

## Physafimm

# La PhytoStabilisation : méthodologie Applicable aux Friches Industrielles Métallurgiques et Minières

Acronyme                      Physafimm  
Titre du projet              La PhytoStabilisation : méthodologie Applicable  
aux Friches Industrielles Métallurgiques et Minières

**PHYtoStabilisation : méthodologie Applicable aux Friches Métallurgiques et Minières**





**Partenaires**

**Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE)**  
Centre SPIN, Sciences des Processus Industriels et Naturels  
Centre SITE, Sciences, Information et Technologies pour l'Environnement

**ICF-IRH, Groupe IRH environnement**

**Université Jean Monnet (Saint-Etienne)**  
Laboratoire d'Ecophysiologie Appliquée (LEPA)

**Industeel Loire, Site de Châteauneuf, ARCELORMITTAL**

**Université d'Auvergne (Clermont Ferrand 1)**  
Laboratoire de Physiologie et de Biotechnologies Végétales (LPBV)

**Université Blaise Pascal (Clermont Ferrand 2)**  
Physique et physiologie intégratives de l'Arbre fruitier et Forestier (PIAF)

**Université Bordeaux 1**  
UMR INRA 1202 BIOGECO Equipe Ecologie des Communautés (BIOGECO)





Coordination du programme : Jean-Luc BOUCHARDON Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Saint-Etienne, France

# SOMMAIRE

|            |                                                                                        |          |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b>   | <b><i>Programme scientifique et technique / Description du projet</i></b>              | <b>3</b> |
| <b>1.1</b> | <b><i>Problème posé</i></b>                                                            | <b>3</b> |
| <b>1.2</b> | <b><i>Contexte et enjeux du projet</i></b>                                             | <b>3</b> |
| 1.2.1      | Contexte et enjeux généraux                                                            | 3        |
| 1.2.2      | Enjeux spécifiques au site d'étude                                                     | 5        |
| 1.3        | Objectifs et caractère ambitieux/novateur du projet.                                   | 5        |
| 1.4        | Positionnement du projet.                                                              | 7        |
| 1.5        | Description des travaux : programme scientifique et technique                          | 8        |
| 1.5.1      | Tâche 1 : préparation et ensemencement des planches expérimentales                     | 9        |
| 1.5.2      | Tâche 2 : suivi de la couverture végétale et de son état physiologique                 | 10       |
| 1.5.3      | Tâche 3 : évaluation des transferts résiduels de métaux                                | 11       |
| 1.5.4      | Tâche 4 : analyse minéralogique et pédo-géochimique du substrat                        | 12       |
| 1.5.5      | Tâche 5 : caractérisation de la mobilité des métaux                                    | 13       |
| 1.5.6      | Tâche 6 : modélisation préliminaire des transferts réactifs du système sol-eau-plante. | 13       |
| 1.5.7      | Tâche 7 : synthèse et traduction des données en résultats opérationnels                | 14       |
| 1.6        | Résultats escomptés et retombées attendues                                             | 15       |
| 1.6.1      | Retombées scientifiques                                                                | 15       |
| 1.6.2      | Retombées sociétales et économiques                                                    | 15       |
| 1.6.3      | Place du projet dans les stratégies industrielles d'Industeel Loire et d'ICF-IRH       | 15       |
| 1.6.4      | Critères de réussite et d'évaluation :                                                 | 16       |
| 1.7        | Organisation du projet.                                                                | 17       |
| 1.7.1      | Tâche de coordination                                                                  | 17       |
| 1.7.2      | Aspects organisationnels du projet                                                     | 18       |
| 1.8        | partenaires comprenant 8 équipes :                                                     | 19       |
| 1.8.1      | Partenaire 1 :                                                                         | 19       |
| 1.8.2      | Partenaire 2 :                                                                         | 19       |
| 1.8.3      | Partenaire 3 :                                                                         | 19       |
| 1.8.4      | Partenaire 4 :                                                                         | 19       |
| 1.8.5      | Partenaire 5 :                                                                         | 19       |
| 1.8.6      | Partenaire 6 :                                                                         | 19       |
| 1.8.7      | Partenaire 7 :                                                                         | 19       |

# 1 Programme scientifique et technique / Description du projet

## 1.1 Problème posé

De nombreux sites contaminés par des éléments métalliques, jusque là délaissés car considérés comme « difficilement traitables », sont aujourd'hui considérés avec une certaine inquiétude. Il en est ainsi des anciens sites d'extraction de minerais métalliques, mais aussi de nombreuses décharges d'usines métallurgiques. Dans l'un ou l'autre cas, compte tenu des volumes considérables des déchets à traiter, il est indispensable de développer des techniques de remédiation réalistes, c'est-à-dire acceptables d'un point de vue environnemental et d'un point de vue économique.

Parmi les méthodes susceptibles de satisfaire à ces contraintes souvent antagonistes, la phytostabilisation est aujourd'hui considérée comme une approche prometteuse. En effet, l'implantation d'un couvert végétal — composé d'espèces tolérantes et non accumulatrices — sur laquelle est basée cette technique, réduit l'érosion éolienne, ralentit le ruissellement des eaux et limite la lixiviation des métaux du sol vers la nappe, en favorisant l'évapotranspiration. Cet objectif, qui place la ressource en eau et la reconquête paysagère au cœur du patrimoine local, passe par la maîtrise des impacts liés à l'activité industrielle sur les composantes de l'écosystème. De ce point de vue toutefois, les retours d'expériences sur site en Europe sont encore trop fragmentaires pour proposer la commercialisation de la phytostabilisation à grande échelle. Il est donc nécessaire de procéder à son développement expérimental sur sites industriels, afin d'en affiner les conditions d'application et d'en mesurer l'impact, en termes de limitation des transferts pour les milieux et de réduction des risques pour les récepteurs, dans des situations de schémas conceptuels parfaitement caractérisés.

Ce programme a pour but de mettre en œuvre et de suivre une opération de démonstration à grande échelle de ce procédé de traitement. Le site retenu est le site métallurgique de Châteauneuf-Rive de Gier (Loire), appartenant à Industeel Loire (groupe ArcelorMittal). D'une surface totale de l'ordre de 10 ha, pour un volume de déchets d'aciérie estimé à plus de 500 000 m<sup>3</sup>, il constitue un site atelier idéal pour définir une méthodologie de phytostabilisation applicable aux friches métallurgiques et minières.

## 1.2 Contexte et enjeux du projet

### 1.2.1 Contexte et enjeux généraux

Depuis quelques années, les politiques françaises et européennes en matière de gestion des sites et sols pollués ont largement évolué, à la fois en encourageant une plus grande transparence des problèmes sanitaires et environnementaux susceptibles de se poser à terme, mais aussi en mettant en place des contraintes législatives plus fortes en matière de responsabilités et de prévention des risques (circulaires du MEDD de février 2007). Dans ce contexte, la préservation des sols et la réhabilitation des sites pollués représentent aujourd'hui un des enjeux majeurs de la politique de développement durable. Au moins 4035 sites pollués ont été officiellement répertoriés<sup>1</sup> en France en 2007. Cependant, selon certaines estimations<sup>2</sup> plus de 100 000 sites pourraient être concernés et environ un tiers d'entre eux présenterait un risque potentiel pour la santé publique ou pour l'environnement. Il devient donc plus que jamais nécessaire de stimuler les recherches dans le

<sup>1</sup> <http://basol.environnement.gouv.fr/>

<sup>2</sup> Lecomte P. (1998). Les sites pollués : traitement des sols et des eaux souterraines. TecDoc Lavoisier ed., Londres, Paris, New-York

domaine de l'évaluation des risques, mais aussi dans celui des technologies de dépollution afin de mettre en place des outils supplémentaires de diagnostic et de traitement des sites pollués.

Dans une étude prospective réalisée en 2007 par MSI Marketing Research<sup>3</sup> le marché français de l'évaluation et du traitement des sols pollués était estimé à environ 346 M€ pour l'année 2007, avec une progression moyenne de 8% par an. Selon l'Union Professionnelle des entreprises de Dépollution de Sites (UPDS), cette enveloppe globale correspond pour 50% aux procédures d'évaluation et pour 50% aux travaux de dépollution. Les récentes évolutions normatives et réglementaires (eg. norme de service NF X31-620, septembre 2003) ou l'adoption, suite aux amendements Métaeurop, de la loi du 30 juillet 2003 sur les risques technologiques, ne pourront que stimuler le développement de ce marché. La « Charte de l'Environnement », adossée à la constitution en 2005, et l'initiative du « Grenelle de l'Environnement » lancée en 2007, représentent par ailleurs des indicateurs solides de la volonté politique forte de pérenniser et de consolider ce secteur d'activité.

A l'heure actuelle, dans ce marché en pleine croissance, les pollutions par des éléments traces métalliques constituent souvent des problématiques pour lesquelles seuls les procédés d'excavation ou de confinement sont retenus. Ces techniques sont certes efficaces mais coûteuses et conduisent à une perte ou à une dégradation des fonctions du sol. Parallèlement à ces approches, des techniques de phytoremédiation (phytoextraction et phytostabilisation notamment) ont été développées. La phytoextraction est toutefois limitée à certains éléments (As, Cd, Ni, Se et Zn), elle ne peut être envisagée si la pollution est trop forte et sa durée de mise en œuvre pour atteindre les objectifs de décontamination peut être très longue (30-50 ans). Dans ce contexte, la phytostabilisation, qui consiste à implanter une couverture végétale homogène et pérenne sur le site à traiter, pourrait être une option pertinente pour le traitement des grands sites industriels. Effectivement, on sait depuis longtemps que les plantes ont un effet protecteur sur les sols en limitant leur lessivage et leur érosion mécanique. Par ailleurs, certains végétaux ont la capacité d'immobiliser des métaux et métalloïdes en libérant des molécules organiques aux propriétés complexantes au niveau de leur système racinaire. Enfin, la végétalisation d'un site répond aussi au souci d'intégration paysagère et de « restauration écologique durable ».

Suite aux travaux précurseurs<sup>4,5,6</sup> publiés en Europe dans le courant des années 1990, une vingtaine de sociétés se sont positionnées aux USA sur le créneau de la phytoremédiation et sont aujourd'hui spécialisées dans les traitements de ce type. A titre d'exemple on peut citer les groupes EdenSpace<sup>7</sup> ou Ecolotree<sup>8</sup> qui sont actuellement leaders du marché. En Europe par contre, aucune société ne revendique aujourd'hui clairement cette spécialité. La recherche dans ce domaine est toutefois très active, notamment grâce aux travaux du groupe de J. Vangronsveld de l'Université de Hasselt en Belgique et à ceux de M. Mench de l'UMR Biogeco à Bordeaux. En France, des évaluations de l'efficacité de la phytostabilisation ont initialement été conduites dans le 4<sup>ème</sup> PCRD (1996-99) avec le programme PhytoRehab<sup>9</sup> puis dans le 5<sup>ème</sup> PCRD (2000-2004) à travers l'un des objectifs du programme Phytodec<sup>10</sup>. La réhabilitation du site de La Combe du Saut (site minéralurgique de Salsigne, Aude, pollué par As), réalisée dans le cadre du programme Européen « Difplomine » (2000 – 2006) avec l'ADEME comme maître d'ouvrage, constitue une première

<sup>3</sup> Le marché de l'évaluation et la décontamination des sols pollués en France – MSI Marketing Research for Industry Ltd, Mars 2008

<sup>4</sup> Mench M., Vangronsveld J., Didier V. & Clijsters H. (1994). Evaluation of metal mobility, plant availability, and immobilization by chemical agents in a limed-silty soil. *Environmental Pollution*, 86, 279-86.

<sup>5</sup> Mench M., Didier V. & Loeffler M. (1994). A mimicked in-situ remediation study of metal-contaminated soils with emphasis on cadmium and lead. *Journal of Environmental Quality*, 23, 58-63.

<sup>6</sup> Boisson J., Mench M., Sappin-Didier V., Solda P. & Vangronsveld J. (1998). Short-term immobilization of Cd and Ni by beringite and steel shots application to long-term sludged plots. *Agronomie*, 18, 347-359.

<sup>7</sup> <http://www.edenspace.com/>

<sup>8</sup> <http://www.ecolotree.com/>

<sup>9</sup> Mench M. & Boisson J. (1998). Strategies for rehabilitation of metal polluted soils: in situ phytoremediation, immobilization and revegetation, a comparative study ((Phytoreab). In Verkleij J., Rapport intermédiaire n°4, Amsterdam, Convention INRA - Union Européenne, Programme Environnement & Climat, n° ENV4 - CT95 - 0083. p

<sup>10</sup> <http://www.alterra-research.nl/pls/portal30/docs/folder/phytodec/index.htm>

expérience à l'échelle industrielle. Cette expérience est actuellement surveillée par le programme Phytoperf (2007-2009) porté par la société ICF-IRH, financé par l'ADEME. Phytoperf a pour objectif l'évaluation des paramètres qui limitent le développement du couvert végétal sur un sol contaminé en As dont les propriétés physico-chimiques ont été améliorées par l'adjonction de grenaille de fer zérovalent. Physafimm vise à réaliser une évaluation, encore non disponible à ce jour, des conditions d'optimisation du procédé sur des friches industrielles métallifères polymétalliques.

### 1.2.2 Enjeux spécifiques au site d'étude

Le crassier d'Industeel-Loire / site de Châteauneuf retenu dans ce projet (figure 1), par son histoire industrielle, sa localisation et ses caractéristiques intrinsèques, présente un certain nombre d'enjeux spécifiques, qui peuvent se retrouver sur d'autres sites post industriels.

Sur le plan sociétal, la responsabilité environnementale des entreprises impose la mise en place de pratiques d'exploitation et de réhabilitation respectueuses de l'environnement. Industeel-Loire s'engage dans cette perspective et souhaite faire valoir un patrimoine industriel en phase avec le patrimoine naturel (sols, air, eau) et les exigences du développement durable. Il est donc nécessaire de développer pour cela des méthodologies de réhabilitation adaptées.



Figure 1 : Vue aérienne du site de Châteauneuf, Industeel Loire, à proximité de Rive de Gier, image tirée de <http://www.mappy.fr>

Sur le plan scientifique, l'enjeu est important puisqu'il s'agit d'interconnecter plusieurs approches issues de disciplines différentes comme la pédogéochimie, l'écophysiologie, la biologie, la biochimie et l'hydrogéologie. La réhabilitation des sols nécessite encore des expérimentations in situ et en laboratoire permettant de tester des solutions de phytostabilisation. La protection de l'hydrosystème, qui constitue le vecteur principal des transferts de pollution, nécessite de mettre en œuvre des méthodologies d'évaluation d'impacts faisant appel à une modélisation intégrée entre les différents compartiments : sols, eaux souterraines, eaux de surface.

## 1.3 Objectifs et caractère ambitieux/novateur du projet.

Les avantages de la phytostabilisation en termes de réduction des transferts, de protection/reconstruction des sols, de reconquête végétale et de restauration écologique de milieux fortement anthropisés, constituent aussi les principaux verrous de son développement. En effet, si les méthodes plus classiques de traitement (telles que l'excavation/mise en décharge ou le confinement in situ) sont aujourd'hui directement applicables en toutes situations par des entreprises du BTP, la phytostabilisation reste une démarche au cas par cas<sup>11</sup>. Complexe par essence, elle doit en effet tenir compte à la fois des polluants présents, de leurs concentrations, des espèces végétales susceptibles de les tolérer, des conditions pédologiques et climatiques du milieu, des voies de transfert résiduel, etc... En conséquence, son développement nécessite une expertise en amont couvrant un ensemble de situations les plus diverses possibles.

<sup>11</sup> Frérot H., Vidal C., Mahieu S., Escarré J., Maure L., Brunel B., Lefèbvre C., Heulin K., Galiana A., Cleyet-Marel1ères J.C. (2009) Phytostabilisation de déchets miniers utilisant les interactions spécifiques entre des plantes méditerranéennes métallicoles et la symbiose Rhizobium / Fabaceae. Journées Ateliers du " Réseau d'Échanges et de Valorisation en Écologie de la Restauration " REVER 1, <http://www.imep-cnrs.com/rever/index.htm>



Le programme Physafimm a pour but de définir une méthodologie de mise en œuvre et de suivi du procédé de phytostabilisation extrapolable à un ensemble de friches industrielles, métallurgiques ou minières. Pour parvenir à ses objectifs, Physafimm est basé sur une double approche expérimentale qui met en œuvre parallèlement un moniteur lysimétrique permettant le contrôle des paramètres explorés et un pilote préindustriel in situ permettant le contrôle de la faisabilité de la méthode. Compte tenu des contraintes liées au développement de la végétation pour obtenir une couverture satisfaisante et une évolution notable des paramètres pédogéochimiques du substrat, la durée du programme a été fixée à 4 ans.

Le premier objectif d'une phytostabilisation est d'obtenir rapidement une couverture végétale maximale. Dans ce cadre, deux paramètres sont particulièrement importants : l'utilisation d'une part, d'espèces non-invasives, tolérantes et non-accumulatrices, adaptées aux conditions pédogéochimiques et climatiques du milieu et d'autre part, l'apport d'amendements, si le milieu le nécessite,.

🌈 Le choix des espèces ensemencées est essentiel et constitue le premier facteur limitant. Au-delà des taxons choisis pour constituer le mélange de semences, il est indispensable de considérer les interactions, de synergie ou d'antagonisme, susceptibles de s'établir entre les espèces<sup>12</sup>. De fait, en milieu naturel les espèces ne se distribuent pas au hasard mais se regroupent pour former des associations caractéristiques<sup>13</sup>. Les taxons rencontrés au sein d'une association donnée présentent non seulement des exigences écologiques similaires mais entretiennent également souvent des relations de facilitation mutuelle. Dans un travail récent<sup>14</sup>, Remon (2006) a étudié la végétation de plusieurs sites métallurgiques de la région stéphanoise et a mis en évidence l'existence d'associations caractéristiques de ce type de milieu. Paradoxalement, l'importance du choix d'associations phytosociologiques particulières a été peu ou pas considérée dans les essais de phytostabilisation. Physafimm propose donc de comparer le comportement d'associations végétales caractéristiques de friches métallurgiques à celui de mélanges d'espèces communément utilisées en revégétalisation.

🌈 La mauvaise qualité du substrat est un second facteur limitant pour la phytostabilisation des sites métallurgiques et miniers. Outre des teneurs anormalement élevées en métaux et des pH souvent extrêmes, ces anthroposols sont déséquilibrés en éléments nutritifs, pauvres en matière organique et souvent très drainants. Dans ces conditions, il est important de rééquilibrer la composition du substrat, de favoriser la reconstruction d'un sol apte à supporter un couvert végétal et de limiter les pertes d'eau. L'addition d'amendements organiques est donc souvent préconisée pour la préparation des sols en vue d'une phytostabilisation. Outre le compost<sup>15,16</sup>, l'apport de boues stabilisées en provenance de station d'épuration (boues de STEP) peut être envisagé. En effet, ces boues sont largement disponibles et leur contenu en métaux, souvent décrié en utilisation agricole, ne risque pas ici de venir perturber le milieu déjà très contaminé. Par ailleurs, depuis quelques années, les effets bénéfiques d'amendements constitués de bois raméal fragmenté (BRF) ont été soulignés<sup>17</sup>, notamment pour enrichir des sols très pauvres, déstructurés et à faible capacité de rétention d'eau. Le BRF permet de stimuler le développement des microorganismes et de la mésofaune du sol, de favoriser les processus d'humification, de réduire les pertes d'eau, et finalement, d'accélérer la reconstruction d'un sol équilibré et biologiquement actif. L'utilisation du BRF, dont le coût est en outre relativement réduit, pourrait donc être très efficace pour enrichir des substrats très

<sup>12</sup> Frérot H., Lefèbvre C., Gruber W., Collin C., Dos Santos A. & Escarré J. (2006). Specific interactions between local metalicolous plants improve the phytostabilization of mine soils. *Plant and Soil*, 282: 53-65..

<sup>13</sup> Braun-Blanquet J. (1964). *Pflanzensoziologie*. Springer-Verlag, Vienne, 865 pp..

<sup>14</sup> Remon E. (2006). Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de biodépollution. Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet, 157 pp.

<sup>15</sup> Rizzi L., Petruzelli G., Poggio G. & Vigna Guidi G. (2004). Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test for phytostabilization. *Chemosphere*, 57, 1039-1046.

<sup>16</sup> Ruttens A., Mench M., Colpaert J.V., Boisson J., Carleer R. & Vangronsveld J. (2006). Phytostabilization of a metal contaminated sandy soil. I: Influence of compost and/or inorganic metal immobilizing soil amendments on phytotoxicity and plant availability of metals. *Environmental Pollution*, 144, 524-532.

<sup>17</sup> <http://www.ctastree.be/BRF/indexbrf.htm>

pauvres en vue de leur phytostabilisation. Physafimm a donc aussi pour but de comparer l'efficacité du BRF à celle des boues de STEP.

Le second objectif d'une phytostabilisation est la réduction des transferts de polluants, tant vers les milieux que vers les récepteurs. Dans ce cadre trois questions principales restent souvent posées, mettant en exergue trois verrous scientifiques plus fondamentaux : i/ quels sont les flux de métaux en direction de la végétation mise en place ? ii/ quelle est l'influence des plantes sur la spéciation et la mobilité des métaux ? et iii/ l'efficacité de la méthode évolue-t-elle au cours du temps ?

-  la question du transfert potentiel des métaux vers la biomasse végétale aérienne, et donc du rôle des plantes en tant que source secondaire de dispersion des polluants (et, in fine, de contamination de la chaîne alimentaire) est relativement complexe. L'importance du phénomène dépend à la fois de l'espèce, de la concentration en polluants, de leur biodisponibilité, mais aussi des conditions pédogéochimiques du sol. Il est donc nécessaire non seulement de déterminer si les végétaux utilisés comme couverture accumulent les polluants dans leurs organes aériens, mais aussi de quantifier le flux éventuel de contaminant et de hiérarchiser les paramètres impliqués dans cette voie de transfert.
-  un autre effet possible de la végétation est une modification des propriétés physico-chimiques du sol. Outre un enrichissement en matière organique, qui peut favoriser l'immobilisation des métaux, les végétaux libèrent des exsudats racinaires dont la diversité et les propriétés précises sont encore mal connues mais qui pourraient notablement modifier la spéciation des métaux. La question reste donc posée de savoir si ces modifications de la composition du sol rhizosphérique augmentent ou diminuent la mobilité potentielle des métaux et dans quelle mesure la modélisation des interactions sol / eau du sol / plante peut en rendre compte.
-  enfin, il est indispensable d'évaluer l'efficacité de la méthode au cours du temps. En premier lieu, on peut se demander comment évoluent les flux de polluants au cours d'un cycle annuel, en particulier durant la période hivernale de repos végétatif. En second lieu, il est nécessaire de s'assurer de l'efficacité du procédé à plus long terme, en suivant notamment la quantité et la nature des lixiviats durant les premières années de traitement, au cours desquelles les caractéristiques pédologiques du substrat peuvent évoluer rapidement. L'ensemble de ces données devrait permettre d'appréhender précisément les risques de transferts résiduels vers la nappe et d'évaluer leur évolution temporelle.

Les objectifs du programme Physafimm sont donc de définir une méthodologie de phytostabilisation basée sur quelques paramètres simples et contrôlables permettant d'optimiser l'implantation d'un couvert végétal homogène et d'évaluer les trois voies potentielles de transfert des métaux pouvant in fine exposer des récepteurs : l'accumulation foliaire ; la re-mobilisation rhizosphérique ; la lixiviation potentielle des polluants conservés sur le site.

## 1.4 Positionnement du projet.

La structuration du projet Physafimm résulte avant tout d'une dynamique de réseau, initiée sous l'impulsion des actions COST 837 (Plant biotechnology for the removal of organic pollutants and toxic metals from wastewaters and contaminated sites)<sup>18</sup> puis COST 859 (Phytotechnologies to promote sustainable land use and improve food safety)<sup>19</sup>, coordonnées en France par M. Mench et V. Bert. Le but de ce réseau est de structurer la recherche européenne dans le domaine des phytotechnologies appliquées à l'environnement et il affiche dans ses objectifs « l'optimisation de la remédiation et le contrôle de la capacité de remédiation des plantes afin de rendre les phytotechnologies attractives ». Physafimm est également en cohérence directe avec le programme européen SNOWMAN-SUMATECS (Sustainable management of trace element contaminated soils)<sup>20</sup>,

<sup>18</sup> <http://lbewww.epfl.ch/COST837/>

<sup>19</sup> <http://w3.gre.ac.uk/cost859/>

<sup>20</sup> <http://www.rhizo.at/default.asp?id=326&lid=2>

dont il alimentera la base de données. Physafimm s'inscrit par ailleurs dans la démarche du réseau « SolBiotech » coordonné à l'ADEME par F. Cadière et N. Dueso, dont l'objectif est de fédérer la recherche dans le domaine des nouvelles technologies de traitement des sols et d'accompagner des projets de mise en œuvre et/ou de démonstration sur des sites ateliers représentatifs de différentes typologies. Enfin, par ses aspects concernant l'influence des éléments métalliques sur les associations végétales et les modalités des transferts sol-plantes, ce projet présente également un lien fort avec le programme « Contaminants, Ecosystèmes et Santé » géré par l'ANR, et les programmes « PNETOX » et « Bioindicateurs » coordonnés respectivement par le MEDAD et par l'ADEME.

Le projet Physafimm se positionne dans un contexte où les expérimentations sur site sont encore nécessaires en Europe. Un des rares retours d'expérience disponibles aujourd'hui pour un projet à l'échelle industrielle est celui du programme Difpolmine<sup>21</sup>, dont les performances sont actuellement évaluées dans le cadre du programme Phytoperf. Le site minéralurgique de Salsigne se situe en domaine agricole, sur des terrains naturels contaminés en As, aux sols très décapés et/ou appauvris par la décontamination, pour lesquels aucun amendement organique n'a été programmé. Physafimm propose une expérience en situation urbaine pour laquelle la reconquête paysagère est une nouvelle dimension, qui se situe dans un contexte pédogéochimique radicalement différent (totalement anthropique et très contaminé en métaux), et veut évaluer l'apport d'amendements et donc nécessairement leur incidence sur les transferts. Les principaux acteurs du projet Physafimm participent également à Phytoperf, garantissant la complémentarité des objectifs, la circulation de l'information et l'intégration des résultats de ces deux programmes dans une optique opérationnelle.

Le projet Physafimm propose de développer une technologie alternative de traitement de déchets solides, visant à diminuer significativement les volumes de déchets stockés en centre d'enfouissement technique. Il s'inscrit ainsi clairement dans la politique affichée par l'état français de recherche de nouveaux procédés (production et traitement) et de nouvelles technologies de protection et gestion des ressources naturelles. Physafimm est basé sur un partenariat tripartite, entre des laboratoires de recherches appartenant à des organismes institutionnels (Ecole des Mines, INRA, Université), un groupe industriel porteur d'une problématique environnementale (Industeel Loire, groupe ArcelorMittal) et une entreprise fournisseur de services (ICF-IRH), afin de « développer une technologie centrée sur une maîtrise de la pollution des milieux ». Il est ainsi en adéquation avec le développement souhaité de nouvelles technologies de protection des milieux en vue de lever certains verrous économiques ou technologiques, permettant de rendre les procédés de dépollution plus compétitifs par rapport aux pratiques actuelles, notamment l'excavation-stockage.

## 1.5 Description des travaux : programme scientifique et technique

Le site retenu pour mettre en œuvre le projet Physafimm est le «crassier» métallurgique d'Industeel-Loire (figure 1, page 6) du groupe ArcelorMittal sur la commune de Châteauneuf (Rives de Gier) entre Saint-Etienne et Givors (Loire). Une des caractéristiques fondamentales des matériaux qui le constituent est leur richesse en éléments métalliques, en fer bien sûr, mais aussi en manganèse, en plomb, plus divers métaux rentrant dans la composition des principaux alliages (Al, Cr, Ni, Zn, Cu....). Compte tenu des volumes de déchets entreposés et du caractère relativement inerte des matériaux, le maintien en place du crassier est la solution la plus satisfaisante, tant du point de vue économique qu'environnemental. Le site est néanmoins répertorié dans la base de données « BASOL », gérée par le MEDAD, et fait l'objet d'une surveillance piézométrique régulière.

D'un point de vue hydrogéologique et paysager, ce site industriel se situe en bordure du Gier, cours d'eau affluent du Rhône. Il est implanté sur des alluvions récentes sablo-caillouteuses et polygéniques, d'épaisseur assez variable mais n'excédant pas la dizaine de mètres. Les crues du Gier sont relativement fréquentes et peuvent être importantes. Ainsi, les débits instantanés maximaux

<sup>21</sup> <http://www.difpolmine.org/>



enregistrés<sup>22</sup> lors des crues de décembre 2003 et novembre 2008 était respectivement de 338 et 300 m<sup>3</sup>/s (fréquence estimée d'ordre cinquantennale) pour un débit moyen de 3,2 m<sup>3</sup>/s à Givors. Ces crues provoquent le lessivage de nombreuses friches industrielles, contribuant ainsi à la dégradation du cours d'eau. Actuellement le Gier fait l'objet d'un contrat de rivière ayant pour objectif principal d'améliorer la qualité des eaux conformément aux exigences de la DCE<sup>23</sup> et les communes membres du Syndicat du Gier ont placé la reconquête de la rivière et de ses rives parmi leurs priorités.

Les équipes de recherche intervenant dans ce projet ont acquis une très bonne connaissance de ce crassier, qui a été retenu comme « site atelier » dans le cadre du programme Bioindicateur 2004-2008. Les principales associations végétales colonisant le crassier et des sites comparables de la région ont donc été caractérisées<sup>24</sup>, permettant ainsi d'optimiser la sélection des espèces végétales utilisées. En outre, 6 piézomètres de surveillance sont déjà en place (2 en amont et 4 en aval).

Les travaux prévus dans le cadre du programme Physafimm seront conduits autour des 7 tâches opérationnelles suivantes, détaillées ci-après :

- tâche 1 : préparation et ensemencement des planches expérimentales
- tâche 2 : suivi de l'évolution de la couverture végétale et de son état physiologique
- tâche 3 : évaluation des transferts résiduels de métaux
- tâche 4 : analyse de l'évolution minéralogique et pédogéochimique du substrat
- tâche 5 : caractérisation de la mobilité des métaux
- tâche 6 : modélisation préliminaire des interactions sol-plante en milieu contaminé
- tâche 7 : synthèse et traduction des données en résultats opérationnels

#### 1.5.1 Tâche 1 : préparation et ensemencement des planches expérimentales (Partenaires : ENSM-SE, ICF-IH, UJM/LEPA et Industeel Loire)

Tâche de lancement du programme, son objectif est de préparer, instrumenter et ensemercer les planches d'expérimentation du moniteur lysimétrique et du pilote préindustriel in situ.

Le schéma expérimental que nous avons choisi a pour but de tester deux paramètres sur l'efficacité globale du procédé :

- l'influence de l'amendement utilisé
- l'influence du cortège d'espèces ensemencées

Dans ce cadre, nous étudierons une combinaison de 3 modalités d'amendement et de 3 ensemencements (pas de semis ; mélange 1 ; mélange 2 ; cf. détails des mélanges ci-après), soit un total de 9 conditions expérimentales.

Ces 9 conditions seront testées en parallèle, sur pilote préindustriel in situ et en moniteur lysimétrique :

 le pilote préindustriel in situ divisé en 9 « planches-pilotes ». L'objectif de ce pilote est d'offrir à l'expérience des conditions de drainage et d'hétérogénéité non modifiées, permettant de contrôler l'impact éventuel de ces deux variables.

 le moniteur lysimétrique sera constitué de 9 « planches-lysismètres ». Chaque planche sera drainée et instrumentée pour contrôler les volumes d'eau entrant et les lixiviats sortant. Ces planches-lysismètres seront préparées selon les mêmes techniques culturales que les planches-pilotes tout en offrant l'avantage de l'homogénéité des conditions pédogéochimiques et celui de la collecte d'eau en vue d'analyser les compositions en métaux des eaux de lixiviation.

<sup>22</sup> DIREN Rhône-Alpes, Délégation de Bassin Rhône Méditerranée. BSHnovembre08\_bilan.pdf

<sup>23</sup> Directive Cadre sur l'Eau

<sup>24</sup> Faure, O. 2007. La végétation des friches métallurgiques : caractéristiques écophysologiques et influence sur la mobilité des métaux lourds. Programme ADEME « Bioindicateurs », convention n° 04 72 C 0021 du 17 mars 2005, rapport d'activité de la 2<sup>ème</sup> année.

Chaque planche du pilote préindustriel et du moniteur lysimétrique sera en outre équipée de 2 cannes lysimétriques PTFE permettant l'échantillonnage de l'eau en domaine rhizosphérique, à 20 et à 50cm de profondeur. Cette double approche, sur pilote et lysimètres, nous permettra d'obtenir des informations qualitatives et quantitatives concernant d'une part le comportement de la végétation dans des conditions aussi proches que possible de la réalité de terrain, et concernant d'autre part le bénéfice potentiel du procédé en termes de réductions des transferts de polluants vers les eaux souterraines.

Les planches seront divisées en 3 lots amendés différemment et l'ensemencement sera effectué avec des semis d'origine commerciale, car la méthodologie recherchée doit pouvoir être appliquée aisément à des friches récentes, dont la recolonisation naturelle est très limitée et ne permet pas une collecte suffisante des graines des taxons les plus intéressants.

Pour chaque situation d'amendement, trois types d'ensemencement seront effectués :

- Pas de semis (dans cette situation la colonisation des planches s'effectuera spontanément, majoritairement par des espèces pionnières présentes sur le site).
- Semis du mélange 1 (tableau I), correspondant à un cortège d'espèces classiquement utilisées en revégétalisation de milieux anthropisés, mais ne correspondant pas à une association phytosociologique caractéristique de friche métallurgique.
- Semis du mélange 2 (tableau I), correspondant à une association prairiale de friche métallurgique caractérisée dans un travail précédent<sup>14</sup>.

A priori, une seule irrigation appliquée au moment du semis sera effectuée durant toute la durée du programme. Cependant en cas de sécheresse importante qui remettrait en question la survie de la végétation, nous prévoyons de recourir à un arrosage d'appoint jusqu'à l'installation d'un couvert végétal suffisant. L'importance et la fréquence de l'irrigation des planches seront ajustées au cas par cas et quantifiées précisément.

Tableau I : Composition des mélanges des graines prévus pour l'ensemencement des planches

| Famille         | Mélange 1 <sup>a</sup> | Mélange 2 <sup>b</sup> |
|-----------------|------------------------|------------------------|
| Poaceae         |                        |                        |
| Fabaceae        |                        |                        |
| Autres familles |                        |                        |

<sup>a</sup> Cortège d'espèces classiquement utilisé en revégétalisation mais non caractéristique de friche métallurgique

<sup>b</sup> Association caractéristique de friche métallurgique, d'après références 14 et 22

#### 1.5.2 Tâche 2 : suivi de la couverture végétale et de son état physiologique (Partenaires : UJM/LEPA, UA/LPBV, UB/BIOGECO et UBP/PIAF)

La réussite d'une stratégie de phytostabilisation dépend avant tout de l'obtention d'un couvert végétal homogène, pérenne, et montrant un développement sain et vigoureux. Il est donc indispensable d'évaluer le développement de la végétation et de suivre son état physiologique au cours des premières étapes du procédé. L'objectif de la tâche 2 sera donc d'acquérir des données permettant d'estimer et comparer la dynamique de la végétation, en intégrant des marqueurs qualitatifs et des marqueurs quantitatifs du développement. Quatre descripteurs principaux seront suivis selon une périodicité variable au cours du programme :

- ✚ La richesse spécifique et l'abondance/dominance des taxons de chaque planche, espèces « vernalles », espèces « estivales » et espèces « automnales ».. Ce travail permettra de préciser l'évolution du système dans son ensemble et de caractériser les associations les plus performantes dans les conditions testées ; il permettra par ailleurs d'étudier la dynamique de la revégétalisation spontanée sur les planches non ensemencées et de caractériser les premières étapes de la reconquête de ce type de milieu fortement anthropisé par des espèces pionnières.
- ✚ Le taux de recouvrement total par planche sera déterminé et un suivi régulier sera réalisé de façon à caractériser précisément les variations annuelles et pluriannuelles du couvert végétal, en fonction des conditions culturales. Ces résultats seront corrélés aux données concernant la lixiviation (tâches 3 et 6).
- ✚ La biomasse aérienne globale sera mesurée à l'optimum de végétation.
- ✚ L'état physiologique de la végétation sera caractérisé par 3 biomarqueurs d'effet, traduisant des symptômes de stress ou révélant une génotoxicité du milieu :
  - i / Suivi du fonctionnement du système photosynthétique : la photosynthèse est un processus complexe qui peut être affecté par différents facteurs environnementaux et notamment par la présence d'éléments traces métalliques<sup>25,26</sup>. Ces perturbations se manifestent généralement par une baisse de la photosynthèse nette associée à une augmentation de la fluorescence chlorophyllienne.
  - ii / Mesure de l'état hydrique des plantes : il est reconnu depuis longtemps que les contaminations par des éléments traces métalliques peuvent entraîner un stress hydrique chez les végétaux<sup>27</sup>, se traduisant par un dessèchement des feuilles et une fanaison plus ou moins rapide.
  - iii / Induction d'anomalies caryologiques : la présence de polluants métalliques dans un sol peut entraîner des anomalies chromosomiques plus ou moins importantes dans les tissus méristématiques racinaires. En particulier, un phénomène facile à observer est l'induction de micronoyaux, qui permet de détecter facilement des effets génotoxiques chez le modèle *Vicia faba*<sup>28</sup>. Nous utiliserons donc ce test in situ.

### 1.5.3 Tâche 3 : évaluation des transferts résiduels de métaux (Partenaires : ENSM-SE, ICF-IH et UJM/LEPA)

Dans une démarche d'évaluation des risques, l'élaboration des schémas conceptuels d'exposition prend classiquement en compte trois paramètres fondamentaux :

- le danger intrinsèque des substances présentes
- la possibilité d'un transfert de ces substances
- les cibles potentielles pouvant être atteintes

Dans ce contexte, le but de la phytostabilisation est de limiter les transferts afin de diminuer les risques. L'objectif de la tâche 3 sera donc de réaliser un bilan précis concernant l'influence de la phytostabilisation sur deux voies de transfert potentiel des métaux, la végétation et l'eau du sol.

- ✚ Les transferts vers les plantes seront évalués en mesurant les concentrations en métaux accumulés dans la biomasse aérienne. Pour cela deux paramètres seront suivis : le transfert « par espèce » et le transfert « global » :

<sup>25</sup> Mysliwa-Kurdziel B. & Strzalka K. (2002) - Heavy metal influence on the light phase of photosynthesis In: Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. M.N. Prasad and K. Strzalka (Eds). Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, Boston, London. pp. 201-256.

<sup>26</sup> Romanowska E. (2002) - Gas exchange functions in heavy metal stressed plants. In: Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. M.N. Prasad and K. Strzalka (Eds). Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, Boston, London. pp. 201-256

<sup>27</sup> Poschenrieder Ch. & Barcelo J. (2004). Water relations in heavy metal stressed plants. In: Prasad M.N.V. (Ed.) Heavy Metal Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems. Springer-Verlag, Berlin. pp. 249-270..

<sup>28</sup> Souguir D., Ledoigt G., Ferjani E. & Goupil P. (1998). Exposure of *Vicia faba* and *Pisum sativum* to copper induced genotoxicity. Protoplasma (In press)

- i / L'étude du transfert « par espèce » a pour but de caractériser le comportement de chaque taxon vis-à-vis de l'accumulation des métaux. Ce travail permettra d'identifier les espèces à faibles capacités d'accumulation (« excluders » selon Baker<sup>29</sup>), à favoriser en phytostabilisation, ainsi que les espèces fortement accumulatrices, à éviter dans les propositions d'ensemencement.
- ii / L'étude du transfert « global » permettra de calculer et de comparer les flux de métaux vers la végétation dans les différentes conditions expérimentales.

 Les transferts vers l'eau du sol seront suivis en réalisant une étude quantitative et qualitative des lixiviats. Les volumes de lixiviats seront suivis en continu grâce à un compteur de débit équipant chaque lysimètre. Les lixiviats récoltés feront également l'objet de tests d'écotoxicité. Trois tests seront utilisés :

- i / Le test d'inhibition de croissance de l'algue verte unicellulaire *Pseudokirchneriella subcapitata* ;
- ii / Le test d'inhibition de la mobilité de *Daphnia magna* ;
- iii / Le test d'inhibition de croissance de *Lemna minor*.

 Les transferts aériens seront également estimés grâce à des jauges Owen placées au niveau des parcelles végétalisées et non traitées. Ce dispositif devrait permettre la détermination quantitative de l'empoussièrement des zones équipées de façon à évaluer l'impact de la revégétalisation.

 Les transferts vers l'eau de la nappe phréatique au droit du site seront évalués par modélisation. L'utilisation de codeurs enregistreurs (thalimède OTT) permettra de suivre en continu les variations de hauteurs d'eau de la nappe alluviale. La modélisation des écoulements souterrains s'effectuera dans un premier temps par modélisation hydrodynamique pure afin de déterminer les gradients hydrauliques et les échanges possibles avec le Gier. La modélisation hydrogéologique<sup>30</sup> de ce secteur de la vallée du Gier reposera sur un modèle déterministe de type « différences finies » à maille large complété par des modèles locaux à maille fine au niveau des planches lysimétriques.

- i / La perméabilité des alluvions et leur coefficient d'emménagement seront obtenus par essais de pompage
- ii / Les résultats fournis par le modèle global serviront de conditions limites aux modèles locaux. Ces derniers permettront de reproduire plus finement les écoulements au droit des planches-pilotes ainsi que les échanges rivière – nappe au niveau du site.

En fonction des résultats de l'étape de modélisation précédente et des connaissances acquises sur la zone non saturée, l'étude des transferts en zone non saturée sur le site pourra être envisagée à partir d'une modélisation 1D des transferts sol-végétation ou par simulation de transfert réactif, couplant les réactions eau - minéraux aux processus d'écoulement en milieu poreux dans la zone non saturée.

#### 1.5.4 Tâche 4 : analyse minéralogique et pédo-géochimique du substrat (Partenaire : ENSM-SE)

Le procédé de phytostabilisation, en favorisant le développement d'un couvert végétal, peut conduire non seulement à un enrichissement du substrat en matière organique mais aussi à une modification progressive des caractéristiques pédogéochimiques du sol pouvant, en retour, modifier la mobilité des métaux. L'objectif de cette tâche sera donc de comparer l'influence des différents itinéraires culturaux utilisés (combinaisons espèces / amendements), sur la construction d'un néo-sol et sur l'évolution des principaux paramètres pédogéochimiques. Elle comprendra :

 La constitution d'un échantillon moyen de sol pour chaque planche.

<sup>29</sup> Baker A.J.M. (1981). Accumulators and excluders – Strategies in the response of plants to heavy metals. J. Plant Nutr., 3, 643-654.

<sup>30</sup> Graillot D. (2006). GIS and geodatabases for groundwater flow modelling Proceedings of the Fifth International Conference on the Analytic Element Method, Kansas State university 14-17 May 2006

- ✚ L'analyse pédologique, qui portera sur 14 paramètres, déterminés selon des procédures normalisées: pH; distribution granulométrique ; porosité ; teneur en carbonates ; calcaire actif ; CEC ; MO ; N total ; P soluble ; cations extractibles ; oligo-éléments « phytodisponibles » ; capacité de rétention normale en eau ; compaction..
- ✚ L'étude de la composition minérale sera conduite en DRX, en microscopie équipée en cathodoluminescence et en MEB équipée d'un analyseur de spectre X :  
L'analyse géochimique élémentaire des éléments majeurs et traces, dosés par XRF et par ICP-OES

1.5.5 Tâche 5 : caractérisation de la mobilité des métaux  
 (Partenaires : ENSM-SE)

Il est très généralement admis que les métaux du sol se distribuent en cinq fractions principales caractérisées par des interactions métal/matrice d'énergies croissantes : fraction « échangeable » ; fraction « acido-soluble » ; fraction « réductible » ; fractions « oxydable » et « résiduelle »<sup>31</sup>. Selon ce concept il apparaît clairement que le risque environnemental lié à un métal donné dépend moins de sa concentration totale que de sa répartition entre les principales fractions du sol, contrôlant sa plus ou moins grande mobilité potentielle. La question que l'on peut se poser est alors de savoir si les végétaux utilisés en phytostabilisation peuvent modifier ces équilibres et dans quel sens ils évoluent. L'objectif de cette tâche sera donc d'évaluer la mobilité potentielle des métaux et de caractériser les phases porteuses, en fonction du développement de la végétation (au cours d'un cycle annuel et au cours de la durée du programme).

Trois approches analytiques seront adoptées :

- i / Analyse des métaux dans la solution du sol en zone non saturée.
- ii / Extraction des métaux « phytodisponibles »,
- iii / Extraction séquentielle.

1.5.6 Tâche 6 : modélisation préliminaire des transferts réactifs du système sol-eau-plante.  
 (Partenaires : ENSM-SE, UJM/LEPA)

Les résultats acquis précédemment constitueront un support de choix pour l'exploration de pistes nouvelles concernant la thermodynamique des systèmes qui associent la fraction minérale et aqueuse du sol d'une part et la fraction biologique d'autre part. En fait, l'étude des interactions fluide-matrice minérale, a conduit l'ENSM-SE à développer des outils logiciels de simulation de transferts réactifs, couplant les réactions eau-gaz-minéraux aux processus d'écoulement en milieu poreux. Ces programmes sont actuellement appliqués à la diagenèse ou le piégeage minéral du CO<sub>2</sub>, mais sont aussi applicables aux processus de transfert de polluants métalliques en subsurface. L'architecture logicielle, actuellement en cours de développement dans le cadre du projet SHPCO2 (initié en 2008), permet une prise en compte de nouveaux processus, par ajout de fonctionnalités au module géochimique. Il est donc projeté d'étendre les fonctionnalités du programme aux processus rencontrés dans Physafimm, tels que les échanges entre les plantes, la rhizosphère et le sol (tâche 6.1).

En cas d'échec de cette approche, il sera conduit une modélisation classique de la spéciation des espèces métalliques en solution dans le sol (e.g. PHREEQC / MINEQL / CHESS).

Il paraît essentiel d'explorer, à l'occasion de ce programme, la faisabilité d'applications pouvant aider à comprendre la dynamique du système eau - sol – plante :

- i/ Comment les équilibres chimiques minéraux - solution aqueuse sont-ils modifiés par l'introduction de composés organiques ? L'étude des phénomènes de transfert sol-plante et de leur cinétique peuvent-ils s'appuyer sur les écarts aux équilibres et gradients correspondants définis à partir des caractérisations thermodynamiques ?

<sup>31</sup> Tessier A., Campbell P.G. and Bisson M. (1979) – Sequential extraction procedure for speciation of particulate trace metals. Anal. Chem., Vol. 51, pp. 844-851.



- ii/ La thermodynamique peut-elle aider à prévoir la complexation, la solubilité, la mobilité de métaux toxiques dans un tel contexte végétal et minéral ? Comment un équilibre minéral est-il déplacé par la présence de telle ou telle espèce végétale ?

#### 1.5.7 Tâche 7 : synthèse et traduction des données en résultats opérationnels

(Tous les partenaires)

L'objectif de cette tâche est d'interpréter et corréler l'ensemble des résultats obtenus durant les tâches 2 à 6 de façon à dégager un schéma cohérent permettant de cerner, pour les modalités testées, les conditions optimales pour la phytostabilisation de sites métallurgiques ou miniers, et les limitations de la méthode.

Pour cela les différents résultats seront compilés dans une base de données SQL (Structured Query Language) open source, hébergée par un serveur ENSM-SE, mise en place durant le premier semestre du programme et ouverte aux partenaires du projet. Toutes les données seront référencées spatialement et chronologiquement afin de permettre l'étude de l'évolution spatio-temporelle des paramètres suivis. Cette base de donnée sera organisée en 4 volets principaux (« sol », « eau », « plantes », « interactions sol-plantes »), correspondant à des groupes cohérents de variables :

- i / Le « volet sol » de la base recevra l'ensemble des variables descriptives du compartiment sol permettant de constater les évolutions potentielles des sols et de les corréler aux itinéraires culturels adoptés sur la durée du programme.
- ii / Le « volet eau » de la base recevra l'ensemble des mesures concernant les volumes et la composition élémentaire des lixiviats et leur écotoxicité, en vue de calculer les transferts massiques de métaux vers l'eau du sol et de la nappe mais aussi de comparer l'importance des flux dans les différentes conditions expérimentales et d'évaluer les risques résiduels éventuels.
- iii / Le « volet plantes » comprendra les données concernant la richesse spécifique, les taux de recouvrement, la biomasse végétale, les marqueurs physiologiques et les concentrations en métaux accumulés dans la biomasse aérienne.
- iv / Le volet « interactions sol-plantes » regroupera un ensemble de données exploratoires acquises en tâche 6, qui devraient permettre d'ébaucher un modèle des échanges entre sol, eau du sol et plantes afin de mieux comprendre l'effet des éléments métalliques sur la végétation et l'influence des plantes sur la mobilité des éléments traces.

L'exploitation de la base de données permettra alors de nourrir les objectifs quantitatifs d'évaluation des transferts et des flux de métaux, vers la végétation, vers l'eau du sol et vers la nappe. Une analyse factorielle et une analyse en composantes principales permettront d'établir les corrélations indispensables entre les variables des 4 volets et d'exprimer leur contribution à la dispersion des données dans cet espace multivarié, avec pour objectif de mieux cerner les facteurs responsables de la mobilité des métaux et de mieux comprendre les interactions sol-eau-plantes.

Les données ainsi récoltées et interprétées en subsurface pourront alors alimenter des modèles hydrogéologiques établis à l'échelle du site, afin d'évaluer les transferts prévisibles de métaux dans la nappe du Gier, à l'échelle du site supposé phytostabilisé, en fonction du couvert végétal, de la pluviométrie et de la saison.

Il sera alors possible de sélectionner, parmi les modalités testées, les couples ensemencement – amendement permettant l'établissement d'une couverture végétale maximale et homogène, et conduisant à une limitation la plus efficace possible des différentes voies de transfert. Cette sélection servira à établir les bases d'un cahier des charges en vue de mettre en œuvre une phytostabilisation la plus efficace possible à l'échelle du site étudié.

L'ensemble des données acquises viendra également enrichir la base de données du projet européen SNOWMAN-SUMATECS « Sustainable management of trace element contaminated soils – Development of a decision tool system and its evaluation for practical application ».

## 1.6 Résultats escomptés et retombées attendues

De manière générale les résultats escomptés et les retombées attendues de ce programme s'articulent autour de quatre points essentiels.

### 1.6.1 Retombées scientifiques

Le caractère fortement interdisciplinaire du projet permettra de produire des connaissances propres à chaque domaine mais aussi à la croisée de la pédogéochimie, de l'écophysiologie, de la biologie, de la biochimie et de l'hydrogéologie. L'ensemble de ces données permettra de mieux cerner la complexité des interrelations végétation-sol pollué-eau et de mieux comprendre le comportement et le devenir des contaminants métalliques dans des systèmes complexes.

En particulier les résultats acquis dans le cadre de Physafimm devraient permettre de développer et de valider des modèles de transfert entre différents compartiments de l'écosystème à plusieurs niveaux d'échelles : celle du pilote in situ, du site et de l'hydrosystème.

L'indisponibilité « d'observée » pour plusieurs de ces échelles nécessitera de mettre en place des stratégies de validations complémentaires des démarches de calibration, par évaluation d'écarts selon l'approche statistique ou stochastique.

Les différents modèles qu'il est prévu de construire au cours de ce programme partagent un corpus de données en partie commun et produisent des résultats complémentaires. C'est l'analyse de la cohérence d'ensemble de l'écotechnologie résultante qui doit permettre d'en valider les composantes. C'est sur ce principe relativement nouveau que la cohérence de chacune des composantes pourra être évaluée.

### 1.6.2 Retombées sociétales et économiques

Les principales retombées d'ordre économique s'inscrivent dans le long terme et il est aujourd'hui difficile de les prévoir de façon précise. Cependant, des stratégies d'adaptation ou de résilience des espèces végétales utilisées en phytostabilisation pourront être identifiées assez rapidement et peuvent intéresser directement les gestionnaires de friches industrielles : celles appartenant aux entreprises ou les sites orphelins relevant des collectivités territoriales. Dans ce domaine, les principaux acteurs bénéficiaires de ces résultats du programme sont les industriels des anciens sites métallurgiques et miniers mais aussi les gestionnaires du patrimoine naturel (eau, sol).

Des retombées économiques indirectes peuvent être citées comme la diminution des coûts de dépollution des sols ou bien des cours d'eau (dispositifs d'épuration). D'autres plus importantes relèvent de la fiscalisation européenne applicable en 2015, si les objectifs de qualité des cours d'eau superficiels et souterrains sont atteints pour les masses d'eau concernées.

### 1.6.3 Place du projet dans les stratégies industrielles d'Industeel Loire et d'ICF-IRH

L'activité métallurgique est implantée sur le site de Châteauneuf depuis 1865. Depuis cette époque jusqu'au milieu des années 1990, la décharge industrielle a été utilisée pour l'enfouissement de l'ensemble des déchets générés par l'activité du site. Classée sous la rubrique 167b de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement elle est soumise aux exigences du régime de l'autorisation et doit, à ce titre, répondre aux exigences de l'arrêté préfectoral d'Industeel Loire. Cette décharge est aujourd'hui une plateforme constituée d'infrastructures (voies ferrées, galerie technique, bascule ferroviaire, portique de détection de radioactivité...), de stockages temporaires de laitiers, d'oxydes, de calamines et de réfractaires et d'installations mobiles de criblages et de chargement des matériaux. Les connaissances d'Industeel Loire sur cette zone sont principalement liées aux suivis piézométriques, à l'ESR et l'EDR réalisés au début des années 2000 et au suivi des stocks et la séparation des matériaux réalisés depuis bientôt 15 ans.

Soucieuse de développer les connaissances de ce crassier et de participer à la définition d'une solution adaptée à son devenir, Industeel Loire a souhaité adhérer à ce partenariat d'étude sur la phytostabilisation. Le projet Physafimm doit proposer à Industeel Loire une alternative aux solutions de réhabilitations classiques utilisées sur les anciens crassiers métallurgiques. Préoccupée par l'aspect extérieur de son site, visible par les riverains mais également par les utilisateurs de l'autoroute et de la voie ferrée Lyon/St-Etienne, Industeel Loire souhaite que le projet Physafimm apporte des réponses à la problématique paysagère et améliore l'esthétique du crassier. De plus, Industeel Loire souhaite par sa participation à ce projet :

- **mettre en avant sa politique environnementale** auprès des scientifiques, des riverains et des instances administratives
- **développer son image d'entreprise citoyenne** et respectueuse de l'environnement
- **promouvoir cette technique** auprès de l'ensemble des sidérurgistes confrontés à des problématiques de réhabilitation.

ICF Environnement est une société d'ingénieurs conseils dont le champ d'action est celui de la gestion des risques au service des collectivités, de l'industrie et de l'immobilier. Être en mesure de proposer à des propriétaires de crassiers sidérurgiques une technique de réhabilitation alternative fondée sur une approche expérimentale, constitue pour ICF-IRH une solution complémentaire aux nombreuses techniques physico-chimiques qu'elle maîtrise déjà.

Pour les deux partenaires, ce projet doit démontrer que la technique de phytostabilisation peut répondre aux attentes des industriels propriétaires de crassiers sidérurgiques et à celles des administrations, vis à vis du devenir de ce type de zones, en satisfaisant notamment les exigences suivantes :

- **Efficacité**, notamment en diminuant les infiltrations d'eau dans les déchets et donc en diminuant la lixiviation
- **Durabilité et pérennité**
- **Résistance** aux phénomènes d'érosion provoqués par le ruissellement et le vent
- **Stabilité** face aux phénomènes climatiques

Ce projet devra, au-delà des exigences écologiques, montrer que la technique de phytostabilisation est économiquement acceptable, lors de la mise en œuvre mais également lors de ces entretiens.

#### 1.6.4 Critères de réussite et d'évaluation :

Pour chaque tâche du programme on peut citer quelques critères de réussite qui jalonnent le déroulement du programme. Certains critères sont techniques et liés au développement des méthodes, outils et modèles inhérents à chaque tâche. D'autres sont plus généraux et vérifieront l'adéquation entre les objectifs du projet et ses possibilités de mise en œuvre.

Il s'agit aussi de critères de qualité des livrables correspondant à chaque tâche.

- Tâche 1 : - bonne représentativité du site par les planches-pilotes
- Tâche 2 : - calibration du modèle de réponse (végétation) des planches du pilote et du moniteur
- Tâche 3 : - calage du modèle hydrologique sur les historiques de données disponibles
  - calage du modèle de transfert en zone non-saturée
- Tâche 4 : - analyse minéralogique et pédogéochimique permettant la caractérisation du substrat et des facteurs pouvant limiter la croissance végétale et renseigner sur la mobilité des métaux
- Tâche 5 : - quantification possible de la mobilité des métaux, avant et après phytostabilisation
- Tâche 6 : - calage des modèles de transfert eau-sol-plante
- Tâche 7 : - comparaison de l'évolution pédologique avec les résultats des extractions
  - bilan équilibré des transferts sol-eau
  - appropriation de la phytostabilisation par les utilisateurs finaux (gestionnaires des anciens sites métallurgiques et miniers, collectivités territoriales, syndicats)
  - validation du cahier des charges pour sa mise en œuvre à échelle industrielle.

## 1.7 Organisation du projet.

Le consortium est constitué par 7 partenaires, comprenant 8 équipes (cf. 1.7), dont la coordination est assurée l'ENSM-SE.

### 1.7.1 Tâche de coordination

Outre les tâches d'organisation et de gestion du planning du projet (voir ci-après), la coordination a pour mission de constituer et de faire fonctionner deux comités, comité de pilotage et comité de partenaires :

 le comité de pilotage sera restreint aux partenaires principaux localisés au voisinage du site d'étude, à savoir : ENSM-SE, UJM/LEPA, Industeel Loire. Sa composition est restreinte au coordinateur et son adjoint pour l'ENSM-SE, au représentant désigné de l'UJM/LEPA et celui de la société Industeel Loire. Le comité de pilotage sera chargé d'assurer le fonctionnement du pilote in situ et du moniteur lysimétrique. Il prendra sur le champ toute décision relative au bon fonctionnement des expérimentations sur site. Le coordinateur ou son adjoint portera les décisions prises en comité de pilotage à la connaissance des membres du comité de partenaires par tout moyen qu'il jugera opportun, sous huitaine. La réponse portant accord ou non accord des membres du comité de partenaires aura valeur de décision définitive, et sera prise à la majorité des réponses rendues sous huitaine. La société Industeel Loire, propriétaire du site, dispose d'un droit de veto, opposable dès lors que les décisions prises auraient une incidence qu'elle juge négative sur le fonctionnement de l'entreprise.

 le comité de partenaires sera composé de 9 membres de plein droit, comprenant le coordinateur plus 8 membres représentant chacune des équipes constitutives du consortium et nommés par elles. En cas de défaillance du représentant, l'équipe est en charge d'adresser un suppléant au comité. Le rôle du comité de partenaires est de :

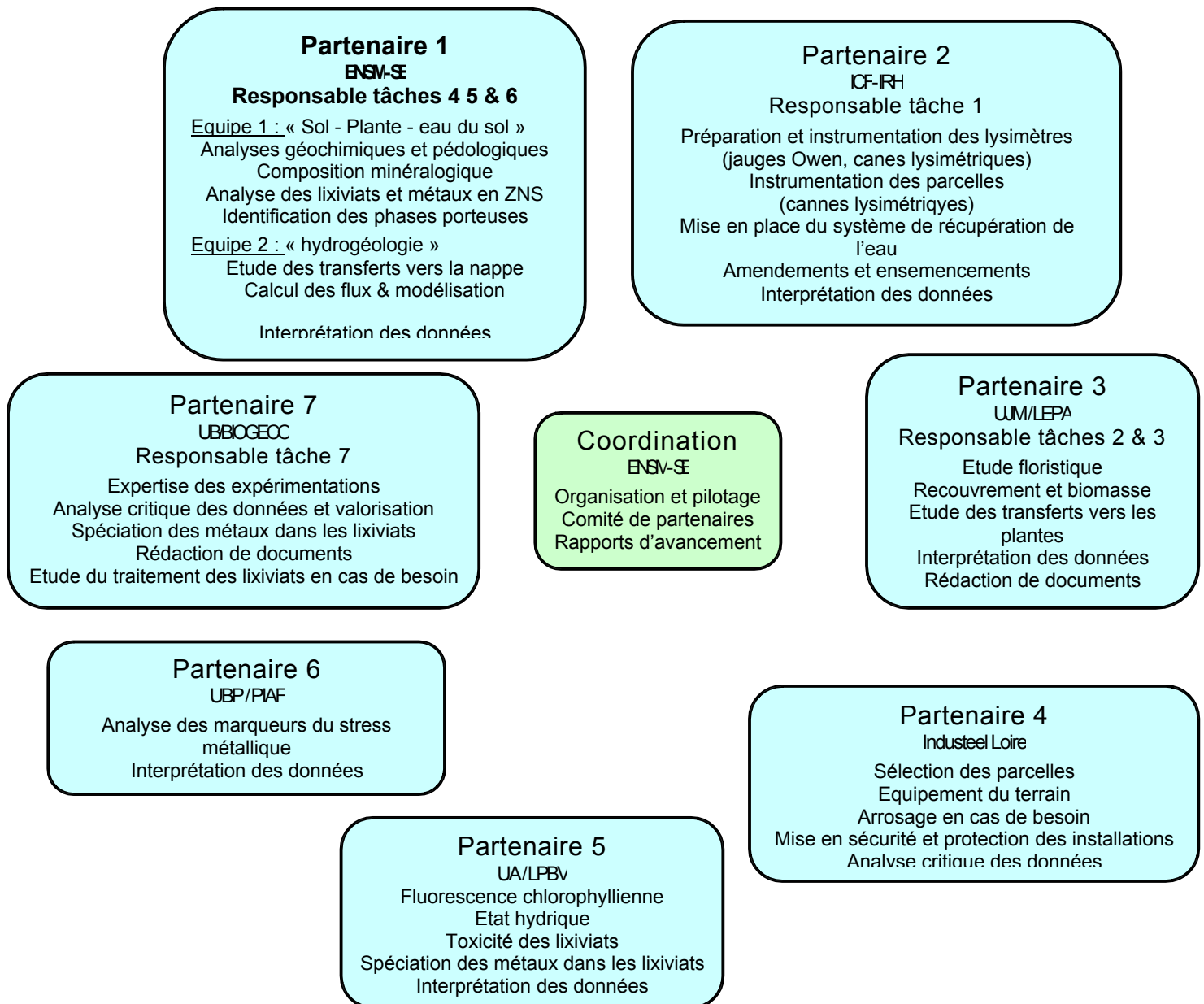
- préconiser des orientations scientifiques pour la poursuite du projet, en respectant l'esprit général du programme de travail
- recueillir en réunion semestrielle les livrables de chacune des équipes. Chaque équipe est en charge de transmettre ses livrables au comité de partenaires à cette date
- préparer l'assemblage des rapports d'avancement et des relevés de dépenses
- recueillir et valider le planning des 6 mois à venir pour toutes les équipes

 la coordination du projet, assurée par l'ENSM-SE (JL. Bouchardon), elle est en charge de :

- l'organisation du comité de partenaires semestriel, 1 mois avant la date de remise des rapports d'avancement à l'ANR, Saint-Etienne étant le lieu privilégié ;
- la coordination de la réalisation du projet en application des décisions du comité de partenaires ;
- la communication des livrables vers l'ADEME, avec l'assemblage des rapports d'avancement semestriels et des relevés de dépenses annuels ;
- la création d'un site Internet dédié au projet (communication vers l'extérieur, espace d'échange entre partenaires du projet et d'accueil de la base des données de Physafimm)

### 1.7.2 Aspects organisationnels du projet

Les responsabilités de tâches des partenaires et le chronogramme de leur implication dans les différentes tâches, sont indiqués dans les deux schémas organisationnels pages suivantes.



## 1.8 partenaires comprenant 8 équipes :

### 1.8.1 Partenaire 1 :

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne 2 équipes :

Equipe géo-bio-chimie du centre SPIN affectée aux process « Sol – plante – eau du sol »

Equipe hydrogéologie du centre SITE affectée aux écoulements hypodermiques et profonds

### 1.8.2 Partenaire 2 :

Société ICF Environnement du groupe ICF-IRH,

### 1.8.3 Partenaire 3 :

Université Jean Monnet, laboratoire LEPA,

### 1.8.4 Partenaire 4 :

la société Industeel Loire du groupe ArcelorMittal,

### 1.8.5 Partenaire 5 :

Université d'Auvergne Clermont 1 / LPBV,

### 1.8.6 Partenaire 6 :

Université Blaise Pascal Clermont 2 / UMR A 547 PIAF,

### 1.8.7 Partenaire 7 :

INRA Bordeaux 1 UMR 1202 BIOGECO.