
Optimisation multi-objectif d'une stratégie de déconstruction de bâtiments

Quéheille Eva¹

¹ Université de Bordeaux-I2M, 351 cours de la Libération, Bât B18, 33405 Talence, France, eva.queheille@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ. La démolition de bâtiments représente une problématique majeure dans la gestion des déchets. Afin d'encourager les entreprises du secteur à améliorer leurs pratiques, les réglementations européenne et française ciblent une valorisation matière minimale de 70 % (en masse) pour 2020. Cependant, le taux de valorisation matière ne suffit pas à prendre en compte les impacts environnementaux de la démolition. Dans cet article, nous proposons un modèle d'optimisation multi-objectif pour optimiser les chantiers de démolition selon le coût, les délais, le taux de valorisation matière et les émissions de gaz à effet de serre. Le modèle prend en compte les caractéristiques du chantier (jusqu'à 40 types de déchets), ses contraintes et le réseau existant de sites de traitement. L'application du modèle sur un cas réel a démontré son efficacité en trouvant des stratégies conciliant performances économiques, respect des délais et impacts environnementaux.

ABSTRACT. Building demolition is a major issue regarding waste management. In order to encourage companies of the sector to improve their practices, European and French laws target a minimal recovery rate of 70 % (in mass) for 2020. However a recovery rate is not enough to study environmental impacts of demolition. In this article, we suggest a Multi-Objective Optimization model to optimize demolition according to cost, delays, recovery rate and greenhouse gases emissions. The model includes the building features (up to 40 waste types), constraints and existing treatment plants network. The model application on a real case showed its efficiency by finding strategies well balanced between economic performance, delays and environmental impacts.

MOTS-CLÉS: Déconstruction, Gestion des déchets, Optimisation multi-objectif, Impact environnemental

KEY WORDS: Deconstruction, Waste management, Multi-objective optimization, Environmental impact

1. Introduction

L'augmentation constante de la population urbaine conduit à un renouvellement accéléré des terrains et des infrastructures. Parmi les travaux de génie civil, la démolition et la réhabilitation de bâtiment ne cessent de croître. De telles activités génèrent chaque année environ 35 millions de tonnes de déchets en France [CGD 11]. Or la gestion des déchets manque encore de coordination et d'efficacité. Un chantier de démolition se caractérise par une grande variété de déchets possibles : béton, bois, brique, brique plâtrière, déchets verts, mobilier, métaux, moquette, sol en PVC, plâtre, cloison amovible, panneau sandwich, verre, amiante... Malheureusement, afin de réduire le temps de travail sur chantier, les déchets sont évacués en mélange, empêchant presque toute valorisation et induisant différents effets négatifs : les décharges sont surexploitées, les matières recyclables sont perdues et les risques de pollution se multiplient.

Afin d'encourager à de meilleures pratiques, l'Union Européenne a fixé un taux de valorisation matière minimum de 70 % (en masse) pour les déchets du bâtiment et des travaux publics d'ici 2020 [PAR 08]. La France a transcrit cet objectif sur son territoire en 2015 [MEE 15]. Cependant, le taux de valorisation matière n'est pas suffisant pour étudier les impacts environnementaux. Comme exemple, le recyclage des métaux et celui du béton, bien que vertueux tous les deux d'un point de vue de quantité de matière valorisée, ne génèrent pas les mêmes conséquences sur l'environnement : le recyclage des métaux requiert de plus grosses quantités d'énergie. Outre le traitement des déchets, leur transport et la démolition en amont provoquent également des impacts à considérer.

Malgré la part importante de la démolition dans la production de déchets, peu d'outils ou de méthodes aident à la limitation des impacts environnementaux des chantiers de démolition [BAN 11, BUH 07, FFB, 18]. Il s'agit d'un travail complexe. Cela requiert d'abord de considérer le processus entier de démolition car les traitements applicables aux déchets dépendent de la manière dont la démolition a été réalisée. Plusieurs dimensions doivent alors être prises en compte : le coût global, la durée nécessaire pour réaliser les travaux et les impacts environnementaux. À notre connaissance, aucun outil existant ne considère l'optimisation de la démolition de bâtiments d'une façon holistique, i.e. considérant le processus complet d'un chantier (depuis l'installation du chantier jusqu'au traitement des déchets) et ses différents impacts (environnementaux, économiques...).

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons développé un modèle d'optimisation multi-objectif pour guider les entreprises de démolition vers une meilleure gestion des déchets. Pour que le modèle soit opérationnel, nous l'avons développé en partenariat avec une entreprise de démolition.

2. Modélisation d'un chantier de démolition sous la forme d'un problème d'optimisation multi-objectif

2.1. Réalisation d'un chantier de démolition sous une approche de déconstruction

Depuis une vingtaine d'années, la démolition tend progressivement vers une nouvelle pratique : la déconstruction. Le principe de la déconstruction peut se voir comme l'inverse de la construction : le dernier élément installé pendant la construction d'un bâtiment est le premier élément retiré lors de la déconstruction. Elle privilégie le travail manuel au travail mécanique ou à l'explosif. Moins destructrice que la démolition, la déconstruction facilite ainsi la mise en place d'un tri des déchets sur site. Il s'agit d'un premier pas vers une meilleure gestion des déchets. Un déchet trié sur site est plus facilement dirigé vers une filière de valorisation que s'il passait en mélange dans un centre de tri. Les centres de tri atteignent des taux de valorisation très faibles : de l'ordre de 35 % pour les déchets inertes mélangés et de l'ordre de 15 % pour les déchets non dangereux mélangés [ADE 11]. Ils ne représentent pas la solution pour une gestion efficace des déchets. Seule la déconstruction permettrait d'atteindre les exigences réglementaires.

2.2. Les étapes successives de la déconstruction d'un bâtiment

La première étape consiste en la préparation du site avant travaux. La véritable déconstruction démarre avec une phase de curage, durant laquelle les éléments composant l'intérieur du bâtiment (mobilier, portes, fenêtres, cloisons, faux plafond, revêtement de sol...) sont retirés. Les ouvriers déposent les éléments en utilisant des techniques manuelles, manuelles assistées (utilisation d'outils comme un marteau-piqueur, une ponceuse, une scie...) ou mécaniques (utilisation de mini-engins comme une mini-pelle). Le choix des techniques dépend de plusieurs facteurs : type et qualité de l'élément, caractéristiques du bâtiment, degré de finition imposé... La déconstruction de la structure du bâtiment s'effectue toujours avec une démarche sélective (la toiture, la charpente, les murs extérieurs, le dallage, les fondations), généralement à l'aide de pelles hydrauliques. Le chantier s'achève lorsque tous les déchets ont été évacués.

2.3. Objectifs

Quatre critères sont considérés pour évaluer les stratégies de déconstruction : la durée (en jours) et le coût du chantier (en euros), le taux de valorisation matière (en % massique) et l'émission de Gaz à Effet de Serre (GES en kg CO₂ équivalent, noté kg CO₂e).

Les deux premiers critères (durée et coût) sont classiques pour toute entreprise de construction ou démolition. On cherchera bien évidemment à les minimiser. Il est à noter que le coût ici calculé considère les coûts de chantier, d'évacuation des déchets mais aussi ceux de traitement, puis des gains dans le cas de revente de matériaux valorisables. La durée correspond à la durée des travaux de déconstruction.

Le troisième critère (taux de valorisation matière des déchets en pourcentage massique) permet de comparer l'issue de la stratégie avec l'objectif réglementaire des 70 %. En tant que valorisation matière, sont compris les traitements tels que le réemploi, la réutilisation, le recyclage, le réaménagement de site (par remblaiement) et le compostage dans une moindre mesure, ce dernier traitement étant surtout applicable aux déchets verts. L'incinération, valorisation énergétique ou non, n'est pas incluse. La valorisation des déchets dangereux et des terres n'est pas comprise dans le calcul, comme précisé dans la réglementation. On cherchera à maximiser ce critère. Cependant, pour faciliter l'implémentation du modèle, il sera formulé sous la forme d'une minimisation : minimiser le taux de déchets non valorisés (taux de stockage).

Le quatrième et dernier critère correspond à un objectif purement environnemental, en complément du taux de valorisation matière. L'émission de GES de la stratégie de déconstruction est calculée en multipliant chaque quantité exploitée ou traitée (e.g. litres de carburant fossile, kWh d'électricité, tonnes de béton à recycler...) par le facteur d'émission en kg CO₂e associé (e.g. 3,17 kg CO₂e émis par la combustion d'un litre de carburant fossile [ADE 13], 938 kg CO₂e émis par une tonne d'acier recyclé [ADE 18]). On considère pour ce calcul les émissions provoquées par la consommation d'énergie (utilisation d'engins de chantier), le déplacement du personnel, le transport du matériel et des déchets, l'immobilisation du matériel et le traitement des déchets. Lorsqu'un déchet est valorisé, il devient une matière première secondaire qui peut se substituer à une matière première primaire dans un nouveau processus de production. La production de matière première primaire est ainsi évitée. Des hypothèses ont été faites sur la matière première primaire que le matériau valorisé remplace (e.g. le béton recyclé en granulats routiers évite la production de granulats non traités). Ces émissions évitées sont calculées en multipliant la masse valorisée par le facteur d'émission de production de la matière première primaire évitée (e.g. tonnes de béton recyclé multipliée par le facteur d'émission d'une tonne de granulats non traités). Le calcul d'émissions évitées reste une estimation, et non une valeur certaine. La réalité est plus complexe car une matière première secondaire ne possède pas les mêmes caractéristiques qu'une matière première primaire, et ne peut alors pas la remplacer en totalité (e.g. les granulats issus de béton recyclé ont des performances moindres par rapport à des granulats classiques). Il faudrait plutôt parler d'émissions « potentiellement » évitées. Diverses sources bibliographiques sont utilisées pour adapter les formules au contexte de la déconstruction [ADE 13, BRI 16, DEC 15]. Les GES émis par la vie des ouvriers sur le chantier (chauffage de la base-vie, alimentation) sont négligeables et ne sont pas inclus dans le calcul.

2.4. Variables

Afin de calculer les 4 objectifs, le modèle d'optimisation a recours à 3 catégories de variables : variables de décision, de connaissances et du chantier. Les variables de décision permettent de construire une stratégie de déconstruction. Le déroulement du chantier se caractérise par la stratégie de travaux (déconstruction ou démolition traditionnelle), ainsi que le nombre de personnel et du matériel. La gestion des déchets est définie à partir du type de contenants pour leur évacuation, des sites de traitement où ils seront envoyés et le traitement qui leur sera appliqué. Les quantités de déchets récupérés pour une valorisation dépendent de la stratégie de travaux adoptée : une démolition traditionnelle, réalisée exclusivement par une pelle hydraulique, ne permet pas de trier autant de déchets qu'une déconstruction. Au total, ce sont 77 variables de décision qui définissent une stratégie de déconstruction. Les relations entre variables de décision et objectifs sont illustrées dans la Figure 1.

Les variables de connaissances sont des variables inhérentes à une entreprise et à un contexte particulier ; elles sont transversales à plusieurs chantiers. Il s'agit des rendements de dépose, des tarifs journaliers du personnel et du matériel, des tarifs de transport et de traitement des déchets, des taux de valorisation et des facteurs d'émission de CO₂. Le rendement de dépose d'un élément de construction (défini par l'expertise du professionnel, selon la technique de dépose prévue) sert à estimer la durée des travaux. Le tarif journalier des ressources humaines et matérielles influence le coût de la stratégie. Les sites de traitement des déchets disponibles autour du chantier doivent être caractérisés par type de déchets acceptés, les traitements proposés et les tarifs à la tonne. Le maillage local revêt d'une grande importance sur le plan de la gestion des déchets. Certains traitements de déchets sont bien

installés sur le territoire français (recyclage du béton en granulats routiers, recyclage du bois en panneaux de particules, recyclage des métaux...), mais d'autres relèvent encore de l'innovation ou ne sont disponibles que sur une région bien spécifique. Il s'agit par exemple du recyclage de la laine de verre [PIN 18] ou du recyclage des revêtements de sol en PVC [SFE 13]. Quant au recyclage du béton en tant que nouveau béton, les dernières études font espérer le passage de cette innovation au niveau industriel dans les prochaines années [COL 15, IRE 18]. Les taux de valorisation par traitement et par déchet sont issus de la bibliographie ou d'études de terrain. Les facteurs d'émissions de CO₂ équivalent par activité permettent de calculer l'émission totale du chantier [FFB 18, ADE 13, ADE 14, ADE 18].

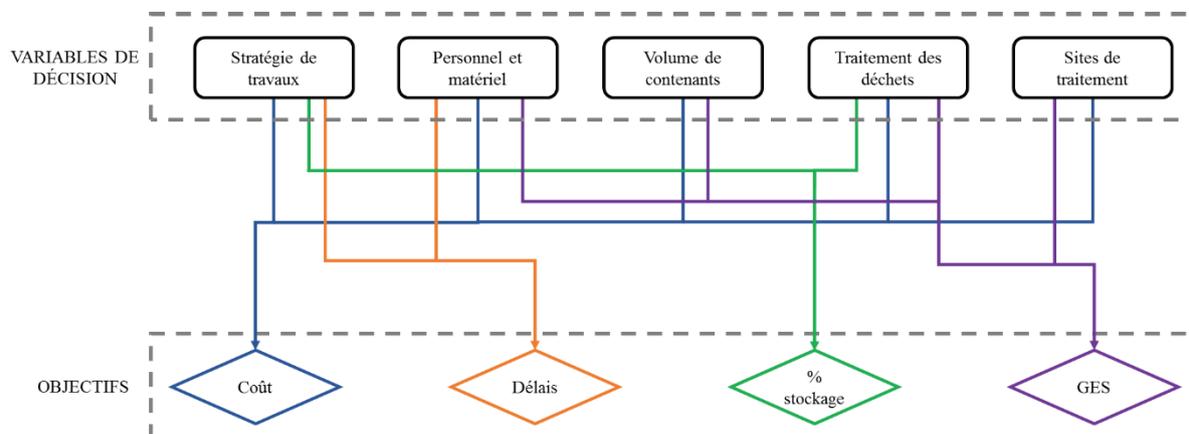


Figure 1. Influence des variables de décision sur les objectifs du modèle.

Les variables du chantier sont propres au cas d'étude. Il s'agit de la surface au sol, la surface développée et le gisement de déchets dans le bâtiment à déconstruire (type, masse et volume) et des contraintes pouvant gêner le déroulement du chantier (localisation en centre-ville, avec accès réduit pour les camions transportant les déchets). Le modèle peut prendre en compte jusqu'à une quarantaine de types de déchets. Sont également considérés les problèmes d'accès au chantier, le nombre maximum d'ouvriers sur le chantier (dépendant de l'étendue du chantier) et la possibilité de réemployer les déchets inertes sur site après un concassage. Ces variables sont estimées par l'expertise d'un professionnel et les documents liés aux bâtiments (plans, diagnostics, métré...).

2.5. Méthode de résolution : l'optimisation multi-objectif

Le modèle d'optimisation est un problème complexe. En effet, il possède des objectifs en opposition, un nombre conséquent de variables de décision (pouvant générer des milliards de stratégies possibles pour un cas de chantier) et des relations non-linéaires entre les variables et les objectifs. Afin de résoudre ce problème complexe, nous utilisons un algorithme de type métaheuristique, i.e. un algorithme stochastique itératif proposant différentes stratégies de recherche d'un optimum global. L'algorithme échantillonne une population (i.e. ensemble de solutions) et fait évoluer cette population en s'inspirant de processus naturels (e.g. évolution darwinienne, colonie de fourmis...). L'algorithme tente de trouver les solutions optimales au sens de Pareto : une solution est optimale au sens de Pareto s'il n'existe aucune autre solution meilleure sur un objectif et au moins aussi bonne sur les autres [COE 07]. Il existe de nombreux algorithmes d'optimisation et aucun d'entre eux n'est meilleur que les autres pour toutes les classes de problème (No free lunch theorem [WOL 97]). Cependant, DBEA (Decomposition-Based Evolutionary Algorithm) [ASA 13] est particulièrement adapté au problème de démolition [QUE 19] ; nous avons ainsi retenu cet algorithme. Le modèle a été implémenté en JAVA avec la librairie Opensource MOEA [HAD 17].

3. Application sur cas réel d'étude

3.1. Contexte du cas réel

Afin de valider la démarche présentée, le modèle a été appliqué sur un cas réel d'étude. Le chantier consiste à la démolition de quatre petites maisons. Le gisement de déchets est composé en masse de 74 % de béton, 19 % de briques plâtrières, 3 % de bois, 2 % de briques, 1 % d'inertes divers (e.g. tuiles) et 1 % de non dangereux divers (e.g. laine de verre). Le chantier ne permet pas le réemploi des déchets inertes après concassage. Il est situé sur une petite commune, éloignée des grandes villes et de leur important réseau de sites de traitement pour les déchets.

Le béton représente la majorité du gisement, mais des déchets tels que la brique plâtrière et la laine de verre compliquent la démolition. Une démolition soignée doit être réalisée pour que les matériaux valorisables ne soient pas pollués. La brique plâtrière a longtemps été considérée comme un déchet inerte jusqu'à que les risques de

lixiviation des sulfates poussent la réglementation à la considérer comme un déchet non dangereux. Des traces d'inertes sont acceptables dans le recyclage de béton, mais des résidus de non dangereux (comme la brique plâtrière) sont à exclure. Cette problématique est bien présente dans le cas d'étude : la brique plâtrière y est installée en doublage des murs de béton et est utilisée au niveau du faux plafond et des cloisons. Une démolition sans curage manuel ne garantirait pas la qualité des matériaux récupérés.

3.2. Résultats et interprétation

Nous avons appliqué le modèle d'optimisation sur ce cas d'étude. La stratégie de démolition a été contrainte à de la déconstruction, à cause de la brique plâtrière en doublage mural. En un délai réduit (moins de 3 mn), 20 solutions optimales ont été trouvées (Figure 2). Ces 20 solutions ont un délai sensiblement équivalent (entre 14 et 16 jours). Ce ne sera donc pas un critère pertinent pour comparer les solutions trouvées pour ce chantier. La Figure 3 présente le front de Pareto (i.e. ensemble des solutions non dominées) donné par DBEA selon les objectifs « Coût et Pourcentage massique de stockage des déchets ». Toutes les solutions ont un taux de valorisation matière au-dessus de l'objectif réglementaire (30% de non valorisation, i.e. stockage). Parmi les solutions obtenues, deux groupes sont identifiables en fonction de leur taux de stockage. Le premier groupe de solutions possède un taux de stockage entre 6 et 8 % tandis que celui du deuxième groupe se situe entre 25 et 26 %.

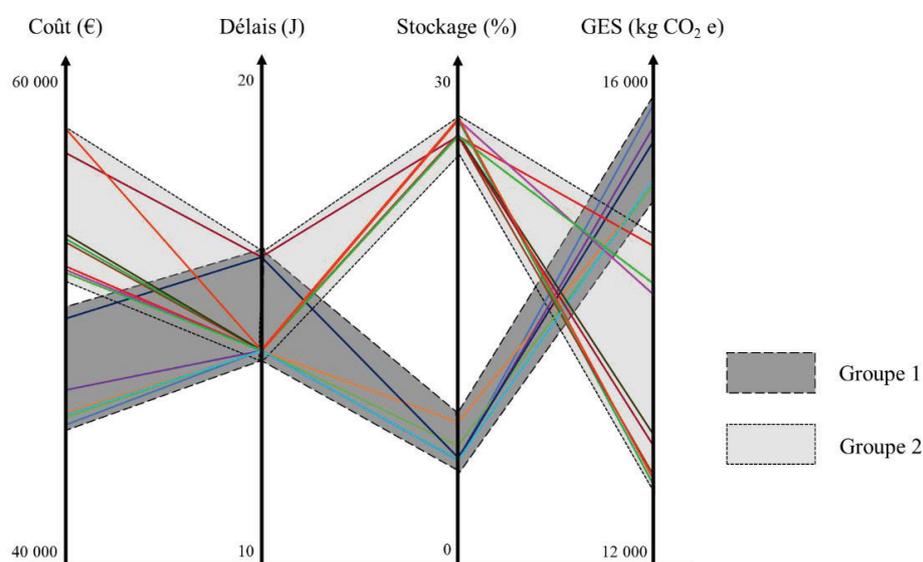


Figure 2. Solutions optimales données par l'algorithme DBEA selon les quatre objectifs « Coût, Délais, Pourcentage massique de stockage des déchets et Émission de GES ».

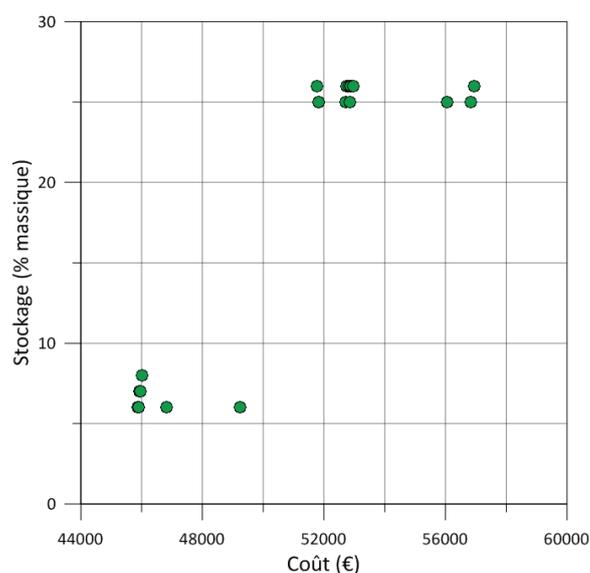


Figure 3. Solutions données par l'algorithme DBEA selon les deux objectifs « Coût et Pourcentage massique de stockage des déchets ».

Le tableau 1 présente les caractéristiques des deux groupes selon les trois principaux objectifs du cas d'étude. L'objectif des délais est omis car sa variation dans ce cas-ci est très réduite.

Tableau 1. Valeurs des deux groupes de solutions selon les trois objectifs « Coût, Pourcentage massique de stockage des déchets et Émission de GES ».

| | Coût (€) | | Stockage (% massique) | | Émission GES (kg CO ₂ e) | |
|---------|----------|----------|-----------------------|----------|-------------------------------------|----------|
| | Groupe 1 | Groupe 2 | Groupe 1 | Groupe 2 | Groupe 1 | Groupe 2 |
| Moyenne | 46 539 | 53 394 | 7 | 25 | 15 189 | 13 191 |
| Minimum | 45 884 | 51 783 | 6 | 25 | 14 973 | 12 610 |
| Maximum | 49 253 | 56 956 | 8 | 26 | 15 593 | 14 504 |

Les solutions avec le plus faible taux de stockage (soit le plus grand taux de valorisation) sont les moins chères, mais émettent le plus de GES. À l'opposé, le deuxième groupe présente en moyenne un taux de stockage supérieur de 18 %, un coût supérieur de 15 %, mais une émission de GES inférieure de 13 %. Ces résultats valident notre hypothèse sur le manque de pertinence du taux de valorisation pour définir la qualité environnementale d'une stratégie de démolition. Cela peut sembler contre-intuitif mais peut s'expliquer. Les émissions de GES sont dues au traitement des déchets, mais aussi au fonctionnement des machines et au transport. La différence entre les solutions à forte valorisation (groupe 1) et celle à faible émission de GES (groupe 2), réside dans le choix du traitement de la brique plâtrière. Les premières solutions proposent de l'utiliser pour le réaménagement de site (e.g. carrière de gypse), qui est un mode de valorisation autorisé par la réglementation [DGP 94]. Ce traitement émet plus de GES qu'un centre de tri ou une installation de stockage de déchets, et n'est pas possible à proximité du chantier, induisant un transport sur plus de 100 km. En revanche, il offre un tarif réduit et une meilleure valorisation. Les solutions à faible émission de GES ne proposent pas de valoriser la brique plâtrière, qui est alors envoyée en centre de tri ou stockée. Cela induit un coût plus élevé et un taux de valorisation plus faible, bien que toujours au-dessus de l'objectif réglementaire (grâce aux autres matériaux valorisés).

Estimer les émissions de GES permet de mieux prendre en compte l'impact environnemental des solutions. En dehors de ces aspects, la plupart des solutions partagent des caractéristiques communes. Elles proposent d'utiliser un nombre d'ouvriers proche du maximum estimé (variable du chantier). Le béton est recyclé avec la brique et les inerts en mélange qui sont acceptés en tant que traces dans le béton, étant donné leur faible proportion. Le bois est recyclé et les déchets non dangereux en mélange sont envoyés en centre de tri. Les sites de traitement les plus proches du chantier sont principalement privilégiés.

En plus de la caractérisation des solutions, le calcul des émissions de GES permet d'identifier les activités les plus impactantes. Pour les solutions du groupe 2, les trois activités les plus émettrices sont le traitement des déchets à 65 %, puis la démolition de la structure avec une pelle hydraulique à 21 % et le transport des déchets à 11 %. Dans le groupe 1, le transport des déchets prend la deuxième position à 26 % tandis que la démolition descend à la troisième position avec 17 % des émissions de GES. Le traitement des déchets est toujours prépondérant, avec 54 % des émissions.

3.3. Retour du terrain

Les solutions trouvées ont été présentées au conducteur de travaux responsable du futur chantier. L'objectif est de soumettre les solutions à un avis d'expert. Une première comparaison a été réalisée avec l'étude réalisée pour le chantier par un chargé d'études, qui s'était alors basé sur sa propre expertise. L'étude privilégiait les sites de traitement les moins chers, même si la distance avec le chantier était plus grande.

L'intérêt principal du conducteur de travaux était de faire un chantier au moindre coût. Traiter les déchets inerts et le bois en recyclage était inévitable. Comme le taux de valorisation est suffisant pour les groupes 1 et 2, les émissions de GES ont été retenues comme deuxième critère, le moyen le plus facile de les réduire étant d'assurer une valorisation tout en limitant le transport. Les plateformes les plus proches et une gestion locale de la brique plâtrière ont ainsi été préférées.

Parmi les 20 solutions optimales données par la résolution du modèle, une solution correspondait à la vision du conducteur de travaux (nombre d'ouvriers, traitement des déchets, type de contenant, site de traitement). Contrairement à l'étude, la solution désignée privilégiait les sites de traitement les plus proches, ce qui affectait légèrement le coût, mais réduisait les émissions GES. Le chantier s'est réalisé en prenant cette solution optimale comme base. Malgré les aléas (e.g. 4 ouvriers n'étaient pas présents chaque jour sur chantier), les résultats de la

solution se sont montrés proches de la réalité du chantier, avec des écarts acceptables (écart de coût de 5 % et de délai de 7 %). La différence de coût est majoritairement portée par une estimation de déchets en-deçà de la réalité. Des chiffres exacts sont impossibles car certains sites de traitement ne disposaient pas de pont-bascule permettant de peser les entrées de déchets. Le gisement réel de déchets serait supérieur de 49 % à l'estimation de l'étude. Sa composition serait de 83 % d'inertes (béton et inertes en mélange), 13 % de briques plâtrières, 1 % de bois et 3 % de non dangereux en mélange. Heureusement, le site de traitement utilisé pour les inertes récupérerait ces derniers sans frais. Les estimations de taux de valorisation et d'émissions GES ne peuvent pas être vérifiées sur le cas réel, par manque de données (e.g. consommation exacte des camions ayant transporté les déchets).

Par cette comparaison, le modèle se montre proche de la situation réelle du chantier. L'écart potentiel entre l'estimation et la réalité est porté par les aléas d'un chantier (e.g. travaux non prévus initialement, l'équipe prévue n'est pas constante sur toute la durée du chantier) et des organisations non formulables d'un point de vue mathématique (e.g. comment estimer exactement le nombre de mini-engins nécessaires en fonction de la quantité de personnel ?). Cet écart est acceptable. Ce n'est pas le cas lorsqu'une différence survient dans le gisement des déchets, car cela impacte tous les critères (e.g. coût supplémentaire de traitement et de transport, délais supplémentaires car gisement plus important, taux de valorisation mal estimé, émission supplémentaire de GES). Une bonne estimation de déchets est d'une grande importance pour une exploitation efficace du modèle.

4. Conclusion

Nous avons proposé dans cet article un modèle d'optimisation multi-objectif pour un chantier de démolition. Ce modèle a prouvé son intérêt dans une étude de cas. Par rapport à une étude habituelle, la gestion des déchets est planifiée de manière plus solide et précise, tout en optimisant les coûts et les délais. L'algorithme DBEA a l'avantage de proposer une bonne diversité de solutions, offrant plus de choix au décideur. Le retour du terrain a confirmé que le modèle, destiné à un stade d'étude, est quand même cohérent avec la réalité des chantiers.

Les solutions de bonne qualité environnementale sont aisément repérées en étudiant conjointement l'émission de GES et le taux de valorisation matière. Tandis que la valorisation ne considère que la masse valorisée, l'émission de GES met en exergue les conséquences que cette valorisation implique (e.g. une distance plus longue et donc une activité de transport plus émettrice). L'émission de GES présente cependant des limites vis-à-vis des données de facteur d'émission. Ces derniers peuvent se révéler faibles pour des traitements tels que du tri ou du stockage et la solution aurait pu tendre vers ces traitements sans le taux de valorisation faible que cela implique.

Un avis professionnel est toujours nécessaire, aussi bien en amont (estimation précise du gisement de déchets, contraintes du chantier, stratégies de démolition envisageables...) qu'en aval (appréciation des solutions et sélection d'une solution selon la sensibilité aux objectifs). Toutefois, le modèle représente une aide précieuse pour le chargé d'études, pour lui permettre de réaliser rapidement une étude optimisée.

Le modèle conçu présente ainsi un avantage majeur pour les études de démolition. Une émission de GES permet une analyse environnementale suffisante pour une entreprise de démolition, mais nous souhaitons apporter un regard plus global sur les impacts environnementaux provoqués par un chantier de démolition. Des travaux sont alors en cours pour remplacer le calcul d'émission de GES par celui d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV). En réalité, une activité de démolition ne peut se résoudre qu'à la participation au changement climatique via les émissions de GES. Elle joue aussi un rôle sur l'épuisement des ressources, l'émission de particules polluantes et toxiques, la modification de la couche d'ozone à cause de la combustion de carburant, du stockage définitif de matières recyclables... L'intégration d'une ACV renforcerait la prise de décision dans sa dimension environnementale.

5. Remerciements

Je remercie l'entreprise BDS et la Région Nouvelle Aquitaine pour leur soutien apporté à ces travaux de thèse.

6. Bibliographie

[ADE 13] ADEME, Bilan Carbone®, Microsoft Excel, 2013.

[ADE 14] ADEME, Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone®, 2014.

[ADE 18] ADEME, Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre. <http://www.bilans-ges.ademe.fr/> (consulté le 07/03/2019).

[ADE 11] ADEME, TREIZE DÉVELOPPEMENT, PÖYRY, Analyse technico-économique de 39 plateformes françaises de tri/valorisation des déchets du BTP, Synthèse réalisée pour l'ADEME, 2011.

- [ASA 13] ASAFUDDOULA M., RAY T., SARKER R., « A decomposition-based evolutionary algorithm for many objective optimization », *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol.19, n°3, 2015, p. 445–460. DOI : 10.1109/TEVC.2014.2339823.
- [BAN 11] BANIAS G., ACHILLAS C., VLACHOKOSTAS C., MOUSSIOPOULOS N., PAPAIOANNOU I., « A web-based Decision Support System for the optimal management of construction and demolition waste », *Waste Management*, vol. 31, n°12, 2011, p. 2497–2502. DOI : 10.1016/j.wasman.2011.07.018.
- [BUH 07] BUHLER T., BUHE C., BERDIER C., BOSCATO J-F., « Pertinence et faisabilité d'une application d'aide à la planification/gestion de déchets de chantier : Du chantier à la gestion territoriale », *25èmes rencontres de l'AUGC*, Bordeaux, 23-25 mai 2007, p.1-8.
- [BRI 16] BRIÈRE R., Étude ACV des chantiers de démolition en vue de la préservation des ressources : Focus sur les procédés de transport et de décharge, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2016.
- [CGD 11] COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, Déchets gérés par les établissements du bâtiment : quantités et modes de gestion en 2008, *Observation et statistiques : Logement et construction*, n°231, Juillet 2011, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
- [COL 15] COLINA H., DE LARRARD F., Projet national de R & D recyclage complet des bétons, Colloque pour le projet RECYBETON, 2015.
- [COE 07] COELLO COELLO C., LAMONT G., VAN VELDHUIZEN D., *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, Éditions Springer, 2007. ISBN : 978-0-387-33254-3.
- [DEC 15] DE CHILLAZ V., SCHULLER A., Bilan de gaz à effet de serre, Carbone 4 et FFB, Microsoft Excel, 2015.
- [DGP 94] DIRECTION GÉNÉRALE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES, Arrêté du 22/09/94 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières, 1994.
- [FFB 18] FÉDÉRATION FRANÇAISE DU BÂTIMENT, Focus Bilan carbone : BatiCarbone, <https://www.ffbatiment.fr/applications-interactive/caisse-outils/CaisseOutilsFocusDetails.aspx?ThemeId=4&FocusId=24#caisse-outils> (consulté le 13/11/2018).
- [HAD 17] HADKA, D., MOEA Framework, Java, 2017.
- [MEE 15] MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, Article 79 de la loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, 2015.
- [PAR 08] PARLEMENT EUROPÉEN ET CONSEIL, Directive 2008/98/CE relative aux déchets et abrogeant certaines directives, *Journal Officiel de l'Union Européenne*, 2008.
- [PIN 18] PINCEMIN F., Isover Recycling, Conférence Pollutec, 2018.
- [QUE 19] QUÉHEILLE E., TAILLANDIER F., SAIYOURI N., « Optimization of strategy planning for building deconstruction », *Automation in Construction*, vol. 98, 2019, p. 236–247. DOI : 10.1016/j.autcon.2018.11.007.
- [SFE 13] SYNDICAT DES FABRICANTS DE REVÊTEMENTS DE SOL PVC, La filière de recyclage des revêtements de sol PVC gérée par le SFEC, le syndicat des fabricants de revêtements de sol PVC, PVC Next, 2013.
- [WOL 97] WOLPERT D.H., MACREADY W.G., « No free lunch theorems for optimization », *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 1, 1997, p. 67–82. DOI : 10.1109/4235.585893.