

OPTIMISATION DU MOUVEMENT DES TERRES D'UN PROJET DE TERRASSEMENTS ET EVALUATION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFETS DE SERRE ET DES DEPENSES ENERGETIQUES ASSOCIEES

S. BERNHARD & D. GAUTIER
Direction Technique et de l'Innovation, Egis, France
stephan.bernhard@egis.fr
dominique.gautier@egis.fr

RÉSUMÉ

La conception d'un projet de terrassements d'une route ou d'une voie de chemin de fer aboutit à la réalisation de son mouvement des terres. Le logiciel MASSTER a été développé pour optimiser ce mouvement des terres, c'est-à-dire minimiser la distance cumulée des transports.

Les récents développements ont permis de l'enrichir d'un calculateur d'émissions de gaz à effets de serre et de dépense énergétique. L'innovation réside dans le fait que le logiciel décompose le chantier de terrassements en ateliers élémentaires, afin de calculer l'impact lié à l'extraction, aux transports, à la mise en œuvre des matériaux et à la fabrication des liants.

Une étude a été réalisée sur un projet autoroutier de 30 km de long en France. Elle montre que la fabrication des produits de traitement et le transport ont un poids prépondérant sur les émissions de gaz à effet de serre et la consommation énergétique de ce projet.

Cet outil permet donc d'évaluer et d'optimiser un projet de terrassements sous l'angle des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation énergétique. Il constitue une aide à la conception et à la décision dans un contexte international de lutte contre le changement climatique et de préservation des ressources naturelles.

1. INTRODUCTION AU PROJET DE TERRASSEMENTS

Les terrassements consistent à modeler le terrain naturel afin d'obtenir une plate-forme permettant de supporter des chaussées, des voies ferrées, des bâtiments ou tout autre structure ou superstructure. Ils ont pour conséquence de produire des ouvrages en terre (principalement des déblais et des remblais) qui doivent être à la fois stables et durables.

Pour en arriver là, le concepteur est amené à imaginer de quelle façon va se dérouler le chantier de terrassements et donc à se poser les questions suivantes : quelles vont être les conditions d'extraction ? De stabilité des ouvrages ? La destination de chaque matériau extrait et ses conditions de réutilisation ? Les performances mécaniques de la plate-forme ?

Mais les réponses à ces questions ne sont pas suffisantes car le projet doit également tenir compte d'un certain nombre de contraintes comme les coupures physiques (par exemple la traversée d'un cours d'eau) ou temporelles (construction d'un ouvrage d'art) qui ont une conséquence sur le déroulement du transport des matériaux.

La conception des terrassements doit permettre de répondre à l'ensemble des questions posées ci-avant et appréhender la problématique des transports, particulièrement importante pour les projets d'infrastructures linéaires.

2. DE LA CONCEPTION A L'OPTIMISATION DU MOUVEMENT DES TERRES

Un projet de terrassement est soit en excédent soit en déficit de matériaux. Sur un chantier linéaire, l'excédent d'une partie des ouvrages en terre doit compenser le déficit des autres, d'où un équilibre nécessaire à trouver entre les caractéristiques des ressources disponibles et la qualité nécessaire des besoins.

Si l'équilibre global du projet est négatif, on fait appel à des matériaux de provenance extérieure. Si l'équilibre est positif, il est nécessaire de trouver une destination pour les matériaux en excédent (dépôt, modelage ou autre). Dans la pratique, les chantiers peuvent produire à la fois des matériaux non réutilisés (impropres ou qualité insuffisante par rapport aux besoins) et nécessiter des matériaux d'apport extérieur.

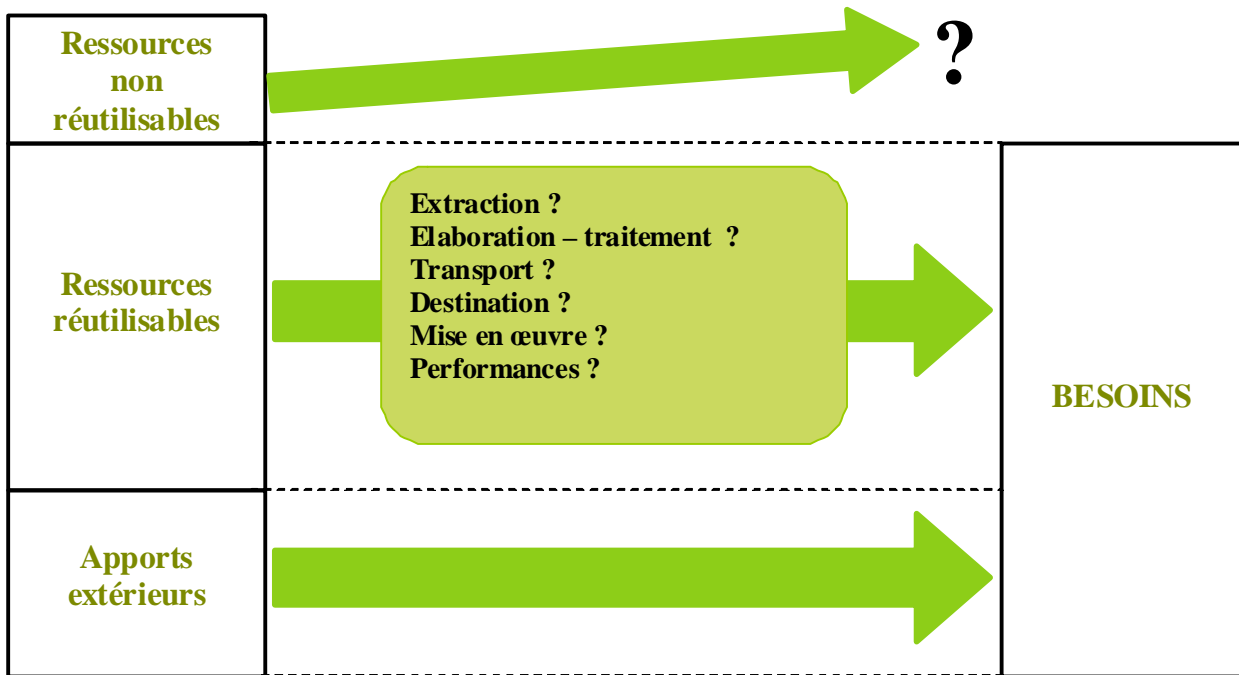


Figure 1 – équilibre du projet de terrassements

La qualité des ressources disponibles sur le projet est définie par les études géotechniques.

La qualité des besoins est quant à elle dépendante de la conception des ouvrages en terre. On peut citer par exemple, et de façon non exhaustive, les parties d'ouvrages suivantes et leurs besoins :

- couche de forme : matériaux insensibles à l'eau permettant d'obtenir un module de déformation élevé,
- base de hauts remblais : matériaux de résistance au cisaillement élevée et peu compressibles,
- base de remblai en zone inondable : matériaux insensibles à l'eau ou rendus insensibles à l'eau par traitement,
- parements de remblais : matériaux permettant d'assurer la stabilité des talus,
- etc.

Le profil en travers de la figure 2 illustre un exemple de conception de remblai de grande hauteur sur pente sur le projet d'autoroute A89 entre Lyon et Balbigny (France).

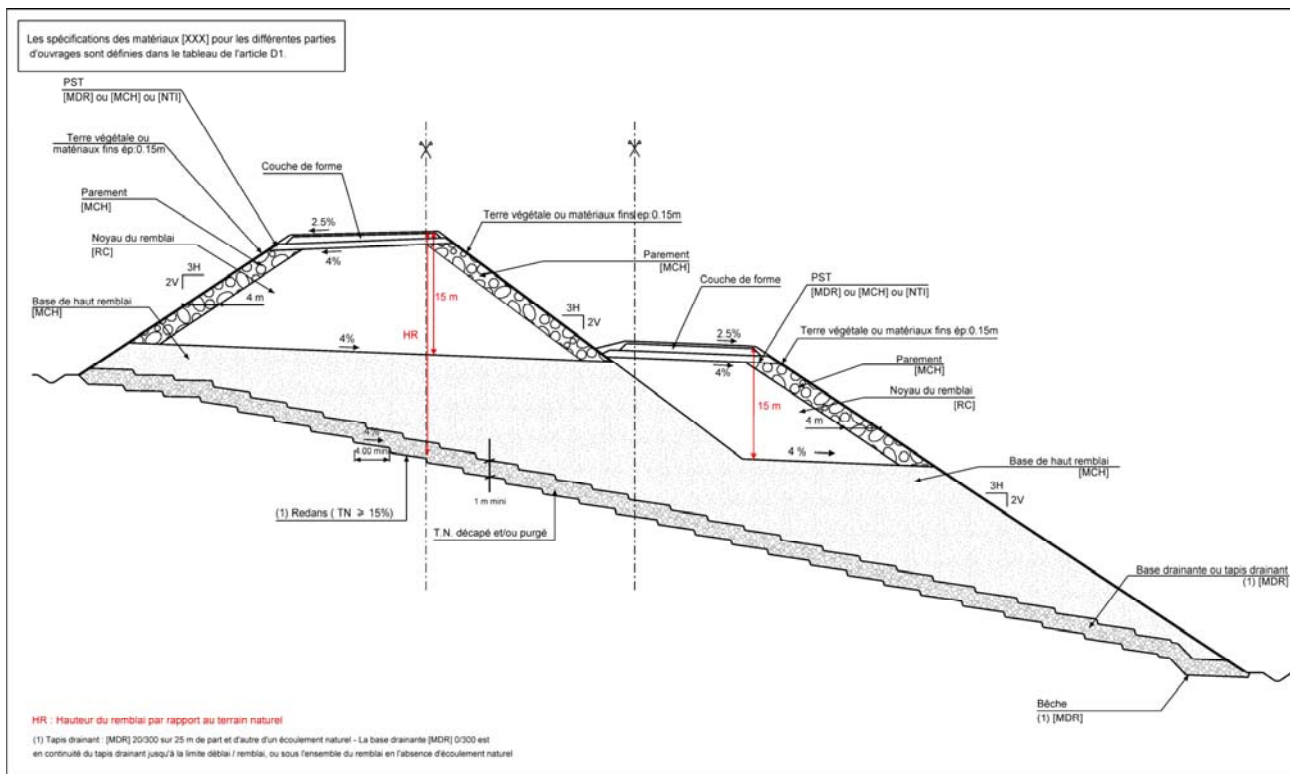


Figure 2 – exemple de conception de haut remblai (autoroute A89 – Lyon – Balbigny)

Le mouvement des terres consiste à mettre dans la même équation le volume, la qualité, et la position géographique des ressources et des besoins, ainsi que les contraintes physiques et temporelles du projet. L'optimisation du projet de terrassements permet de résoudre cette équation avec pour objectif de minimiser la distance totale parcourue par les engins de transport.

Le module d'assistance aux terrassements (MASSTER) a été développé par Egis dans le but d'aider à la conception et à l'optimisation du mouvement de terres en étude et au suivi des terrassements en phase travaux aussi bien pour les infrastructures routières que pour les infrastructures ferroviaires. Il permet donc d'assurer la continuité études/travaux, en offrant notamment la possibilité d'analyse du mouvement des terres de l'entreprise vis-à-vis de celui du maître d'œuvre puis d'assurer le suivi de la réalisation du mouvement des terres à partir de la récupération par moyens informatiques des données fournies par l'entrepreneur.

3. EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE (GES) ET CONSOMMATION ENERGETIQUE DES PROJETS DE TERRASSEMENTS

3.1. Terrassements et développement durable

Pendant très longtemps, les projets de terrassements ont été conçus dans une logique d'optimisation technico-économique. Depuis quelques années, il est apparu évident qu'un projet d'infrastructure ne peut plus être construit sans tenir compte de ses impacts environnementaux et sociaux.

Le contexte actuel nous pousse donc à aborder les projets dans une optique de développement durable et il est donc de la responsabilité des concepteurs de proposer aux donneurs d'ordre des solutions innovantes pour répondre à cet enjeu.

La tendance actuelle est donc d'évaluer et d'optimiser les projets selon les trois piliers du développement durable (économique, environnemental et social). Dans la suite du présent article, on s'intéressera principalement à l'évaluation environnementale des projets de terrassements selon deux indicateurs : les émissions de GES et la consommation énergétique.

3.2. Méthode d'évaluation des émissions de GES et de consommation énergétique

L'idée directrice du développement de MASSTER est d'évaluer individuellement l'ensemble des sources d'émission de GES et de consommation énergétique unitaires.

Les principales sources d'émission en GES et de consommation énergétique des chantiers de terrassements sont issues :

- De la consommation en carburant des engins sur chantier (extraction, chargement, mise en œuvre) ;
- Du transport des matériaux sur chantier ;
- De la fabrication des liants ;
- Du transport de fournitures extérieures au chantier (matériaux d'apport, liants,...).

Afin d'être exhaustif, il conviendrait également de tenir compte de l'impact lié à la fabrication, à l'entretien et la durée de vie des engins de chantier ou encore à la préparation du chantier et aux travaux annexes.

Le choix a été fait de ne pas en tenir compte car la principale fonctionnalité recherchée pour le logiciel est de comparer les émissions de GES et les impacts énergétiques liés à des scénarios de mouvement des terres. Les émissions citées ci-avant ne dépendent pas ou peu du scénario choisi, leur évaluation ne nous a pas paru indispensable.

Ainsi, le chantier de terrassements a été décomposé en ateliers élémentaires, dont les principaux sont détaillés sur le schéma de la figure 3.

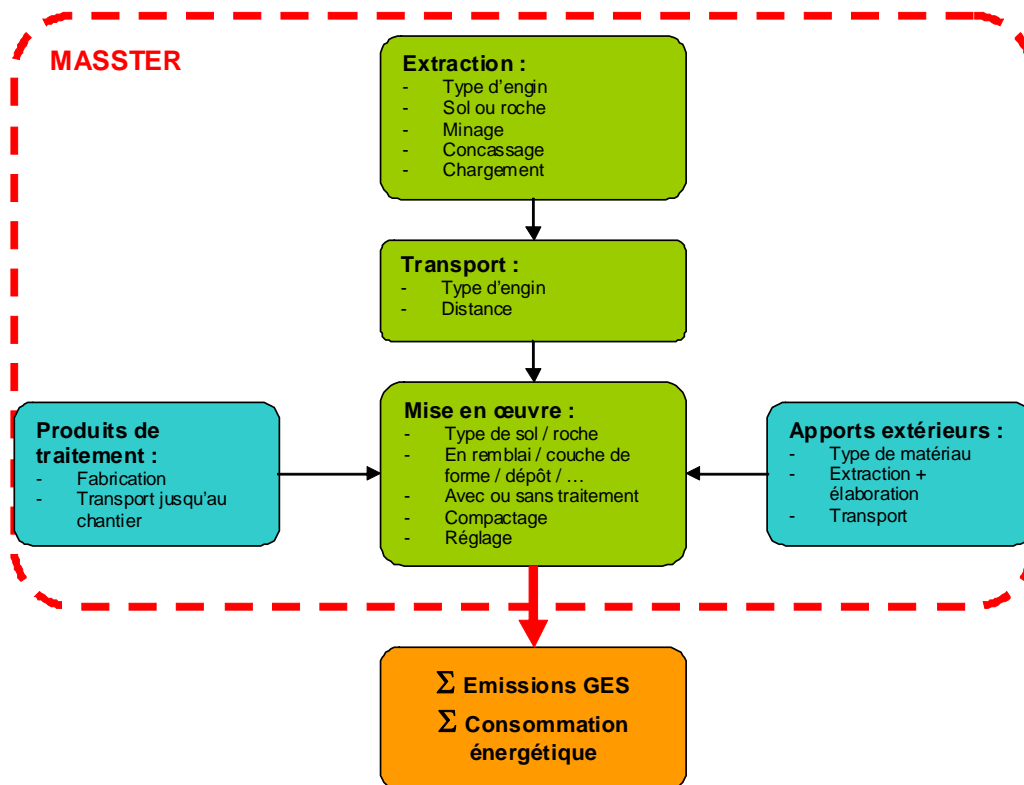


Figure 3 – postes d'émission et de consommation énergétique

3.3. Choix des facteurs d'émission et consommations unitaires

3.3.1. Engins de chantier et de transport

Comme vu dans les paragraphes précédents, les principaux postes d'émission de GES de et consommation énergétique d'un chantier de terrassement sont dus à la consommation en carburant (ou électrique le cas échéant) des engins de chantier (extraction, transport et mise en œuvre) et à la fabrication des liants.

Les valeurs retenues pour les carburants sont présentées dans le tableau 1. Ces valeurs tiennent compte de l'impact lié à la combustion des carburants mais aussi à l'impact amont (raffinage du pétrole notamment).

Tableau 1 – impacts retenus pour les carburants

Carburant	Facteur d'émissions de GES (émissions amont + combustion) [5]	Impact énergétique (impact amont + combustion) [1]
Gazole	2,948 kg éq. CO ₂ / l	38,26 MJ / l

La consommation des ateliers de terrassements peut dépendre quant à elle principalement de trois facteurs :

- la nature des matériaux : cas de l'extraction et de la mise en œuvre,
- la distance et l'état des pistes : cas du transport des matériaux,
- le type d'engins utilisé : cas de l'extraction, du transport et de la mise en œuvre.

Pour chaque nature de matériau, les ateliers de terrassements suivants ont ainsi été retenus :

- Extraction :
 - o à la décapeuse,
 - o à la pelle hydraulique,
 - o à la pelle hydraulique accompagnée d'un ripper,
 - o par minage,
 - o concassage des matériaux rocheux,
- Transport :
 - o en décapeuse,
 - o en tombereau,
 - o en semi-remorque,
- Mise en œuvre des matériaux :
 - o mise en dépôt,
 - o mise en remblai non traité,
 - o mise en remblai traité (plusieurs choix de traitement),
 - o mise en PST non traitée,
 - o mise en PST traitée (plusieurs choix de traitement),
 - o couche de forme granulaire,
 - o couche de forme traitée (plusieurs choix de traitement).

Les ateliers de mise en œuvre ont été déclinés pour les 51 classes de matériaux définies dans la classification du guide technique GTR [6]. Ainsi, on obtient un total de 432 ateliers de terrassements.

3.3.2. Produits de traitement

Les facteurs d'émission de GES et les émissions énergétiques retenus pour les produits de traitement sont quant à eux issus de la publication de CIMBETON [2], qui tire ses sources de deux associations françaises de producteurs : l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH) et l'Union des Producteurs de Chaux (UPC).

Le tableau 2 indique les valeurs retenues pour deux des principaux produits de traitement : la chaux vive et le ciment CEM II.

Tableau 2 – impact de la fabrication des produits de traitement

Chaux ou liant	Impact CO2 de fabrication (kg éq. CO2 / t)	Impact énergétique de fabrication (MJ / t)
Chaux vive	1 059	4 301
Ciment CEM II	650	4 395

3.4. Développement du logiciel MASSTER

L'ensemble des données présenté ci-avant a été intégré sous le logiciel MASSTER. Ainsi pour chaque projet de terrassements, on importe les données suivantes :

- les volumes géométriques des ouvrages de terrassements (déblais, remblais, dépôts,...) ainsi que leur position géographique sur le tracé,
- la composition géotechnique des déblais : classe géotechnique, conditions de réemploi, taux de réemploi, rendement,...
- le volume, la qualité et la provenance géographique des apports extérieurs,
- la conception des ouvrages de terrassement et les besoins en qualité de matériau.

A partir de ces données, le logiciel calcule automatiquement le bilan ressources – besoins pour chaque nature de besoin (par exemple : couche de forme, remblai courant, PST, base de haut remblais, etc) et établit le mouvement des terres optimisé. Un exemple de sortie graphique est présenté sur la figure 4.

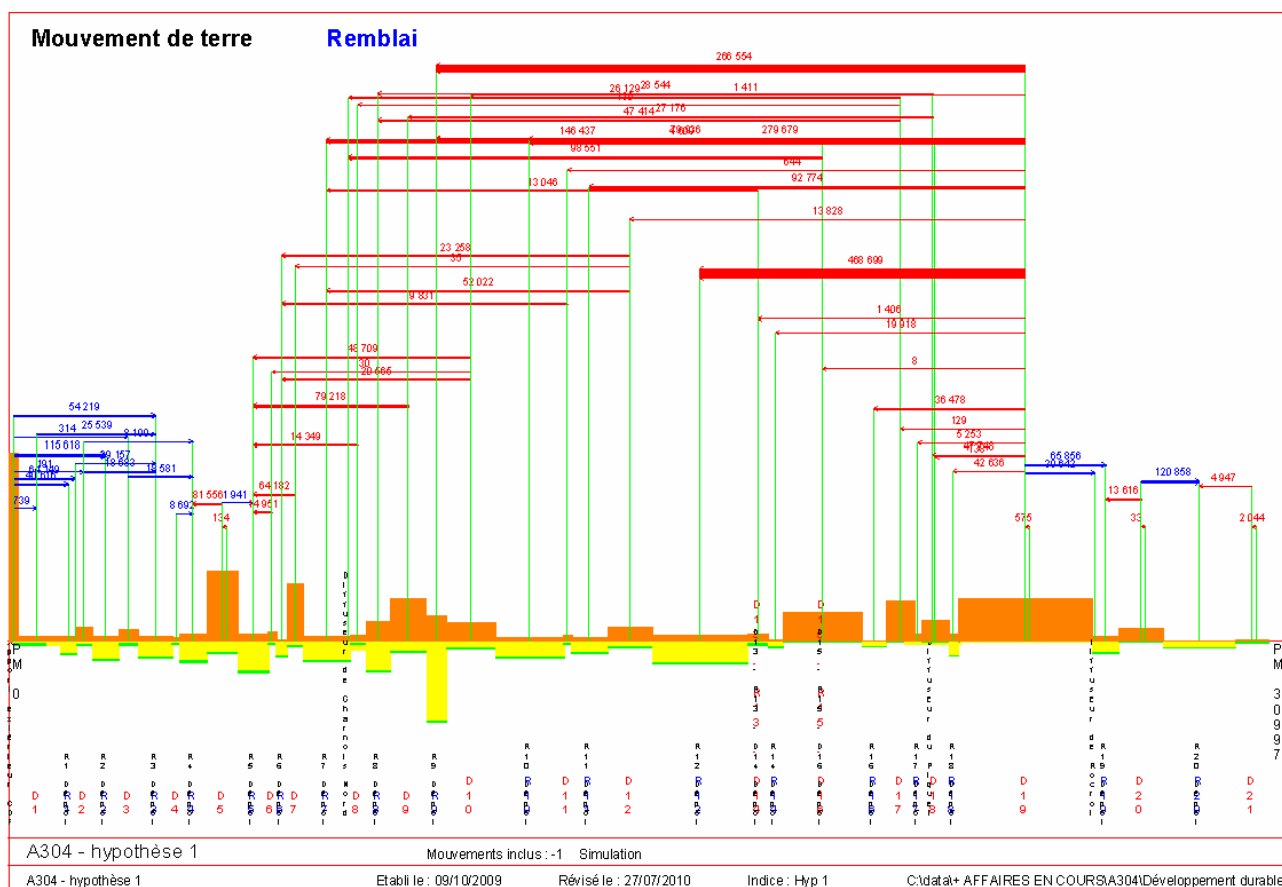


Figure 4 – exemple de mouvement des terres

Lors du calcul du mouvement des terres, le logiciel affecte automatiquement à chaque matériau et pour chaque destination : les ateliers d'extraction, de transport et de mise en œuvre correspondants. Le bilan des émissions de GES et de consommation énergétique du mouvement des terres est alors automatiquement calculé.

4. APPLICATION A UN PROJET LINEAIRE

4.1. Présentation du projet

L'autoroute A304 est un projet autoroutier neuf d'un linéaire de 30 km situé entre Charleville-Mézières et Rocroi, dans le département des Ardennes (France). Les données présentées dans les paragraphes suivants sont issues de l'étude d'avant projet.

Le tableau 3 présente les principales quantités mises en jeu sur le projet.

Tableau 3 – volumes en jeu lors de l'étude d'avant-projet de l'A304

Volume de déblais	7 100 000 m ³
Volume de remblais (y compris les dispositions constructives)	4 000 000 m ³
Dispositions constructives : bases drainantes, masques de protection, substitutions, etc.	1 200 000 m ³
Couche de forme granulaire	500 000 m ³
Dépôts	3 900 000 m ³

Le projet se caractérise par la présence majoritaire dans les déblais de matériaux fins sensibles à l'eau et notamment des argiles marneuses du Toarcien, qui présentent en plus une propriété à gonfler en cas de changement d'état hydrique. Les études géotechniques d'avant-projet ont conclu à leur inaptitude à être réutilisées en remblai et ont ainsi conduit à prévoir la mise en dépôt de 3 900 000 m³ de déblai.

Compte-tenu des possibilités de réutilisation des matériaux de déblai et des besoins, le projet est déficitaire de 1 300 000 m³ pour réaliser : la couche de forme, une partie des dispositifs géotechniques et une partie des remblais.

4.2. Scénarios étudiés

Comme vu précédemment, l'objectif principal de la démarche est de comparer plusieurs scénarios de mouvement des terres. A ce stade des études, nous avons choisi de faire varier à la fois les hypothèses de conception de la couche de forme et les taux de réutilisation de certains matériaux :

- Conception de la couche de forme : à performances mécaniques égales (classe de plate-forme PF3), nous avons étudié les cas de couche de forme granulaire et de couche de forme en limons traités aux liants hydrauliques.
- Réutilisation des déblais : nous avons considéré l'hypothèse de la réutilisation d'une partie des marnes du Toarcien après stabilisation des gonflements par traitement à la chaux vive.
- Approvisionnement extérieur : deux distances emprunt – chantier ont été étudiées : 20 km et 50 km.

Les 5 scénarios étudiés sont donc les suivants :

Tableau 4 – scénarios de mouvement des terres

	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3	Hypothèse 4	Hypothèse 5
Couche de forme	Granulaire (0,80m)	Limons traités à 5% de ciment (0,35m) sur une PST en limons traités à 2% de chaux vive (0,35m)	Granulaire (0,80m)	Limons traités à 5% de ciment (0,35m) sur une PST en limons traités à 2% de chaux vive (0,35m)	Granulaire (0,80m)
Réutilisation des argiles marneuses (1 000 000 m ³)	0%	0%	50% du volume traité à 2% de chaux vive	50% du volume traité à 2% de chaux vive	0%
Distance usine de fabrication des liants - chantier	100 km	100 km	100 km	100 km	100 km
Distance carrière - chantier	20 km	20 km	20 km	20 km	50 km

Aucune coupure n'a été imposée dans l'étude de ces cinq hypothèses.

4.3. Résultats obtenus

Pour les cinq scénarios étudiés, les émissions de GES sont comprises entre 66 000 t éq. CO₂ (hypothèse 1) et 102 000 t éq. CO₂ (hypothèse 4), soit un écart de 55 %.

Tableau 5 – émissions de GES pour les 5 scénarios

	Hypothèse 1		Hypothèse 2		Hypothèse 3		Hypothèse 4		Hypothèse 5	
	t eq CO ₂	%	t eq CO ₂	%	t eq CO ₂	%	t eq CO ₂	%	t eq CO ₂	%
Extraction	8 284	13	7 848	9	7 982	9	7 313	7	8 284	12
Transport	12 282	19	13 003	16	12 402	14	11 924	12	14 651	21
Fabrication de liants	40 208	61	57 803	69	59 823	69	77 345	76	40 208	59
Mise en œuvre	5 178	8	5 167	6	5 880	7	5 746	6	5 178	8
TOTAL	65 952		83 821		86 087		102 328		68 321	

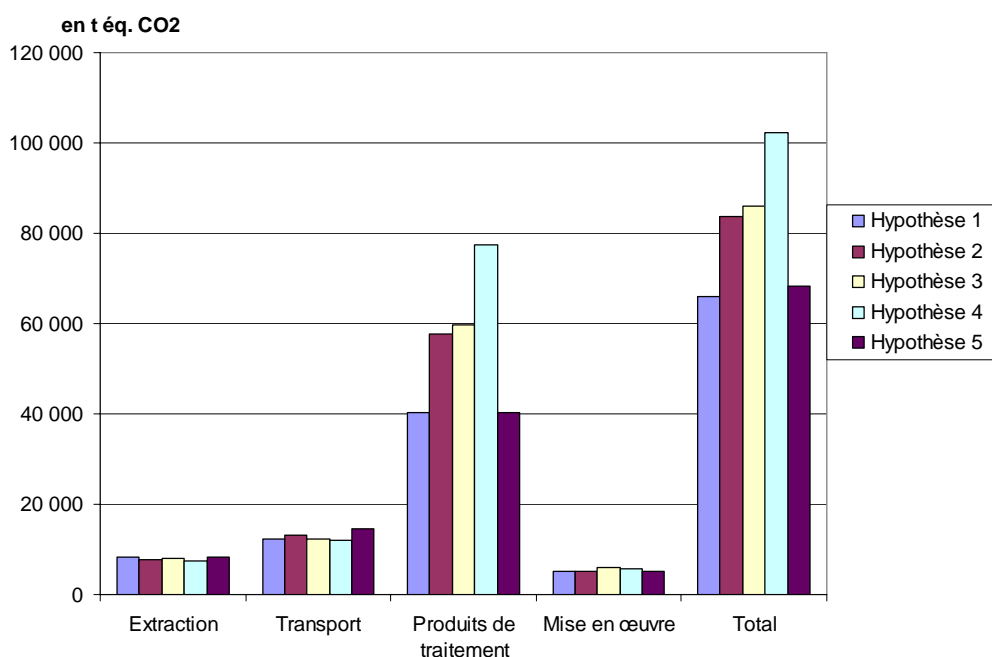


Figure 5 – répartition des émissions de GES pour les 5 scénarios

De même, la consommation énergétique est comprise entre 500 000 GJ (hypothèse 1) et 665 000 GJ (hypothèse 4) soit un écart de 33 %.

Tableau 6 – consommation énergétique pour les 5 scénarios

	Hypothèse 1		Hypothèse 2		Hypothèse 3		Hypothèse 4		Hypothèse 5	
	GJ	%	GJ	%	GJ	%	GJ	%	GJ	%
Extraction	104 759	21	99 086	16	101 117	17	92 646	14	104 759	20
Transport	164 630	33	173 832	29	165 556	28	157 967	24	198 824	37
Fabrication de liants	163 298	33	260 905	43	242 963	41	340 273	51	163 298	31
Mise en œuvre	67 169	13	67 024	11	76 270	13	74 543	11	67 169	13
TOTAL	499 855		600 847		585 906		665 428		534 049	

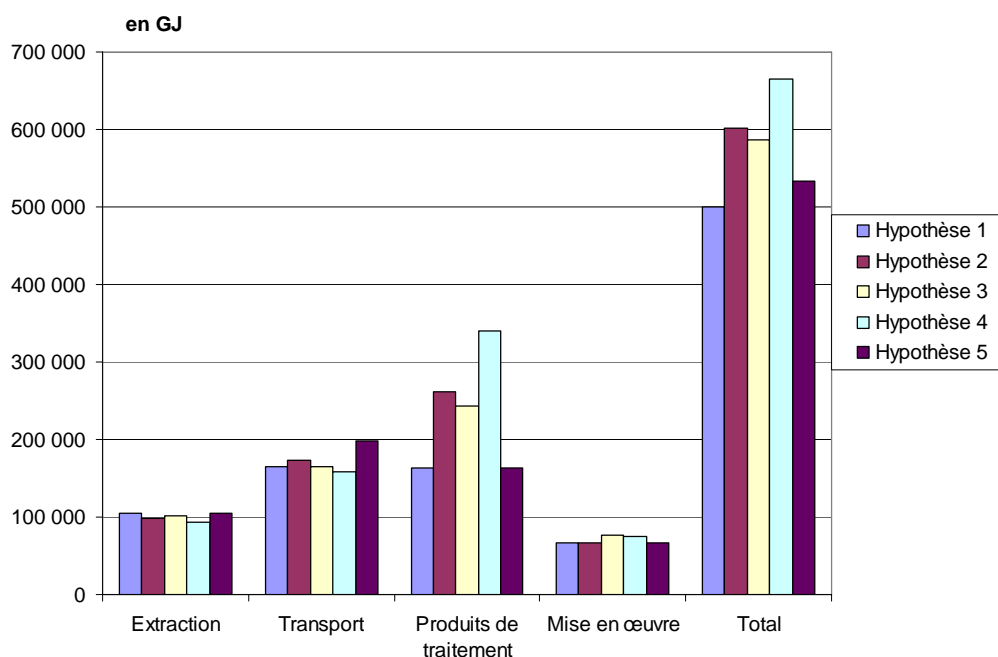


Figure 6 – répartition de la consommation énergétique pour les 5 scénarios

4.4. Analyse

Le principal enseignement est que le résultat final est essentiellement fonction de la quantité de chaux et de ciment utilisée sur chantier, comme le montrent les figures 5 et 6. En effet, la fabrication des produits de traitement pèse entre 59 et 76 % des émissions de GES, et entre 31 % et 51 % de la dépense énergétique. Il faut noter que la quantité de produits de traitement est particulièrement importante sur ce chantier car environ la moitié du volume de matériaux mis en œuvre en remblai est traitée à un dosage compris entre 1 et 2 % de chaux vive. Ce point illustre l'extrême sensibilité des résultats aux hypothèses de réutilisation des sols. Prenons l'exemple de l'hypothèse 1, pour laquelle environ 800 000 m³ de matériaux sont prévus d'être traités à 2 % de chaux vive. Si les études géotechniques de niveau projet montrent qu'un dosage moyen à 1,5 % est suffisant, les émissions totales de GES seraient ainsi réduites de plus de 10 %.

Le transport pèse quant à lui seulement entre 12 et 21 % des émissions de GES et entre 24 et 37 % de la consommation énergétique totale selon le scénario choisi. Ce poste tient compte de l'approvisionnement sur chantier des liants et des fournitures, et surtout du transport de matériaux sur chantier. La distance moyenne de transport sur chantier des

cinq scénarios étudiés est pourtant élevée (environ 5 km), ce qui donne d'autant plus de poids à l'impact de la fabrication des produits de traitement.

Le poids de l'extraction des matériaux est peu variable d'un scénario à l'autre, même si l'on constate une différence d'environ 1 000 t éq. CO₂ (11 %) et 12 000 GJ (11 %) entre les cinq scénarios. Cette différence est due à la différence de conception de la couche de forme, qui est granulaire dans le cas de l'hypothèse 1 (extraction par minage et concassage) et traitée dans le cas de l'hypothèse 4 (pas de minage ni de concassage).

Il y a très peu de différence d'impact de mise en œuvre entre les cinq scénarios étudiés. En effet, les émissions de GES varient entre 6 et 8 % du total et la consommation énergétique entre 11 et 13 %. On peut donc considérer que les conditions de mise en œuvre n'ont que très peu d'influence sur les émissions de GES et sur la consommation énergétique totales de ce projet de terrassements.

5. CONCLUSIONS – PERSPECTIVES

Le logiciel MASSTER a été développé pour optimiser le mouvement des terres des projets de terrassements linéaires. De récents développements ont permis d'y ajouter un calculateur des émissions de GES et de consommation énergétique.

Une première étude a été réalisée sur un projet autoroutier neuf de 30 km. Les résultats montrent que le plus gros poste d'émission de GES et de consommation énergétique est dû à la fabrication des produits de traitement des sols et n'est donc pas directement visible sur chantier. Ceci montre que l'éventuelle réduction des empreintes carbone et énergie de ce chantier passera par la recherche d'un traitement optimisé et donc d'une connaissance approfondie de la géotechnique du site et du comportement des matériaux traités.

Il faut également avoir à l'esprit que les indicateurs GES et énergie proposés sont deux indicateurs parmi d'autres et ne doivent pas être considérés eux seuls pour réaliser une évaluation développement durable d'un projet. Par exemple, les résultats de l'étude montrent que, pour le projet en question, le traitement des sols est source d'émissions importantes de GES et de surconsommation énergétique. Le traitement permet cependant de limiter le recours à des emprunts extérieurs et par conséquent de préserver les ressources naturelles, ce qui peut être considéré comme un impact positif en termes de développement durable.

Le logiciel ainsi développé permet donc de comparer plusieurs scénarios de terrassements selon deux critères du développement durable et constitue une aide à la décision. Le développement sera poursuivi pour que le logiciel puisse tenir compte d'autres indicateurs et donner ainsi une évaluation développement durable plus complète des projets de terrassements.

RÉFÉRENCES

1. Leroy, C., Molleron, H., Grosshenny, V., Quint, S., Fallone, D., Krafft, S., Jakubowski, M., Brosselier, E., Verhée, F., Venambre, P. (2010). SEVE, le nouvel outil des entreprises routières, Revue Générale des Routes et Aérodrômes n°883, pp. 28-33.
2. CIMBETON (2009). Étude comparative en technique routière traitement des sols VS emprunts granulaires - Méthode graphique de comparaison économique et environnementale. Collection technique CIMBETON T30, 76 pages.
3. ADEME (2009). BILAN CARBONE ® Entreprises et Collectivités - Guide méthodologique - version 6.0 - objectifs et principes de comptabilisation. ADEME, 117 pages.
4. Couvrat, J.-F., Dernoncourt, J.-R., Martareche, F. (2009). L'explosif, une source d'énergie efficace et propre. Travaux n°864, pp. 50-55.
5. ADEME (2007). BILAN CARBONE ® Entreprises et Collectivités - Guide des facteurs d'émission - version 5.0 - Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées. ADEME, 240 pages.
6. SETRA – LCPC (2000). Guide technique – réalisation des remblais et des couches de forme (GTR). , Fascicule 1 (98 pages) et Fascicule 2 (102 pages).
7. GIEC (1996). Manuel simplifié pour l'inventaire des gaz à effet de serre – Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre – version révisée 1996. Volume 2, 311 pages.