l'une d'entre elles) ;
- Enfin, il s'agit d'un travail relativement conséquent que j'ai pu effectuer dans l'entreprise, et dont la présentation me tenait à cœur ;

Ainsi, la présente section présentera 1) le projet de recherche, 2) les systèmes envisagés 3) les hypothèses prises en compte lors de la modélisation des différents systèmes 4) les résultats et 5) analyse de l'implication de ces résultats. A noter que l'ensemble des résultats présentés sont le fruit d'un travail de modélisation.

A noter que la description du travail de recherche reprise dans les sections suivante ne reprend que les points essentiels au lecteur afin qu'il puisse visualiser le travail de recherche effectué. Les détails ne sont présentés que dans la **version confidentielle** de ce rapport.

2.3.1 Présentation du projet de recherche

L'objectif du projet de recherche était d'imaginer et d'étudier une manière d'améliorer le bilan énergétique d'une pile thermique (technologie ESTD). Pour se faire, le design de pile considéré est celui d'une pile standard, de 2000 m³, 75 brûleurs et 25 tubes échangeurs, alimentée en gaz naturel.

La pile est chauffée par des brûleurs au gaz nécessitant un apport d'air pour une bonne combustion. Actuellement, cet air est prélevé à l'atmosphère, en général à 25°C. L'introduction d'un air d'appoint frais (appelé **air primaire**) implique une perte énergétique constante dans la combustion qui pourrait être palliée par un préchauffage de celui-ci. En parallèle, les gaz de combustion, une fois passés par les tubes de chauffe et les tubes échangeurs, sortent actuellement à 300°C avant d'être refroidit sous la limite autorisée (perte d'énergie supplémentaire due au refroidissement de ces gaz). Ces gaz de combustion sont donc valorisables dans un circuit de récupération de chaleur pour préchauffer l'air d'appoint.

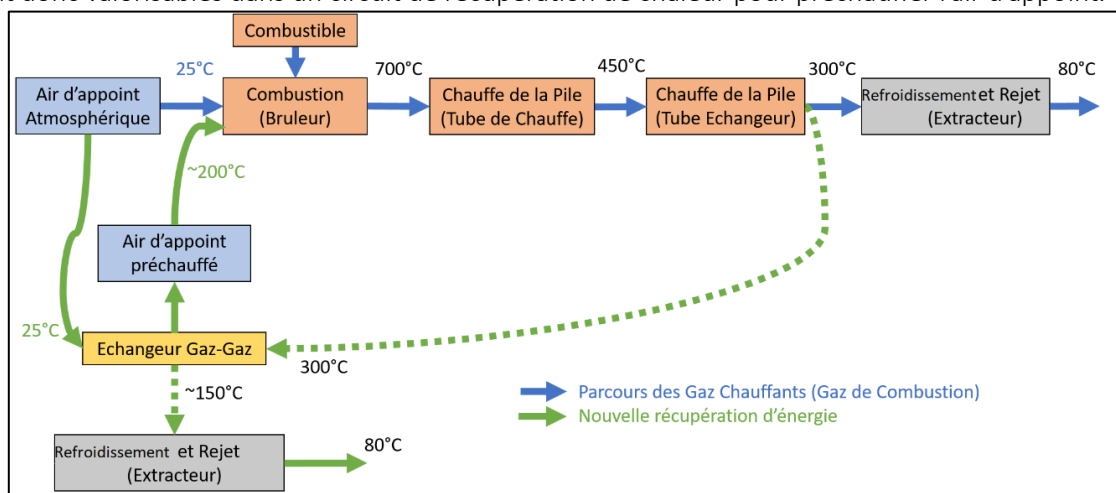


Figure 7 : Récupération d'énergie des gaz de combustion

La Figure 7 montre le parcours actuel des gaz de combustion et l'implémentation du nouvel échangeur. L'objectif est donc de concevoir ce circuit de récupération de chaleur et quantifier le gain énergétique et économique potentiel. Un calculateur Excel a été mis en place pour ce projet.

2.3.2 Présentation des systèmes envisagés

Les systèmes envisagés consistent en l'installation d'un échangeur de chaleur à tubes coaxiaux (Figure 8) à la sortie du collecteur des gaz de combustion (en dehors de la pile, venant des tubes échangeurs), permettant de valoriser l'énergie de ces gaz et de la transférer à l'air servant à la combustion des brûleurs (dans les tubes de chauffe).

Les configurations envisagées sont les suivantes⁸ :

- 1 : Echange de chaleur en contre-courant ;
- 2 : Echange de chaleur en co-courant ;

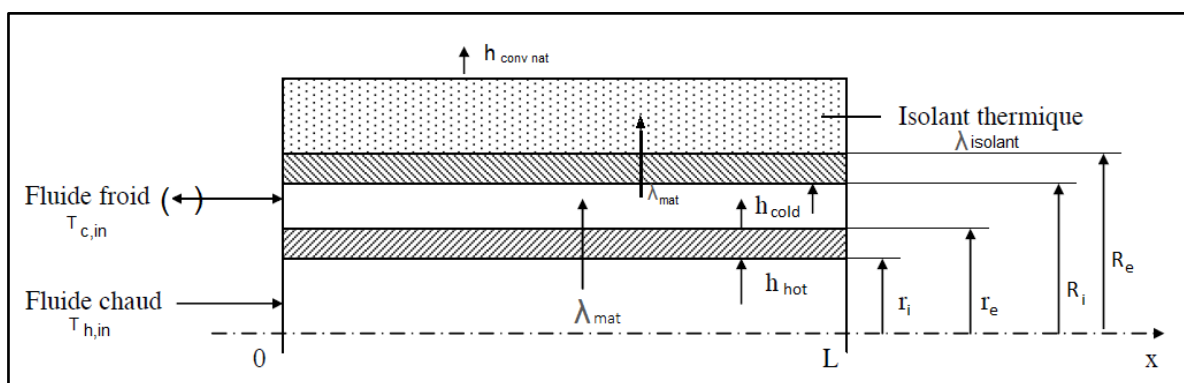


Figure 8: Géométrie de l'échangeur en (contre) co – courant

Les Figure 9 et Figure 10 représentent schématiquement les configurations étudiées afin de réaliser l'échange de chaleur en contre-courant et en co-courant. Chaque système comporte l'ajout de deux éléments par rapport à la configuration standard des piles :

- L'échangeur de chaleur, connecté à la sortie du réseau de collecte des gaz de combustion ;
- Un réseau de redistribution de l'air préchauffé depuis la sortie de l'échangeur vers les brûleurs.

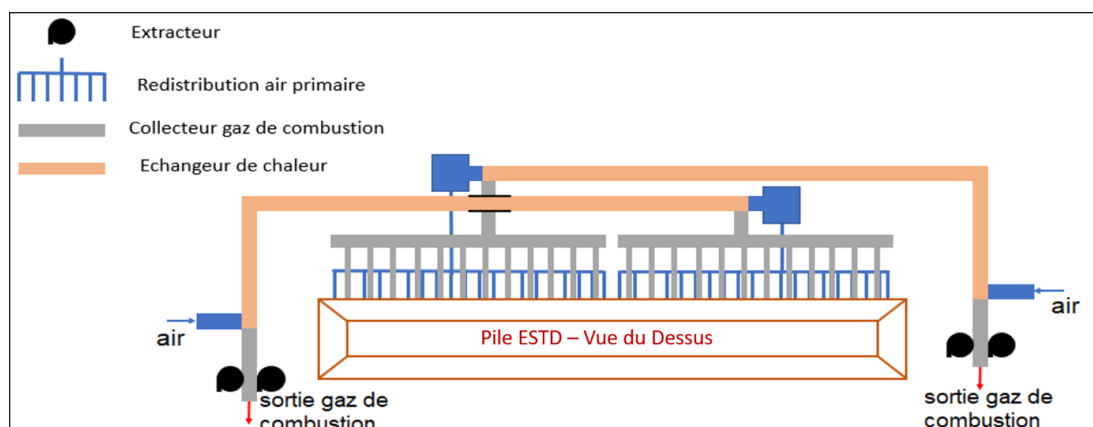


Figure 9: Représentation schématique de la configuration pour l'échange en contre-courant

⁸ Pour l'étude, le préchauffage d'un deuxième circuit d'air (appelé **air secondaire**) a également été considéré. Néanmoins, afin de garder ce rapport digeste, seuls les résultats de l'étude concernant l'**air primaire** seront présentés.

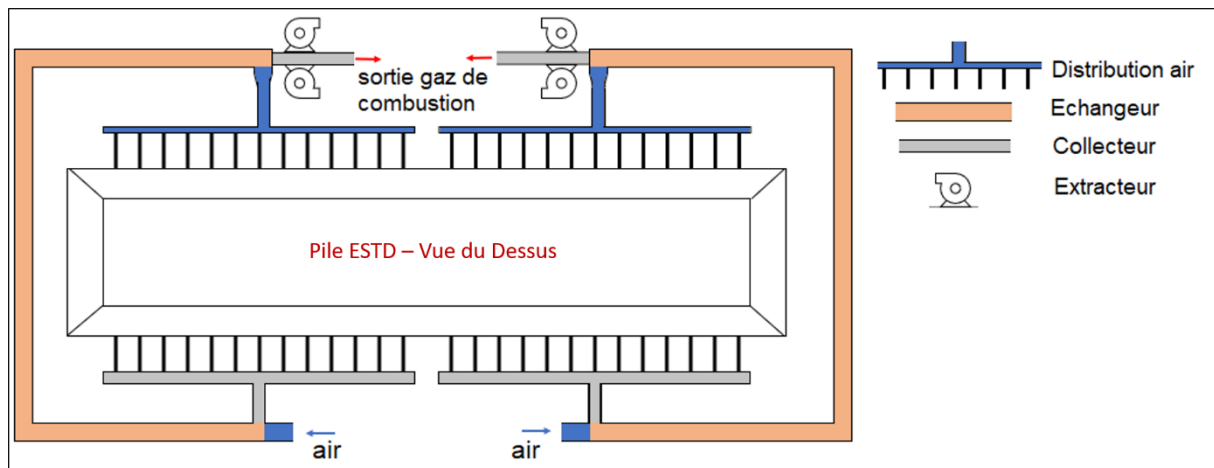


Figure 10: Représentation schématique de la configuration pour l'échange en co-courant

Chacun des cas étudiés nécessite la mise en place de deux échangeurs de chaleur par pile, qui récupèrent respectivement l'énergie contenue dans les gaz de combustion de 36 et 39 brûleurs (soit 75 au total). Avant la modélisation, on peut d'ores et déjà tirer quelques observations :

- Les configurations en co-courant permettent de mieux répartir l'encombrement matériel de part et d'autre de la pile ;
- Les configurations en contre-courant devraient permettre un échange de chaleur plus efficace.

La section suivante présente les résultats principaux de la modélisation des différentes configurations.

2.3.3 Modélisation

Cette section vise à présenter l'ensemble des hypothèses réalisées afin de pouvoir modéliser les systèmes.

a. Débits

La première étape de la modélisation est le calcul des débits du système. Les **deux entrées du système** sont le gaz naturel (méthane, butane ou propane) et l'arrivée d'air dite « **primaire** ». Le débit initialement nécessaire de gaz naturel est calculé en fonction de la puissance de chauffe désirée par brûleur. Le débit total d'air à injecter est calculé sur base de la stœchiométrie des réactions et d'une concentration cible de d'O₂ dans les gaz de combustion. Les débits d'air primaire et secondaire sont calculés de telle manière à ce que l'air primaire soit injecté avec l'excès spécifique nécessaire calculé par l'entreprise.

La **sortie du système** est l'ensemble des gaz de combustion, dont le débit est calculé par conservation de la matière. L'ensemble des débits est recalculé par calcul itératif sur base de l'énergie réinjectée dans le système par l'intermédiaire de l'air préchauffé.

b. Dimensions

Réseau de collecte

Les dimensions considérées pour le réseau de collecte des gaz de combustion suivent celles du réseau de collecte actuellement mis en place sur une pile de standard.

Echangeur de chaleur

Les dimensions considérées pour l'échangeur ont été fixées de manière à limiter les pertes de charge tout en conservant un rendement énergétique important.

Réseau de redistribution de l'air préchauffé

Cfr. version confidentielle.

c. Bilan énergétique [1]

Plusieurs éléments ont été pris en compte afin d'établir un bilan énergétique détaillé :

- La puissance thermique potentiellement récupérable, considérée comme :

$$P_{recup} = C_{p,m,hot} * \dot{M}_{hot} * \Delta T \quad [kW]$$

Où $C_{p,m,hot}$ [kJ/(kg.K)] est la capacité calorifique massique des gaz de combustion, $\dot{M}_{hot}$ [kg/h] est le débit massique des gaz de combustion et ΔT [K] est la différence entre la température des gaz de combustion à la sortie des tubes échangeurs et la température ambiante ;

- Les pertes thermiques sur le réseau de collection des gaz de combustion ;
- L'efficacité de l'échange entre les gaz chauds (gaz de combustion) et froids (air de combustion) ;
- Les pertes thermiques sur l'échangeur ;
- Les pertes thermiques sur le réseau de redistribution de l'air préchauffé.

Pour l'ensemble des transferts de chaleurs considérés, sont pris en compte :

- La température des fluides (profil exponentiel considéré pour le calcul des pertes de l'échangeur vers l'extérieur, profils linéaires considérés pour le reste) ;
- La vitesse et le type d'écoulement des fluides ;
- Les résistances en convection dans les fluides, conduction dans les solides (parois et isolant), et la convection naturelle de l'air ambiant ;
- Une isolation de 5 cm d'épaisseur pour l'ensemble des surfaces en contact avec l'air ambiant.

d. Pertes de charges [1]

Les pertes de charges calculées sont les pertes de charge supplémentaires qu'implique la mise en place du système par rapport à la situation normale. Leur calcul se base sur les hypothèses suivantes :

- Les pertes de charge dues à l'élévation sont négligées ;
- Les pertes de charges sur le réseau collecteur sont supposées identiques à la situation normale ;
- Les pertes de charges linéaires de friction sur une conduite de longueur L sont calculées comme ;

$$\circ \quad H = \rho f * L * \frac{v^2}{2 * D} * 10^{-5} [bar]$$

avec ρ [$\frac{kg}{m^3}$] la densité du fluide, L [m] la longueur de la section, v [m/s] la vitesse du fluide, D [m] le diamètre hydraulique et f le facteur de friction, calculé par la formule de Zigrang and Sylvester :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{13}{Re} \right) \right) \right]$$

Avec ε [m] la rugosité de la conduite et Re le nombre de Reynolds propre à la situation.

- Les pertes de charges singulières sont calculées comme :
 - $H = \rho F * \frac{v^2}{2} * 10^{-5} [bar]$ avec F un facteur qui dépend du type de singularité (coude, TE,...)⁹ ;

2.3.4 Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation sont présentés dans la **version confidentielle** du rapport. N'est laissée dans cette section que la structure initiale :

- a. Bilan énergétique
- b. Pertes de charges
- c. Etude de coûts

2.3.5 Conclusion de l'étude

Sur base des modélisations réalisées, on peut conclure que la mise en place d'un système de récupération d'énergie des gaz de combustion est prometteuse, tant sur le plan énergétique que sur le plan financier. La configuration étudiée la plus efficace en termes de récupération d'énergie est celle en contre-courant. La possibilité de mise en place d'un système d'échange en contre-courant dépend principalement de la place disponible (l'encombrement) du côté des brûleurs de la pile qui doit rester le plus dégagé possible pour le passage des superviseurs. Enfin, il ressort de l'étude de coût qu'au plus l'envergure du projet (pour lequel le système est envisagé) est importante, au plus il devient intéressant financièrement à appliquer.

Le modèle actuel présente bien sûr des limitations, notamment sur les points suivants :

- Affinement de la prise en compte de l'isolation. Pour l'instant une couche uniforme d'isolant est considérée pour l'ensemble des surfaces d'échange avec l'air ambiant (cas idéalisé). Il serait intéressant de prendre en compte les non-linéarités ;
- Les pertes thermiques sur le réseau de distribution à revoir en fonction de la géométrie des conduites sélectionnées.
- Un affinement du calcul de pertes de charges est possible afin de s'approcher davantage encore de la réalité ;
- Adaptation des dimensions du tube échangeur externe en fonction des disponibilités du marché ;
- Affinement de l'étude de coûts :
 - Affinement dans la sélection des éléments considérés ;
 - Main d'œuvre supplémentaire non prise en compte ;
 - (Autres dépenses éventuelles) ;
- Réalisation un modèle avec un échangeur tubulaire à calandre simple.

⁹ Issus de Jean-Louis Fanchon, Guide de Mécanique

Enfin, l'ensemble des résultats présentés sont le fruit d'un travail de modélisation. Il serait donc intéressant d'aller plus loin dans la démarche, et de récolter des données expérimentales par la mise en place d'un projet pilote.

Un dernier point qu'il est important de souligner est que la mise en place d'un tel système signifie l'introduction de nouveaux paramètres à prendre en compte lors du réglage de la technologie. Malgré l'intérêt que le projet suscite, il faut donc garder en tête qu'il n'est pas exempt de difficultés pratiques supplémentaires en termes de réglages. Il est dès lors d'autant plus important de passer par une phase de test (pilote) intermédiaire avant la mise en pratique à grande échelle.

2.4 Résultats de projets antérieurs

Comme précisé plus haut, les projets de remédiation par désorption sont des projets de grande envergure, relativement chronophage. Ainsi, les projets de l'entreprise auxquels j'ai participé n'ont pu être menés à leur terme au cours de mon stage. Cette section vise donc à présenter quelques résultats de projets antérieurs, afin d'illustrer la capacité de la technologie SMART BURNER™ à atteindre ses objectifs de décontamination.

Projet	Mise en Œuvre	Polluants	Concentration max initiale [mg/kg DM]	Objectif [mg/kg DM]	Résultats [mg/kg DM]
Sous-sol Bruxellois (rue des drapiers à Ixelles)- 2014. 66 m ³	ISTD	C10-C40	18 000	<300	< 51
Ancien site de stockage de pétrole à Kinkasi, Congo – 2014. 690 m ³	ESTD	TPH	65 000	<5000	<3660
Institut Saint-Joseph, Etterbeek – 2014 65 m ³	ISTD	HCT	2 000	< 300	< 300
Ecole internationale de Bruxelles (ISB) – 2014. 212 m ³	ISTD	TPH, BTEX, PAH	16 000 pour TPH	<300 pour TPH < 12 pour BTEX <0.8 pour PAH	< 50 pour TPH n.d. pour BTEX n.d. pour PAH
Milan, sous un bâtiment – 2016	ISTD	2016	3 000	<100	<100
Centrale électrique Danemark – 2016. 288 m ³	ISTD	Solvant chlorés	0,38	< 0.1	< 0.1
Sous-sols d'un bâtiment, quartier européen, Bruxelles – 2016. 700 m ³	ISTD	C10-C40, BTEX	18 000 pour C10-C40 10 pour BTEX	< 300 <10	< 310 < 0.1
Quartier résidentiel, Poggio San Lorenzo, Italie – 2017. 1024 m ³	ISTD	C10-C40	3170	< 50	< 50
Terrain privé résidentiel à Vedbaek, Danemark – 2017. 7257 m ³	ISTD	C10-C40	22000	<100	<20 pour une grande majorité des échantillons.
Raffinerie de Gela,	ISTD	HCT	18000	<750	<<750

Sicile – 2017 à aujourd’hui. 1 ^{er} batch= 1400 m ³ Total = 12800					
--	--	--	--	--	--

Les résultats ci-dessus montrent que l’application de la technologie SMART BURNER™ développée par Haemers Technologies a pu, à de nombreuses reprises déjà, prouver son efficacité et sa capacité à atteindre ses objectifs de décontamination.

A ce stade du rapport, la technologie a été présentée et son efficacité à atteindre un haut degré de décontamination dans certains cas bien précis a été démontrée. La suite du rapport détaillera une étude plus critique, qui abordera notamment la question des types de polluants efficacement éliminés, comparera les procédés ESTD et ISTD et finalement abordera la question de la durabilité de désorption thermique.

3 Analyse critique

Toute technologie, quel que soit le domaine concerné, comporte sa part d'avantages et d'inconvénients. Ainsi, il n'est pas possible d'étudier la problématique de la désorption thermique sans passer par une approche plus critique. Celle-ci sera développée dans cette section.

3.1 Applicabilité - Contaminants traités

La première question à se poser est celle de la détermination des types de polluants qui peuvent être traités par le procédé SMART BURNER™.

De manière tout à fait générale, le chauffage du sol conduit à des changements drastiques des conditions thermodynamiques, augmentant d'une part la mobilité des polluants, et menant éventuellement à l'apparition de mécanismes de destruction de ces polluants [2]. Ainsi, seront traités par désorption thermique les contaminants susceptibles d'être transférés en phase gazeuse ou sujets à des réactions de destructions dans les conditions induites par la technologie. Le Tableau 1 : Mécanismes de traitement thermique présente les principaux mécanismes de traitement thermique possibles et distingue les zones basse température (< 100 °C- début de traitement et/ou zones éloignées de tubes de chauffe) et les zones hautes températures (>100 °C- phase de traitement avancée et/ou zones proches des tubes de chauffe).

Pour $T \leq 100^\circ\text{C}$ [3]	Pour $T > 100^\circ\text{C}$
• Évaporation • Entrainement par la vapeur d'eau • Ébullition (pour certains polluants avec $T_{\text{éb}} < 100^\circ\text{C}$)	• Ébullition • Pyrolyse • Hydrolyse • Oxydation (si présence d'O_2)

Tableau 1 : Mécanismes de traitement thermique¹⁰.

Dans le Tableau 8, les mécanismes de transfert des polluants vers la phase gazeuse sont présentés en **bleu**, tandis que les mécanismes de destruction sont présentés en **rouge**.

Une liste non exhaustive des polluants pouvant être traités par désorption thermique est présentée ci-dessous [4] [5] :

- Une grande partie des composés organiques volatils et semi-volatils, halogénés ou non ;
- Des composés organiques moins volatils tels que PCBs, dioxines et furanes, pesticides ;
- Solvants chlorés ;
- Cyanures organiques et inorganiques ;
- Métaux volatils (mercure) ;

De manière générale, on peut considérer que toute substance dont la température d'ébullition est inférieure à 550 °C peut être traitée par la technologie SMART BURNER™. ¹¹ Les métaux lourds (à l'exception faite du mercure) et autres polluants inorganiques non volatils échappent par ailleurs au spectre d'application de la technologie.

¹⁰ Issu de la documentation de HT et soutenue par diverses sources [16] [16] [4].

¹¹ Données issues de l'expérience de HT et appuyées par diverses sources [6] [8].

Parmi les polluants les plus souvent traités par la technologie, on retrouve les hydrocarbures. Leurs températures d'évaporation varient en fonction de leur structure et du nombre d'atomes de carbone qui les composent. Comme règle de base, on peut appliquer le fait que plus l'hydrocarbure possède d'atomes de carbone (on parle d'hydrocarbures plus « lourds »), plus sa température d'évaporation est élevée. Les hydrocarbures présents dans les sols pollués vont donc se comporter différemment en fonction de leur poids moléculaire. Plus celui-ci sera élevé, plus la température et/ou le temps de séjour devra être élevés afin de les évaporer. [6]

Parmi les hydrocarbures, on distingue notamment les hydrocarbures aliphatiques, les hydrocarbures mono-aromatiques et les hydrocarbures poly-aromatiques. Les premiers et les seconds se rencontrent souvent dans le cadre de pollutions provenant d'activités liées à des produits issus du pétrole. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) se retrouvent quant à eux le plus souvent dans le cadre de pollutions liées à des produits issus du charbon. [6]

/!\ Une fois les polluants extraits, ils ne peuvent être relâchés tels quels dans l'atmosphère. Ils doivent être envoyés vers une unité de traitement de vapeurs ad-hoc, où ils sont soit directement détruits sur le site, soit capturés et envoyés hors site pour traitement ultérieur. Haemers Technologies a également mis en place une solution alternative pour le traitement des vapeurs d'hydrocarbures, dans le cas où le sol présente suffisamment peu d'impuretés (faibles concentrations) : les vapeurs sont directement renvoyées vers la flamme du brûleur, permettant de se passer de l'unité de traitement ad hoc tout en améliorant le bilan énergétique du procédé. Il s'agit du **procédé Reburn**, développé au sein de l'entreprise.

3.2 Comparatif des technologies ISTD et ESTD

Les deux technologies étant basées sur un principe de fonctionnement similaire, elles présentent de nombreux points communs. Une première partie de la présente section présentera les avantages et inconvénients communs aux technologies ISTD et ESTD, tandis qu'une deuxième partie soulignera les particularités propres à chacune des deux technologies.

3.2.1 Avantages et inconvénients communs aux deux technologies

Parmi les avantages principaux communs aux deux technologies, on notera :

- La large gamme des polluants traités (cfr section 3.1) ;
- La variété de sols pouvant être traités, le principe de fonctionnement se basant sur la conduction, et les coefficients de conductivités variant peu entre les différents types de sols (facteur <5 [7]) ;
- Possibilité de traiter des sols fortement contaminés (hautes concentrations en polluants) ;
- Efficacité et fiabilité (en termes de taux de dépollution) ;
- Homogénéité de la dépollution, et ce même dans des sols non homogènes, grâce à la faible variabilité des facteurs de conduction. A contrario, les procédés de ventings par exemple, régis par les phénomènes de convection, sont largement dépendant du type de sols et de la présence de chemins préférentiels en leur sein [8] ;
- Prévisibilité des résultats (en termes de décontamination, de durée de traitement, de coût traitement, ...) ;
- Durées de traitement compétitives pour des objectifs fixés : 4 à 6 semaines de traitement pour 1 batch (volume variable et fonction du nombre et de la longueur des tubes de chauffages impliqués) ;
- Flexibilité du design : la technologie se compose de nombreux éléments, qu'on appellera « unités thermiques » (1 brûleur, le tube de chauffe et les autres éléments associés). Ainsi, la

technologie est facilement adaptable à de nombreuses situations, volumes et géométries en modifiant le nombre d'unités thermiques ou la longueur des éléments impliqués ;

- Flexibilité en cours de traitement : le fait que la technologie soit composée d'unités thermiques indépendantes permet éventuellement de couper le traitement dans les zones où les objectifs de dépollutions sont déjà atteints, ou de modifier les consommations en carburant en fonction des besoins énergétiques locaux. Il existe donc une forme de flexibilité de traitement au sein même d'un batch, une possibilité de ne chauffer que ce qui est encore nécessaire à un instant t.
- Importance des volumes traités : il n'y a théoriquement pas de limitation de la technologie en termes de volumes traitables. Les limitations sont généralement de nature économique, temporelle ou d'espace disponible.
- Transportabilité : le fait que la technologie soit composée de nombreuses unités thermiques permet un montage, une démobilisation et un transport aisé. De plus, si l'intégrité de certains éléments est compromise, cela n'empêche pas la réutilisation des autres éléments du procédé ;
- Les terres sont traitées sur places et évitant ainsi leur transport vers une zone de traitement ;
- Durant la phase de traitement, les nuisances générées par le traitement sont faibles (peu d'odeurs, de nuisances sonores, pas de production de poussière, pas de transports nécessaires) ;

En ce qui concerne les inconvénients communs aux deux technologies, on notera :

- L'incapacité de traitement des substances non volatiles, tels que métaux lourds et autres substances inorganiques ;
- La production de vapeurs polluées impliquant le besoin d'une unité de traitement ad-hoc. Dans le cas où les substances polluantes ne sont pas détruites directement sur le site, il peut également y avoir une production de condensats qu'il est nécessaire de traiter. A noter que dans le cas d'un procédé fonctionnant en **Reburn**, les contaminants sont directement oxydés et transformés en CO_2 et H_2O (+ CO , H_2 , N_2 , NO_x), et les vapeurs produites ne nécessitent pas de traitement supplémentaire. Il est néanmoins important de contrôler les taux CO , de garder la combustion la plus complète possible (CO proche de zéro), et contrôler les taux de N_2 et NO_x en sortie de vapeurs (ceux-ci devraient rester faible si la contenance du sol en impuretés autres que hydrocarbures est faible). Il convient également de surveiller le niveau des autres rejets possibles, tels que les niveaux d'Arsenic, Cl_2 , SO_2 , SO_3 , et de mettre en place les mesures de mitigations adéquates si nécessaire ;
- Le refroidissement nécessaire des gaz de combustion (et éventuellement vapeurs polluées). En effet, dépendant de la législation, les gaz rejetés ne peuvent généralement pas dépasser 200°C . La résistance thermique de l'appareillage d'extraction peut également être un facteur limitant. A noter qu'il est possible de récupérer cette chaleur et de la réinjecter dans le système à l'aide d'échangeur de chaleur (cfr exemple en section 0). Un échange de chaleur bien dimensionné permettrait de refroidir les gaz en dessous des limites autorisées tout en améliorant le bilan énergétique du procédé ;
- La production de dioxyde de carbone au cours du procédé. En effet, que ce soit par son caractère énergivore, ou par le rejet de produit de combustion, le procédé n'est pas exempt de rejet de dioxyde de carbone. Cet aspect est d'autant plus important vu la situation climatique que nous traversons à l'heure actuelle. La question de la durabilité du procédé sera soulevée dans la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ;
- L'utilisation de matériaux et matières premières dans la mise en place du chantier, qui rentre également en ligne de compte si l'on veut aborder la question de la durabilité du système.
- Le procédé est largement dépendant de la quantité d'eau présente dans le sol. En effet, la température du sol ne pourra dépasser les 100°C tant que l'entièreté de l'eau à une localisation donné n'a pas été évaporée, l'entièreté de l'énergie fournie au sol alors utilisée pour l'évaporation de l'eau en présence. C'est d'ailleurs pour cela qu'on observe un plateau de

température à 100°C lors d'un traitement thermique. Le procédé sera donc d'autant plus long, énergivore, et donc couteux, que le sol est initialement riche en eau ($\Delta H_{\text{vap, H}_2\text{O}} = 2257 \text{ kJ/kg}$ à 1 atm [9]) ;

- Le procédé est peu/ pas adaptée au traitement de la zone saturée. Le problème qui se pose est le même que celui évoqué au point précédent. Il est théoriquement possible de traiter une zone saturée si la cinétique d'évaporation de l'eau est supérieure à la vitesse d'alimentation en eau de la zone saturée. Néanmoins, le procédé deviendrait rapidement trop énergivore. Une autre solution consisterait à rabattre la nappe en parallèle ;

3.2.2 Tableau comparatif des technologies ISTD et ESTD

Le Tableau 2 présente les différences principales entre les technologies ISTD et l'ESTD. Celui-ci a été établi sur base de l'expertise de **HT** dans le domaine, d'observations personnelles et de sources extérieures citées dans le texte.

ISTD	ESTD
• Pas besoin d'excavation. On évite dès lors toutes les nuisances qui y sont liées telles que poussières, odeurs, nuisances sonores, trafic ...	• Moins de pertes de chaleur : il est en effet plus facile d'isoler la pile thermique, et l'utilisation de tubes échangeurs permet de faire traverser les gaz de combustion une fois de plus dans les terres (optimisation du transfert de chaleur depuis les gaz vers le sol).
• Possibilité de traiter sous un bâtiment, et dans des endroits difficiles d'accès (éventuellement même dans un bâtiment, près d'infrastructures, sous le niveau du sol).	• Main d'œuvre, travail en amont et temps supplémentaires nécessaire pour la préparation du terrain.
• Possibilité de traitement sur de grande profondeur (éventuellement 20 m).	• Temps de traitement plus courts (directement lié aux pertes de chaleurs moindres). Cela ne prend cependant pas en compte le temps supplémentaire nécessaire à l'excavation.
• Possibilité de traitement dans des zones très étroites, ou l'excavation est impossible.	• Si la pollution est disparate, et concerne une multitude de zones réduites, il devient plus intéressant d'excaver et de traiter l'ensemble des terres.
• Risques limités de contamination croisée.	• Risque contamination croisée plus élevé, mais néanmoins minimales puisque les terres sont traitées sur le site même.
• Demande une connaissance/ étude préalable du terrain ;	• Moins d'incertitudes sur la dépollution : meilleure connaissance du sol et éventuelle

	possibilité de mélange et d'homogénéisation des terres à traiter.
Faible impact sur la stabilité du sol¹². /!\ Exception faite cependant des sols extrêmement riches en matières organiques, dont la pyrolyse et la combustion peuvent mener à d'importantes réductions en volume des terres traitées.	Dans le cas de faibles profondeurs de pollution (< 2 mètres), il devient plus difficile et moins rentable d'appliquer l'ISTD (plus grand nombre d'unités thermiques nécessaire par rapport au traitement ESTD d'un même volume de terres).

Tableau 2: Tableau comparatif des technologies ISTD et ESTD

¹² Études menées par HT

3.3 Evaluation de la durabilité du procédé

Dans la section 3.2.1 était évoqué le fait que l'application de la technologie comporte également des aspects négatifs, tels que le caractère énergivore du procédé (son principe même implique la production d'énergie et sa transmission au sol afin d'en faire évaporer les contaminants), l'emprunte carbone associée, la consommation de matériaux et matières premières.

Dans cette section sera développée la question de la durabilité du procédé, et la détermination des conditions qui doivent être remplies afin de pouvoir déterminer que les bénéfices tirés de l'application de la technologie sont suffisants pour contrebalancer les effets négatifs associés.

Nous commencerons par tenter de définir le concept de durabilité dans le domaine de la remédiation des sols.

3.3.1 Définition de la durabilité

Le concept de développement durable est un concept largement répandu, et se place logiquement au cœur de toute activité environnementale. Il semble évident que tout travail de remédiation doive s'aligner avec ce concept. Quel sens y aurait-il par ailleurs à appliquer une technologie de remédiation jugée non durable ?

Cependant, il n'existe pas de définition fixe et établie de la durabilité en remédiation. De plus, les outils permettant de juger de la durabilité d'une technologie restent rares. L'exercice est d'autant plus difficile que le concept de durabilité touche à des domaines extrêmement variés, quoi que indissociables, tels que les aspects environnementaux, sociaux et économiques.

Dans un article publié en 2018 [10], Jan Haemers propose une méthodologie permettant d'attribuer un score de durabilité globale à une technologie de remédiation donnée. Cette méthodologie permet de prendre en compte les composantes environnementales, économique et sociales liées à la technologie qu'on souhaite évaluer.

La Figure 11 illustre le découpage conceptuel du développement durable en ces trois composantes, sous la forme de trois sphères interconnectées.

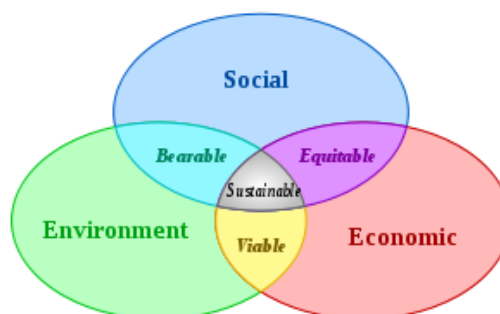


Figure 11: Les trois composantes du développement durable [10]

Ainsi la méthode utilisée pour évaluer la durabilité d'un procédé se doit de prendre en compte chacune de ces trois sphères, et de refléter leur interconnectivité. Dans son article [10], Jan Haemers donne également des pistes des différents aspects qui doivent être pris en compte dans l'évaluation de ces trois sphères. Ceux-ci sont repris ci-dessous :

Score économique

Doit prendre en compte :

- Le coût total de la remédiation ;
- Le coût total du monitoring et du suivi :
 - Coûts externes et internes ;
- Le coût des remédiations futures nécessaire (pollutions résiduelles, prise en compte de la probabilité d'occurrence) ;
- L'augmentation en valeur du terrain dépollué ;
- Autres bénéfices additionnels éventuels

Score environnemental

Celui-ci doit refléter la variation engendrée par la remédiation sur l'environnement.

Il prendra en compte :

- La réduction de l'impact sur la santé humaine ;
 - Elle est mesurée par la réalisation d'une étude d'évaluation des risques. Les modèles utilisés permettent de déterminer les risques sur la santé humaine liés à un site spécifique, et le niveau de risque qu'il représente avant et après les travaux de remédiation. C'est cette différence de niveau de risque avant/ après remédiation qui détermine le score attribué.
- La réduction de l'impact sur l'écosystème ;
 - La même logique s'applique pour les risques concernant l'écosystème.
- Le bilan carbone du procédé ;
 - Bilan CO₂ net du procédé, incluant l'ensemble des travaux sur site et hors site, ainsi que tous les transports réalisés dans le cadre du projet de dépollution. Il peut être mesuré par le biais de différents modèles.
- L'utilisation des ressources naturelles ;
 - Prise en compte de l'utilisation des ressources naturelles telles que l'eau, les graviers et autres ressources non renouvelables.
- Le niveau de remédiation/ recyclage des sols traités – Echelle de Lansink ;
 - Toute technique de remédiation ne permet pas d'atteindre un même niveau de récupération des terres. L'échelle de Lansink permet d'évaluer le « niveau de recyclage » impliqué par l'application d'une technique de remédiation. Ainsi, un sol pouvant être réutilisé sans limitation obtiendra un score plus élevé que s'il est recyclé et utilisé dans la fabrication de béton par exemple.
- Autres impacts à long terme ;

Score social

L'aspect social de la contamination des sols concerne d'une part les usages possibles du sol en question, ainsi que les nuisances engendrées par les travaux de dépollution :

- Usages et limitations d'usage : concerne les limitations d'usage d'un terrain avant et après travaux de remédiation (et les impacts sociaux positifs liés à ces usages en question) ;
- Autres impacts sociaux liés à l'application de la technologie de dépollution (bruits, odeurs, vibrations, trafic, pollution visuelle, ...) ;

Score global

Une fois l'établissement des scores économique, écologique et social, ceux-ci doivent être combinés de manière à donner un score global qui reflète ces scores et leur connectivité. Une manière simple d'y parvenir est de multiplier les différents scores individuels obtenus. Ainsi, une technologie obtenant un score important dans deux catégories, mais un score faible dans la troisième, ne pourra jamais obtenir de score global important ($10 \times 10 \times 0 = 0$).

Selon l'importance accordée à l'un ou l'autre des aspects pris en compte, il est toujours possible d'appliquer une pondération spécifique accentuant l'influence de l'aspect en question sur le score global.

Au travers de cette section, nous avons pu établir les lignes directrices permettant de définir si oui ou non une technologie de remédiation peut être considérée comme durable. Bien sûr, les critères sont divers, et le score de durabilité obtenu par une certaine technologie pourra varier grandement en fonction du projet pour lequel elle est appliquée. Ainsi, dans la section suivante nous tenterons d'établir dans quels cas pourra être appliquée la désorption thermique de manière durable, sur bases de la définition de la durabilité qui a été présentée dans la présente section.

3.3.2 Le concept de la durabilité appliqué à la désorption thermique

Le but de cette section n'est donc pas d'attribuer un score précis de durabilité à la désorption thermique (celui-ci variant de projet en projet), mais de passer en revue les différents points que comporte la définition de la durabilité présentée dans la section précédente et de tenter de définir un domaine d'applicabilité de la technologie. Bien sûr, ce ne sont ici que des lignes directrices qui seront établies, une étude approfondie et spécifique à chaque projet devrait être réalisée dans le but de déterminer la durabilité de l'application de la technologie.

Comme nous avons pu le voir dans la section précédente, la durabilité est un concept complexe, qui demande une vision générale d'un projet pour pouvoir juger de sa durabilité. La désorption thermique étant un processus énergivore, qui n'est pas exempt de rejets de CO₂. Il ne peut donc pas être adapté à l'ensemble des projets de dépollution. Ainsi, pour un sol contenant de faibles concentrations d'un polluant aisément éliminable, on préférera des méthodes moins lourdes, telles que *bioventing*¹³ ou le *venting*¹⁴.

Néanmoins, la désorption thermique possède un certain nombre d'avantages qui rendent la technique intéressante à appliquer dans certaines situations. On notera notamment la large gamme de polluants pour laquelle la désorption thermique est applicable (cfr section 3.1), les hautes efficacités de dépollution (> 95 %) [5] [11] et la possibilité d'appliquer la technologie à des sols hautement hétérogènes. A contrario, beaucoup de technologies de dépollution *in situ* se retrouveront notamment limitées par leur haute dépendance à l'homogénéité du sol et à leur perméabilité (e.g. *bioventing* et *venting*, largement dépendants de mécanismes de convection dans les sols [12] [8]).

Un autre avantage de la désorption thermique à considérer est la possibilité de réaliser les travaux de dépollution sans devoir excaver les terres. On évite ainsi les nuisances, rejets et consommation d'énergie

¹³ « Le bioventing est un traitement biologique aérobie qui consiste à stimuler la biodégradation dans la zone non saturée par apport d'oxygène. » [12]

¹⁴ « Le Venting consiste à extraire des polluants volatils par mise en dépression de la zone non saturée. » [8]

liés à l'excavation et au déplacement des terres : les nuisances sonores, de vibrations, les poussières produites, le trafic des véhicules, l'énergie et les matières premières nécessaires au déplacement des terres (vers une zone de traitement parfois éloignée), les émissions des véhicules de chantier et de transport, ... Cette possibilité de ne pas excaver les terres peut peser lourd dans la balance lors de l'évaluation de la durabilité d'un procédé. Dans leur article, Cappuyns et al. [13] comparent, pour un cas d'étude donné, le caractère durable de l'application d'un procédé de désorption thermique *in situ*, à celui de l'excavation et traitement hors site par bioremédiation. Ils en viennent à conclure que, pour le cas étudié, appliquer la désorption thermique est la méthode la plus durable et la plus fiable en termes de rendements épurateurs.

Un autre paramètre à prendre en compte est la durée de traitement. Si ce n'est pas une règle universelle, certaines nuisances, émissions et consommations liées à l'application d'un projet de dépollution sont proportionnelles à la durée de celui-ci, ou tout au moins seront d'autant plus importantes que le projet tire en longueur. La désorption thermique a l'avantage de pouvoir traiter de larges volumes de terres dans des délais relativement courts (l'espace quelques mois, voire jours [5]).

En conclusion, la sélection d'une technique de dépollution n'est pas une décision à prendre à la légère, et la durabilité de l'application d'un certain procédé dépendra des conditions particulières du projet pour lequel il est envisagé. Il convient tout d'abord de déterminer quelles sont les techniques qui permettront d'obtenir les résultats de dépollution et le rendement épurateur fixés. Cette présélection des technologies applicables dépendra des caractéristiques du sol (perméabilité, homogénéité, ...) et des contaminants en présence. Parmi ces techniques, il convient ensuite de sélectionner la « meilleure technologie disponible », à savoir la technique de dépollution produisant le moins d'externalités, tout en prenant en compte les budgets disponibles et les impératifs de temps liés à la dépollution. Une fois la technologie choisie, il convient encore de déterminer si les bénéfices tirés de la dépollution sont au moins proportionnels aux externalités provoquées par l'application de la technologie. L'attribution de scores de durabilité (section 3.3.1) est un outil qui peut s'avérer d'une grande aide dans ce processus de sélection et évaluation d'une technologie.

Comme nous avons pu le voir, la désorption thermique jouit d'une grande flexibilité et d'un domaine d'applicabilité large (i.e. polluants traités, types de sols, structures de sols, durées de traitement relativement courtes, application *in situ*, ...). Ainsi, malgré son caractère énergivore, dans certaines conditions pour lesquelles beaucoup de technologies atteignent leurs limites (e.g. concentrations en polluants élevées et sol hétérogène, peu perméable), la désorption thermique reste envisageable. La possibilité d'appliquer la technologie *in situ*, les courtes durées de traitement et les hauts rendements épurateurs sont autant d'aspects qui jouent en faveur de la désorption thermique lors de l'évaluation de la durabilité du procédé.

La présente section a permis d'établir des pistes quant au domaine d'applicabilité de la désorption thermique. Bien sûr, ce ne sont ici que des lignes directrices qui seront établies, une étude approfondie et spécifique à chaque projet devrait être réalisée dans le but de déterminer la durabilité de l'application de la technologie.

Chapitre 2

Analyse des acquis du stage

Ces six mois passés au sein de Haemers Technologies ont été une expérience plus qu'enrichissante tant au niveau professionnel que personnel, les deux étant intimement liés. En démarrant mon stage, j'avais beaucoup de choses à apprendre, et de nombreuses compétences à développer. Si c'est toujours le cas aujourd'hui, mon stage m'aura permis de beaucoup évoluer. Je m'efforcerai, au travers de ce chapitre, à décrire l'ensemble des compétences et connaissances qui m'ont été transmises.

L'expertise de l'entreprise : La réalisation de ce stage m'a tout d'abord permis d'accéder aux connaissances et à l'expertise de Haemers en matière de remédiation des sols. En effet, en plus de compter cinq ans de projets et de recherches, Haemers dispose également des nombreuses années d'expérience de ses fondateurs, et des autres membres de l'équipe. Cette connaissance est partagée de manière transparente et dans un objectif de progression collective qui rend aisée et agréable l'évolution au sein de la compagnie. Cette première rencontre avec la technologie m'a également permis de me rendre compte de l'importance de bien s'imprégner de la théorie, des rouages d'une technologie avant de mettre toute cette théorie en pratique.

L'expérience de terrain : L'entreprise m'a ensuite permis de mettre en pratique la théorie acquise dans un premier temps en m'envoyant sur le terrain. Ainsi, j'ai pu vivre une expérience de terrain beaucoup plus pratique et développer des compétences plus techniques. L'expérience de terrain permet non seulement de pouvoir acquérir des compétences techniques transposables à un autre projet, mais également de mieux visualiser les besoins et subtilités du terrain, et de produire des travaux de modélisation, de préparer un projet ou de le manager à distance de manière beaucoup plus efficace. Cela m'a également permis de me rendre compte des différences qu'il peut y avoir entre la théorie et la pratique, et de l'importance de savoir rebondir face à des imprévus.

Compétences organisationnelles : Travailler sur des projets de grande envergure m'a également permis d'avoir un premier aperçu de ce en quoi consiste le management de projet. Ainsi, cela m'a permis de développer des compétences organisationnelles mais également des compétences en termes de visualisation de projet, d'identification des livrables et des délais à respecter, d'identification des priorités, des objectifs à court, moyen et long terme et organiser le travail en fonction.

Compétences en résolution de problèmes : Mon travail chez HT a été d'autant plus stimulant qu'il m'a permis de développer des compétences en résolution de problèmes. En effet, les challenges (situations où il est nécessaire de mettre en place des solutions) qui se sont présentés à nous tout au long de mon stage n'ont pas été rares. Il a donc fallu, à de nombreuses reprises, analyser la situation, identifier les besoins et mettre en place des solutions qui répondent à ces besoins. Ces situations ont également démontré l'importance d'être réactif et de prendre des initiatives afin de ne pas rester bloqué sur un problème.

Travail d'équipe et communication : La communication est au centre de tout travail en équipe. Au cours de mes six mois de stage, j'ai pu collaborer avec de nombreux collègues pour les multiples tâches et travaux que j'ai réalisés. Cette communication peut prendre de nombreuses formes. Voici une liste, non exhaustive, de différentes formes de communication que j'ai pu expérimenter au cours de mon stage :

- J'évoquerai notamment l'importance de la communication (écrite et orale) dans les tâches organisationnelles et le travail en équipe. Une communication efficace, que ce soit au travers de brainstormings, comptes-rendus ou de l'organisation des tâches encore à accomplir, permet une réelle optimisation du travail. Un projet géré efficacement est avant tout un projet pour lequel tous les membres de l'équipe sont bien informés, conscients des livrables à court, moyen et long terme et sur la même longueur d'onde en ce qui concerne tout ce qui a été accompli et le travail encore à réaliser. Aussi, travailler au sein d'une équipe demande à aiguïser les capacités d'écoute tout en exprimant ses points de vue. Le respect et la considération reçus m'ont naturellement offert l'occasion d'exercer ces savoirs-être essentiels à un travail d'équipe fructueux.
- Une équipe regroupe généralement des membres qui présentent des formations et profils divers. Il est extrêmement intéressant de voir que les points de vue peuvent varier en fonction de l'individu. Il m'a été tout particulièrement intéressant de constater à quel point il est important de confronter les opinions de profils plus pratiques et plus théoriques. S'ils paraissent parfois opposés, ils sont généralement d'une grande complémentarité et permettent de mener à des solutions beaucoup plus complètes. Ceci démontre toute l'importance du partage des connaissances et d'une bonne communication au sein d'une équipe.
- Travailler sur le terrain veut également dire être en contact avec partenaires et clients, ce qui implique une forme de communication particulière. En effet, lorsqu'on parle avec des partenaires, clients ou collaborateurs, nous représentons la compagnie à laquelle nous sommes affiliés, et notre discours représente lui aussi l'opinion de la compagnie. Ainsi, sur base de mon expérience je conclurai que la communication avec des personnes extérieures à la boîte doit se faire de manière franche bien sûr, mais également réfléchie. Afin que le discours des membres d'une équipe soit uniforme, tous les sujets importants doivent être préalablement abordés, et la parole de chacun doit refléter le point de vue commun du groupe auprès des différents *stake holders* impliqués.
- Le partage de connaissances constitue une autre forme de communication qu'il est essentiel de développer. Lors de mon stage, j'ai également été amené à prendre part au partage des connaissances de Haemers sous la forme de formations données aux opérateurs et partenaires sur le terrain.
- Enfin, la communication avec les équipes de terrains, et le management d'équipes de terrain se distinguent également des autres formes de communication. Cette forme de communication est d'autant plus difficile que les interlocuteurs en face ne parlent pas forcément un anglais correct. Il faut dès lors apprendre à se faire comprendre, s'exprimer avec autorité tout en gardant beaucoup de tact. La communication non verbale occupe une place importante dans ces échanges.

Compétences de synthèses : J'ai également pu entraîner et développer mes compétences de synthèse au travers de comptes-rendus oraux et écrits, de la rédaction de rapports de chantier et de diverses présentations orales.

Modélisation : Au travers de la première phase de mon stage chez HT, passée au bureau d'étude et en recherche et développement, j'ai pu exercer mes compétences de modélisation et les appliquer à des projets concrets, tel que celui présenté en section 0 du présent rapport. Celles-ci sont importantes afin de pouvoir prévoir les effets d'une modification d'un procédé, ou tout simplement la création d'un nouveau procédé, et évaluer si oui ou non il serait profitable (d'un point de vue écologique, économique ou tout autre paramètre d'intérêt) de les implémenter. Au plus la modélisation est poussée et précise, au plus ses résultats sont fiables et permettent de prévoir avec exactitude l'expérience et la mise en pratique.

Gestion de risque : Un autre aspect important est la gestion de risques. Tout projet demande de pouvoir évaluer les risques éventuels liés au projet, juger de leur acceptabilité, mettre en place des mesures de mitigations. J'ai pu notamment mettre en pratiques ces aspects en formant des équipes non averties aux gestes qu'il est important d'avoir sur un projet de dépollution. Ces gestes m'avaient préalablement été transmis au travers de formations internes.

La pluralité des enjeux : Travailler de manière concrète sur des projets permet également de se rendre compte de la pluralité des enjeux qui sont inhérents à la mise en œuvre de tout projet environnemental. Ceux-ci sont de natures très diverses, à la fois environnementaux bien sûr, mais également sociaux, économiques et juridiques. Mon travail sur le projet de recherche (cfr section 0) m'a également permis de me rendre compte de cette réalité et de la multitude de problématiques sous-jacentes qui accompagnent indéniablement toute problématique environnementale.

Cette pluralité d'enjeux souligne tout l'intérêt du master en science et gestion de l'environnement. Au cours de mon stage, j'ai en effet pu m'appuyer à de nombreuses reprises sur des compétences acquises au travers des différents cours du master. J'évoquerai notamment les cours de *toxicologie humaine et environnementale* [LENVI2012] et *méthodes d'évaluation et de gestion de l'environnement* [LENVI2011] qui ont pu m'aider à identifier les possibles impacts sur la santé et l'environnement, les nuisances et externalités possibles et la manière de les mitiger. J'évoquerai également le cours de *Droit sectoriel de l'environnement* [LDROP2063] qui m'a donné des bases en termes de législation sur la gestion des sols, et qui m'a été très utile afin de comprendre et appréhender les problèmes d'ordre juridique qui ont pu se poser. Enfin, le cours de *Sustainable treatment of industrial and domestic waste* [LMAPR2647] a pu me servir lorsque qu'il a fallu imaginer et mettre en place des technologies de traitement de certains effluents gazeux, tandis que le cours de *Pollution de l'environnement* [LENVI2012] - plus particulièrement la partie concernant la pollution des sols- a pu m'être utile tout au long de mon stage.

Outre les points présentés ci-dessous, il ne fait aucun doute que le stage m'aura énormément apporté sur de nombreux autres aspects. Passer six mois au sein d'une entreprise, c'est partager des moments de vie, de partage et d'émotion avec une équipe liée par des objectifs communs. J'ai eu la chance énorme de pouvoir passer quatre mois sur des projets localisés en dehors de l'Europe, de rencontrer et de travailler avec des gens d'origine et de culture différentes. Evoluer dans un environnement non familier est une expérience toute particulière, riche en enseignements de par les contacts très divers qu'il nous est donné d'établir, mais bien sûr aussi très riche sur le plan personnel.

Chapitre 3

Suggestions à l'institution d'accueil

Cette section vise à présenter quelques suggestions qui peuvent être données à l'institution d'accueil, sur base du travail réalisé et d'observations faites tout au long du stage.

Les premières suggestions concernent les suites envisageables pour le projet de recherche présenté en section 0. En effet, le travail réalisé consiste en une première modélisation du système imaginé. Ainsi, plusieurs étapes sont encore nécessaires avant l'implémentation et la mise en pratique du projet. La première est l'affinement des hypothèses et le peaufinement de la modélisation suivant les conseils présentés en fin de section 2.3.5. Il serait également intéressant de modéliser d'autres types d'échangeurs de chaleurs, tel qu'un échangeur de chaleur à calandres simple, et de comparer les résultats. L'étape suivante serait la mise en place d'un projet pilote, afin de collecter des données expérimentales supplémentaires, et vérifier la faisabilité technique de l'optimisation du procédé. Cela est d'autant plus important que la mise en place d'un tel système signifie l'introduction de nouveaux paramètres à prendre en compte lors du réglage de la technologie, et donc l'introduction de difficultés pratiques supplémentaires.

Comme nous avons pu le voir dans la section 3.3, la désorption thermique est particulièrement adaptée aux pollutions lourdes. Il me semblerait judicieux de développer une technologie moins lourde, qui puissent être appliquée sur des sols moins pollués tout en respectant les critères de durabilité. Cette diversification permettrait ainsi d'étendre le domaine d'applicabilité des technologies développées par l'entreprise, d'être encore plus compétitifs et présents sur le marché et d'augmenter encore l'impact positif de l'entreprise. Une piste à creuser pourrait être le développement d'un procédé de *venting* qui ne nécessiterait que peu de matériel supplémentaire par rapport à ce que HT utilise déjà pour ses chantiers de désorption thermique. Un schéma de principe est présenté à la Figure 12.

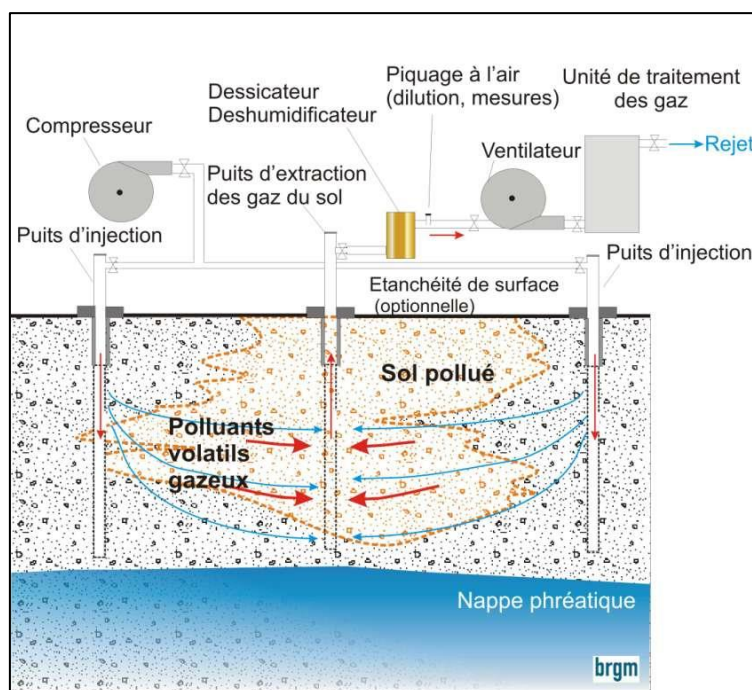


Figure 12: Schéma de principe du venting [8].

Le système d'extraction reste similaire à celui utilisé pour extraire les vapeurs dans le cas de la désorption thermique. Le système d'injection reste lui aussi similaire au réseau d'extraction en termes de matériel, si ce n'est pour l'utilisation de compresseurs à la place des ventilateurs. La difficulté majeure réside dans le design des puits d'injection, et l'homogénéité de l'injection d'air au niveau de ces puits, mais reste surmontable car ne s'éloignant pas trop du domaine d'expertise de la boîte. Une autre idée, qui permettrait d'étendre le domaine d'applicabilité des technologies de HT à la zone saturée, serait de développer un procédé de *sparging*¹⁵ [14]. Le principe est extrêmement similaire à celui du *venting* si ce n'est que l'air est injecté dans la zone saturée. Le matériel nécessaire reste donc lui aussi similaire (compresseurs, à dimensionner, de plus grosses puissances nécessaires). Un schéma de principe est présenté à la Figure 13. Le *sparging* pourrait éventuellement être couplé à la désorption thermique dans le cas de fortes concentrations de polluants à la fois dans la zone vadoze et dans la zone saturée.

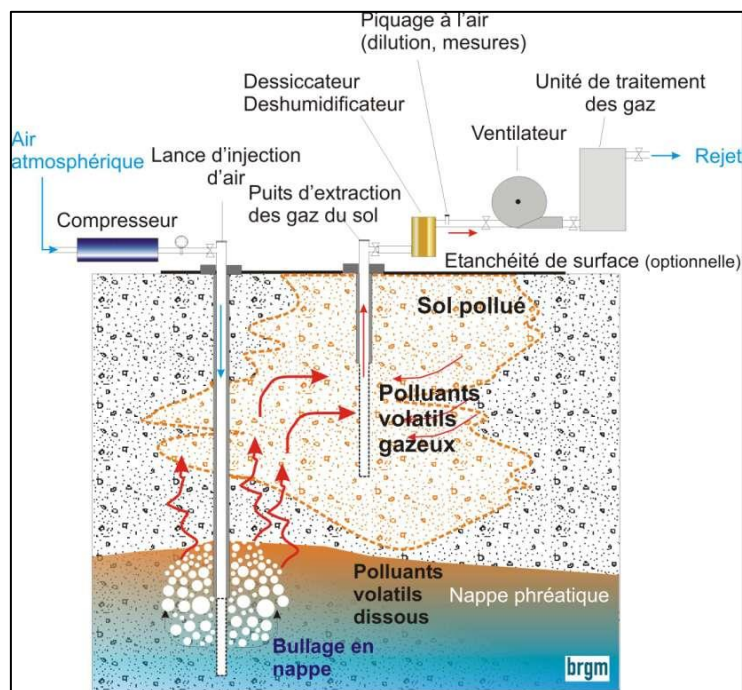


Figure 13: Schéma de principe de l'air sparging couplé à un venting. [14]

La dernière suggestion que je donnerai et qui d'après moi, est déjà mise en grande partie en pratique chez HT est la recherche continue du progrès. De toujours se remettre en question et de sans cesse optimiser ses procédés pour les rendre les plus exempts d'externalités possible.

¹⁵Repose sur le même principe que le *Venting* mais s'applique à la zone saturée et dans la frange capillaire. L'air est injectée dans la nappe (et non dans la zone non saturée comme pour le *venting*) et va favoriser la volatilisation des polluants qui sont ensuite extraits au niveau de la zone vadoze et traités sur site. [14]

Conclusion

Au travers de ce travail a pu être étudiée la question de la dépollution des sols par l'application de la technologie de désorption thermique telle que développée par Haemers Technologies. Cette étude s'est axée autour de trois grands projets, qui ont permis d'explorer la technologie sous des angles à la fois différents et complémentaires.

Ainsi, après une introduction aux bases théoriques de la désorption thermique et de la technologie SMART BURNER™, le travail s'est intéressé à deux projets concrets de mise en œuvre de la technologie. Ceux-ci ont permis d'illustrer les deux méthodes d'application de la technologie développées par l'entreprise : l'ISTD et L'ESTD. Le premier, projet de dépollution de grande envergure basé à Singapour, a permis d'exposer les subtilités de l'application *in situ* de la désorption thermique (i.e. ISTD). Le deuxième, projet de plus petite envergure situé au Vietnam, a permis d'explorer les principes de l'application *ex situ* de la technologie (i.e. ESTD).

Le troisième projet présenté est un projet de recherche, visant le développement d'un moyen d'optimiser le bilan énergétique d'une pile thermique (de taille standard) telle qu'installée lors de l'application ESTD de la technologie. La présentation de celui-ci a permis de montrer deux choses : d'une part la volonté de l'entreprise de sans cesse se renouveler et optimiser ses procédés, et d'autre part la complexité de la problématique étudiée et le fait qu'elle soulève de nombreuses problématiques sous-jacentes (l'optimisation énergétique du procédé ESTD étant l'une d'entre elle).

La solution imaginée consiste en la modélisation d'un système d'échangeurs de chaleurs coaxiaux, permettant de récupérer l'énergie thermique contenue dans les gaz de combustion et de la réinjecter en préchauffant l'air nécessaire à la combustion (insérée au niveau des brûleurs). Le projet s'est avéré prometteur tant sur le plan énergétique qu'économique. La modélisation nécessite néanmoins l'affinement de certaines de ses hypothèses, et le projet bénéficierait du passage par une étape expérimentale intermédiaire avant de pouvoir être mise en pratique.

Cette première partie, étoffée des résultats de quelques projets antérieurs réalisés par HT, a permis de démontrer l'efficacité de la technologie à atteindre ses objectifs de dépollution dans certains cas précis. Néanmoins, la désorption thermique, comme toute technologie, possède son lot d'inconvénients : il s'agit d'un procédé particulièrement énergivore et qui n'est donc pas exempt d'émissions secondaires.

Une définition de la durabilité englobant des composantes à la fois économiques, sociales et environnementales nous a permis de démontrer à quel point elle est un concept complexe. Le caractère durable de la désorption thermique dépend donc du projet auquel elle est appliquée. Ainsi, la désorption thermique jouit d'une grande flexibilité et d'un domaine d'applicabilité large (i.e. polluants traités, types de sols, structures de sols, durées de traitement relativement courtes, application *in situ*, ...) qui la rend envisageable dans de nombreux cas malgré son caractère énergivore.

Tout particulièrement, les conditions plus ou moins extrêmes dans lesquelles beaucoup de technologies atteignent leurs limites (e.g. concentrations en polluants élevées et sol hétérogène, peu perméable), verront la désorption thermique devenir un allié majeur. La possibilité d'appliquer la technologie *in situ*, les courtes durées de traitement et les hauts rendements épurateurs sont autant d'aspects qui jouent en faveur de la désorption thermique lors de l'évaluation de la durabilité du procédé.

Outre le fait de m'avoir permis de développer le projet de recherche qui est présenté dans ce rapport, les six mois passés au sein de Haemers technologies m'ont également énormément apportés en termes d'expérience, de compétences développées et de contacts humains. J'ai pu, entre autres, développer des compétences de modélisation, d'organisation, de synthèse ou encore de communication.

Cette expérience, particulièrement enrichissante tant sur le plan personnel que professionnel, m'aura permis de faire mes premières armes dans une entreprise aux valeurs environnementales fortes, qui se donne les moyens d'atteindre les objectifs environnementaux qu'elle s'est fixés. La réalisation de ce stage m'aura dans tous les cas permis de conforter l'idée que je me fais du chemin que j'aimerais parcourir dans ma vie professionnelle future, et du type d'entreprise pour laquelle j'aimerais travailler : une entreprise à taille humaine, soucieuse de ses employés, alignée à mes valeurs tant sur le plan social qu'environnemental.

Table des illustrations et liste des tableaux

Table des illustrations

Figure 1 : SMART BURNER™- Schéma de principe	5
Figure 2: Configuration en triangles équilatéraux (tubes de chauffe/ tubes vapeur)	6
Figure 3 : Exemple d'application de la technologie ISTD, tubes de chauffe placés à la verticale, dans un bâtiment (projet réalisé à Bruxelles)	8
Figure 4: Montage d'une pile ESTD (2 étapes)	10
Figure 5 : Schéma d'une pile montée	11
Figure 6: Pile ESTD montée et équipée	11
Figure 7 : Récupération d'énergie des gaz de combustion	13
Figure 8: Géométrie de l'échangeur en (contre) co – courant	14
Figure 9: Représentation schématique de la configuration pour l'échange en contre-courant	14
Figure 10: Représentation schématique de la configuration pour l'échange en co-courant.....	15
Figure 11: Les trois composantes du développement durable [10]	26
Figure 12: Schéma de principe du venting [8].	35
Figure 13: Schéma de principe de l'air sparging couplé à un venting. [14]	36

Liste des tableaux

Tableau 1 : Mécanismes de traitement thermique.....	21
Tableau 2: Tableau comparatif des technologies ISTD et ESTD.....	25

Liste des références bibliographiques

- [1] G. Winckelmans, P. Descamps et P. Luis Alconero, «LMAPR2691- Technology of chemical and environmental engineering,» *Cours de l'UCLouvain*.
- [2] S. Lingineni et V. Dhir, «Modelling of soil venting processes to remediate unsaturated soils,» *J. Environmental Engineering*, vol. 118(1), pp. 135-152, 1992.
- [3] J. Ren, S. Xin et D. Da, «Sustainable Remediation of Diesel-Contaminated Soil by Low Temperature Thermal Treatment: Improved Energy Efficiency and Soil Reusability ,» *Chemosphere*, vol. 241, 2020.
- [4] Haemers Technologies, «Contaminants,» [En ligne]. Available: <https://haemers-technologies.com/contaminants/>.
- [5] SelecDEPOL, «Désorption Thermique in situ,» [En ligne]. Available: <http://www.selecdepol.fr/fiche-technique/desorption-thermique-in-situ>.
- [6] J. E. Vidonish, K. Zygourakis, C. A. Masiello, G. Sabadell et P. J. Alvarez, «Thermal Treatment of Hydrocarbon-Impacted Soils: A Review of Technology Innovation for Sustainable Remediation,» *Engineering*, vol. 2, n° %14, p. 426-37, 2016.
- [7] United State Environmental Protection Agency, «In Situ Thermal Treatment Technologies : Lessons Learned,» 2014.
- [8] SelecDEPOL, «Venting,» [En ligne]. Available: <http://www.selecdepol.fr/fiche-technique/ventilation-de-la-zone-non-saturee-venting>.
- [9] National Institute of Standards and Technology (NIST), «NIST Chemistry WebBook- Isobaric Properties for Water,» [En ligne]. Available: <https://webbook.nist.gov>.
- [10] J. Haemers, «Sustainable Remediation: How to compare the technologies?,» 2019.
- [11] I. C. Ossai, A. Aziz, H. Auwalu et H. Fauziah Shahul, «Remediation of Soil and Water Contaminated with Petroleum Hydrocarbon: A Review ,» *Environmental Technology & Innovation*, vol. 17, février 2020.
- [12] SelecDEPOL , «Bioventing,» [En ligne]. Available: <http://www.selecdepol.fr/fiche-technique/bioventing>.
- [13] V. Cappuyns, D. Bouckenoghe, L. van Breuseghem et S. van Herreweghe, «Can Thermal Soil Remediation Be Sustainable? A Case Study of the Environmental Merit of the Remediation of a Site Contaminated by a Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL),» *Journal of Integrative Environmental Sciences*, vol. 8, n° %12, pp. 103-121, 2011.
- [14] selecDEPOL, «Barbotage in situ (sparging),» [En ligne]. Available: <http://www.selecdepol.fr/fiche-technique/barbotage-in-situ-sparging>.
- [15] G. L. Stegemeier et H. J. Vinegar, *Hazardous & Radioactive Waste Treatment*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001, pp. Ch. 4.6-1.
- [16] National Institute of Standards and Technology (NIST), «NIST Chemistry WebBook- Isobaric properties of Methane,» [En ligne]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=74-82-8>.
- [17] S. Kanan et S. Fatin, «Dioxins and Furans: A Review from Chemical and Environmental Perspectives,» *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, vol. 17, p. 1-13, 2018.

Annexe 1 : Calendrier de stage

Septembre 2019	Semaine 1	
	Semaine 2	• 09 septembre : début de stage. • Introduction à la technologie : lecture de documents théoriques et explications. • Vendredi 15 : réunion hebdomadaire sur l'état d'avancement.
	Semaine 3	• Introduction à la technologie : lecture de documents théoriques et explications. • Formations pratiques. • Début des formations sécurité. • Vendredi 22 : Réunion hebdomadaire sur l'état d'avancement.
	Semaine 4	• Démarrage du projet de recherche. • Suite des formations sécurité. • Vendredi 29 : Réunion hebdomadaire sur l'état d'avancement.
Octobre 2019	Semaine 1	• Suite du travail de recherche. • Soutient au bureau d'étude. • Vendredi 4 : Réunion hebdomadaire sur l'état d'avancement.
	Semaine 2	• Lundi 7 : présentation des premiers résultats du projet de recherche. • Suite du travail de recherche. • Vendredi 11 : réunion hebdomadaire sur l'état d'avancement.
	Semaine 3	• Suite du projet de recherche • Introduction aux projets de dépollution au Vietnam et à Singapour. • Participation à la rédaction de documents divers. • Vendredi 18 : Réunion hebdomadaire sur l'état d'avancement.
	Semaine 4	• Suite du projet de recherche et écriture du rapport. • Participation à la rédaction de documents divers. • Projet de recherche secondaire : étude des moyens d'élimination des suies dans les gaz de combustion. • Première réunion avec l'équipe de Singapour et introduction auprès des partenaires. • Vendredi 25 : Réunion hebdomadaire sur l'état d'avancement.

Novembre 2019	Semaine 1	• Participation à la rédaction de documents divers (principalement connecté au projet de dépollution de Singapour) • Lecture de documents divers sur le projet de dépollution de Singapour. • Projet : arbre de décision - support visuel aux processus décisionnel dans la sélection de la technologie. • Vendredi 1: Réunion hebdomadaire sur l'état d'avancement.
	Semaine 2	• Participation à la rédaction de documents divers (principalement connecté au projet de dépollution de Singapour) • Projet : arbre de décision - support visuel aux processus décisionnel dans la sélection de la technologie. • Vendredi 8 : Départ pour Singapour.
	Semaine 3	• Arrivée sur chantier : Visite du site et introduction auprès des partenaires. • Introduction aux tâches de chantier. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Phase de forage du batch 4, phase de préparation du batch 2.
	Semaine 4 & 5	• Réunion hebdomadaire avec les collaborateurs. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Phase de forage du batch 4, phase de préparation du batch 2.
Décembre 2019	Semaine 1	• Réunion hebdomadaire avec les collaborateurs. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Installation réseaux batch 4, forage du batch 2.
	Semaine 2	• Réunion hebdomadaire avec les collaborateurs. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Installation réseaux batch 4, forage du batch 2.
	Semaine 3	• Réunion hebdomadaire avec les collaborateurs. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Installation réseaux batch 4 et 2. • Préparation du matériel et instrumentations de monitoring.
	Semaine 4	• Réunion hebdomadaire avec les collaborateurs. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Installation réseaux batch 4 et 2. • Préparation du matériel et instrumentations de monitoring.

Janvier 2020	Semaine 1	• Réunion hebdomadaire avec les collaborateurs. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Installation réseaux batch 4 et 2. • Formations des opérateur. • Préparation du matériel et instrumentations de monitoring.
	Semaine 2	• Réunion hebdomadaire avec les collaborateurs. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Installation réseaux batch 4 et 2. • Formation des opérateurs. • Préparation du matériel et instrumentations de monitoring.
	Semaine 3	• Fin du montage des réseaux batch 4, installation monitoring. • Installation réseaux batch 2. • Réunion hebdomadaire avec les collaborateurs. • Réunions journalières avec les équipes d'opérateurs et l'entreprise de construction habilitée au projet. • Formation des opérateur au gestes de sécurité.
	Semaine 4	• Démarrage du batch 4, suite installation monitoring. • Installation réseaux batch 2. • Réglages de des bruleurs et extracteurs. • Réseau de monitoring.
Février 2020	Semaine 1	• Lundi 2 : Arrivée sur le projet au Vietnam. • Montage des réseaux.
	Semaine 2	• Montage des réseaux. • Réunion hebdomadaire avec les partenaires.
	Semaine 3	• Fin montage des réseaux. • Réunion hebdomadaire avec les partenaires. • Ajustement du SVE : modifications sur la quench, boucle à condensats, réglages de la post-combustion. • Réunion hebdomadaire avec les partenaires.
	Semaine 4	• Réunion hebdomadaire avec les partenaires. • Ajustement du SVE : modifications sur la quench.

Annexe 2 : Calendrier des contacts avec la maître de stage UCL

Aout 2019 : premier contact.

27 Avril 2020 : reprise de contact.

20 Mai 2020 : réunion et fixation des objectifs quant au travail écrit.

10 Juin 2020 : premier jet du travail écrit.

25 juin 2020 : deuxième version du travail écrit.

28 Juillet 2020 : troisième version du travail écrit.

30 Juillet 2020 : version finale du travail écrit.

Annexe 3 : Liste des différents « stake holders » contactés

A la demande de l'entreprise, les différents « stake holders » avec lesquels j'ai eu l'occasion d'entrer en contact ne seront pas nommés. Seule une description de leur fonction est présente dans cette section.

Projet de recherche	
Fournisseurs	Fournisseurs des divers éléments du matériel nécessaire à la mise en place d'un chantier de dépollution.
Project ISTD- Singapour	
Autorité de gestion du territoire et des ressources	Client
Entreprise de consultance environnementale	Partenaire dans la mise en œuvre et le suivi de chantier. Vérification du respect des normes environnementales.
Entreprise de construction	Main d'œuvre pour la mise en place de la technologie.
Bureau d'étude indépendant	Validation de la dépollution et du respect des normes environnementales.
Projet ESTD- Vietnam	
Autorité en matière de technologies de traitements environnementaux	Validation de la dépollution et du respect des normes environnementales.
Autorité en matière d'approvisionnement d'équipement techniques	Approvisionnement d'équipement techniques, accès au site, vérification du respect des normes en termes d'équipement.
Entreprise de construction	Main d'œuvre pour la mise en place de la technologie.