



# LE RÉAMÉNAGEMENT DES FRICHES URBAINES À L'ÉCHELLE D'UN TERRITOIRE INDUSTRIEL : UNE APPROCHE D'OPTIMISATION ÉCONOMIQUE

[Joaquin Ameller](#), [Jean-Daniel Rinaudo](#), [Corinne Merly](#)

Armand Colin | « [Revue d'Économie Régionale & Urbaine](#) »

2023/1 Février | pages 5 à 33

ISSN 0180-7307

ISBN 9782200934989

DOI 10.3917/reru.231.0005

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://www.cairn.info/revue-d-economie-regionale-et-urbaine-2023-1-page-5.htm>

Distribution électronique Cairn.info pour Armand Colin.

© Armand Colin. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

# **Le réaménagement des friches urbaines à l'échelle d'un territoire industriel : une approche d'optimisation économique**

## **Urban brownfields redevelopment at an industrial territory scale: an economic optimization approach**

**Joaquin AMELLER**

Agence de la transition écologique (ADEME), Angers  
Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Montpellier  
Université de Montpellier, Montpellier  
Montpellier SupAgro, Montpellier  
joaquinamellerpavez@gmail.com  
ORCID : 0000-0003-0357-7895  
Auteur correspondant

**Jean-Daniel RINAUDO**

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Montpellier  
jd.rinaudo@brgm.fr  
ORCID : 0000-0001-8539-574X

**Corinne MERLY**

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Villeurbanne  
c.merly@brgm.fr  
ORCID : 0000-0003-2199-9653

**Mots-clés** : redéveloppement des friches, réhabilitation des sites contaminés, outils d'aide à la décision, économie environnementale, analyse coûts-bénéfices.

**Keywords** : brownfield redevelopment, contaminated site remediation, decision support tools, environmental economics, cost-benefit analysis.

**Classification JEL** : C61, R52, R58.

## Résumé

*Le redéveloppement des friches est un sujet d'importance croissante pour les aménageurs du territoire, particulièrement dans les pays industrialisés. Dans les dernières années, la littérature scientifique pluridisciplinaire portant sur le redéveloppement des friches a fortement progressé : celle-ci concerne principalement l'échelle d'un seul site. Le défi devient plus important lorsque le redéveloppement doit être planifié à l'échelle d'un portefeuille de sites. L'objectif de cet article est de présenter une méthode permettant aux décideurs publics de réaliser une analyse économique ex-ante du redéveloppement des friches à l'échelle d'un territoire industriel. Nous présentons un modèle basé sur l'optimisation sous contraintes et l'analyse coût-bénéfices permettant d'identifier la combinaison économiquement optimale des choix de réaménagement pour un portefeuille donné de sites et d'alternatives de reconversion. Les résultats de cet exercice de modélisation, illustré avec le cas d'étude de la Vallée de la Chimie, sont pertinents pour accompagner les réflexions exploratoires de planification et pour comparer différents scénarios prospectifs.*

## Abstract

*Brownfields redevelopment is an issue of increasing concern for urban planners and decision-makers, especially in highly industrialized countries. As the multidisciplinary scientific literature on brownfields redevelopment continues to grow - usually targeted at the scale of a single site - the challenge becomes more and more important when it comes to managing the redevelopment at the level of a portfolio of sites. This article presents a novel approach aiming the systematization of an ex-ante economic analysis of brownfield redevelopment at the scale of a large industrial area. We have developed a decision support tool based on constrained optimisation and cost-benefit analysis to identify the economically optimal combination of redevelopment choices for a given portfolio of sites and future use alternatives. This approach incorporates: (1) the costs and benefits of brownfields redevelopment; (2) sites characteristics and compatibility with future-use alternatives; (3) regulatory requirements and regional policy orientations; and (4) synergies or interactions between sites and future-use alternatives. The implementation of the modelling exercise is illustrated with the case study of the Vallée de la Chimie, for which the model enabled to find an economically optimal solution and then to explore different scenarios. Results demonstrate that portfolio scale analysis offers relevant economic information for decision-making. Urban-planning experts from Lyon metropolis who are in charge of the case study signalled that the tool offers relevant support for exploratory studies, especially by using it to compare different scenarios based on different prospective evaluations. Therefore, we argue that there is scope for further development of portfolio-scale decision support tools as a complementary approach for the well-known single-site scale best practices.*

## Points-clés

- Le modèle identifie la combinaison optimale de projets de reconversion de friches dans un territoire industriel.
- L'analyse ex-ante repose sur une analyse coûts-bénéfices combinée à une optimisation sous contraintes.
- L'optimisation est répétée pour plusieurs scénarios de contraintes correspondant à des choix de politiques publiques.
- L'outil permet d'explorer différentes stratégies avant d'engager des études approfondies à l'échelle des sites.

## - 1 -

# Introduction

La problématique du redéveloppement des friches urbaines (RFU) préoccupe depuis plusieurs décennies les aménageurs et les urbanistes, non seulement dans les anciennes régions industrialisées d'Europe et d'Amérique du Nord mais aussi dans les économies émergentes (Panagos *et al.*, 2013 ; U.S. EPA, 2016 ; EEA, 2018). De plus en plus de sites, sur lesquels fleurissaient autrefois d'intenses activités économiques ou industrielles, sont désormais abandonnés ou sous-utilisés. Leur nombre est susceptible de continuer d'augmenter du fait de la contraction et de la délocalisation des activités industrielles (Leigh et Coffin, 2000 ; Adams *et al.*, 2010 ; Paya Perez et Rodriguez Eugenio, 2018).

Or, les friches urbaines, notamment celles ayant hébergé des activités industrielles, sont souvent une source de nuisances pour les populations qui résident dans leur voisinage (Gayer *et al.*, 2000 ; Longo et Alberini, 2006). La contamination des sols, de l'eau et des sédiments génère des risques sanitaires et environnementaux tandis que les bâtiments abandonnés sont à l'origine d'un risque d'accidents, d'occupation illégale et parfois même de criminalité. Ces nuisances affectent le plus souvent les populations de quartiers défavorisés, contribuant à accentuer des problèmes de justice environnementale et sociale. Bien que perçue comme une priorité par les acteurs publics, la suppression de ces nuisances se heurte encore souvent à de nombreuses difficultés dont le coût de décontamination et les risques financiers et juridiques qui découragent les investisseurs privés (Coffin et Shepherd, 1998 ; Paull, 2008 ; BenDor *et al.*, 2011 ; Spiess et De Sousa, 2016). Cela est notamment le cas dans les régions où le marché foncier n'est pas en tension et où les possibilités de développement à l'extérieur des villes restent peu contraintes et moins coûteuses que redévelopper les friches urbaines.

Le constat de ces difficultés a poussé l'Etat et les collectivités locales à intervenir financièrement dans la mise en œuvre de projets de redéveloppement de friches urbaines (Lafeuille et Steichen, 2015). L'existence de nombreux bénéfices économiques, sociaux et environnementaux, non pris en compte par les investisseurs privés, justifie en effet cette intervention publique (De Sousa, 2003 ; EC, 2012 ; Schädler *et al.*, 2012).

Les friches industrielles sont aussi un levier intéressant pour lutter contre l'étalement urbain et l'artificialisation des sols. En effet, l'aménagement urbain et l'imperméabilisation des terres naturelles, agricoles et forestières se poursuivent en Europe, ce qui nuit considérablement à la biodiversité, aux fonctions écologiques des sols et aux services associés (Born, 2010 ; France Stratégie, 2019). Afin d'inverser le phénomène d'artificialisation, la Commission européenne a fixé un objectif de « *zero net land take* » (ou zéro artificialisation nette) d'ici 2050 dans sa « Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources » (Commission européenne, 2011). En France, cet objectif est repris dans l'objectif « Zéro Artificialisation Nette » (ZAN) initialement introduit à travers le Plan Biodiversité (2018) puis repris par la loi « climat et résilience » (2021). Ainsi, les friches industrielles, souvent situées à

proximité des agglomérations, voire enclavées dans le tissu urbain qui s'étend, offrent de réelles opportunités de densification des villes (Del Biondo, 2009). Ce faisant, elles permettent aux collectivités d'éviter les coûts liés à l'étalement urbain, notamment en termes de construction d'infrastructures (transport, communication, énergie) et de coûts environnementaux (pollution liée au transport routier, consommation d'espaces naturels et agricoles, etc.). La mise en œuvre de solutions basées sur la nature ou de technologies de phytoremédiation permet de promouvoir la nature en ville et la reconquête de la biodiversité et des écosystèmes (ADEME, 2015 ; Song *et al.*, 2019). Le RFU peut également offrir des opportunités en termes d'activités récréatives et de production de services environnementaux, améliorer le cadre de vie des populations vivant à proximité des sites, et indirectement permettre de revaloriser les biens immobiliers dans ces zones. Le redéveloppement des friches peut aussi soutenir les politiques de développement durable en offrant des opportunités pour la transition énergétique (Mahzouni, 2018) et en promouvant les principes de l'économie circulaire (Bardos *et al.*, 2020).

Depuis près de deux décennies, une littérature scientifique relativement abondante a traité de cette question de l'évaluation économique des coûts et des bénéfices non marchands générés par le RFU. Cependant, quelle que soit la méthode utilisée, la quasi-totalité des évaluations économiques décrites dans cette littérature repose sur des études de cas très localisées qui, le plus souvent, ne considèrent qu'un nombre très limité (voire unique) de sites et de projets de redéveloppement (pour plus de détails voir Ameller *et al.*, 2020). Une revue critique récente sur les OAD (outils d'aide à la décision) utilisés pour optimiser le redéveloppement des friches (Hammond *et al.*, 2021) recommande que les indicateurs socio-économiques soient plus largement développés et pris en compte dans le RFU. Or, les urbanistes et aménageurs urbains sont de plus en plus demandeurs d'évaluations économiques leur permettant de comparer, voire d'optimiser, le choix de redéveloppement (i.e. réhabilitation du site et développement d'un nouvel usage) pour un portefeuille de projets pouvant concerner plusieurs dizaines de sites à l'échelle d'une métropole.

Pour répondre à cette demande, des équipes pluridisciplinaires, souvent structurées autour de compétences en ingénierie, ont développé des OAD reposant sur des méthodes d'évaluation multicritères. L'objectif est de comparer diverses options en termes de durabilité, définie par des critères environnementaux, sociaux et économiques. Ces derniers sont souvent décrits de manière qualitative et rarement quantifiés en termes monétaires. Ces OAD sont appliqués soit à l'échelle d'un site unique, permettant de comparer des options techniques de décontamination ou des nouveaux usages des sites (Marcomini *et al.*, 2009 ; Sorvari et Seppälä, 2010 ; Söderqvist *et al.*, 2015 ; Song *et al.*, 2018) soit à une échelle régionale – l'objectif étant alors de hiérarchiser les sites (Chrysochoou *et al.*, 2012 ; Wang *et al.*, 2013 ; Bartke *et al.*, 2016 ; Nogués et Arroyo, 2016 ; Pizzol *et al.*, 2016).

Le travail de modélisation présenté dans cet article s'inscrit à l'interface de la littérature économique et de celle relative à ces OAD. Il propose de développer un outil d'optimisation économique, intégrant une évaluation monétaire des coûts et bénéfices associés aux différents projets de RFU, et permettant d'optimiser les choix

de réaménagement des friches à l'échelle d'un territoire industriel. La nouveauté de cette étude réside donc dans l'application d'une approche de modélisation inspirée de la programmation mathématique couramment utilisée dans les domaines de l'économie agricole et de la gestion de l'eau, mais qui, à notre connaissance, n'a jusqu'à présent pas été utilisée dans le domaine du réaménagement des friches, notamment à l'échelle d'un portefeuille de sites. Par ailleurs, l'application empirique du modèle a été réalisée dans le cadre d'une étude de cas présentant un contexte inhabituel par rapport à ce qui est rapporté dans la littérature : une grande zone industrielle dans laquelle l'activité économique domine encore, mais qui contient néanmoins une multitude de sites à réaménager. La première section de l'article présente le cadre conceptuel et la logique de modélisation proposée. Le site d'étude – la Vallée de la Chimie dans l'agglomération du Grand Lyon – est ensuite présenté. La troisième section décrit les étapes de mise en œuvre du modèle. La quatrième section présente les résultats de l'utilisation du modèle. La dernière section discute la portée et les limites de la méthode et identifie des perspectives de poursuite de cette recherche.

## - 2 -

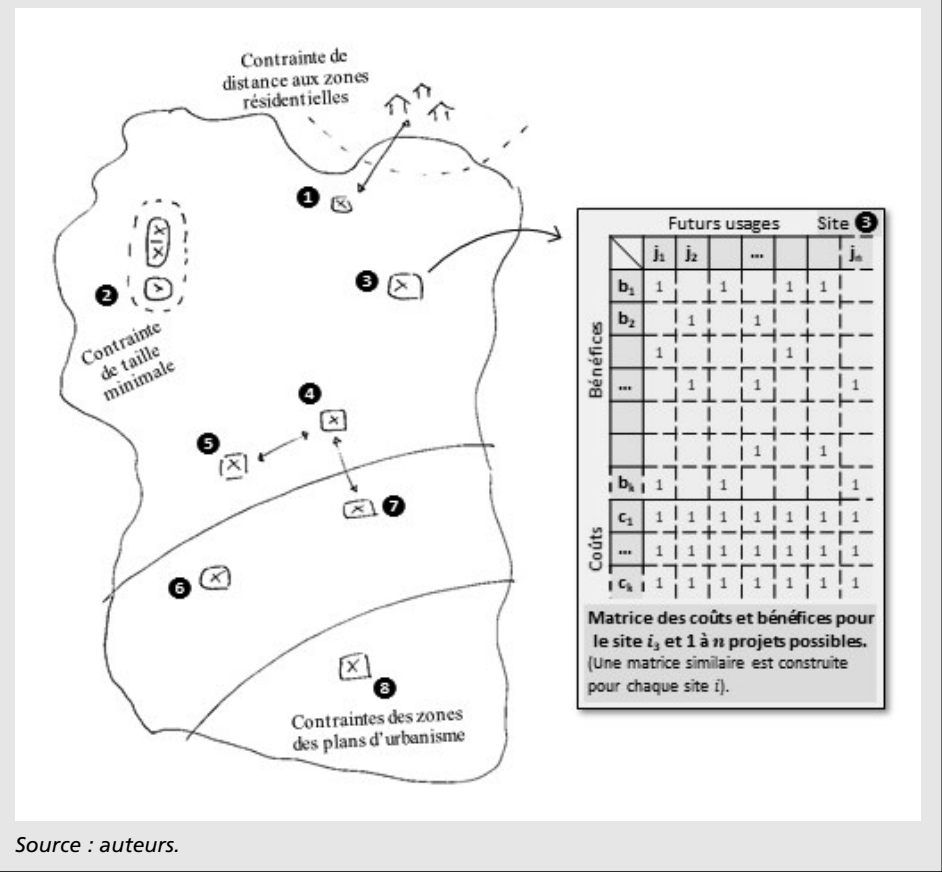
### Cadre conceptuel

Conceptuellement, nous nous intéressons au cas d'un planificateur urbain qui souhaiterait définir un programme de reconversion de plusieurs dizaines de sites de friches urbaines, en tenant compte de l'ensemble des retombées économiques susceptibles de se matérialiser pour différents acteurs et à différentes échelles spatiales. Son objectif est d'identifier la combinaison optimale de projets à mettre en œuvre dans les sites qu'il gère afin de maximiser la somme des bénéfices pour les acteurs du territoire. L'outil d'optimisation économique vise à permettre une évaluation systématique des coûts et bénéfices pour toutes les combinaisons possibles ( $x_{i,j}$ ) de projets de redéveloppement (indice  $j$ ) sur tous les sites (indice  $i$ ). L'évaluation des coûts et des bénéfices tient compte des caractéristiques des sites (taille, situation géographique, *etc.*), de la nature des projets de redéveloppement (exigence des usages prévus), et de la variabilité de l'environnement physique et socio-économique du territoire pour identifier la combinaison de projets qui maximise le bénéfice total net. L'optimisation mobilise quatre types d'informations : les coûts et bénéfices de chaque projet ( $x_{i,j}$ ), les contraintes associées à chaque projet  $j$  et à chaque site  $i$ , les contraintes à satisfaire à l'échelle du portefeuille (territoire), et l'existence de synergies ou interactions entre projets / sites. Ces informations sont décrites plus en détail ci-dessous.

#### 2.1. Évaluation coûts et bénéfices pour chaque $x_{ij}$

La mise en œuvre de chaque alternative de reconversion ( $x_{i,j}$ ) implique des coûts de réhabilitation pour la mise en adéquation du site avec l'usage futur, et génère différents types de bénéfices (privés, sociaux, et environnementaux). Les valeurs de ces coûts et bénéfices sont évaluées pour chaque projet de redéveloppement, en

Figure 1 – Illustration conceptuelle des éléments intégrés dans le modèle d'optimisation



tenant compte des spécificités du site (situation, état environnemental, contraintes) puis sont consolidées sous forme de matrices développée pour chaque site (voir Figure 1). Cette évaluation des coûts et bénéfices est réalisée *ex-ante*, c'est à dire avant la mise en œuvre réelle du projet de RFU, sur la base d'une description hypothétique des impacts du projet par rapport à la situation de référence. L'évaluation est réalisée en procédant par analogie entre la situation hypothétique et des projets réels ayant fait l'objet d'évaluation *ex-post* (pour plus de détails voir Ameller, 2021). Ces matrices constituent la base pour calculer le bénéfice net de chaque portefeuille de projets de RFU, que le modèle d'optimisation cherche à maximiser.

## 2.2. Contraintes à échelle d'un site

Les choix de réaménagement doivent aussi respecter un certain nombre de contraintes, qui déterminent notamment la compatibilité d'un projet avec un site. Il peut s'agir d'une distance minimale aux zones résidentielles, imposée à certaines

activités sources de nuisances sonores / olfactives (voir cas du site ❶ dans la Figure 1). L'implantation des activités peut être contrainte par le zonage des plans d'urbanisme permettant la gestion des risques naturels et technologiques, etc. (site ❸ situé dans une zone différente des sites ❹ et ❺ dans la Figure 1). Dans le cas de friches potentiellement polluées, l'activité est conditionnée par une compatibilité entre l'état environnemental du site et l'usage envisagé qui garantit la gestion des risques sanitaires et environnementaux. Il peut enfin s'agir de contraintes d'accessibilité (proximité échangeur autoroutier, largeur de voirie desservant le site, accès aux services) ou une contrainte de superficie minimale. Ces différentes contraintes à l'échelle des sites sont intégrées dans le modèle, elles contraindront l'optimisation.

## 2.3. Contraintes à échelle globale

Des contraintes globales peuvent aussi être introduites dans le modèle. Il peut s'agir de plafonner la surface totale de certaines activités, pour lesquelles il existe un marché restreint ou un budget de subventions publiques limitées. Il peut aussi s'agir de contraindre le modèle à respecter un objectif environnemental global, comme la neutralité carbone ou la production d'une quantité minimale d'énergie renouvelable. Dans ce cas, la contrainte ne s'applique pas à un ou plusieurs sites en particulier, elle force simplement le modèle à s'assurer que le portefeuille de projets  $x_{ij}$  choisi satisfait cette contrainte globale.

## 2.4. Interactions et synergies

Contrairement à une approche à l'échelle d'un site, une modélisation à l'échelle d'un territoire permet d'inclure une analyse des interactions et des synergies entre les sites et les alternatives de reconversion du portefeuille. Par exemple, deux sites adjacents peuvent être trop petits pour accueillir un projet, s'ils sont considérés indépendants dans l'optimisation. En revanche, si le modèle tient compte de leur contiguïté, ils peuvent accueillir le projet (voir site ❷, Figure 1). De même, la mise en œuvre d'un projet sur plusieurs sites voisins peut réduire des coûts fixes (par exemple liés à la connexion à des réseaux énergétiques ou de transports de fluide), permettant ainsi de les intégrer dans la solution optimale alors qu'ils ne l'auraient pas été si considérés comme indépendants. Enfin, la synergie peut être relative aux bénéfices produits, lorsque le bénéfice associé à plusieurs sites dépasse la somme des bénéfices individuels. Cela peut être le cas des projets qui améliorent le cadre de vie des habitants (espaces verts, etc.) pour lesquels la valeur de l'aménité (et son éventuelle traduction sur le marché immobilier) est une fonction non linéaire de la superficie totale aménagée. Cette situation est illustrée par la synergie entre les sites ❹, ❺ et ❻ dans la Figure 1.



- 3 -

## Cas d'étude : la Vallée de la Chimie

Le modèle conceptuel présenté ci-dessus a été mis en œuvre dans la Vallée de la Chimie (VdC) au sud de l'agglomération du Grand Lyon. La VdC regroupe 12 des 59 communes de la métropole, et accueille plus de 100 000 habitants sur environ 9 400 hectares. La zone strictement industrielle a une superficie de 3 200 hectares et s'étend sur 15 kilomètres le long du Rhône. Le périmètre industriel de la VdC est un vaste territoire qui accueille de nombreuses entreprises et usines depuis une centaine d'années. Cette zone constitue le troisième pôle d'emploi de l'agglomération lyonnaise et contient aussi une quantité importante d'espaces sous-utilisés, typiquement reconnus comme friches industrielles. Pour accompagner le redéveloppement de ces friches, la métropole a mis en place une équipe spécifique (la Mission de la VdC), dont l'action doit permettre de répondre à la pression foncière, de renforcer la compétitivité et l'attractivité du site pour l'industrie chimique, tout en améliorant le cadre de vie pour les habitants, en gérant les risques industriels et en contribuant aux objectifs de développement durable de la collectivité (énergie renouvelable, économie circulaire, etc.). Le modèle développé est ainsi mis au service de cette Mission qui se positionne comme un planificateur centralisé, cherchant à maximiser le bien-être collectif à travers la mise en œuvre d'un portefeuille de projets de RFU sur l'ensemble des sites de son territoire.

### 3.1. Présentation des sites et des alternatives de reconversion de la VdC

Une série d'entretiens réalisés avec des acteurs du territoire a permis d'identifier 58 sites de la VdC pouvant accueillir des projets de RFU. Ces 58 sites ont été caractérisés dans un SIG intégrant le zonage réglementaire, les contraintes spécifiques à chacun des sites, les caractéristiques des sols et des bâtiments, etc. Ce SIG permet également d'intégrer des contraintes spatiales comme la distance aux zones urbanisées, aux infrastructures d'accès, la proximité ou contiguïté des sites, etc.

En parallèle, neuf grands types de projets de redéveloppement adaptés aux contraintes de la vallée de la chimie ont été identifiés, sur la base de propositions développées dans le cadre d'un appel à projets porté par la Métropole. Il s'agit de :

- sites de production de sols artificiels à partir de matériaux inertes issus de grands chantiers de travaux publics et de déchets organiques ; la production issue de ces « usines à terre » est utilisée dans la métropole, permettant de réduire l'importation de terre naturelle, issue de décapage de terrains naturels ou agricoles ;
- projets de phytoremédiation, consistant à implanter des végétaux qui captent les polluants présents dans les sols des friches industrielles et permettent, dans le long terme, de les stabiliser voire de les décontaminer ;
- fermes urbaines, développant une production alimentaire intensive en condition artificielle (hydroponie sur plusieurs étages) ;
- production de biomasse (taillis courte rotation) ;
- chaufferies urbaines, permettant de valoriser la biomasse produite dans la VdC ;

- installations photovoltaïques ;
- et enfin des activités économiques en lien avec l'industrie chimique et les technologies vertes à différentes échelles (petite, moyenne et grande superficie).

### 3.2. Evaluation des coûts de réhabilitation des friches de la VdC

L'accueil de nouvelles activités nécessite, le plus souvent, une réhabilitation des friches urbaines. Quatre types de coûts de réhabilitation doivent être évalués pour chaque site :

- les coûts de décontamination des sols et des eaux souterraines pollués par les activités industrielles qui se sont succédées sur le site ;
- les coûts de traitement et de stockage des sols contaminés qui ne peuvent pas être traités et rester sur site ;
- les coûts de déconstruction des bâtiments qui ne peuvent pas être réutilisés. Ces coûts comprennent le démantèlement systématique des bâtiments, le tri des déchets qui en résultent et la démolition des structures restantes ;
- les coûts de re-fonctionalisation des sols lorsque ceux-ci sont si pauvres/ déstructurés qu'ils doivent être retravaillés, amendés et mélangés à de la terre fertile pour permettre le développement de végétation (ornementale ou production de biomasse). Ce coût n'est engagé que pour les projets nécessitant un sol fertile.

L'évaluation *ex-ante* de ces coûts pour chaque projet ( $x_{ij}$ ) est rendue difficile par l'insuffisance des données disponibles. Les volumes de sols contaminés, leur impact éventuel sur la qualité des eaux souterraines et la nature des polluants présents sont mal connus, ce qui rend incertain l'évaluation des deux premiers coûts listés ci-dessus. Leur évaluation a été réalisée en s'appuyant, d'une part sur une évaluation à dire d'expert de l'état des sites et, d'autre part, sur l'utilisation de coûts de référence observés dans des situations similaires bien documentées.

### 3.3. Description des bénéfices des projets de RFU dans la VdC

L'étape suivante a consisté à caractériser et à évaluer (en termes monétaires) les bénéfices associés à chaque option  $x_{ij}$ . Cela a été réalisé sur la base de données issues de projets réels, pour lesquels les valeurs de bénéfices ont été normalisées afin que les estimations puissent être transférées à n'importe lequel des 58 sites étudiés (fonctions de transfert simples). L'analyse tient principalement compte de deux types de bénéfices : 1) les bénéfices financiers, définis comme le profit dégagé par les activités économiques développées par les porteurs de projet (ex. production d'électricité à partir de panneaux solaires, production de biomasse, production de sols recyclés, *etc.*) ou, dans certains cas, les coûts évités (ex. réduction des coûts d'approvisionnement en biomasse pour un projet de chaufferie) ; 2) les bénéfices environnementaux, notamment associés à la réduction des émissions de  $\text{CO}_2$ , la production de services écosystémiques dans les sites réhabilités, la réduction de la consommation d'espaces naturels ou agricoles (le RFU évitant d'artificialiser de nouveaux espaces). Une présentation détaillée de l'évaluation de ces bénéfices est disponible dans Ameller (2020). Des discussions avec les acteurs nous ont conduit à négliger les bénéfices liés à l'amélioration du cadre de vie et l'impact éventuel sur la

valeur de l'immobilier : en effet, les friches réhabilitées sont toutes insérées dans la zone industrielle, isolées des zones habitées et les aménités qu'elles pourraient créer ont peu de chance d'être perçues et valorisées par les résidents. D'autres indicateurs, tels que le nombre d'emplois créés et la recette fiscale générée par les nouvelles activités, sont également calculés pour chaque projet  $x_{ij}$ .

### 3.4. Description des contraintes spécifiques

Pour chaque activité, des contraintes spécifiques ont été définies sur la base d'échange avec les acteurs et porteurs de projets : distance minimale aux habitations ; surface minimale du site d'accueil ; distance maximale aux voies de communication ou aux réseaux de fluide (gaz, réseaux de chaleur, lignes haute tension). Des contraintes globales sont également intégrées, permettant d'exiger que la solution optimale produise un minimum d'énergie renouvelable, ou d'emplois ou encore que la production de certaines activités (ex. recyclage des terres) ne dépasse pas un volume maximal. Des contraintes spatiales correspondant au zonage du Plan de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) ont également été incluses. À noter que le processus d'optimisation autorise le modèle à subdiviser les sites de grande taille pour accueillir plusieurs activités différentes sur différentes sous-parcelles.

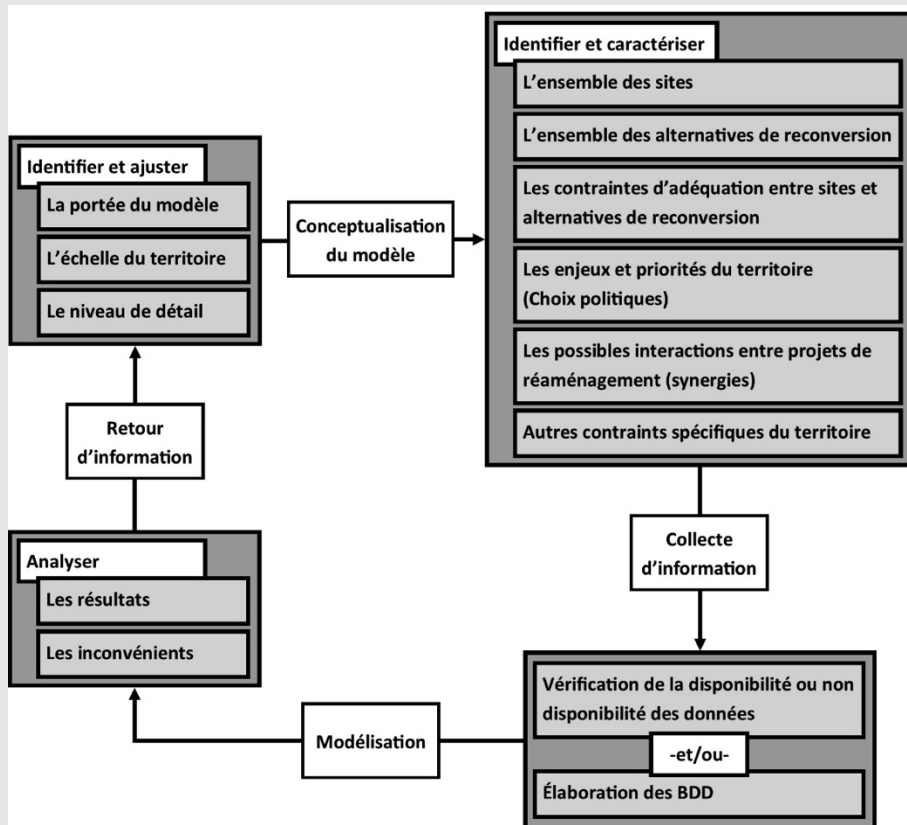
### 3.5. Synthèse de l'approche méthodologique

Cette recherche a bénéficié de la collaboration de plusieurs experts externes dont les travaux antérieurs qui ont été essentiels pour caractériser l'étude de cas. La disponibilité de l'information a donc été un atout important pour le développement de l'étude. La consultation des experts inclut 1) plusieurs échanges avec les urbanistes de la Mission de la VdC (Métropole du Grand Lyon), chargés du redéveloppement des friches dans ce territoire, et 2) deux séries d'entretiens avec d'autres experts comprenant des employés de l'administration métropolitaine, des consultants de cabinets indépendants et des représentants de groupes d'investissement. Leur expertise couvre les domaines nécessaires à la caractérisation de l'étude de cas : gestion foncière et immobilière, prospective territoriale, énergie, risques technologiques, construction et déconstruction, écologie et biodiversité, arbres et paysages, et alternatives de reconversion. Au total, ce volet de l'étude s'appuie sur 23 entretiens non structurés et 12 entretiens semi-structurés.

Le caractère ouvert et itératif de l'approche adoptée a permis la collecte de l'information, son traitement par le modèle, puis des réajustements du modèle en fonction des résultats obtenus (Figure 2). Ainsi ce processus itératif a permis d'ajuster la portée et le niveau de détail du modèle pour répondre aux attentes des acteurs en fonction des données disponibles.

La liste de l'ensemble des données qui ont été nécessaires à la construction et à la validation du modèle est détaillée dans l'Annexe 1.

**Figure 2 – Approche méthodologique de l'étude**



Source : auteurs.

## - 4 -

### Implémentation du modèle

Cette étude propose une nouvelle échelle d'analyse de gestion des friches en proposant un outil d'aide à la décision à l'échelle d'un territoire. En tant que tel, l'outil consiste en un modèle de programmation mathématique mis en œuvre à l'aide du logiciel GAMS. Cette section présente la formalisation du modèle en articulant le raisonnement conceptuel et le cas d'étude présentés ci-dessus.

#### 4.1. Formulation mathématique et programmation du modèle

Les variables de décision du modèle, notées  $x_{ij}$ , décrivent la surface de chaque site  $i$  allouée au projet (ou alternative) de redéveloppement  $j$ . Pour tenir compte des zonages du PPRT qui autorisent ou non certaines activités, la surface allouée à chaque projet  $j$  est estimée pour chaque zone de risque  $k$ . Une variable binaire  $\rho_{ikj}$

qui précise si l'alternative de reconversion  $j$  est permise dans la zone  $k$  est introduite et multipliée à  $\gamma_{ikj}$  pour activer ou non le projet. Au final, la variable de décision s'écrit comme suit (eq. 1) :

$$x_{ij} = \sum_k \gamma_{ikj} * \rho_{ij} \quad (1)$$

La fonction objectif est égale au bénéfice net total associé au choix du portefeuille de projets  $x_{ij}$ . Ce bénéfice net est la somme algébrique des bénéfice  $\beta_j$  moins les coûts  $c_i$  (estimés pour la fraction  $s_i$  du site qui accueille le projet  $j$ ), plus les synergies entre projets, notées  $\delta_{ij}$ . Le modèle maximise donc la fonction objectif suivante (eq. 2) :

$$\text{MAX } Z = \sum_i \sum_j [x_{ij} (\beta_j - (c_i/s_i) + \delta_{ij})] \quad (2)$$

Les contraintes décrites dans la section précédente sont toutes formalisées sous forme d'inéquations présentées dans l'Annexe 2 - Équations du modèle. On distingue les contraintes de taille, de compatibilité site-projet, d'accessibilité, de distance, etc. Les contraintes globales plafonnent la production d'électricité renouvelable et la production des usines à terre (contraintes de marché). La valeur de la contrainte globale peut être ajustée, en fonction des hypothèses de politique publique (rachat d'énergie renouvelable par exemple).

## 4.2. Construction des scénarios

Le modèle est ensuite utilisé pour identifier le portefeuille optimal de projets pour différents scénarios, à partir des hypothèses de politiques d'urbanisme et de gestion des friches. Cette utilisation permet de mesurer l'effet de ces choix politiques sur la fonction objectif (bénéfice net total), sur la nature des projets à mettre en place et sur certains indicateurs comme l'emploi, les retombées fiscales ou la production d'énergie renouvelable.

Pour pouvoir comparer les scénarios, une situation de référence est définie et un portefeuille optimal de projets est identifié pour cette situation. Les paramètres du modèle sont ensuite modifiés pour représenter différents scénarios et la solution optimale recherchée pour chacun.

Deux scénarios sont présentés dans la suite de l'article :

- Le **scénario 1** teste l'impact d'une augmentation de la demande d'énergie renouvelable. *Ceteris paribus*, ce scénario suppose que les objectifs d'autonomie énergétique de la métropole seraient plus importants que ceux du scénario de référence. Les limites supérieure et inférieure de la production d'énergie dans la VdC sont ainsi augmentées de 20 à 50 et de 70 à 140 MWh respectivement. La limite supérieure équivaut à l'énergie produite par les deux centrales électriques vieillissantes de Lyon dont le cycle de vie arrive à son terme.
- Le **scénario 2** propose une suite de modifications des paramètres concernant l'allocation des alternatives de reconversion des initiatives privées orientées vers l'industrie chimique. Ce scénario est construit pour évaluer l'impact des contraintes techniques restreignant l'utilisation des sites ou celles, plus globales, plafonnant le

développement de certaines activités. Trois variantes du scénario sont présentées. D'abord, seule la contrainte du zonage réglementaire (PPRT) est relâchée, permettant l'activité  $j_7$  d'être implantée là où le scénario de référence ne le permettait pas, donc avec un code de zone de régulation maximale rouge à la place de bleu. Ensuite, en plus de la contrainte de zonage, la contrainte de distance minimale requise entre les usines ( $j_7$ ) et les zones résidentielles est également relâchée. Enfin, comme les résultats de base incluant jusqu'à 150 ha de BFR dans les PME ( $j_9$ ) peuvent sembler irréalistes, en plus des deux changements précédents, la troisième variante inclut une restriction supplémentaire imposant une surface maximale qui pourrait être couverte de manière réaliste par  $j_9$  dans le contexte de la VdC (80ha).

### 4.3. Résultats

L'approche utilisée comprenant une étroite collaboration avec les acteurs, plusieurs retours d'informations ont permis d'ajuster la formulation du modèle et des scénarios jusqu'à arriver à la version définitive du modèle. Les résultats sont présentés ci-dessous.

### 4.4. Résultat du scénario de référence

Le Tableau 1 résume les résultats obtenus à l'échelle du territoire industriel pour le scénario de référence, dont 30 des 58 sites ont été retenus pour accueillir un ou plusieurs projets de redéveloppement ce qui représente 205,3 hectares (28 sites n'ont pas été réaménagés). Cette solution permettrait de générer 3 016 emplois et 70 MWh d'énergie pendant les 20 ans du programme de réaménagement. Le modèle a privilégié l'installation d'entreprises ( $j_9$ ) sur 150,2 hectares. En ce qui concerne les interactions, les synergies de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et des coûts de réhabilitation des sols (notées  $\delta_1$  et  $\delta_2$  respectivement) n'ont pas été activées, l'infrastructure industrielle existante ( $\delta_3$ ) serait significativement valorisée par les synergies entre entreprises (552,2 M€), et les mesures de sécurité supplémentaires dans les zones bleues de gestion des risques ( $\delta_4$ ) impliquent des coûts supplémentaires de 180,7 M€.

Il est normal que les résultats du réaménagement de la VdC donnent la priorité à l'allocation des start-ups et moyennes entreprises ( $j_9$ ), car après les usines d'incinération ( $j_6$ ),  $j_9$  est l'activité caractérisée par les bénéfices par hectare les plus élevés. De plus,  $j_9$  est également relativement flexible face aux contraintes de compatibilité. Par exemple, elle n'exige pas de distance minimale avec les zones résidentielles ni une accessibilité trop élevée, et elle est compatible avec la plupart des zones réglementaires du PPRT. Il reste à signaler qu'il est peu probable que dans la vie réelle l'offre d'investissements privés permette de porter le redéveloppement de 150,2 ha en  $j_9$  dans les délais proposés par ce scénario. D'une certaine manière, ce résultat d'optimisation peut être considéré comme un résultat idéal qui peut ne pas être atteint dans la réalité, d'où l'intérêt de tester le modèle avec un scénario qui plafonne l'offre maximale de  $j_9$ .

Tableau 1 – Résumé de la solution du scénario de référence

Vue d'ensemble : Solution du scénario de référence		
Alternatives de reconversion	Surface allouée (ha)	Bénéfices obtenus (M€)
j <sub>1</sub> Usine à terre	0,00	- €
j <sub>2</sub> Production de biomasse	12,91	5,7 €
j <sub>3</sub> Phytoremédiation	0,00	- €
j <sub>4</sub> Ferme urbaine	0,06	0,143 €
j <sub>5</sub> Énergie photovoltaïque	42,19	368,9 €
j <sub>6</sub> Unité de production d'énergie	0,00	- €
j <sub>7</sub> Grande usine	0,00	- €
j <sub>8</sub> Usine taille moyenne	0,00	- €
j <sub>9</sub> PME's & start-ups	150,15	7 367,9 €
Indicateurs à l'échelle du territoire		
Bilan des bénéfices nets	6 889,9 M€	
Création d'emploi	3 016 ETP	
Énergie produite	70 MWh	
Recyclage des sols	0 m <sup>3</sup> /année	
Surface totale réaménagée	205,3 ha (34 %)	
Sites réaménagés	30 Sites (52 %)	
Bilan des interactions activées		
δ1 : Réduction des émissions de CO2	0 €	
δ2 : Réduction des coûts de réhabilitation des sols	0 €	
δ3 : Coûts évités du réseau industriel	552 M €	
δ4 : Coûts supplémentaires par mesures de sécurité	180 M €	

Par ailleurs on constate que, même si l'allocation de la production de biomasse (j<sub>2</sub>) est suffisante pour activer la synergie de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des incinérateurs, les résultats excluent l'allocation des unités de production d'énergie j<sub>6</sub>, qui est l'activité dont les bénéfices attendus par hectare sont les plus élevés. De toute évidence, la raison en est que la limitation de la production d'énergie crée une concurrence entre l'énergie solaire et les incinérateurs. Produire le plafond d'énergie (70 MWh) nécessite 42,2 ha de j<sub>5</sub> ou 4,2 ha de j<sub>6</sub>. Le modèle compare donc le résultat de ces allocations en termes de bénéfices globaux en tenant compte des coûts

d'opportunité. Ainsi, bien que la mise en œuvre de 4,2 ha de  $j_6$  libérerait 38 ha pour d'autres allocations, il se trouve que ces espaces ne seraient pas forcément compatibles avec d'autres alternatives de reconversion, le modèle finissant par accorder la priorité à l'allocation des 42 ha de  $j_5$ .

Cette solution du modèle exclut l'activité  $j_1$  parce que tous les sites qui étaient compatibles avec l'usine de recyclage des sols étaient également compatibles avec d'autres activités qui génèrent des bénéfices à l'hectare plus élevés. La synergie de réduction des coûts de réhabilitation des sols n'a pas été suffisante pour compenser, par exemple, les bénéfices sur vingt ans de l'allocation de 5 ha de start-up et PME. Ce résultat du scénario de référence exclut également l'allocation de  $j_3$ . La phyto-rémediation ( $j_3$ ) a été incluse dans le portefeuille des alternatives de reconversion vis-à-vis de l'utilisation du sol. Cependant, la mise en œuvre hypothétique de la phytoremediation considérée dans cette étude ne crée pas de valeur autre que la réduction des coûts de réhabilitation (c'est-à-dire en mettant en œuvre la phytoremediation au lieu d'autres techniques de réhabilitation). Ce n'est donc pas surprenant que cette alternative de reconversion ne soit pas retenue par le modèle.

En complément des résultats globaux, la variable d'allocation est informative par elle-même, donnant une idée des alternatives de reconversion à allouer sur chaque site. La Figure 3 montre les allocations résultantes du scénario de référence.

Certains sites n'ont pas du tout été attribués du fait des importantes contraintes qui caractérisent la VdC. Par exemple,  $i_4$  et  $i_{36}$  ont des superficies de 0,41 et 0,034 ha respectivement, ce qui est trop petit par rapport aux exigences de taille minimale de la plupart des alternatives de reconversion identifiées. Ainsi,  $i_4$  est seulement assez grand pour les fermes urbaines et la phyto-rémediation, et  $i_{36}$  pour les fermes urbaines uniquement. Malheureusement,  $i_4$  ne convient pas à la phyto-rémediation, et les deux sites sont situés dans une zone de risque du PPRT qui exclut la possibilité d'installer des fermes urbaines.

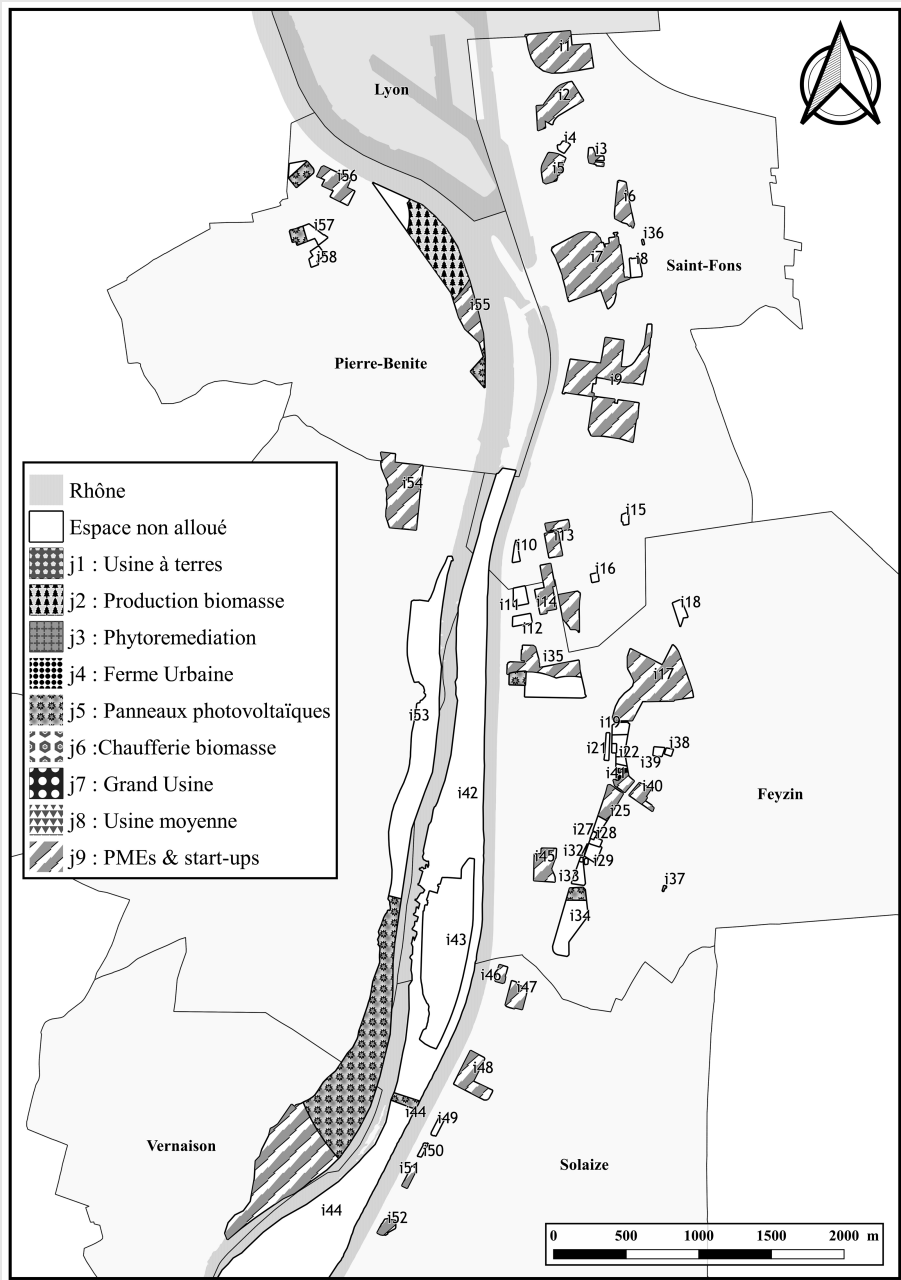
L'allocation du site  $i_{55}$  est un bon exemple de l'implication des contraintes du PPRT. La partie nord du site est située en zone rouge foncé, ce qui exclut ces 2,9 ha de toute affectation. Ensuite, le site contient deux zones rouge clair, une de 12,9 ha dans la partie centrale qui est attribué à la production de biomasse ( $j_2$ ), et une autre dans la partie sud du site (1 ha) qui est attribuée à l'installation de panneaux photovoltaïques ( $j_5$ ). Enfin, le site contient également 1,18 ha en zone verte, et 3,55 ha sans restriction de zonage, ces deux zones ont été allouées à  $j_9$ .

#### 4.5. Résultat du scénario 1 : production d'énergie

La Figure 4 présente les résultats de ce scénario focalisé sur la production d'énergie renouvelable locale. L'augmentation du plafond de production énergétique permet d'augmenter de 5,31 % les bénéfices nets globaux. Cela augmente légèrement la création d'emplois (+0,39 %) et augmente également la surface totale réaménagée (+20,55 %). Les affectations de la production de biomasse et des PME sont



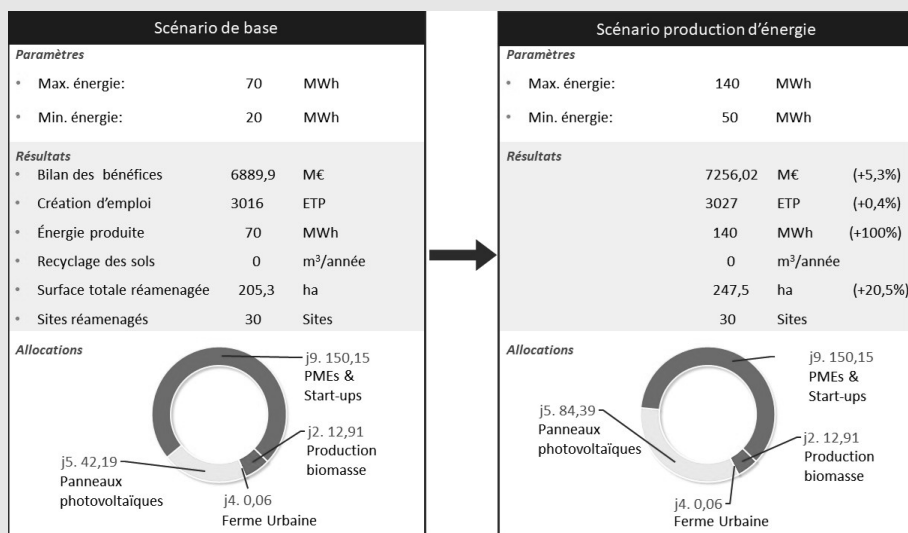
Figure 3 – Allocations des RFU dans le scénario de référence



Source : auteurs.

maintenues, et l'allocation pour la production d'énergie solaire double sa surface (+100 %).

**Figure 4 – Résultats scénario production d'énergie**



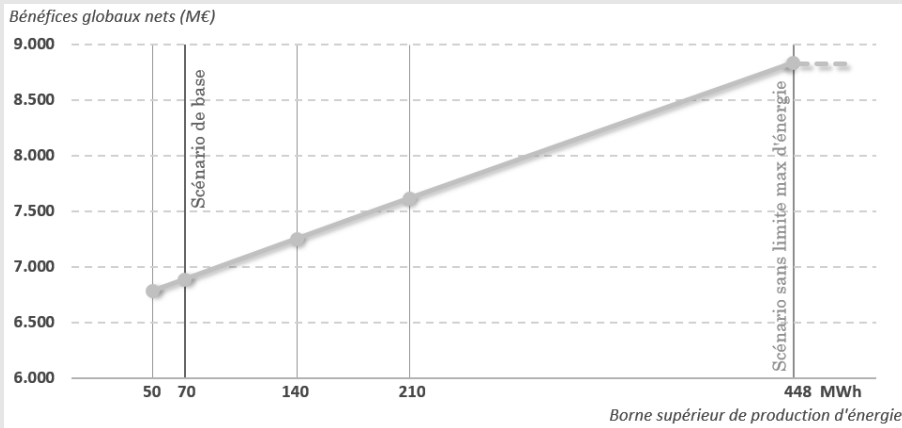
Source : auteurs.

La Figure 5 présente les résultats de la simulation répétée pour cinq augmentations successives du plafond de production d'énergie (50, 70, 140, 210 puis sans restriction). Clairement l'augmentation du plafond de production d'énergie a une relation positive avec les bénéfices globaux. Ceci peut s'expliquer par le fait que dans les résultats du scénario de référence, 66 % de la surface disponible reste sans allocations (voir Tableau 1). Notamment à cause des contraintes liées à ces espaces, et en augmentant la borne supérieure de production d'énergie, le modèle retrouve la possibilité de développer les panneaux photovoltaïques, activité très peu contrainte. Le modèle maximise donc la production d'énergie jusqu'à 448 MWh dans le scénario sans restriction, ce qui signifie qu'au-delà de ce point, l'optimal reste stable. Ces résultats restent sous l'hypothèse qu'il y a suffisamment de demande d'énergie – ce qui est discutable, les prévisions les plus élevées des besoins énergétiques ne dépassant pas 210 MWh. La courbe aide à comprendre la dynamique d'allocation optimale pour cette activité, et permet d'illustrer la nature et l'intérêt des scénarios comme support outil d'aide à la décision.

#### 4.6. Résultat du scénario 2 : assouplissement des contraintes

La Figure 6 montre que la première variante de ce scénario (contrainte de zonage uniquement) n'affecte que très marginalement la solution optimale. La seconde variante du scénario (assouplissement des restrictions de zonage et de distance)

Figure 5 – Comparaison des scénarios de production d'énergie

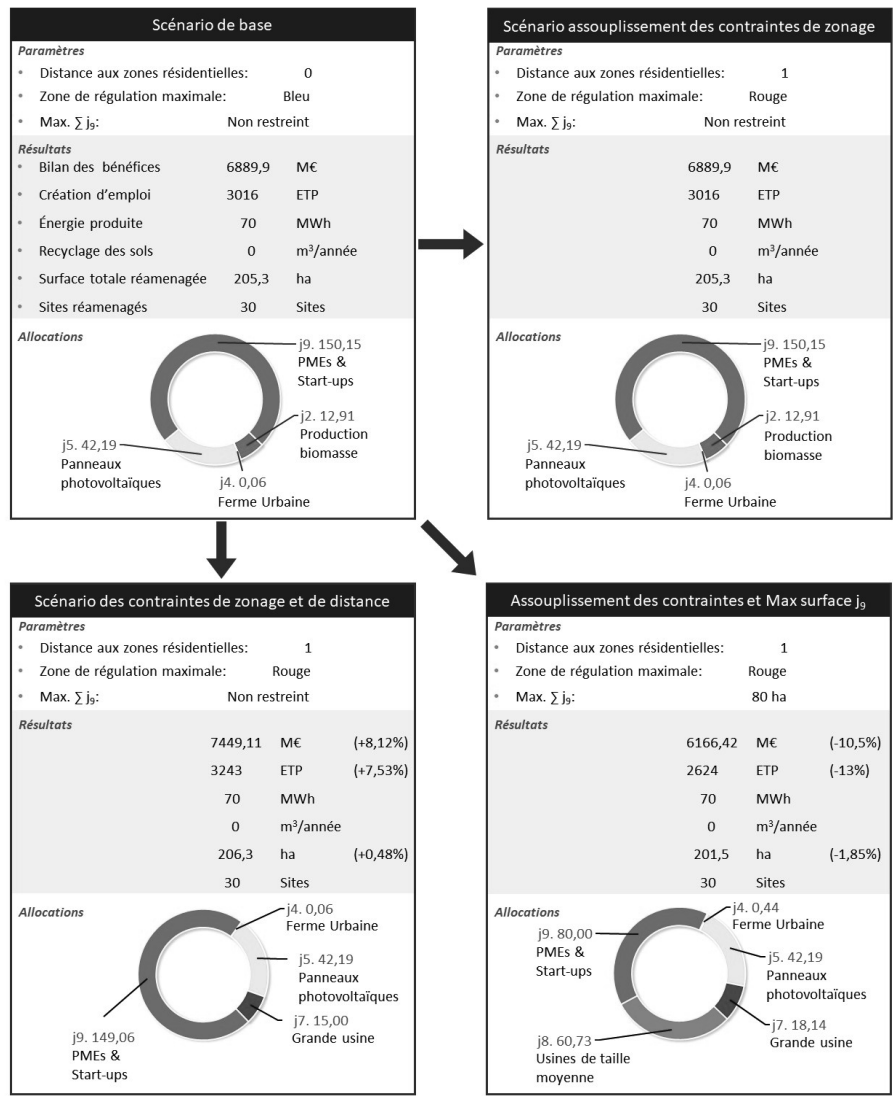


Source : auteurs.

permet d'allouer 15 ha à  $j_7$  (grande usine). La modification se produit en  $i_{55}$ , où la surface initialement allouée à la production de biomasse ( $j_2$ ) est entièrement concédée à l'installation des grandes usines ( $j_7$ ). Un hectare alloué à  $j_5$  est transféré de  $i_{55}$  à une surface vacante sur  $i_{53}$ , et seulement un hectare de  $j_9$  est cédé. Ce scénario porte les bénéfices nets globaux à 7 449 millions d'euros (+8,12 %) et crée 227 emplois supplémentaires (+7,53 %). D'autre part, le troisième scénario limite effectivement l'allocation de  $j_9$  à 80 ha, ce qui permet d'allouer 60,73 ha à des usines de taille moyenne ( $j_8$ ) et 18,14 ha à des grandes usines ( $j_7$ ). Cela entraîne également une réduction de la surface totale réaménagée de 3,8 ha (-1,85 %), des bénéfices nets globaux (-10,5 %), et de la création d'emplois (-13 %).

Globalement ces résultats montrent que l'allocation des activités varie significativement en fonction des hypothèses des scénarios. En revanche, la valeur du bénéfice total change peu (de l'ordre de 15 %).

Figure 6 – Assouplissement des contraintes de compatibilité



Source : auteurs.

- 5 -

## Discussion et conclusions

Cet article démontre la faisabilité d'une approche de modélisation d'optimisation sous contraintes à l'échelle d'un territoire industriel pour planifier la reconversion des friches urbaines, à travers une application à la Vallée de la Chimie au sud de Lyon. Cette approche, qui répond à un besoin exprimé par les acteurs en charge de la planification du territoire, n'a pas vocation à se substituer aux méthodes déployées à l'échelle de sites, dont la mise en œuvre reste indispensable pour élaborer des plans de gestion et d'aménagement opérationnels des sites et qui de surcroît permettent d'alimenter en données des approches globales comme celle-ci.

Les résultats de cet exercice de modélisation ont été présentés et discutés avec les experts de la Mission de la Vallée de la Chimie (Métropole du Grand Lyon) chargés du redéveloppement des friches dans ce territoire. L'outil a été jugé pertinent pour accompagner des réflexions exploratoires, en s'appuyant sur une comparaison des valeurs relatives issues des simulations de différents scénarios. Il est clair que l'outil ne peut pas être utilisé pour déterminer précisément quel projet mettre en œuvre dans chaque site, compte tenu des incertitudes relatives aux coûts et bénéfices associés à chaque projet. Une analyse non systématisée permet d'introduire des multiples réflexions pluridisciplinaires non comprises dans cette approche de modélisation. En revanche, la systématisation proposée par le modèle permet de mettre en évidence la valeur économique des interactions et synergies de la reconversion des friches à l'échelle d'un portefeuille de sites (un territoire).

L'une des principales limites de l'approche proposée tient à la qualité des données utilisées. Le fait de travailler à l'échelle d'un territoire (par opposition aux études à l'échelle d'un site) impose d'évaluer sommairement les coûts et les bénéfices, sur la base de fonctions de transfert de valeurs établies à partir d'études réalisées dans d'autres contextes. L'incertitude associée devrait faire l'objet d'une évaluation, consistant par exemple à réaliser des simulations Monte-Carlo, avec tirage aléatoire, pour chaque projet et chaque site, de valeurs de coûts et bénéfices dans une plage définie à dire d'expert. Une telle approche permettrait d'identifier les données dont l'incertitude impacte le plus le résultat du modèle – aidant ainsi les acteurs à définir des priorités en matière d'acquisition d'information sur les sites.

Une question posée par les acteurs d'autres territoires est celle de la possibilité de transposer ce modèle à d'autres cas d'étude. L'essentiel des équations mathématiques ayant une portée générique, la structure du modèle est en effet transposable. Le travail existant permettrait également de faciliter le dialogue entre les modélisateurs et les acteurs du terrain par rapport aux attentes du travail de modélisation, ainsi qu'à la caractérisation du cas d'étude (identifier les données et contraintes nécessaires). Cependant, une transposition du modèle nécessiterait un travail de collecte de données, reposant à la fois sur la mobilisation d'experts locaux, la consultation de rapports d'étude (souvent confidentiels), de données détenues par l'État et au besoin la revue d'articles scientifiques (pour suppléer l'absence de données du territoire). L'outil d'optimisation est aussi modulable, dans le sens où il est facilement

adaptable pour prendre en compte d'autres types d'alternatives de reconversion, leurs contraintes et leurs synergies et les caractéristiques du territoire (par exemple les zonages). Le modèle pourrait aussi faire l'objet de développement complémentaire de manière à intégrer la dimension temporelle des projets de redéveloppement, permettant d'optimiser non seulement l'allocation des superficies mais aussi le phasage dans le temps des projets.

Enfin, les travaux de modélisation décrits dans cet article ont permis d'identifier des nouvelles opportunités de développement en sciences économiques, notamment pour améliorer l'évaluation des bénéfices liés au redéveloppement de friches à l'échelle d'un ensemble de sites (synergies, contreparties) et/ou des bénéfices associés aux services écosystémiques rendus par les sols. Un exemple de voie d'amélioration de cette étape serait d'élargir les approches d'évaluation des bénéfices afin de permettre, ultérieurement, une valorisation des résultats plus robuste lors d'un éventuel transfert des fonctions des bénéfices. Ceci faciliterait et ouvrirait largement le champ d'application des évaluations économiques à l'échelle d'un portefeuille de sites.

Annexes

Tableau 2 – Annexe 1 Données collectées pour la caractérisation du cas d'étude Vallée de la Chimie

Données collectées	Sources*			
	E	D	S	P
Sites				
Identification des sites	•		•	
Surface des sites en m²		•		•
Zonage en code couleur selon le PPRT de la Vallée de la Chimie pour chaque site		•	•	
Réseaux industriels (présence ou proximité) : eaux industrielles, gaz, produits chimiques, hydrocarbures, lignes électriques.		•	•	
Accès et/ou proximité au système de transport public, gares, rues et autoroutes.	•		•	
Proximité aux zones résidentielles et au fleuve			•	•
Catégories de qualité du sol requise par type de végétation		•	•	
Référencements BDD BASIAS, BASOL et ICPE		•	•	
Nombre, identification, étages et surfaces des bâtiments par parcelle			•	•
Typologie de chaque bâtiment selon usage : Bureaux ; Stockage ; et Industriel.	•			
Bâtiment amiante (Bâtiment contenant ou soupçonné de contenir de l'amiante)	•			
Estimation du coût de décontamination et gestion des terres excavées	•			•
Estimation du coût de déconstruction des bâtiments	•			•
Estimation du coût de reconditionnement des sols				•
Autres contraintes d'urbanisme : Hauteur maximale de construction, servitudes, espaces enclavés, parcelles réservées pour futurs projets d'urbanisme.	•			
Matrice de distance entre sites				•
Alternatives de reconversion				
Identification des alternatives de reconversion	•			
Condition technique de surface minimale pour la viabilité de chaque alternative de reconversion	•	•		
Condition technique d'accessibilité pour la viabilité de chaque alternative de reconversion	•			

**Tableau 2 – (suite)**

Condition de sécurité concernant la distance minimale aux zones résidentielles	•			
Condition de proximité au fleuve	•			
Condition de compatibilité concernant la qualité environnementale du sol	•			
Contrainte de sécurité. Autorisation des activités selon zonage PPRT	•	•		
Contraintes techniques de besoin de présence ou proximité aux réseaux : eaux industrielles, gaz, produits chimiques, hydrocarbures, lignes électriques	•			
Estimation des bénéfices financiers, sociaux et environnementaux de chaque alternative de reconversion (nets des coûts d'investissement)	•	•		•
Contrainte de temporalité adaptée à l'échelle temporelle du modèle	•	•		
Quantité d'emplois (ETP) créés par chaque alternative de reconversion	•	•		
Estimation des coûts de construction des bâtiments par hectare de chaque projet	•			•
<i>Autres données du territoire</i>				
Synergies : Identification, caractérisation et estimation des variations des bénéfices à cause des interactions entre sites et/ou entre alternatives de reconversion	•			•
Estimation prospective de offre/demande d'énergie électrique et des terres excavées/fertiles	•			

\* E : Entretien, D : Documentation, S : SIG, P : Propre estimation.



## Annexe 2 - Équations du modèle

### 5.0.1. Fonction objectif

$$\text{F.O.} \quad \text{MAX } Z = \sum_i \sum_j [x_{ij} (\beta_j - (c_i/s_i) + \delta_{ij})] + \delta 4_{ij} \quad (2)$$

$$\text{Où} \quad x_{ij} = \sum_k \gamma_{ikj} * \rho_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Et} \quad \delta_{ij} = \delta 1_{ij} + \delta 2_{ij} + \delta 3_{ij} \quad (3)$$

Où  $x_{ij}$  est la variable de décision du modèle, représente l'allocation - en hectares - des alternatives de reconversion ( $j$ ) dans chaque site ( $i$ ).

$\gamma_{ikj}$  est une variable auxiliaire représentant également l'allocation, elle permet d'inclure la notion spatiale de zones de restriction ( $k$ ), et de contrôler l'application des contraintes concernant  $\rho_{ij}$ .

$\rho_{ij}$  est la variable binaire ( $\rho_{ij} \in \{0,1\}$ ) qui active  $x_{ij}$  lorsque toutes les contraintes de l'allocation sont satisfaites.

$\beta_j$  représente les bénéfices nets par hectare, estimés pour chaque alternative de reconversion ( $j$ ), dont 20 ans ont été actualisés à la valeur actuelle.

$s_i$  le paramètre de taille de la surface de chaque site ( $i$ ).

$c_i$  sont les coûts de réhabilitation prévus pour chaque site ( $i$ ), qui ont été initialement estimés pour le site et sont ici "convertis" en coût par hectare en utilisant le paramètre  $s_i$ .

$\delta_{ij}$  représente ce que nous avons appelé synergies, c'est-à-dire les avantages (ou coûts) supplémentaires résultant des interactions entre les sites et les activités.

$\delta 1_{ij}$  représente l'interaction entre  $j_2$  et  $j_6$ , qui permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> issues de la production d'énergie par rapport aux émissions utilisant des alternatives aux combustibles fossiles (Eq. 4 et 5).

$\delta 2_{ij}$  représente les coûts de reconditionnement des sols, qui peuvent être réduits grâce à la mise en place d'une station de recyclage des sols ( $j_2$ ) (Eq. 6 et 7).

$\delta 3_{ij}$  représente les bénéfices supplémentaires liés au réseau de pipelines (Eq. 8).

$\delta 4_{ij}$  représente une pénalisation liée aux surcoûts dans les constructions de bâtiments dus aux mesures de sécurité requises dans les zones  $p_3$  et  $p_4$  (Eq. 9).

$$5 * B_1 \leq \sum_i X_{ij_2} \quad (4)$$

$$\forall j_6 \quad \delta 1_{ij} = X_{ij} * B_1 * 800.000 \quad (5)$$

Où  $B_1$  est la variable binaire qui active le bénéfice environnemental de la réduction des émissions de  $CO_2$  (800mil €) chaque fois que l'allocation totale de  $j_2$  atteint au moins 5 ha.

$$\delta 2_{ij} = B_2 * \Delta P * Q_{ij} \quad (6)$$

$$5B_2 \leq \sum_i X_{ij_i} \quad (7)$$

Où la variable binaire ' $B_2$ ' détermine si la différence de prix du reconditionnement des sols par tonne ( $\Delta P=5$ ) doit être activée. Si et seulement si la somme des allocations à l'usine de recyclage des terres ( $j_1$ ) est égale ou supérieure à 5 ha.

Et  $Q_{ij}$  dénote la quantité de sol attendue qui devrait être reconditionnée pour chaque site ( $i$ ) compte tenu des exigences de qualité du sol de chaque alternative de reconversion ( $j$ ).

$$\forall ij \quad \delta 3_{ij} = 150000m_i/t_j \leftrightarrow r_j = 1 \quad (8)$$

Où la valeur de la proximité du réseau de pipelines ( $\delta 3_{ij}$ ) est définie en fonction de  $m_i$  en utilisant une valeur référentielle de 150mil € chaque fois que des pipelines sont nécessaires et selon la distance entre le site et le réseau.

$m_i$  est un paramètre discret décrivant si les sites contiennent les pipelines requis ( $m_i=2$ ), si celles sont à proximité ( $\text{Distance}<150m \rightarrow m_i=1$ ), ou relativement éloignés ( $\text{Distance}>150m \rightarrow m_i=0$ ).

$t_j$  est le paramètre de taille minimale des alternatives de reconversion ( $j$ ) - incluse dans l'équation afin de fournir une relativité en fonction de la surface allouée.

Et  $r_j$  est un paramètre discret décrivant si les activités nécessitent des pipelines ( $r_j=1$ ) ou non ( $r_j=0$ ).

$$\forall ij \quad \delta 4_{ij} = - \left( \sum_{k_3} \gamma_{ikj} * \rho_{ij} * 0.1h_j \right) - \left( \sum_{k_4} \gamma_{ikj} * \rho_{ij} * 0.2h_j \right) \quad (9)$$

Où  $h_j$  est la valeur approximative du coût de construction des bâtiments requis par hectare par chaque alternative de reconversion ( $j$ ), en ajoutant 10% s'il s'agit de la zone  $k_3$ , et 20% si les allocations ont lieu dans  $k_4$ .

Les bénéfices supplémentaires  $\delta 1_{ij}$ ,  $\delta 2_{ij}$ , et  $\delta 3_{ij}$  restent en fonction de  $x_{ij}$ , tandis que la pénalisation  $\delta 4_{ij}$  prend déjà en compte les surfaces allouées ( $\gamma_{ikj} * \rho_{ij}$ ).

Sous contrainte de :

Contraintes de surface

$$\forall ikj \quad \gamma_{ikj} \leq w_{ikj} \quad (10)$$

$$\forall ik \quad \sum_j \gamma_{ikj} \leq \varphi_{ik} \quad (11)$$

$$\forall ij \quad \sum_k \gamma_{ikj} \geq t_j * \rho_{ij} \quad (12)$$

Où  $w_{ikj}$  est la surface du site correspondant à chaque zone du plan de régulation urbaine. Donc la taille de la surface de chaque site ( $i$ ), compatible avec chaque alternative de reconversion ( $j$ ) en ce qui concerne la tolérance avec les zones de régulation urbaine ( $k$ ).

$\varphi_{ik}$  est la taille de la sous-surface de chaque zone ( $k$ ) de chaque site ( $i$ )

Contraintes d'énergie

$$\sum_{ij} x_{ij} * e_j \geq 20 \quad (13)$$

$$\sum_{ij} x_{ij} * e_j \leq 70 \quad (14)$$

Où le paramètre  $e_j$  désigne la capacité de production d'énergie par hectare de chaque alternative de reconversion. La production minimale requise a été fixée à 20 MWh et la limite supérieure a été fixée à 70 MWh.

Contraintes de compatibilité Site-Alternatives de reconversion :

**Accessibilité** (Eq. 3) : Cette contrainte permet de modéliser le besoin d'accessibilité des sites.

$$\forall ij \quad a_i \leq v_j \rightarrow x_{ij} = 0 \quad (15)$$

Où  $a_i$  est le paramètre caractérisant l'accessibilité pour chaque site ( $i$ ) comme faible (0), intermédiaire (1) ou bonne (2).

$v_j$  est le paramètre décrivant le besoin d'accessibilité de chaque alternative de reconversion.

**Distance au fleuve** (Eq. 4) : Cette contrainte permet de modéliser des scénarios dans lesquels certaines activités ne peuvent utiliser que le fleuve comme moyen de transport pour certains produits.

$$\forall ij \quad d_i \geq f_j \rightarrow x_{ij} = 0 \quad (16)$$

Où  $d_i$  est le paramètre caractérisant la distance minimale de chaque site ( $i$ ) par rapport au fleuve.

$f_j$  est le paramètre décrivant la distance maximale requise de chaque alternative de reconversion ( $j$ ) par rapport au fleuve.

**Distance par rapport aux zones résidentielles** (Eq. 5) : Cette contrainte permet d'imposer, pour certaines activités, une distance minimale de sécurité par rapport aux zones résidentielles à l'aide d'un paramètre si les sites étaient plus éloignés que

500 m (0), plus proches que 500 m mais séparés par des barrières physiques (1), ou plus proches que 500 m (2).

$$\forall ij \quad z_i \geq o_j \rightarrow X_{ij} = 0 \quad (17)$$

Où,  $z_i$  est le paramètre caractérisant la distance de chaque site ( $i$ ) avec la zone résidentielle la plus proche.

$o_j$  est le paramètre caractérisant la distance minimale requise de chaque alternative de reconversion ( $j$ ) par rapport à la zone résidentielle la plus proche.

**Présence d'infrastructures de réseau industriel et de lignes électriques** (Eq. 6-10) : La VdC contient un réseau d'infrastructures industrielles qui peuvent compromettre la compatibilité des sites avec certaines alternatives de reconversion. Ces infrastructures sont des lignes électriques, des stations électriques, et trois pipelines (produits chimiques, hydrocarbures, et gaz). La présence de ces infrastructures peut également être bénéfique pour certaines alternatives de reconversion. Les sites étaient finalement considérés comme incompatibles lorsque la zone incompatible dépassait 3 % de la superficie du site.

$$\forall ij \quad Si \ II1_i \geq \ II1Rq_j \wedge \ SII1_i \geq 0.03 \rightarrow X_{ij} = 0 \quad (18)$$

Où,  $II1_i$  est le paramètre signalant la présence de lignes électriques dans chaque site (Oui=1, Non=0).

$II1Rq_j$  est le paramètre signalant la compatibilité avec les lignes électriques pour chaque activité (Oui=1, Non=0).

$SII1_i$  est le pourcentage de la surface du site qui serait incompatible en raison de la présence de lignes électriques.

Ce type de contrainte est répété pour chaque infrastructure industrielle. Où  $II1$ =Lignes électriques,  $II2$ =Station électrique,  $II3$ =Canalisation de produits chimiques,  $II4$ =Canalisation d'hydrocarbures, et  $II5$ =Gazoduc.

Des équations supplémentaires seraient nécessaires si les zones incompatibles se chevauchent. Ce problème ne s'est pas posé dans l'étude de cas VdC.

$$\forall ij \quad Si \ II2_i \geq \ II2Rq_j \wedge \ SII2_i \geq 0.03 \rightarrow X_{ij} = 0 \quad (19)$$

$$\forall ij \quad Si \ II3_i \geq \ II3Rq_j \wedge \ SII3_i \geq 0.03 \rightarrow X_{ij} = 0 \quad (20)$$

$$\forall ij \quad Si \ II4_i \geq \ II4Rq_j \wedge \ SII4_i \geq 0.03 \rightarrow X_{ij} = 0 \quad (21)$$

$$\forall ij \quad Si \ II5_i \geq \ II5Rq_j \wedge \ SII5_i \geq 0.03 \rightarrow X_{ij} = 0 \quad (22)$$

## Références bibliographiques

- Adams D, de Sousa C, Tiesdell S (2010) Brownfield development: A comparison of North American and British approaches. *Urban Studies* 47(1):75-104.
- ADEME (2015) *Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - Etat de l'art et guide de mise en oeuvre*. Les Ulis (Essonne): EDP sciences.
- Ameller J (2020) *Optimisation économique d'un programme de redéveloppement de friches à échelle régionale*. Montpellier SupAgro.
- Ameller J (2021) An ex-ante evaluation of brownfield redevelopment benefits at a regional scale. 14<sup>es</sup> journées de recherches en sciences sociales (JRSS). Clermont Ferrand: SFER-INRA-CIRAD: 1-24.
- Ameller J, Rinaudo J, Merly C (2020) The contribution of economic science to brownfield redevelopment: a review. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 16(2): 184-196.
- Bardos P, Spencer KL, Ward RD, Maco BH, Cundy AB (2020) Integrated and sustainable management of post-industrial coasts. *Frontiers in Environmental Science* (8)86: 2-14.
- Bartke S, Martinát S, Klusáček P, Pizzol L, Alexandrescu F, Frantál B, Critto A, Zabeo A (2016) Targeted selection of brownfields from portfolios for sustainable regeneration: User experiences from five cases testing the Timbre Brownfield Prioritization Tool. *Journal of Environmental Management*. 184: 94-107.
- BenDor TK, Metcalf SS, Paich M (2011) The dynamics of brownfield redevelopment. *Sustainability*. 3(6): 914-936.
- Del Biondo L (2009) La conversion des friches sidérurgiques à la frontière franco-luxembourgeoise : un enjeu transfrontalier. *L'Information Géographique*. 73(3) : 46.
- Born C-H (2010) La protection juridique des sols en Région wallonne : une approche "désintégrée" | DIAL.pr - BOREAL. "Aménagement - Environ Urban droit foncier." 2: 20-53.
- Chrysochoou M, Brown K, Dahal G, Granda-Carvajal C, Segerson K, Garrick N, Bagtzoglou A (2012) A GIS and indexing scheme to screen brownfields for area-wide redevelopment planning. *Landscape and Urban Planning*. 105(3): 187-198.
- Coffin SL, Shepherd A (1998) Barriers to brownfield redevelopment: lessons learned from two great lakes states. *Public Work Management Policy*. 2: 258-266.
- Commission européenne (2011) *Communication to the EU Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Roadmap to a Resource Efficient Europe*. COM 571.
- Commission européenne (2012) *The implementation of the soil thematic strategy and ongoing activities*. Bruxelles
- EEA (2018) *Europe's environment : the second assessment*. European Environmental Agency.
- France Stratégie (2019) *Objectif « zéro artificialisation nette » : quels leviers pour protéger les sols ?*
- Gayer T, Hamilton JT, Viscusi WK (2000) Private values of risk tradeoffs at superfund sites: housing market evidence on learning about risk. *The Review of Economics and Statistics*. 82(3): 439-451.
- Hammond EB, Coulon F, Hallett SH, Thomas R, Hardy D, Kingdon A, Beriro DJ (2021) A critical review of decision support systems for brownfield redevelopment. *Science of the Total Environment* 785: 147132.
- Lafeuille C, Steichen P (2015) La politique de réutilisation des friches industrielles stimulée par la loi ALUR. Un nouvel encadrement des rapports contractuels portant sur les friches industrielles. *Revue Juridique de l'Environnement*. 40(2) : 264-281.
- Leigh NG, Coffin SL (2000) How many brownfields are there? building an industrial legacy database. *Journal of Urban Technologies*. 7(3): 1-18.
- Longo A, Alberini A (2006) What are the effects of contamination risks on commercial and industrial properties? Evidence from Baltimore, Maryland. *Journal of Environmental Planning Management*. 49: 713-737.
- Mahzouni A (2018) Urban brownfield redevelopment and energy transition pathways: A review of planning policies and practices in Freiburg. *Journal of Cleaner Production*. 195: 1476-1486.

- Marcomini A, Suter GW, Critto A (2009) Decision support systems for contaminated land management: a review. *Decision support systems for risk-based management of contaminated sited*, 1-20.
- Nogués S, Arroyo NL (2016) Alternative approach to prioritization of brownfield reclamation attending to urban development potentialities: case study in a depressed industrial district in northern Spain. *Journal of Urban Planning and Development*. 142(1): 05015002.
- Panagos P, Van Liedekerke M, Yigini Y, Montanarella L (2013) Contaminated sites in Europe: Review of the current situation based on data collected through a European network. *Journal of Environnemental Public Health*. 2013: 158764.
- Paull E (2008) *The environmental and economic impacts of brownfields redevelopment*. Northeast Institute, Washington, DC: 1-53.
- Payá Pérez A, Rodríguez Eugenio N (2018) *Status of local soil contamination in Europe: Revision of the indicator "Progress in the management Contaminated Sites in Europe"*. EUR 29124 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Pizzol L, Zabeo A, Klusáček P, Giubilato E, Critto A, Frantál B, Martinát S, Kunc J, Osman R, Bartke S (2016) Timbre brownfield prioritization tool to support effective brownfield regeneration. *Journal of Environnemental Management*. 166 : 178-192.
- Schädler S, Morio M, Bartke S, Finkel M (2012) Integrated planning and spatial evaluation of megasite remediation and reuse options. *Journal of Contaminant Hydrology*. 127(1-4): 88-100.
- Söderqvist T, Brinkhoff P, Norberg T, Rosén L, Back P-E, Norrman J (2015) Cost-benefit analysis as a part of sustainability assessment of remediation alternatives for contaminated land. *Journal of Environnemental Management*. 157: 267-278.
- Song Y, Hou D, Zhang J, O'Connor D, Li G, Gu Q, Li S, Liu P (2018) Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China. *Science of the Total Environnement*. 610-611: 391-401.
- Song Y, Kirkwood N, Maksimović Č, Zhen X, O'Connor D, Jin Y, Hou D (2019) Nature-based solutions for contaminated land remediation and brownfield redevelopment in cities: A review. *Science of the Total Environnement*. 663: 568-579.
- Sorvari J, Seppälä J (2010) A decision support tool to prioritize risk management options for contaminated sites. *Science of the Total Environnement*. 408(8): 1786-1799.
- De Sousa C (2003) Turning brownfields into green space in the City of Toronto. *Landscape and Urban Planning*. 62(4): 181-198.
- Spiess T, De Sousa C (2016) Barriers to renewable energy development on brownfields. *Journal of Environnemental Policy Planning*. 18(4): 507-534.
- U.S. EPA (2016) Superfund: National Priorities List (NPL). [accessed 2018 Feb 6]. <https://www.epa.gov/superfund/superfund-national-priorities-list-npl>.
- Wang W-M, Lee AHII, Peng L-P, Wu Z-L (2013) An integrated decision making model for district revitalization and regeneration project selection. *Decision Support Systems*. 54(2): 1092-1103.