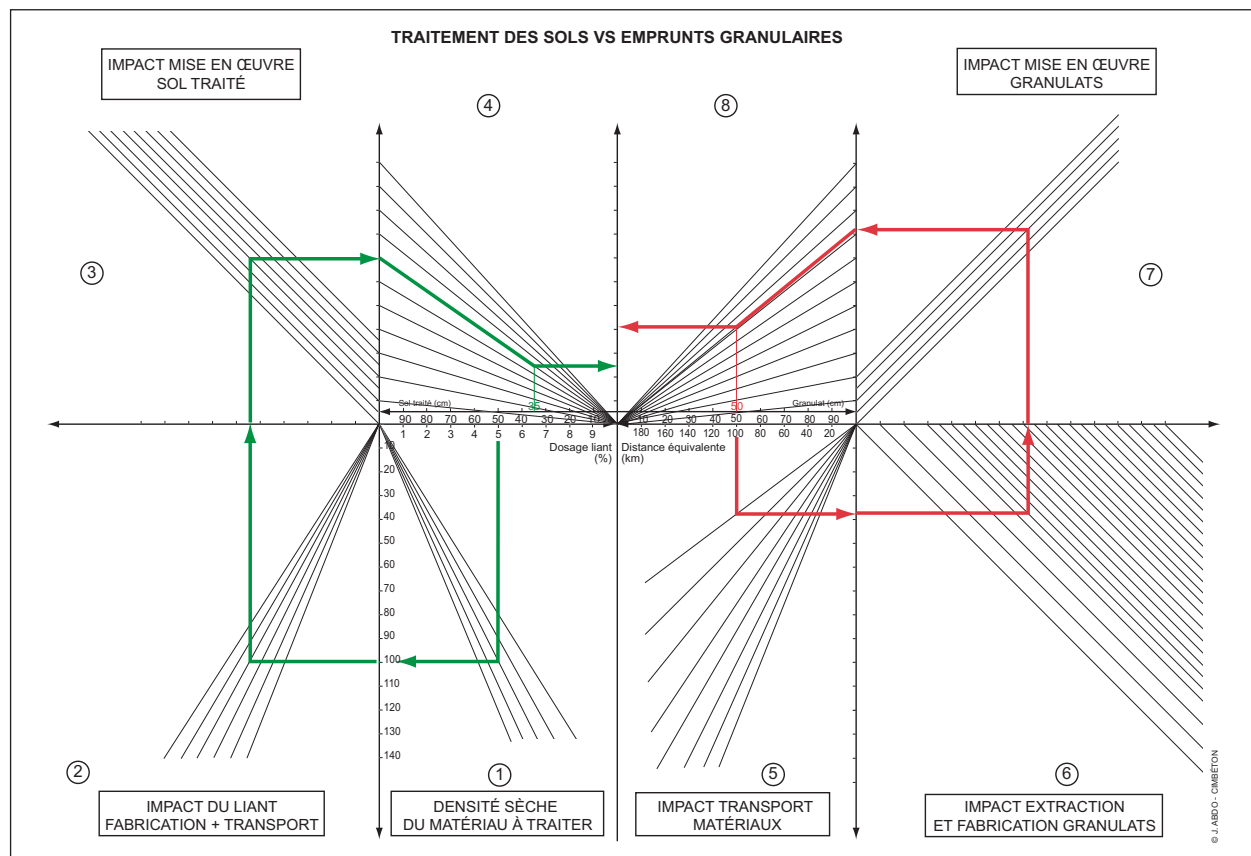


## ÉTUDE COMPARATIVE EN TECHNIQUE ROUTIÈRE TRAITEMENT DES SOLS VS EMPRUNTS GRANULAIRES

### Méthode graphique de comparaison économique et environnementale





**ÉTUDE COMPARATIVE EN TECHNIQUE ROUTIÈRE**  
**TRAITEMENT DES SOLS VS EMPRUNTS GRANULAIRES**

Méthode graphique de comparaison  
économique et environnementale

Ce document a été rédigé par Joseph ABDO, directeur délégué Routes Cimbéton,  
et validé par un Groupe de Travail constitué de :

Ludovic CASABIEL	CIMENTS VICAT
David CUINET	LAFARGE CIMENTS
Frédéric DIDIER	HOLCIM CIMENTS
Patrick DUBOIS	CIMENTS CALCIA
Antoine GARRIDO	CIMENTS CALCIA
Jean-Christophe REDON	LAFARGE CIMENTS

# Avant-propos

● Pour construire des routes, des autoroutes, des aires aéroportuaires, ou tout aménagement d'aires à caractère industriel, commercial ou logistique, il est nécessaire de concevoir et de réaliser, au préalable, une plate-forme support de capacité portante minimale, permettant la construction de la structure de chaussée proprement dite.

La réalisation de la plate-forme support, qui fait partie du domaine des terrassements routiers, consiste à effectuer des travaux de nivellement (déblais, remblais) et à exécuter une couche structurale qu'on désigne par « couche de forme ».

Les travaux de remblais et de couche de forme peuvent faire appel à l'une des deux techniques suivantes :

- **La technique des emprunts granulaires**, qui consiste à utiliser des matériaux granulaires en provenance de ballastières ou de carrières,
- **La technique de traitement des sols en place aux liants hydrauliques**, qui consiste à valoriser les sols naturels (existant à l'endroit du chantier) en les mélangeant avec un liant hydraulique et de l'eau.

Ces deux techniques présentent des avantages et des inconvénients, tant sur le plan économique qu'environnemental.

**La technique des emprunts granulaires**, faisant appel à des granulats dont l'extraction et la fabrication n'ont que peu d'impact en matière économique et environnementale, peut être handicapée par les impacts générés :

- par le transport des granulats (un produit pondéreux), dès que la distance carrière-chantier dépasse un certain seuil.
- par le transport des sols excédentaires, du chantier jusqu'à la décharge.

**La technique de traitement des sols en place aux liants hydrauliques** nécessite l'utilisation d'un liant hydraulique, dont la fabrication représente un impact non négligeable tant sur le plan économique qu'environnemental, mais ce liant est utilisé en faible dosage et les quantités à fabriquer et à transporter sont faibles, comparées à celles des emprunts granulaires.

Ainsi, en fonction du contexte propre à chaque projet (distance carrière-chantier, distance chantier-décharge, dosage du liant et distance usine-chantier), l'une ou l'autre technique peut s'imposer sur le plan économique et/ou sur le plan environnemental.

Cet ouvrage présente une méthode graphique qui permet l'évaluation et la comparaison d'ordre économique ou environnemental (Énergie et CO<sub>2</sub>) entre la technique de Traitement des sols et la technique des Emprunts granulaires.

Cette méthode présente un double avantage :

- elle permet à l'utilisateur de choisir, en fonction des données locales de ses projets, les valeurs des paramètres à chaque étape de l'étude,
- elle aide à estimer et à comparer, rapidement et visuellement, selon une progression cumulative, laquelle des deux techniques Traitement des sols ou Emprunts granulaires est la plus adaptée sur le plan économique ou environnemental.

Elle prend en compte les impacts de fabrication (liant, granulats), de transport (liant, granulats, sols excédentaires) et de mise de oeuvre des matériaux (Sol traité, Emprunts granulaires).

Elle n'intègre pas certains facteurs qui auraient avantagé la technique de Traitement des sols et qui sont : le coût de mise en décharge des sols excédentaires, le coût d'entretien du réseau routier qui aurait été dégradé par le trafic occasionné par le chantier (transport des matériaux) et le coût sociétal pour les riverains lié à ce trafic (risques d'accidents, nuisances...).

Vous trouverez, dans ce document, une série de diagrammes que vous pourrez, à loisir, photocopier afin de réaliser vos études spécifiques.

L'élaboration du diagramme Economique est une adaptation de l'abaque publié dans l'annexe 4 du guide technique « Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques » (GTS – SETRA/LCPC – 2000). Les diagrammes Environnement (Energie et CO<sub>2</sub>) ont été conçus selon la même méthode, mais sont totalement inédits.

Nous sommes persuadés que la méthodologie, que nous avons élaborée, saura vous aider efficacement dans les choix que vous aurez à faire concernant vos projets de terrassements routiers.

Joseph ABDO  
Directeur délégué Routes - Cimbéton



# Sommaire

---

<b>I - Principes fondamentaux de la méthode graphique de comparaison</b>	<b>7</b>
<b>1.1 - Les 3 graphiques comparatifs</b>	<b>8</b>
1.1.1 - Le graphique Comparaison Economique	8
1.1.2 - Le graphique Comparaison Environnementale - Indicateur Energie	8
1.1.3 - Le graphique Comparaison Environnementale - Indicateur CO <sub>2</sub>	9
<b>1.2 - Le découpage en 2 zones comparatives</b>	<b>9</b>
1.2.1 - La Zone 1	10
1.2.2 - La Zone 2	11
<b>1.3 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols</b>	<b>12</b>
1.3.1 - Quadrant 1	12
1.3.2 - Quadrant 2	13
1.3.3 - Quadrant 3	15
1.3.4 - Quadrant 4	16
<b>1.4 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires</b>	<b>17</b>
1.4.1 - Quadrant 5	17
1.4.2 - Quadrant 6	18
1.4.3 - Quadrant 7	19
1.4.4 - Quadrant 8	20
<b>1.5 - Conclusion</b>	<b>21</b>

---

<b>2 - Comparaison économique</b>	<b>23</b>
<b>2.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols</b>	<b>24</b>
2.1.1 - Quadrant 1	24
2.1.2 - Quadrant 2	25
2.1.3 - Quadrant 3	26
2.1.4 - Quadrant 4	27
<b>2.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires</b>	<b>28</b>
2.2.1 - Quadrant 5	28
2.2.2 - Quadrant 6	29
2.2.3 - Quadrant 7	30
2.2.4 - Quadrant 8	31
<b>2.3 - Conclusion</b>	<b>32</b>

---

---

<b>3 - Comparaison environnementale – Indicateur Energie</b>	<b>37</b>
<b>3.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols</b>	<b>38</b>
3.1.1 - Quadrant 1	38
3.1.2 - Quadrant 2	39
3.1.2.1 - L'Energie transport	40
3.1.2.2 - L'Energie totale (fabrication + transport)	41
3.1.3 - Quadrant 3	41
3.1.4 - Quadrant 4	43
<b>3.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires</b>	<b>44</b>
3.2.1 - Quadrant 5	44
3.2.2 - Quadrant 6	45
3.2.3 - Quadrant 7	46
3.2.4 - Quadrant 8	47
<b>3.3 - Conclusion</b>	<b>48</b>

---

<b>4 - Comparaison environnementale – Indicateur CO<sub>2</sub></b>	<b>53</b>
<b>4.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols</b>	<b>54</b>
4.1.1 - Quadrant 1	54
4.1.2 - Quadrant 2	55
4.1.2.1 - L'impact CO <sub>2</sub> transport	56
4.1.2.2 - L'impact CO <sub>2</sub> total (fabrication + transport)	57
4.1.3 - Quadrant 3	57
4.1.4 - Quadrant 4	59
<b>4.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires</b>	<b>60</b>
4.2.1 - Quadrant 5	60
4.2.2 - Quadrant 6	62
4.2.3 - Quadrant 7	63
4.2.4 - Quadrant 8	64
<b>4.3 - Conclusion</b>	<b>65</b>

---

<b>5 - Conclusion générale</b>	<b>71</b>
--------------------------------	-----------

---



# Principes fondamentaux de la méthode graphique de comparaison

## 1.1 - Les 3 graphiques comparatifs

1.1.1 – Le graphique Comparaison Economique

1.1.2 – Le graphique Comparaison

Environnementale - Indicateur Energie

1.1.3 – Le graphique Comparaison

Environnementale - Indicateur CO<sub>2</sub>

## 1.2 - Le découpage en 2 zones comparatives

1.2.1 – La Zone 1

1.2.2 – La Zone 2

## 1.3 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols

1.3.1 - Quadrant 1

1.3.2 - Quadrant 2

1.3.3 - Quadrant 3

1.3.4 - Quadrant 4

## 1.4 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires

1.4.1 - Quadrant 5

1.4.2 - Quadrant 6

1.4.3 - Quadrant 7

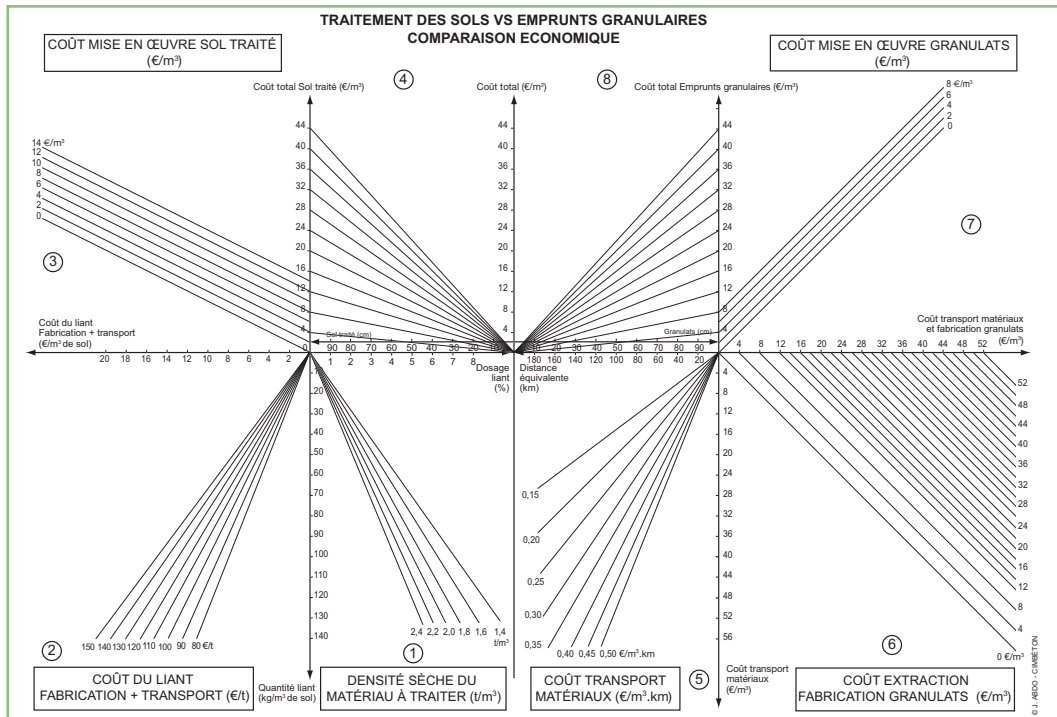
1.4.4 - Quadrant 8

## 1.5 - Conclusion

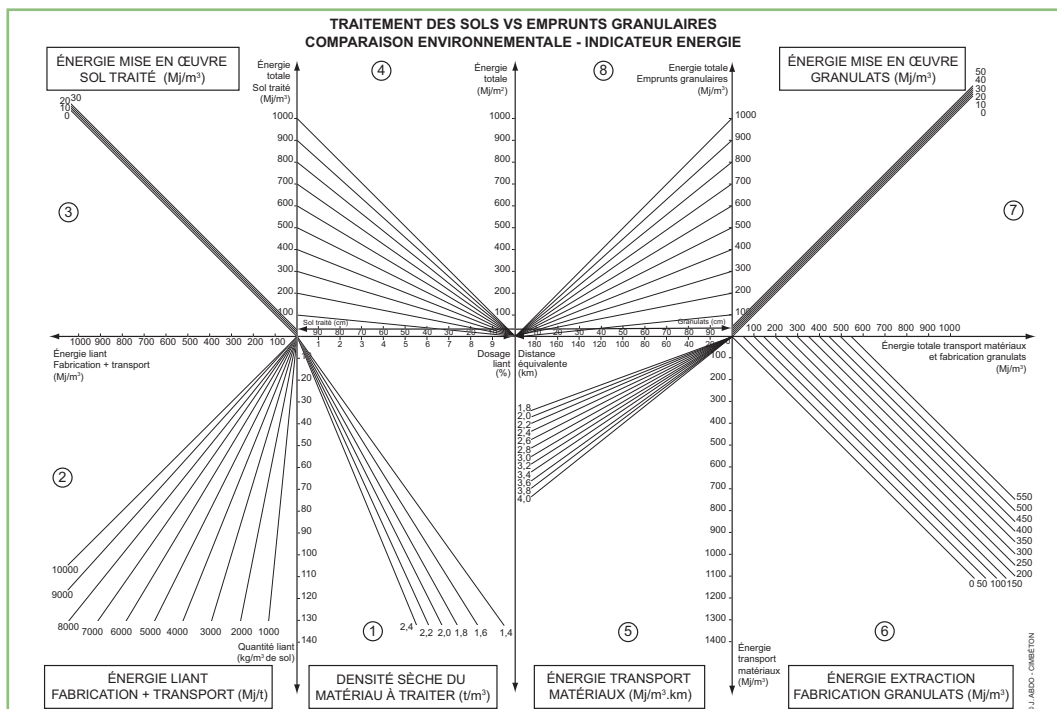
## 1.1 - Les 3 graphiques comparatifs

Ce document comprend 3 différents graphiques.

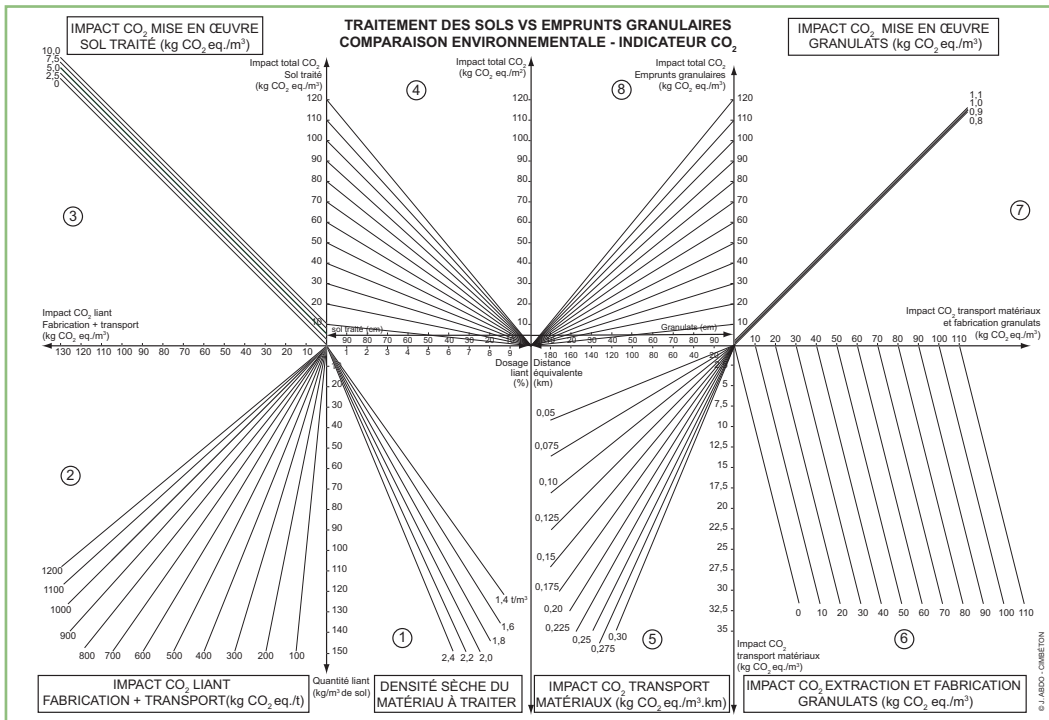
### 1.1.1 - Le graphique Comparaison Economique



### 1.1.2 - Le graphique Comparaison Environnementale - Indicateur Energie

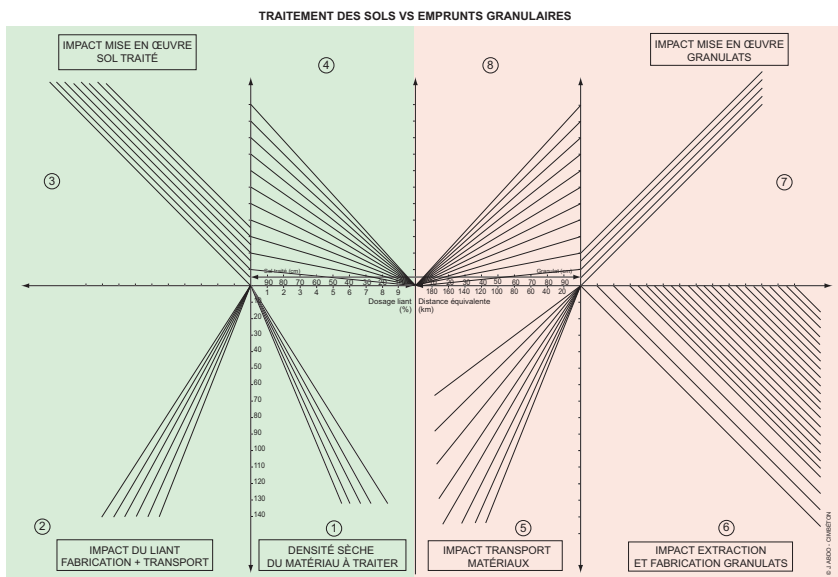


### 1.1.3 - Le graphique Comparaison Environnementale - Indicateur CO<sub>2</sub>



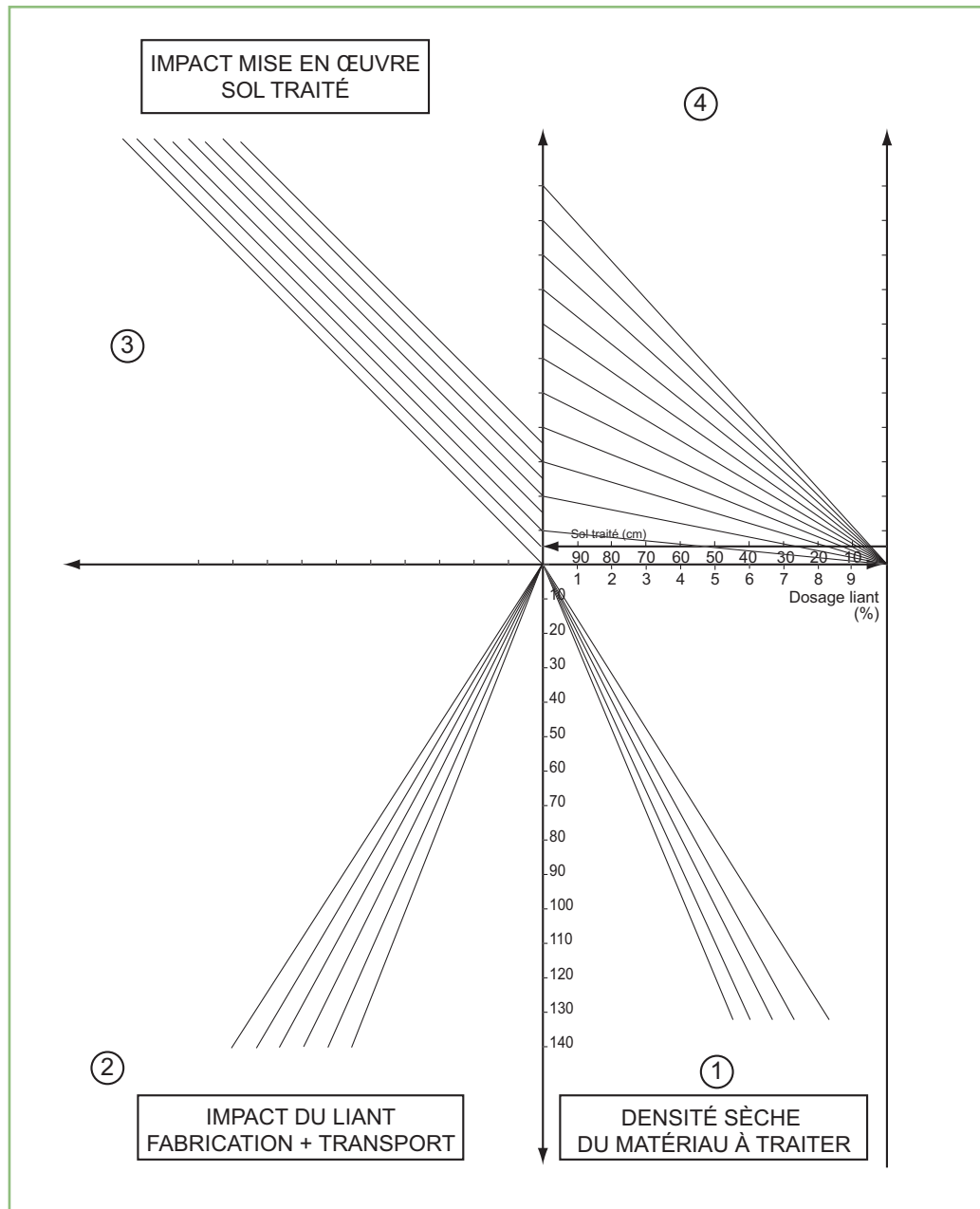
## 1.2 - Le découpage en 2 zones comparatives

Chacun des 3 graphiques proposés dans ce document est divisé en 2 zones (la Zone 1 en vert à gauche et la Zone 2 en rouge à droite), chaque zone représentant une technique spécifique qui est, elle-même, répartie en 4 quadrants.



■ 1.2.1 - La Zone 1

Elle couvre la moitié gauche des graphiques et concerne **la technique de Traitement des matériaux en place**.

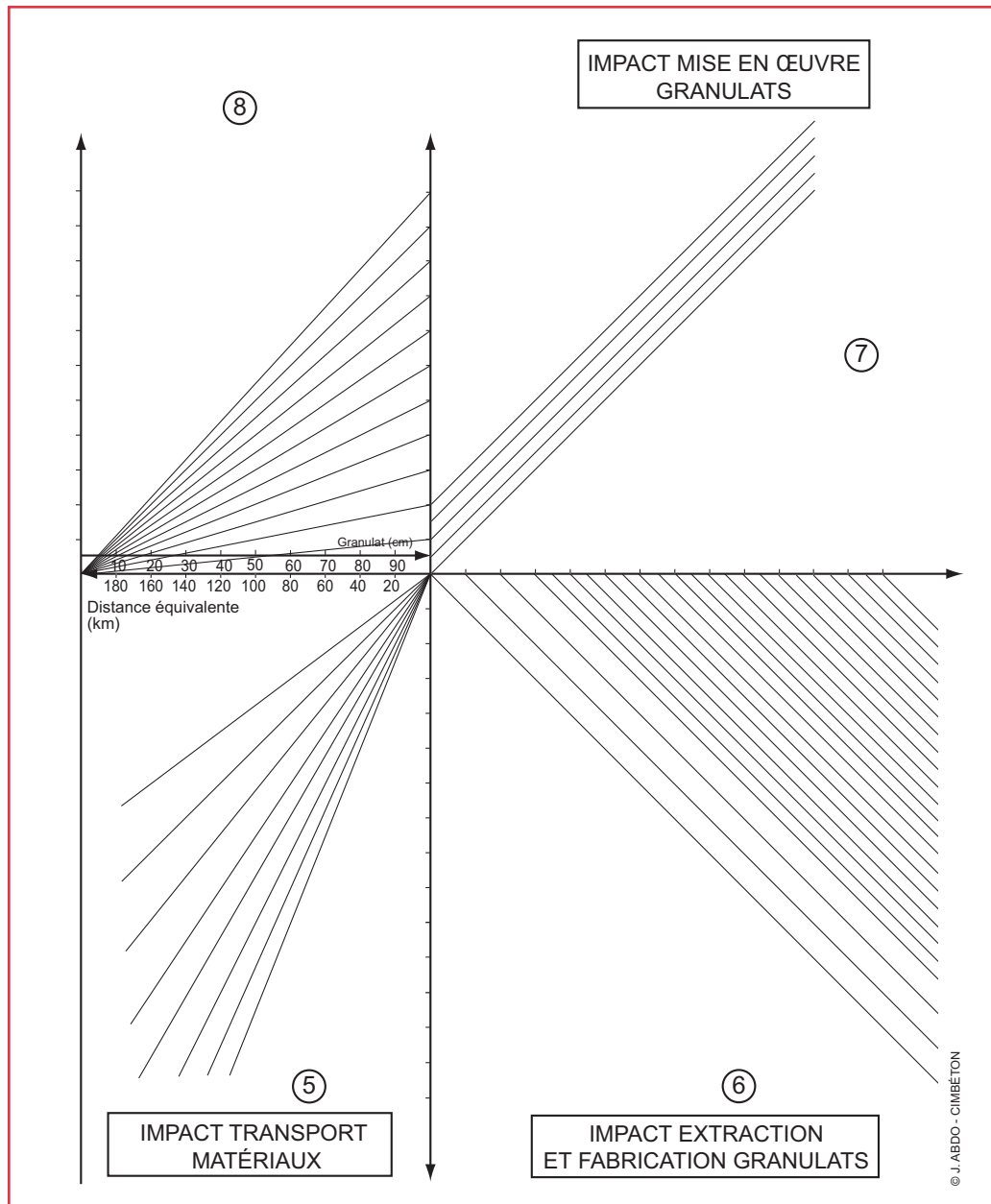


Dans cette zone, le paramètre spécifique et prépondérant est le liant, qu'il faut fabriquer, transporter jusqu'au chantier où le processus de mise en œuvre (épandage en petites quantités, de l'ordre de 30 kg/m<sup>2</sup>, malaxage, arrosage, nivellement, compactage et cure) est mené jusqu'à son terme. Ceci permet d'obtenir un matériau traité pour une utilisation en remblais (impact évalué au m<sup>3</sup> de Sol traité) ou en couche de forme (impact évalué au m<sup>2</sup> de Sol traité).

Dans la Zone 1, il est donc évident que l'étude de comparaison débute par le dosage du liant.

### ■ 1.2.2 - La Zone 2

Elle couvre la moitié droite des graphiques et concerne **la technique des Emprunts granulaires**.



Dans cette zone, le paramètre prépondérant est la distance équivalente, qui est la somme des distances carrière-chantier et chantier-décharge. En effet, la technique des Emprunts granulaires nécessite, outre l'extraction et la fabrication des granulats, et leur mise en œuvre (nivellement, arrosage, compactage), le transport d'un matériau pondéreux, pour une utilisation en forte épaisseur dans le cas de remblais et en grandes quantités (à raison d'une tonne par m<sup>2</sup>) dans le cas d'une couche de forme, et surtout la mise en décharge des sols excédentaires.

Dans la Zone 2, il est donc évident que l'étude de comparaison débute par la distance équivalente.

### 1.3 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols

Cette zone se décompose en 4 quadrants numérotés 1, 2, 3 et 4, dont voici les caractéristiques essentielles de chacun.

#### ■ 1.3.1 - Quadrant 1

Il permet de calculer la quantité de liant nécessaire par  $m^3$  de sol pour obtenir les performances recherchées du matériau traité, dans le cadre du projet étudié.

Dans ce quadrant figurent une famille de droites (passant par l'origine) qui représentent différentes densités sèches, correspondant à une large gamme de matériaux qu'on peut rencontrer dans la nature (figure 1).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît la densité sèche du sol et le dosage en liant, il suffit de tracer une verticale descendante à partir du chiffre du dosage liant jusqu'à l'intersection avec la droite de densité sèche choisie : on lit alors directement, sur l'axe vertical de ce Quadrant, la quantité de liant au  $m^3$  de sol qu'il faut prévoir afin de traiter ce sol.

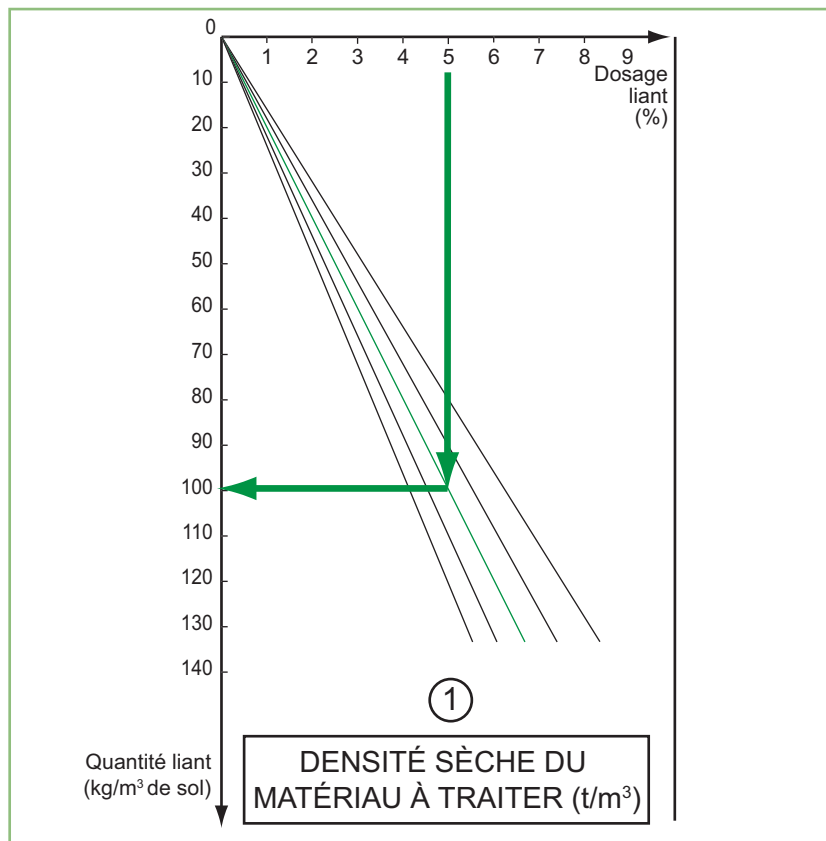


Figure 1 : zone Sol traité - Quadrant densité sèche matériau

Si, pour un projet donné, on connaît la nature du matériau à traiter mais pas sa densité sèche, on peut se référer aux valeurs indicatives du tableau 1.

Matériaux	Densité sèche
<b>Limon</b>	<b>1,6 - 1,8</b>
<b>Argile</b>	<b>1,7 - 1,8</b>
<b>Sable</b>	<b>1,4 - 1,9</b>
sable homéométrique	1,4 - 1,6
sable gradué	1,6 - 1,9
<b>Sol graveleux</b>	<b>1,8 - 2,2</b>

Tableau 1 : densité sèche de différents types de matériaux

### ■ 1.3.2 - Quadrant 2

La quantité de liant pour un m<sup>3</sup> de sol ayant été déterminée par le Quadrant 1, le Quadrant 2 permet alors de calculer son impact sur le plan économique ou sur le plan environnemental (Energie ou CO<sub>2</sub>). Dans ce Quadrant figurent des droites (passant par l'origine) qui, selon le graphique utilisé, seront d'ordre économique ou d'ordre environnemental (Energie ou CO<sub>2</sub>).

Chacune de ces droites a une valeur d'impact qui prend en compte la fabrication et le transport du liant entre l'usine et le chantier (figure 2).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît l'impact total (fabrication + transport) d'une tonne de liant, il suffit de prolonger horizontalement la droite du Quadrant 1 jusqu'à l'intersection avec la droite correspondant à l'impact choisi : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 2, l'impact du liant par m<sup>3</sup> de Sol traité.

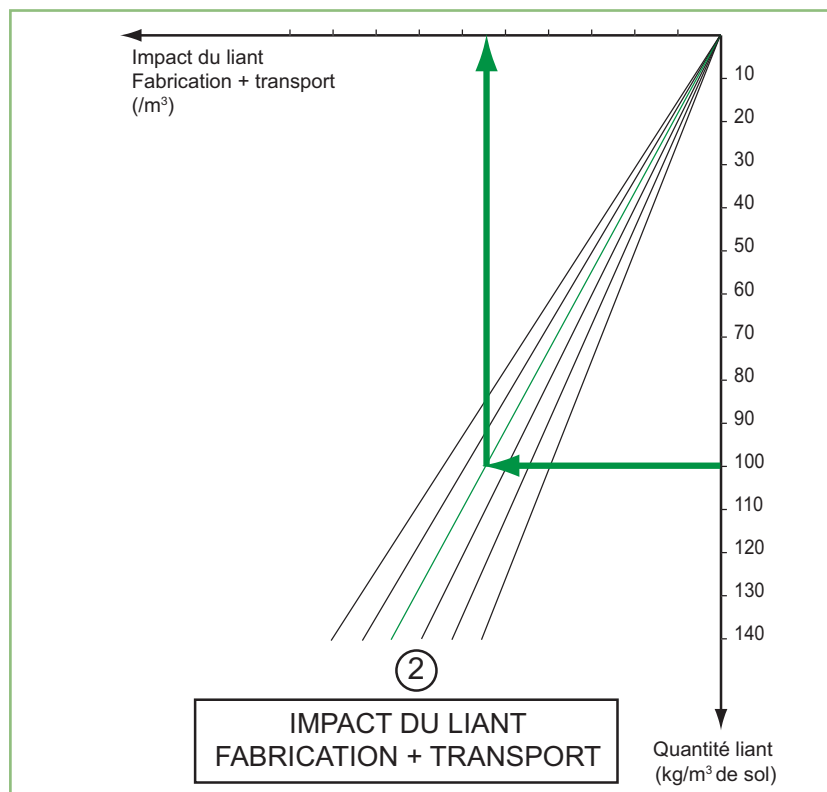


Figure 2 : zone Sol traité - Quadrant impact liant

Si l'on ne connaît pas l'impact total de la tonne de liant ou si l'utilisateur souhaite la déterminer de façon précise, compte tenu des données locales en sa possession, on peut se référer au diagramme de la figure 3.

Celui-ci permet, connaissant la distance de transport entre l'usine de liant et le chantier, l'impact transport en /t.km, ainsi que l'impact fabrication d'une tonne de liant, de déterminer successivement l'impact transport, puis l'impact total fabrication + transport. Ce dernier impact sera alors reporté sur le Quadrant 2, ce qui permettra de déduire l'impact du liant par m<sup>3</sup> de Sol traité.

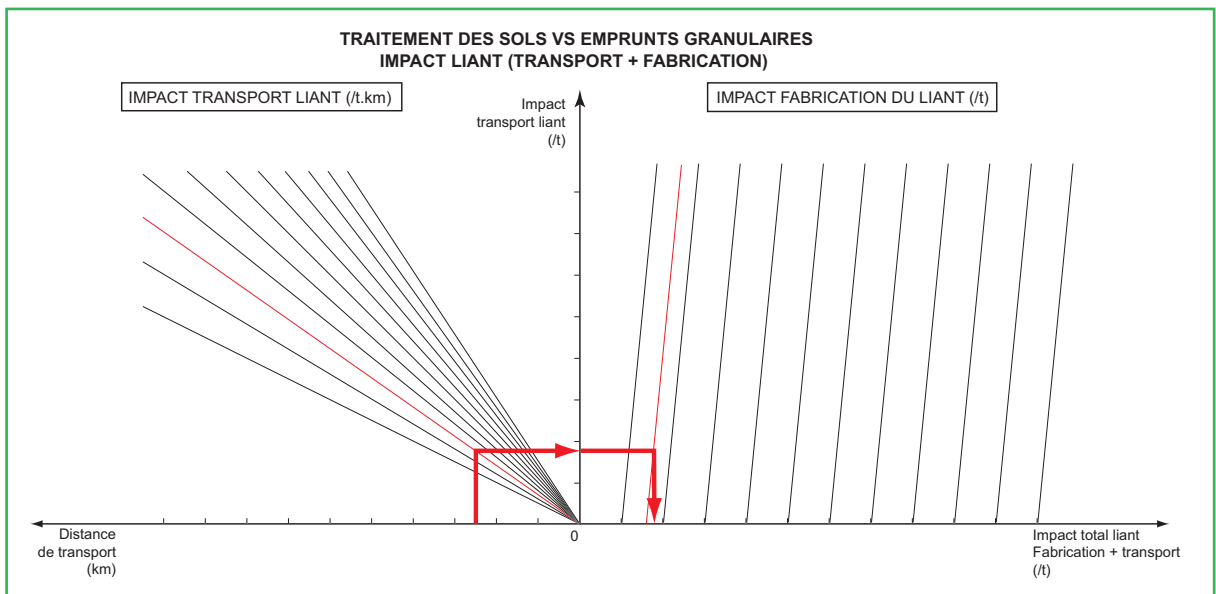


Figure 3 : diagramme d'évaluation de l'impact du liant (fabrication + transport)





### ■ 1.3.3 - Quadrant 3

Il concerne l'impact de la mise en œuvre.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses, relatives aux impacts de l'atelier de mise en œuvre (épandeur, malaxeur, arroseuse, compacteur, niveleuse).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts des Quadrants 2 et 3 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts qu'elles représentent (figure 4).

La valeur de l'impact du liant au m<sup>3</sup> de Sol traité ayant été déterminée par le Quadrant 2, il suffit de prolonger verticalement, vers le haut, la droite obtenue jusqu'à l'intersection avec la droite représentant l'impact de l'atelier de mise en œuvre : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 3, l'impact cumulé total d'un m<sup>3</sup> de Sol traité.

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'impact de la technique de Traitement des sols et celle des Emprunts granulaires, dans le cas de l'utilisation en remblais.

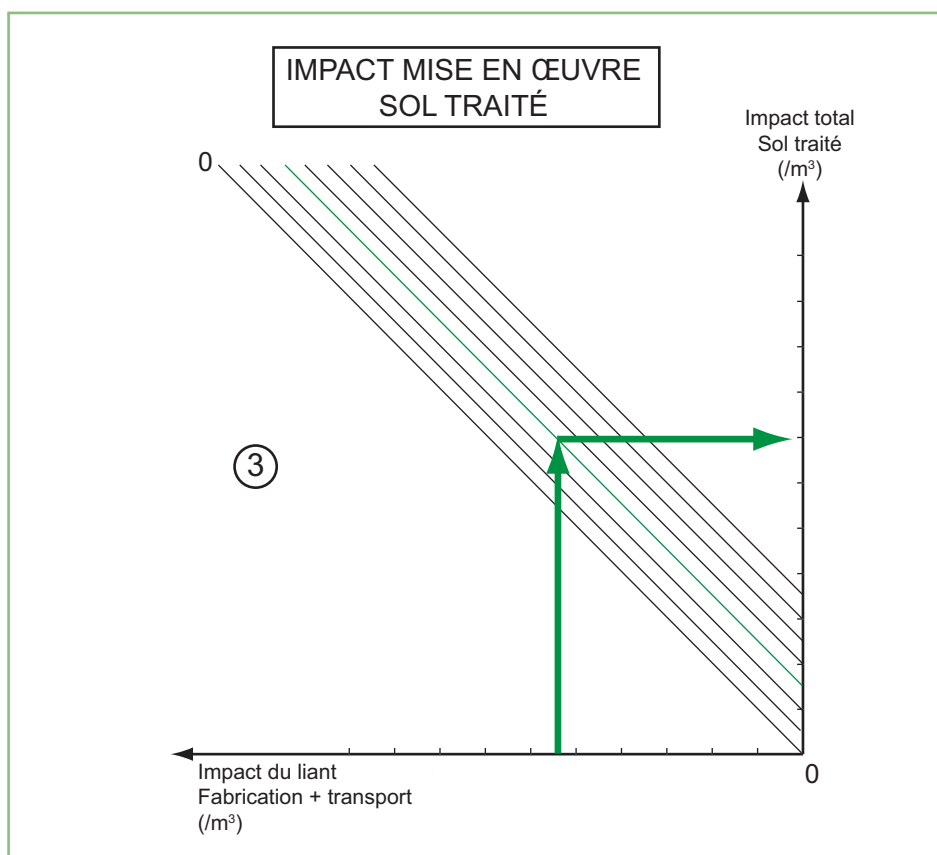


Figure 4 : zone Sol traité - Quadrant impact mise en œuvre

■ 1.3.4 - Quadrant 4

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'impact au  $m^3$  de Sol traité à l'impact au  $m^2$  de Sol traité (figure 5).

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'impact de la technique de Traitement des sols à celui des Emprunts granulaires, dans le cas de l'utilisation en couche de forme.

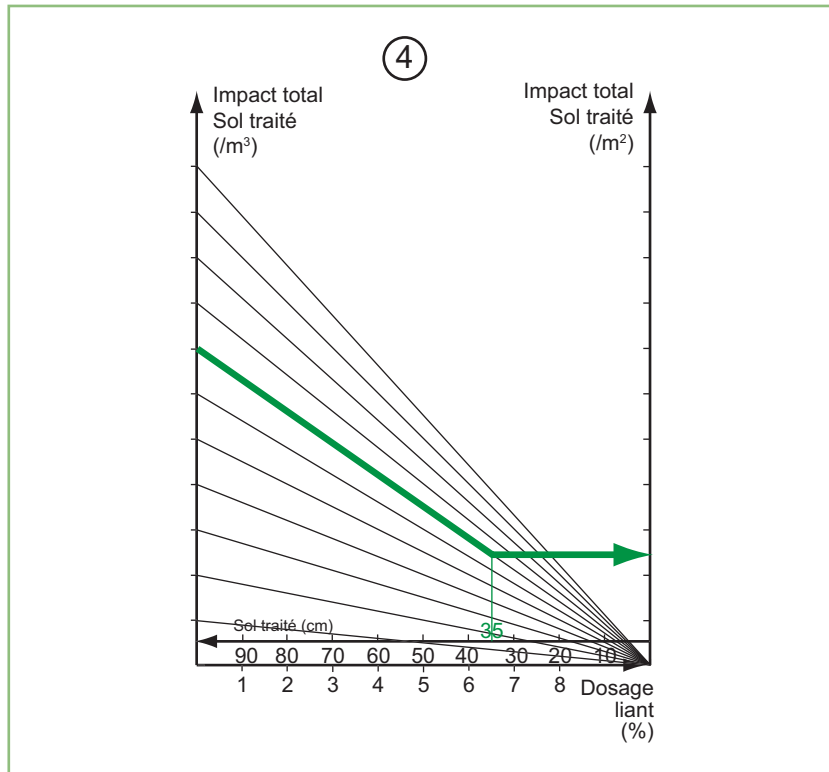


Figure 5 : zone Sol traité - Quadrant impact total (/m³ et /m²)



## 1.4 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires

Cette zone se décompose en 4 quadrants numérotés 5, 6, 7 et 8, dont voici les caractéristiques essentielles de chacun.

### ■ 1.4.1 - Quadrant 5

Il mesure l'impact du transport des matériaux qui sont :

- les Emprunts granulaires, de la carrière au chantier,
- les sols excédentaires (dont le volume est supposé, dans ce document, équivalents à celui des Emprunts granulaires), du chantier à la décharge.

Les droites de ce Quadrant passent par l'origine et représentent les impacts économiques ou environnementaux (Energie ou CO<sub>2</sub>) de différents modes de transports utilisés.

Pour un projet donné, connaissant la distance carrière-chantier ainsi que la distance chantier-décharge, on définit une distance de transport équivalente, somme des distances carrière-chantier et chantier-décharge. Cette distance équivalente déterminée, connaissant l'impact transport au m<sup>3</sup>.km, ce Quadrant permet la lecture de l'impact transport d'un m<sup>3</sup> de matériaux (sols excédentaires + granulats), comme l'indique la figure 6.

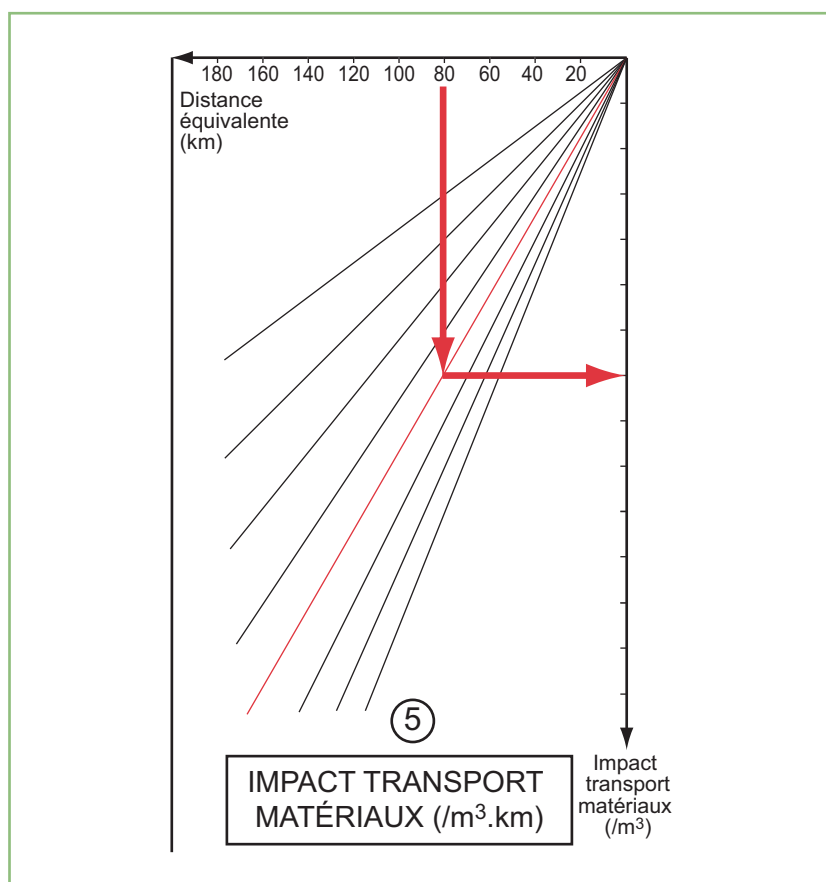


Figure 6 : zone Emprunts granulaires - Quadrant impact transport matériaux

■ **1.4.2 - Quadrant 6**

Il mesure l'impact de l'extraction et de la fabrication d'un m<sup>3</sup> de granulats.

Dans ce Quadrant figurent plusieurs droites parallèles, correspondant aux impacts de différentes natures d'Emprunts granulaires (granulats roulés, granulats concassés, roches dures, roches tendres...).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts des Quadrants 5 et 6 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts qu'elles représentent (figure 7).

L'impact transport ayant été déterminé au Quadrant 5 et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, les impacts d'extraction et de fabrication, le Quadrant 6 permet d'évaluer, de façon cumulée :

- l'impact de mise en décharge d'un m<sup>3</sup> de sols excédentaires,
- l'impact d'extraction, de fabrication et de transport d'un m<sup>3</sup> de granulats.

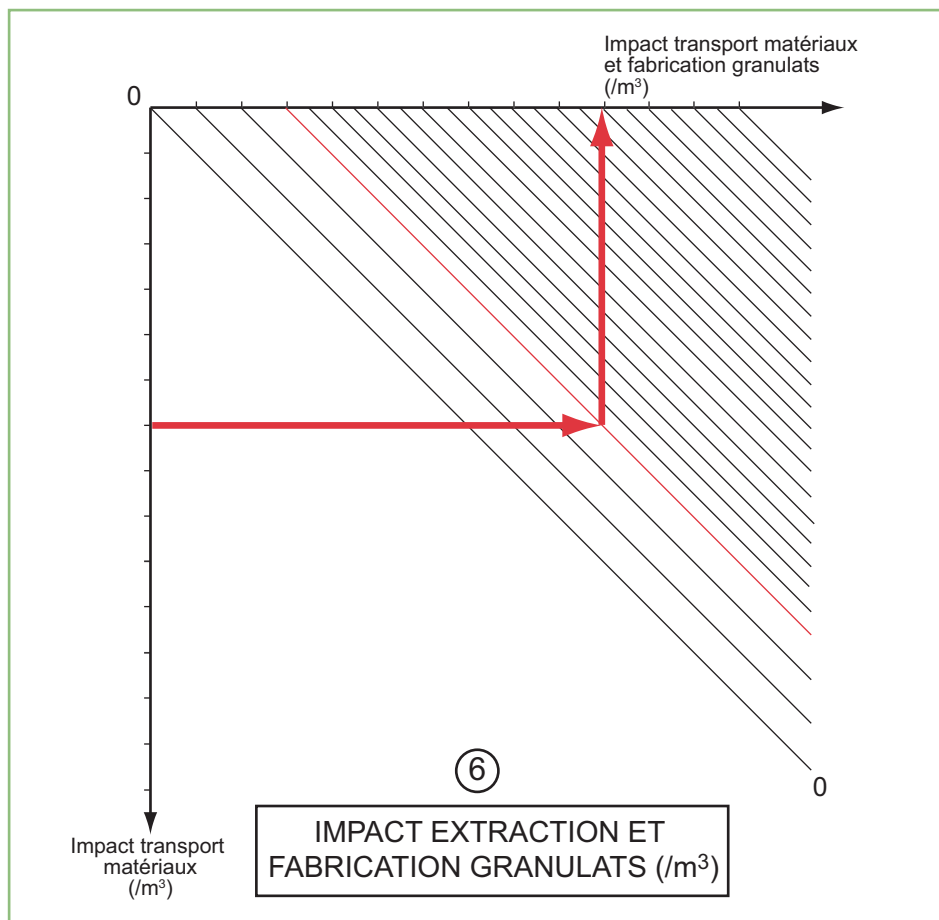


Figure 7 : zone Emprunts granulaires - Quadrant impact extraction et fabrication granulats

### ■ 1.4.3 - Quadrant 7

Il mesure l'impact de la mise en œuvre des Emprunts granulaires.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses, relatives aux impacts de l'atelier de mise en œuvre (niveleuse, arroseuse, compacteur).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts des Quadrants 5, 6 et 7 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts qu'elles représentent (figure 8).

L'impact extraction, fabrication et transport ayant été déterminé au Quadrant 6, et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, l'impact de la mise en œuvre, le Quadrant 7 permet d'évaluer, de façon cumulée, l'impact total de mise en décharge d'un m<sup>3</sup> de sols excédentaires et d'extraction, fabrication, transport et mise en œuvre d'un m<sup>3</sup> de granulats.

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'impact de la technique d'Emprunts granulaires à celui du Traitement des sols, dans le cas de l'utilisation en remblais.

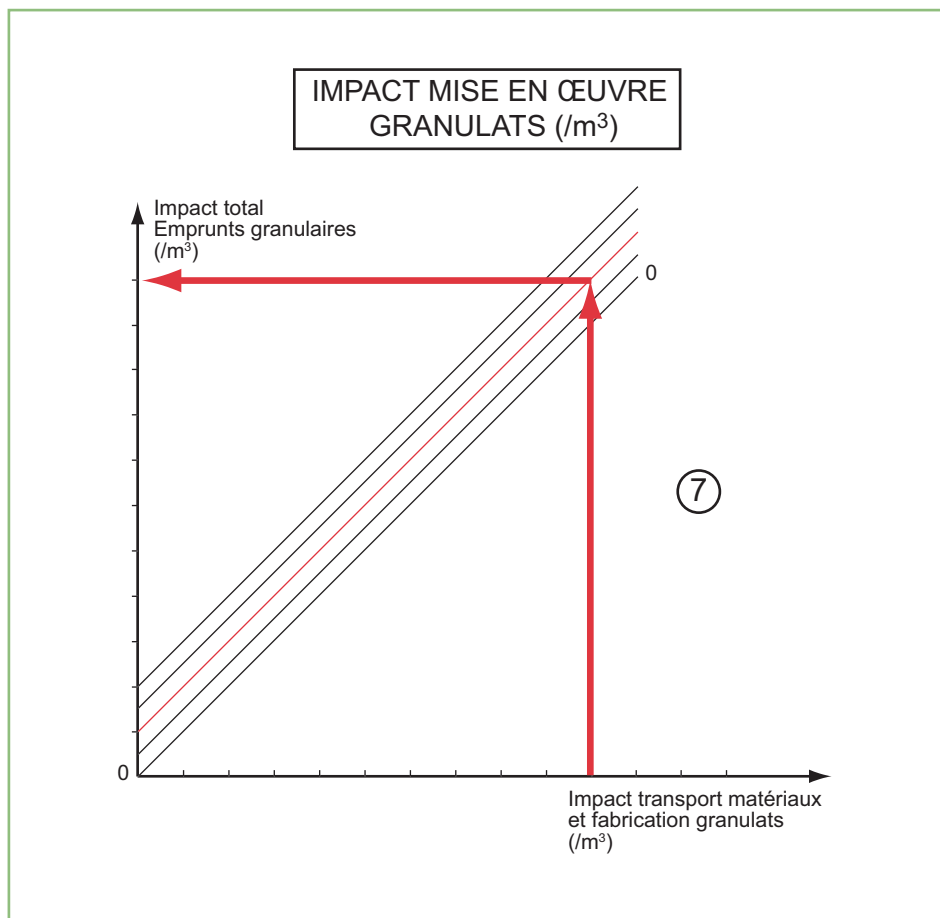


Figure 8 : zone Emprunts granulaires - Quadrant impact mise en œuvre granulats

■ 1.4.4 - Quadrant 8

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'impact au  $m^3$  de couche granulaire à l'impact au  $m^2$  de couche granulaire (figure 9).

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'impact de la technique d'Emprunts granulaires à celui du Traitement des sols, dans le cas de l'utilisation en couche de forme.

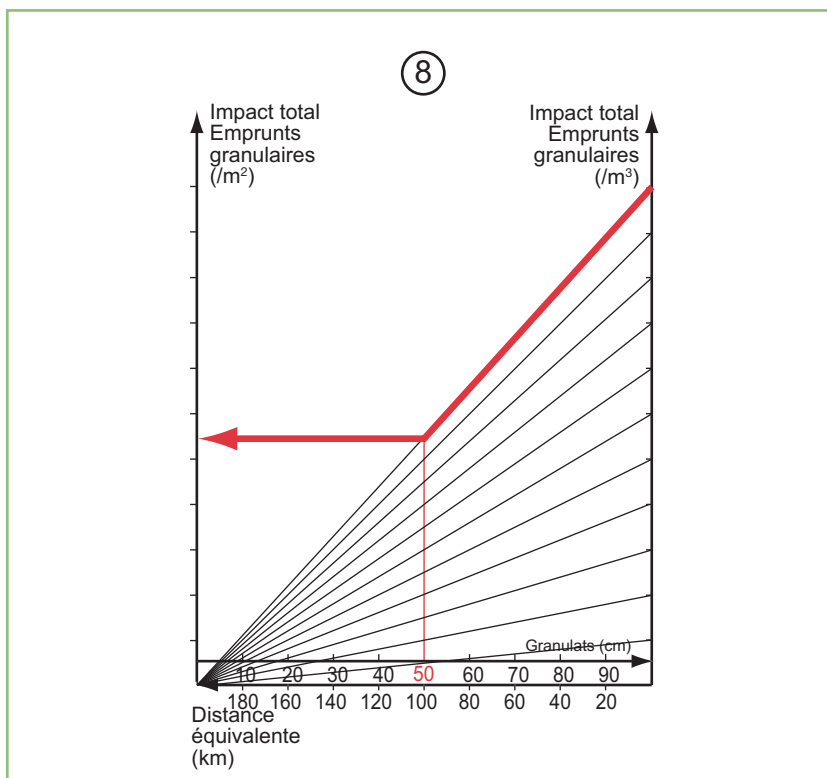


Figure 9 : zone Emprunts granulaires - Quadrant impact total ( $m^3$  et  $m^2$ )



## 1.5 - Conclusion

L'application de la méthode sur les 4 Quadrants de la Zone 1 et sur ceux de la Zone 2 permet d'effectuer une comparaison entre les impacts de la technique de Traitement des sols et ceux de la technique des Emprunts granulaires.

Pour le cas de l'utilisation en **remblais**, la comparaison s'effectue au **m<sup>3</sup>** de matériau (figure 10).

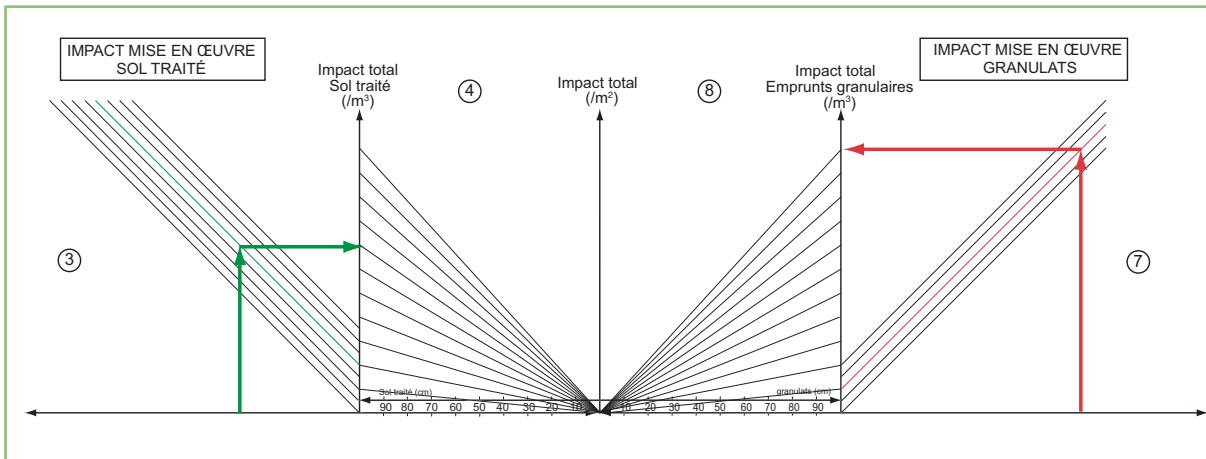


Figure 10 : diagramme de comparaison des impacts - Cas des remblais

Pour le cas de l'utilisation en **couche de forme**, la comparaison s'effectue au **m<sup>2</sup>** de matériau (figure 11).

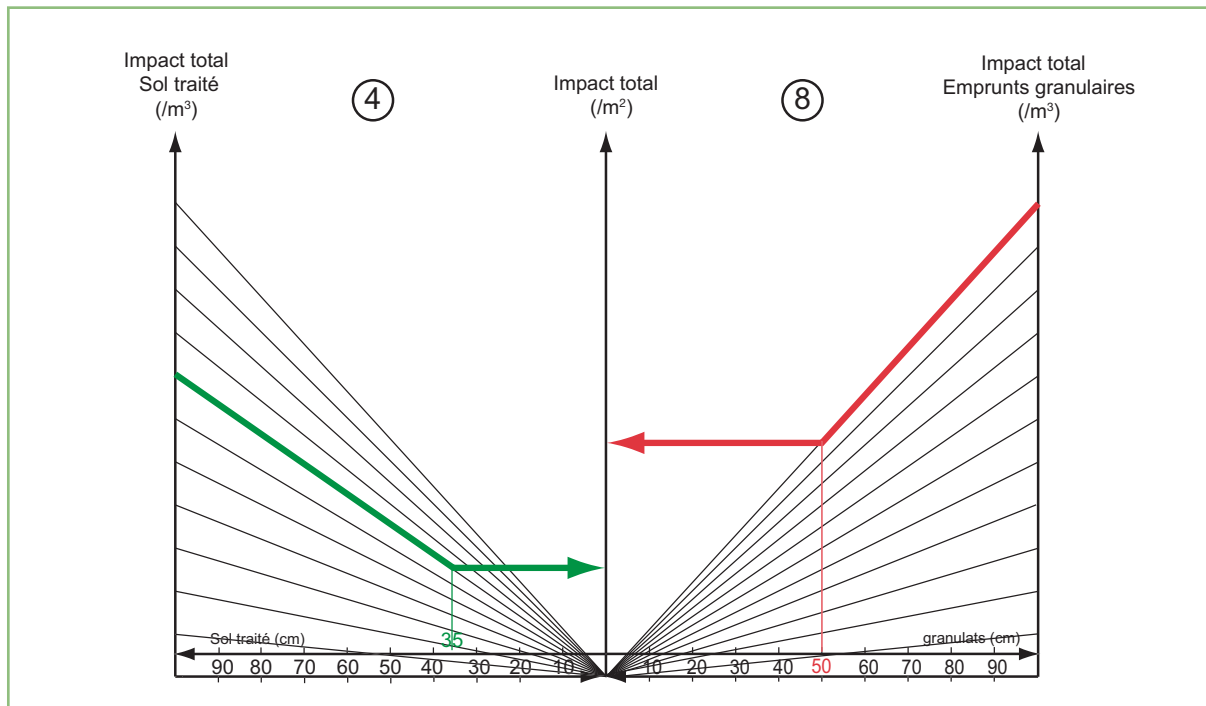


Figure 11 : diagramme de comparaison des impacts - Cas des couches de forme





# Comparaison économique

## **2.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols**

- 2.1.1 - Quadrant 1
- 2.1.2 - Quadrant 2
- 2.1.3 - Quadrant 3
- 2.1.4 - Quadrant 4

## **2.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires**

- 2.2.1 - Quadrant 5
- 2.2.2 - Quadrant 6
- 2.2.3 - Quadrant 7
- 2.2.4 - Quadrant 8

## **2.3 - Conclusion**

## 2.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols

Cette zone se décompose en 4 quadrants numérotés 1, 2, 3 et 4, dont voici les caractéristiques essentielles de chacun.

### ■ 2.1.1 - Quadrant 1

Il permet de calculer la quantité de liant nécessaire par  $m^3$  de sol pour obtenir les performances recherchées du matériau traité, dans le cadre du projet étudié.

Dans ce quadrant figurent une famille de droites (passant par l'origine) qui représentent différentes densités sèches, correspondant à une large gamme de matériaux qu'on peut rencontrer dans la nature (figure 12).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît la densité sèche d'un sol et le dosage en liant, il suffit de tracer une verticale descendante à partir du chiffre du dosage liant jusqu'à l'intersection avec la droite de densité sèche choisie : on lit alors directement, sur l'axe vertical de ce Quadrant, la quantité de liant au  $m^3$  de sol qu'il faut prévoir afin de traiter ce sol.

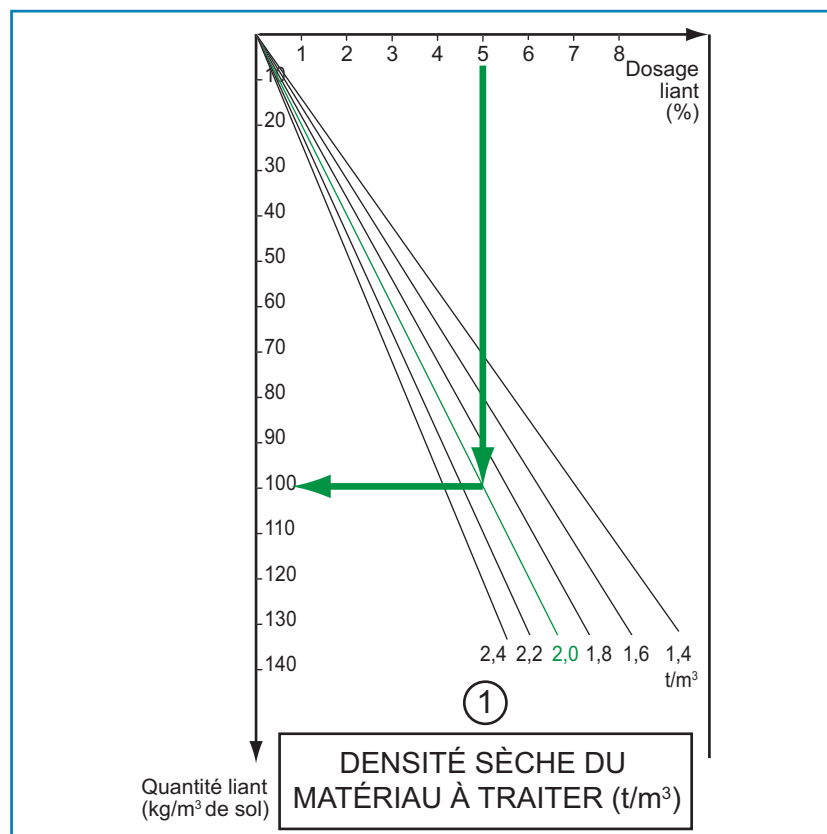


Figure 12 : zone Sol traité - Quadrant densité sèche matériau

Si, pour un projet donné, on connaît la nature du matériau à traiter mais pas sa densité sèche, on peut se référer aux valeurs indicatives du tableau 2.

Matériaux	Densité sèche
<b>Limon</b>	<b>1,6 - 1,8</b>
<b>Argile</b>	<b>1,7 - 1,8</b>
<b>Sable</b>	<b>1,4 - 1,9</b>
sable homéométrique	1,4 - 1,6
sable gradué	1,6 - 1,9
<b>Sol graveleux</b>	<b>1,8 - 2,2</b>

Tableau 2 : densité sèche de différents types de matériaux

### ■ 2.1.2 - Quadrant 2

La quantité de liant pour un m<sup>3</sup> de sol ayant été déterminée par le Quadrant 1, le Quadrant 2 permet alors de calculer son impact sur le plan économique.

Dans ce Quadrant figurent des droites (passant par l'origine) qui représentent le coût total (fabrication et transport) d'une tonne de liant (figure 13).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît le coût total (fabrication + transport) d'une tonne de liant, il suffit de prolonger horizontalement la droite du Quadrant 1 jusqu'à l'intersection avec la droite du coût choisi : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 2, le coût du liant par m<sup>3</sup> de Sol traité.

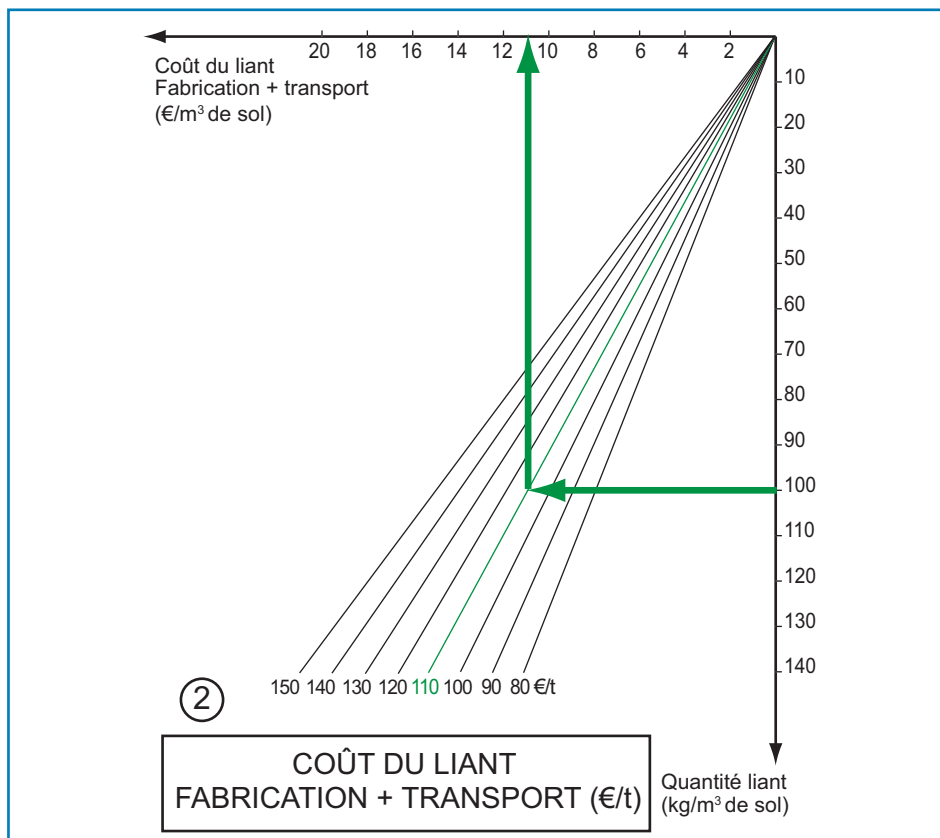


Figure 13 : zone Sol traité - Quadrant coût liant

### ■ 2.1.3 - Quadrant 3

Il concerne l'impact de la mise en œuvre.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses relatives aux coûts de l'atelier de mise en œuvre (épandeur, malaxeur, arroseuse, compacteur, niveleuse).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des coûts des Quadrants 2 et 3 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux coûts qu'elles représentent (figure 14).

Le coût du liant au m<sup>3</sup> de Sol traité ayant été déterminé par le Quadrant 2, il suffit de prolonger verticalement, vers le haut, la droite obtenue jusqu'à l'intersection avec la droite représentant le coût de l'atelier de mise en œuvre : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 3, le coût cumulé total par m<sup>3</sup> de Sol traité.

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer le coût de la technique de Traitement des sols à celui des Emprunts granulaires, dans le cas de l'utilisation en remblais.

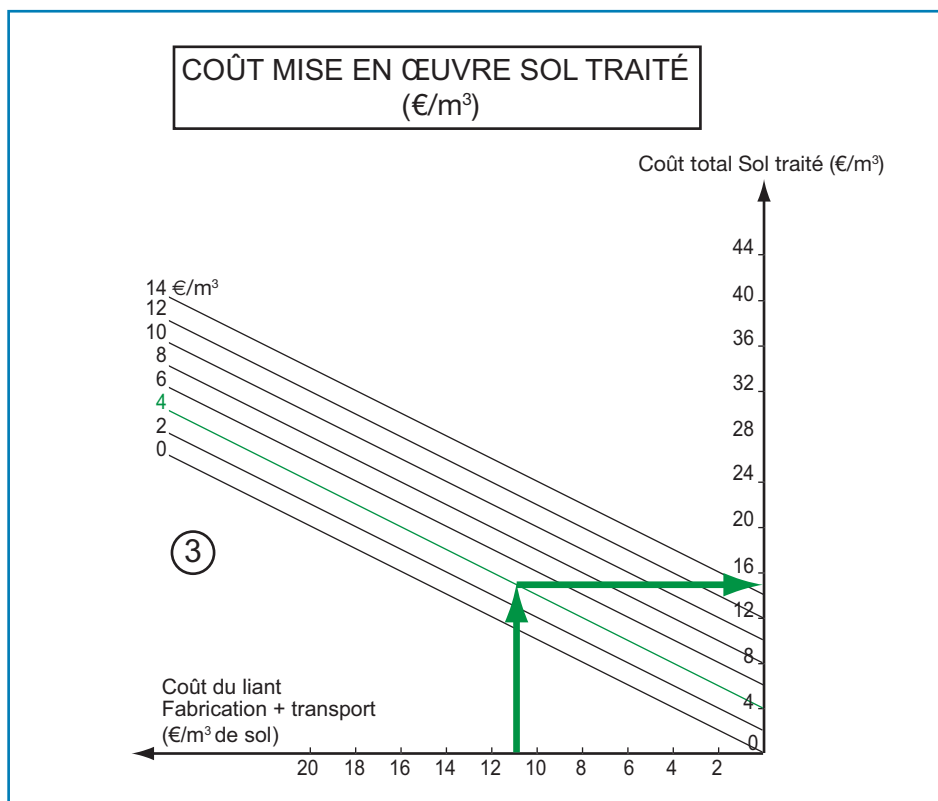


Figure 14 : zone Sol traité - Quadrant coût mise en œuvre

### ■ 2.1.4 - Quadrant 4

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), du coût au  $m^3$  de Sol traité au coût au  $m^2$  de Sol traité (figure 15).

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer le coût de la technique de Traitement des sols à celui des Emprunts granulaires, dans le cas de l'utilisation en couche de forme.

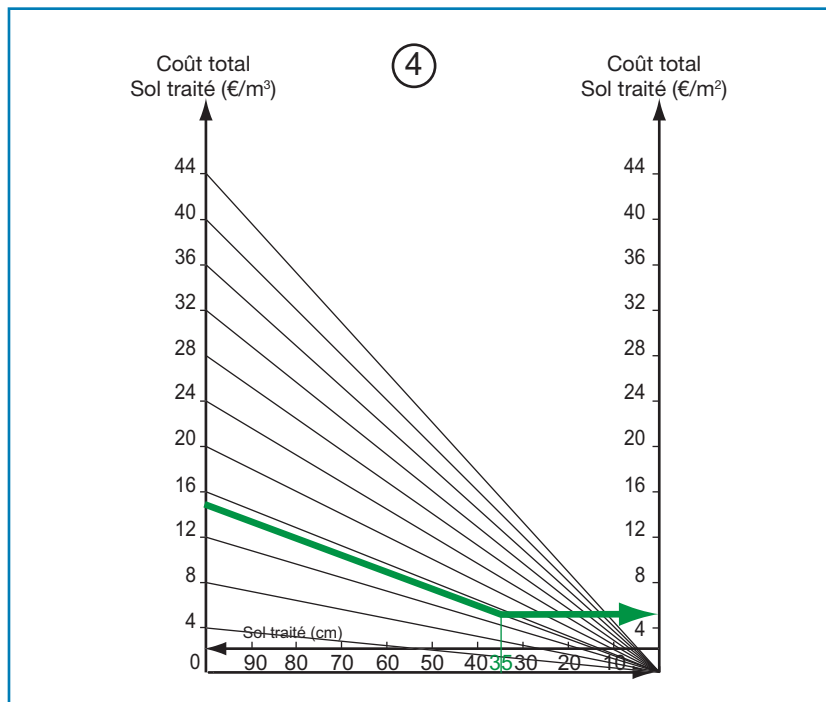


Figure 15 : zone Sol traité - Quadrant coût total ( $m^3$  et  $m^2$ )



## 2.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires

Cette zone se décompose en 4 quadrants numérotés 5, 6, 7 et 8, dont voici les caractéristiques essentielles de chacun.

### ■ 2.2.1 - Quadrant 5

Il mesure le coût du transport des matériaux qui sont :

- les Emprunts granulaires, de la carrière au chantier,
- les sols excédentaires (dont le volume est supposé, dans ce document, équivalents à celui des Emprunts granulaires), du chantier à la décharge.

Les droites de ce Quadrant passent par l'origine et représentent les coûts (exprimés en €/m<sup>3</sup>.km) des différents modes de transports utilisés.

Pour un projet donné, connaissant la distance carrière-chantier ainsi que la distance chantier-décharge, on définit une distance de transport équivalente, somme des distances carrière-chantier et chantier-décharge. Cette distance équivalente déterminée, connaissant le coût transport au m<sup>3</sup>.km, ce Quadrant permet la lecture du coût transport d'un m<sup>3</sup> de matériaux, comme l'indique la figure 16.

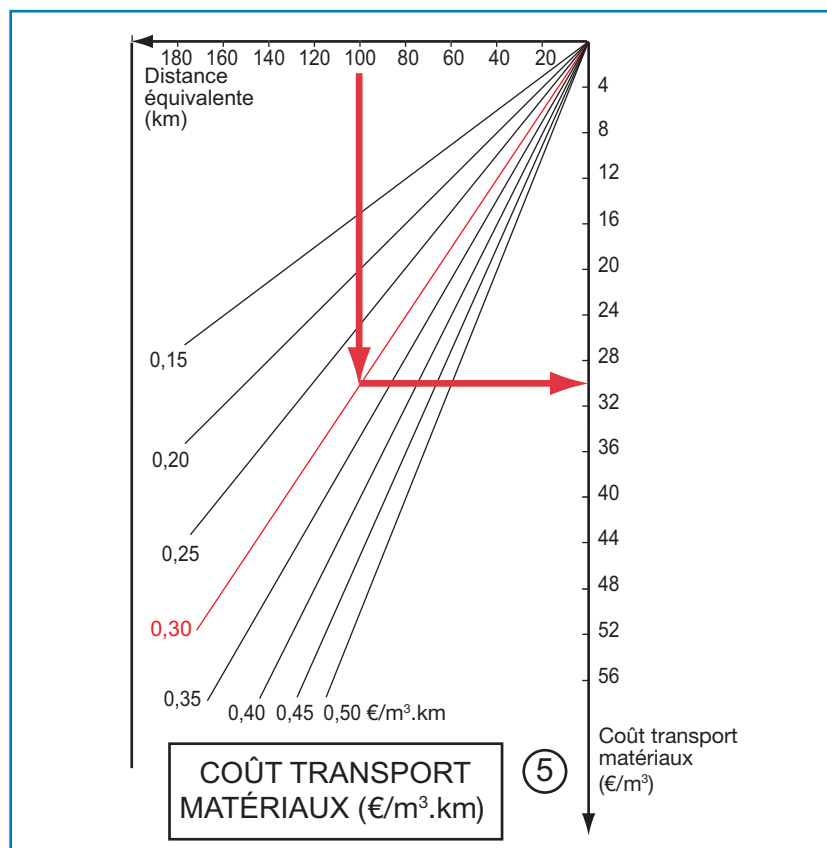


Figure 16 : zone Emprunts granulaires - Quadrant coût transport matériaux

### ■ 2.2.2 - Quadrant 6

Il mesure le coût de l'extraction et de la fabrication d'un m<sup>3</sup> de granulats.

Dans ce Quadrant figurent plusieurs droites parallèles, correspondant aux coûts générés par l'extraction et la fabrication d'un m<sup>3</sup> de différentes natures d'Emprunts granulaires (granulats roulés, granulats concassés, roches dures, roches tendres...) exprimés en €/m<sup>3</sup> (figure 17).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des coûts des Quadrants 5 et 6 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux coûts qu'elles représentent.

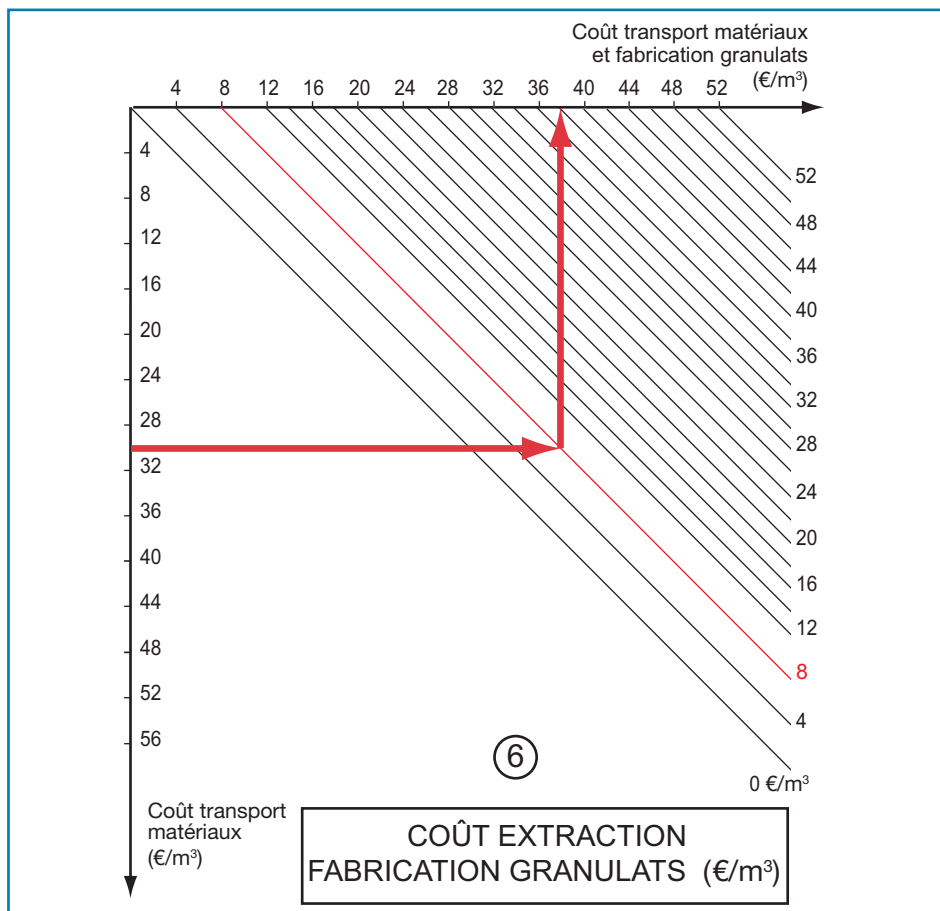


Figure 17 : zone Emprunts granulaires - Quadrant coût extraction et fabrication granulats

Le coût transport ayant été déterminé au Quadrant 5 et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, les coûts d'extraction et de fabrication, le Quadrant 6 permet d'évaluer, de façon cumulée, le coût total de mise en décharge d'un m<sup>3</sup> de sols excédentaires et d'extraction, fabrication et transport d'un m<sup>3</sup> de granulats.

■ 2.2.3 - Quadrant 7

Il mesure le coût de la mise en œuvre des Emprunts granulaires.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses, relatives aux coûts de l'atelier de mise en œuvre (niveleuse, arroseuse, compacteur).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des coûts des Quadrants 5, 6 et 7 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux coûts qu'elles représentent (figure 18).

Le coût extraction, fabrication et transport ayant été déterminé au Quadrant 6, et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, le coût de la mise en œuvre, le Quadrant 7 permet d'évaluer, de façon cumulée, le coût total de mise en décharge d'un m<sup>3</sup> de sols excédentaires et d'extraction, fabrication, transport et mise en oeuvre d'un m<sup>3</sup> de granulats.

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer le coût de la technique des Emprunts granulaires à celui du Traitement des sols, dans le cas de l'utilisation en remblais.

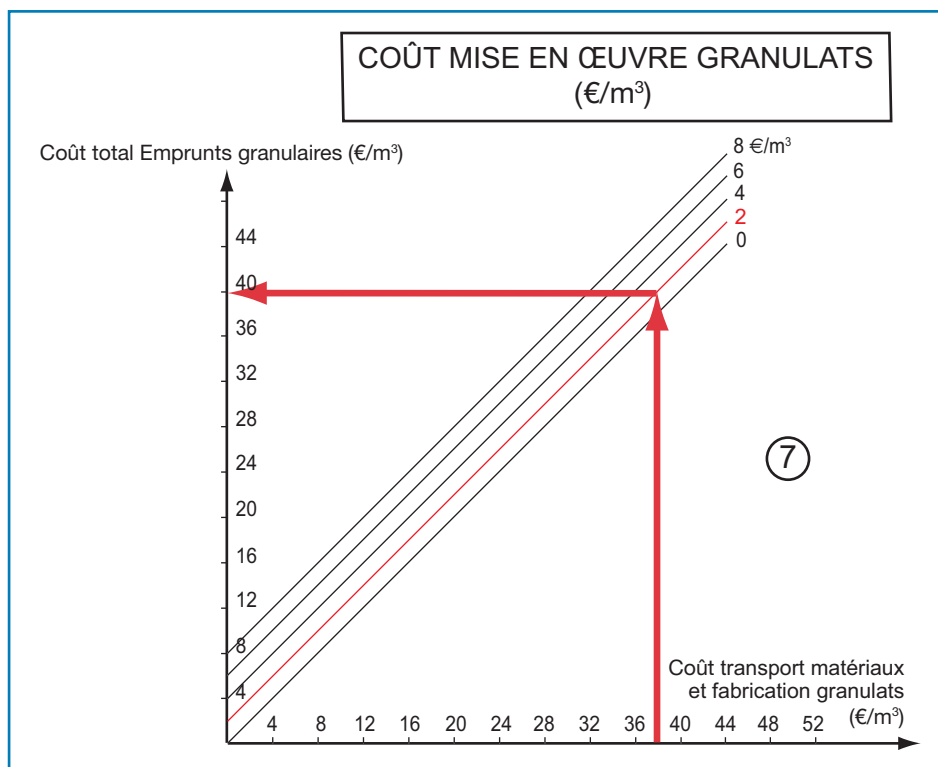


Figure 18 : zone Emprunts granulaires - Quadrant coût mise en œuvre granulats



### ■ 2.2.4 - Quadrant 8

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), du coût au  $m^3$  de couche granulaire au coût au  $m^2$  de couche granulaire (figure 19).

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer le coût de la technique des Emprunts granulaires à celui du Traitement des sols, dans le cas de l'utilisation en couche de forme.

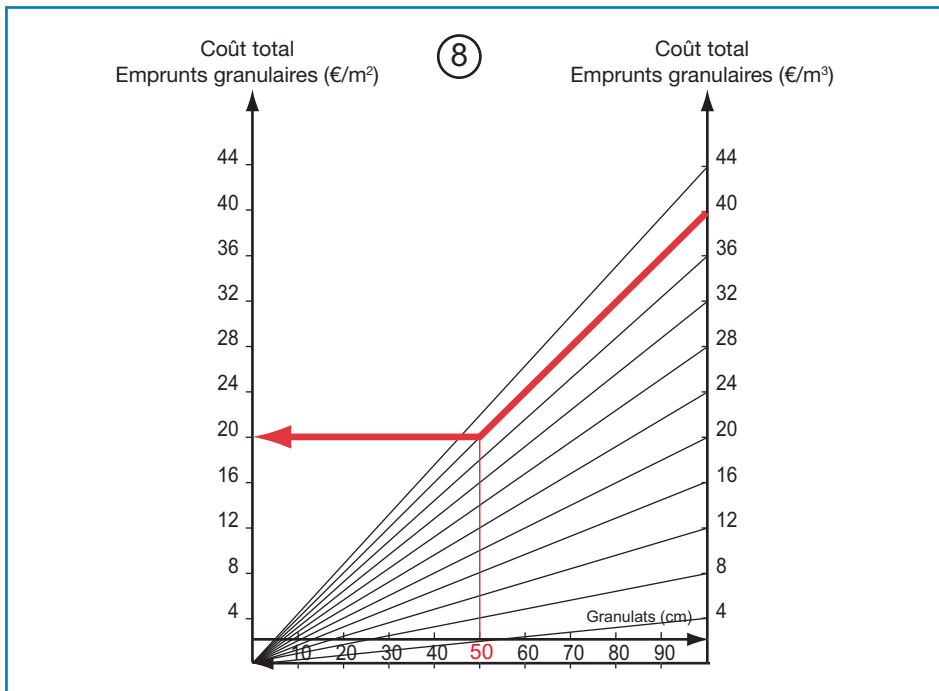


Figure 19 : zone Emprunts granulaires - Quadrant coût total ( $m^3$  et  $m^2$ )



### 2.3 - Conclusion

L'application de la méthode sur les 4 Quadrants de la Zone 1 et sur ceux de la Zone 2 permet d'effectuer une comparaison entre les coûts de la technique de Traitement des sols et ceux de la technique des Emprunts granulaires telle qu'illustrée sur le diagramme de la page 33.

Pour le cas de l'utilisation en **remblais**, la comparaison s'effectue au **m<sup>3</sup>** de matériau (figure 20).

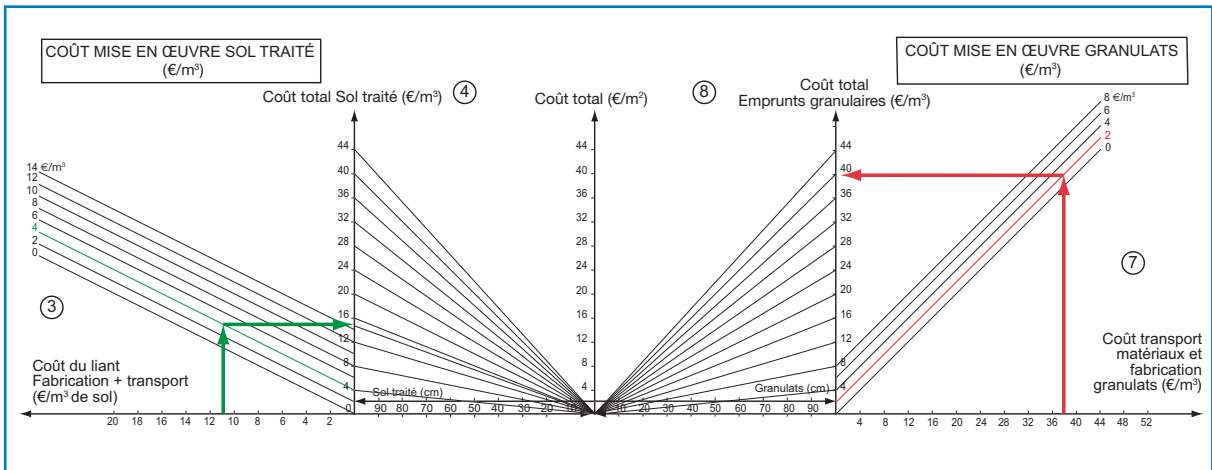


Figure 20 : diagramme de comparaison des coûts - Cas des remblais

Pour le cas de l'utilisation en **couche de forme**, la comparaison s'effectue au **m<sup>2</sup>** de matériau (figure 21).

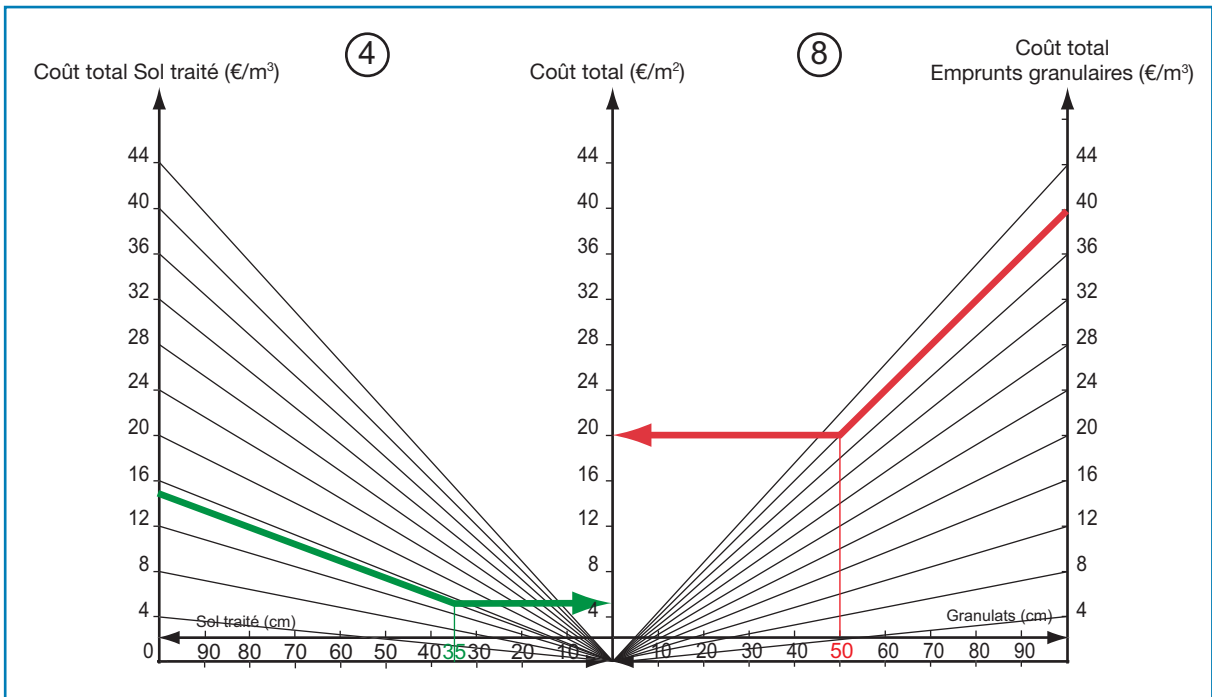


Figure 21 : diagramme de comparaison des coûts - Cas des couches de forme

# TRAITEMENT DES SOLS VS EMPRUNTS GRANULAIRES COMPARAISON ECONOMIQUE

COÛT MISE EN ŒUVRE SOL TRAITÉ  
(€/m<sup>3</sup>)

COÛT MISE EN ŒUVRE GRANULATS  
(€/m<sup>3</sup>)

Coût total Sol traité (€/m<sup>3</sup>)

Coût total (€/m<sup>3</sup>)

Coût total Emprunts granulaires (€/m<sup>3</sup>)

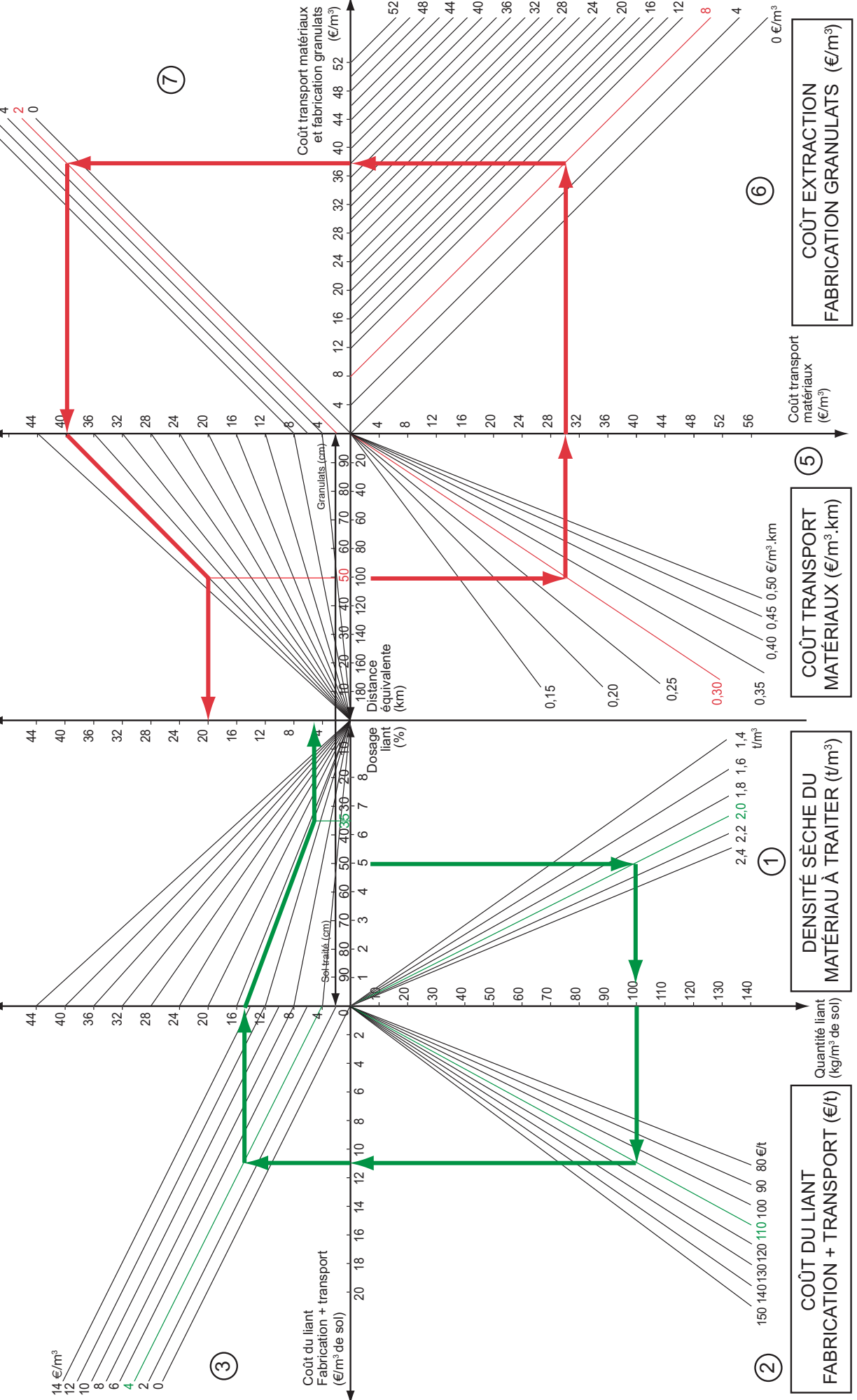
Coût transport matériaux et fabrication granulats (€/m<sup>3</sup>)

Coût transport matériaux (€/m<sup>3</sup>)

Coût transport matériaux (€/m<sup>3</sup>)

Coût transport matériaux (€/m<sup>3</sup>)

Coût transport matériaux (€/m<sup>3</sup>)



③

④

⑤

⑥

⑦

②

①

⑧

⑨

⑩

**Pour réaliser vos propres études de comparaison économique entre la technique de Traitement des sols et celle des Emprunts granulaires, c'est très simple : il vous suffit de faire une photocopie du graphique vierge de la page 35, d'y intégrer les informations spécifiques à votre étude, puis de lire directement le résultat recherché sur le graphique.**

# TRAITEMENT DES SOLS VS EMPRUNTS GRANULAIRES COMPARAISON ECONOMIQUE

**COÛT MISE EN ŒUVRE SOL TRAITÉ  
(€/m<sup>3</sup>)**

**COÛT MISE EN ŒUVRE GRANULATS  
(€/m<sup>3</sup>)**

Coût total Sol traité (€/m<sup>3</sup>)

Coût total Emprunts granulaires (€/m<sup>3</sup>)

④

Coût total (€/m<sup>2</sup>)

8 €/m<sup>3</sup>

6

4

2

0

44

40

36

32

28

24

20

16

12

8

4

0

4

8

12

14 €/m<sup>3</sup>

12

10

8

6

4

2

0

4

8

12

16

20

24

28

32

36

40

44

48

52

56

60

64

68

72

76

80

84

88

92

96

100

104

108

112

116

120

124

128

132

136

140

144

148

152

156

160

164

168

172

176

180

184

188

192

196

200

204

208

212

216

220

224

228

232

236

240

244

248

252

256

260

264

268

272

276

280

284

288

292

296

300

304

308

312

316

320

324

328

332

336

340

344

348

352

356

360

364

368

372

376

380

384

388

392

396

400

404

408

412

416

420

424

428

432

436

440

444

448

452

456

460

464

468

472

476

480

484

488

492

496

500

504

508

512

516

520

524

528

532

536

540

544

548

552

556

560

564

568

572

576

580

584

588

592

596

600

604

608

612

616

620

624

628

632

636

640

644

648

652

656

660

664

668

672

676

680

684

688

692

696

700

704

708

712

716

720

724

728

732

736

740

744

748

752

756

760

764

768

772

776

780

784

788

792

796

800

804

808

812

816

820

824

828

832

836

840

844

848

852

856

860

864

868

872

876

880

884

888

892

896

900

904

908

912

916

920

924

928

932

936

940

944

948

952

956

960

964

968

972

976

980

984

988

992

996

1000

1004

1008

1012

1016

1020

1024

1028

1032

1036

1040

1044

1048

1052

1056

1060

1064

1068

1072

1076

1080

1084

1088



# Comparaison environnementale Indicateur Energie

## **3.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols**

3.1.1 - Quadrant 1

3.1.2 - Quadrant 2

*3.1.2.1 - L'Energie transport*

*3.1.2.2 - L'Energie totale (fabrication + transport)*

3.1.3 - Quadrant 3

3.1.4 - Quadrant 4

## **3.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires**

3.2.1 - Quadrant 5

3.2.2 - Quadrant 6

3.2.3 - Quadrant 7

3.2.4 - Quadrant 8

## **3.3 - Conclusion**

### 3.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols

Cette zone se décompose en 4 quadrants numérotés 1, 2, 3 et 4, dont voici les caractéristiques essentielles de chacun.

#### ■ 3.1.1 - Quadrant 1

Il permet de calculer la quantité de liant nécessaire par  $m^3$  de sol pour obtenir les performances recherchées du matériau traité, dans le cadre du projet étudié.

Dans ce quadrant figurent une famille de droites (passant par l'origine) qui représentent différentes densités sèches, correspondant à une large gamme de matériaux qu'on peut rencontrer dans la nature (figure 22).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît la densité sèche du sol et le dosage en liant, il suffit de tracer une verticale descendante à partir du chiffre du dosage liant jusqu'à l'intersection avec la droite de densité sèche choisie : on lit alors directement, sur l'axe vertical de ce Quadrant, la quantité de liant au  $m^3$  de sol qu'il faut prévoir afin de traiter ce sol.

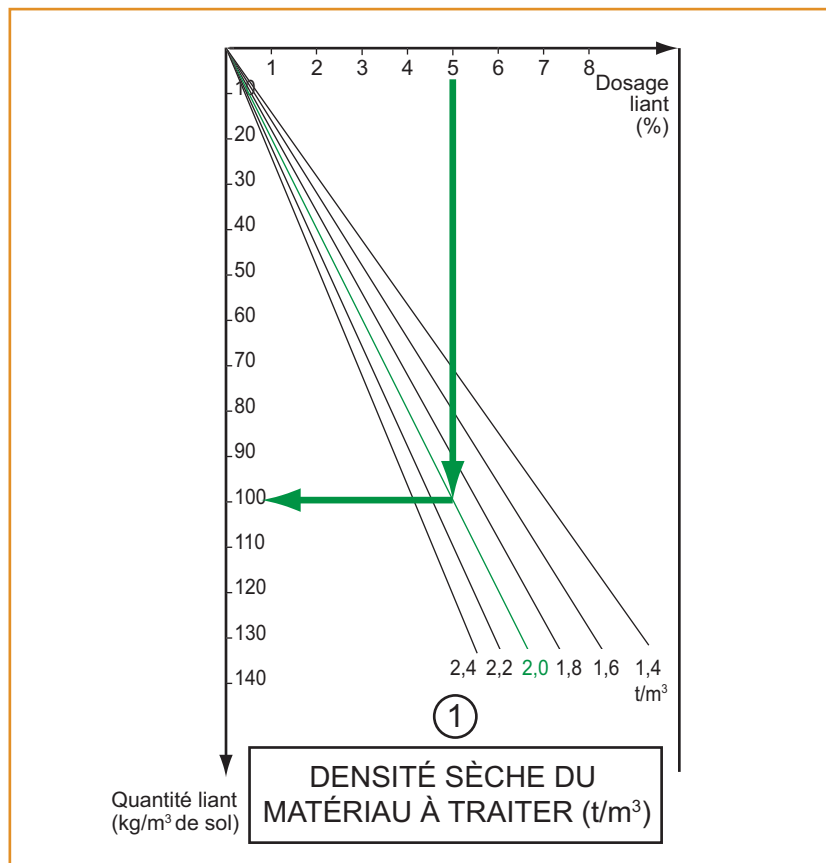


Figure 22 : zone Sol traité - Quadrant densité sèche matériau



Si, pour un projet donné, on connaît la nature du matériau à traiter mais pas sa densité sèche, on peut se référer aux valeurs indicatives du tableau 3.

Matériaux	Densité sèche
<b>Limon</b>	<b>1,6 - 1,8</b>
<b>Argile</b>	<b>1,7 - 1,8</b>
<b>Sable</b>	<b>1,4 - 1,9</b>
sable homéométrique	1,4 - 1,6
sable gradué	1,6 - 1,9
<b>Sol graveleux</b>	<b>1,8 - 2,2</b>

Tableau 3 : densité sèche de différents types de matériaux

### ■ 3.1.2 - Quadrant 2

La quantité de liant pour un m<sup>3</sup> de sol ayant été déterminée par le Quadrant 1, le Quadrant 2 permet alors de calculer son impact Energie.

Dans ce Quadrant figurent des droites (passant par l'origine) qui représentent l'impact Energie (fabrication + transport) par tonne de liant (figure 23).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît l'Energie totale (fabrication + transport) d'une tonne de liant, il suffit de prolonger horizontalement la droite du Quadrant 1 jusqu'à l'intersection avec la droite correspondant à l'Energie choisie : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 2, l'Energie du liant par m<sup>3</sup> de Sol traité.

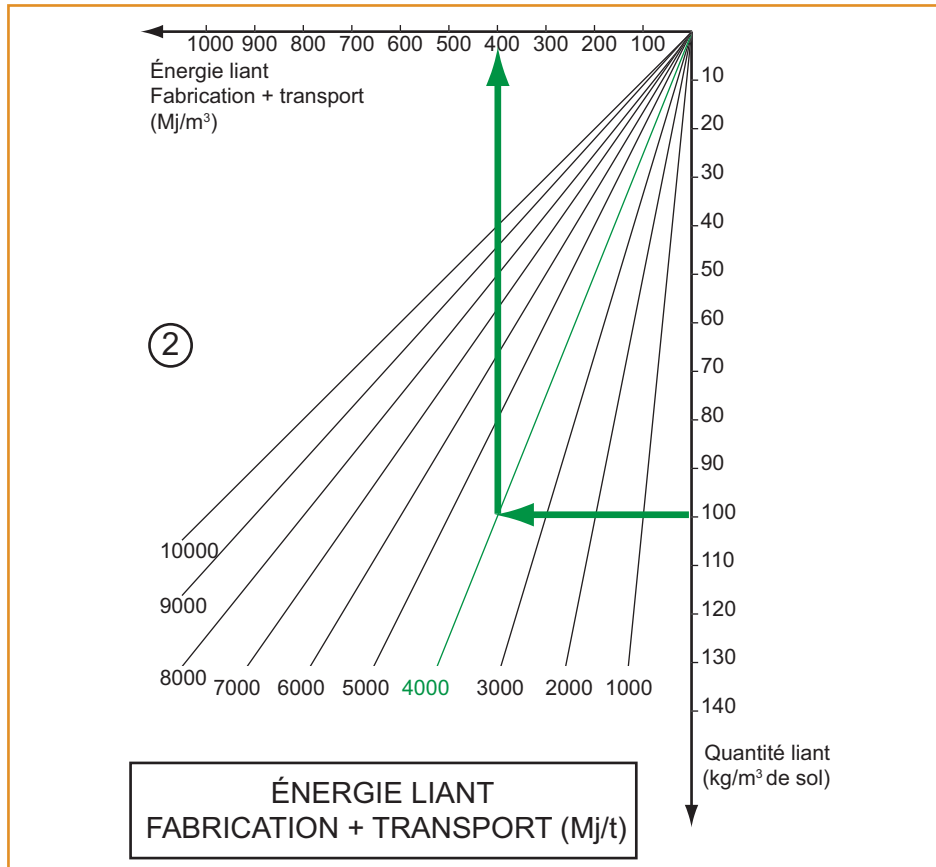


Figure 23 : zone Sol traité - Quadrant Energie liant

Si l'on ne connaît pas l'énergie totale à la tonne de liant ou si l'utilisateur souhaite la déterminer de façon précise, compte tenu des données locales en sa possession, on peut se référer au diagramme de la figure 24.

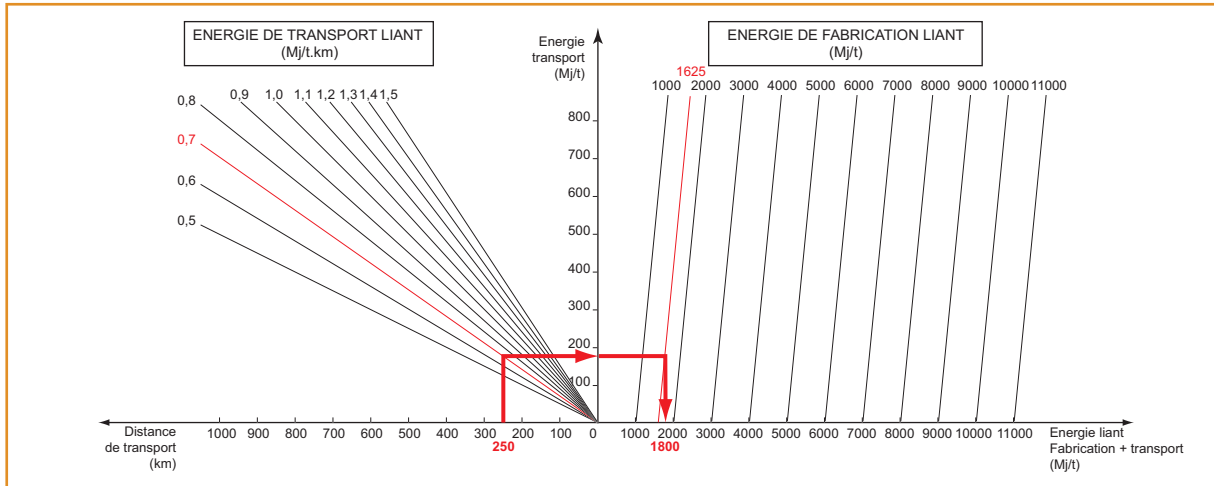


Figure 24 : diagramme d'évaluation de l'Energie du liant (fabrication + transport)

Ce diagramme permet, connaissant la distance de transport entre l'usine de liant et le chantier, l'énergie transport liant en  $Mj/t.km$ , ainsi que l'énergie de fabrication du liant, de déterminer successivement l'énergie transport et l'énergie totale d'une tonne de liant. L'énergie totale sera alors reportée sur le Quadrant 2, ce qui permettra de déduire l'énergie du liant par  $m^3$  de Sol traité.

### 3.1.2.1 - L'Energie transport

Si on ne connaît pas l'énergie transport liant en  $Mj/t.km$ , l'utilisateur pourra la déterminer au moyen de la formule suivante :

$$F (\text{Énergie, D}) = \frac{\text{Consommation aux 100 km} \times 35}{\text{Charge utile camion} \times 100}$$

Avec :

#### Consommation aux 100 km

Camion 16 tonnes : 29 litres de fuel

Camion 29 tonnes : 36 litres de fuel

Camion 40 tonnes : 40 litres de fuel

#### Charge utile camion

Camion 16 tonnes : charge utile 8 tonnes

Camion 29 tonnes : charge utile 16 tonnes

Camion 40 tonnes : charge utile 20 tonnes

**Coefficient 35** : c'est la quantité d'énergie (en  $Mj$ ) libérée par la combustion d'un litre de fuel

**Coefficient 100** : aux 100 km

### 3.1.2.2 - L'Energie de fabrication du liant

Si l'on ne connaît pas l'énergie de fabrication d'une tonne de liant, on pourra utiliser les valeurs données à titre indicatif et figurant dans le tableau 4.

Liant	Energie de fabrication (Mj/t liant)
CEM I	5 930*
CEM II	4 395*
Liant hydraulique routier LHR 70% Laitier	2 636*
Liant hydraulique routier LHR 50% Laitier	3 459*
Liant hydraulique routier LHR 30% Laitier	4 282*
Liant hydraulique routier LHR 30% Calcaire	3 856*
Liant hydraulique routier LHR 30% Cendres Volantes	3 887*
Chaux vive	4 301**

\* Source : ATILH

\*\* Source : Union des Producteurs de Chaux

Tableau 4 : Energie de fabrication du liant

Pour obtenir l'énergie réelle de fabrication d'une tonne d'un produit donné, nous vous invitons à contacter directement le producteur du liant.

### ■ 3.1.3 - Quadrant 3

Il concerne l'Energie consommée lors de la mise en œuvre.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses relatives aux énergies consommées par l'atelier de mise en œuvre (épandeur, malaxeur, arroseuse, compacteur, niveleuse).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des énergies des Quadrants 2 et 3 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des Energies qu'elles représentent (figure 25).

La valeur de l'Energie du liant au m<sup>3</sup> de Sol traité ayant été déterminée par le Quadrant 2, il suffit de prolonger verticalement, vers le haut, la droite obtenue jusqu'à l'intersection avec la droite représentant l'Energie de l'atelier de mise en œuvre : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 3, l'Energie cumulée totale par m<sup>3</sup> de Sol traité.

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'Energie totale de la technique de Traitement des sols et celle des Emprunts granulaires, dans le cas de l'utilisation en remblais.

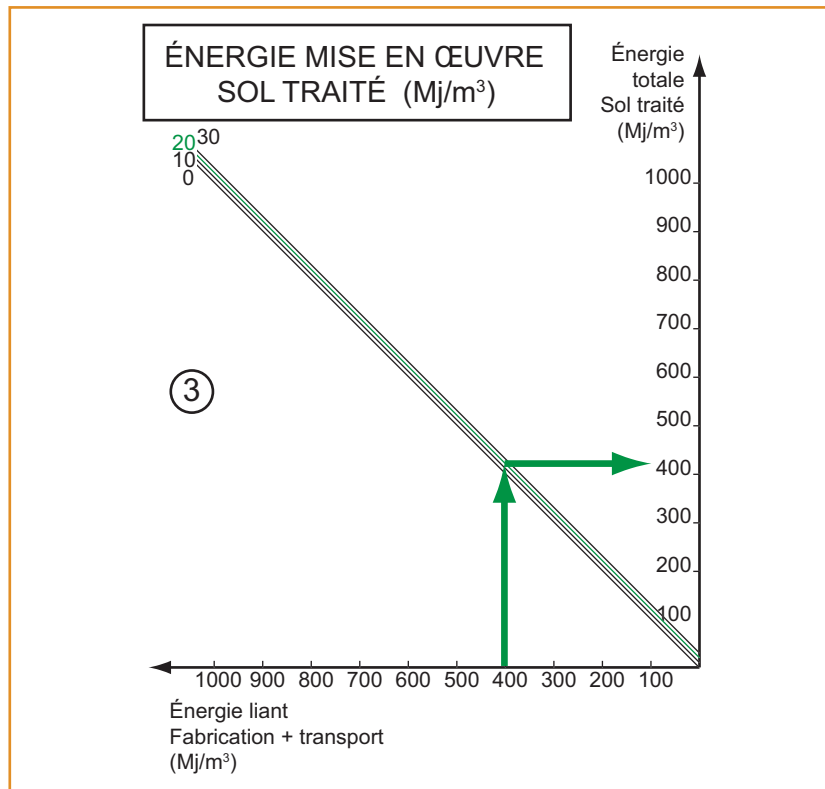


Figure 25 : zone Sol traité - Quadrant Energie mise en œuvre

Si l'on ne connaît pas l'énergie de l'atelier de mise en œuvre, on pourra utiliser la méthode de calcul suivante :

$$E_{Mj} = 35 L \text{ Litre}$$

Avec :

**E** : énergie consommée pour la mise en œuvre d'un m<sup>3</sup> de Sol traité (Mj)

**Coefficient 35** : pouvoir calorifique d'un litre de fuel

**L** : consommation de fuel par l'ensemble des engins intervenant dans la mise en œuvre du Sol traité (pour 1 m<sup>3</sup>). Les valeurs de **L** sont données dans le tableau 5.

L	Sol
0,7	Sol limoneux/sableux
0,8	Sol argileux
0,9	Sol graveleux
1,0	Sol compact et difficile
> 1,0	Sol blocailleux

Tableau 5 : consommation fuel de l'atelier de mise en œuvre Sol traité en fonction de la nature du sol

### ■ 3.1.4 - Quadrant 4

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'Énergie au  $m^3$  de Sol traité à l'Énergie au  $m^2$  de Sol traité (figure 26).

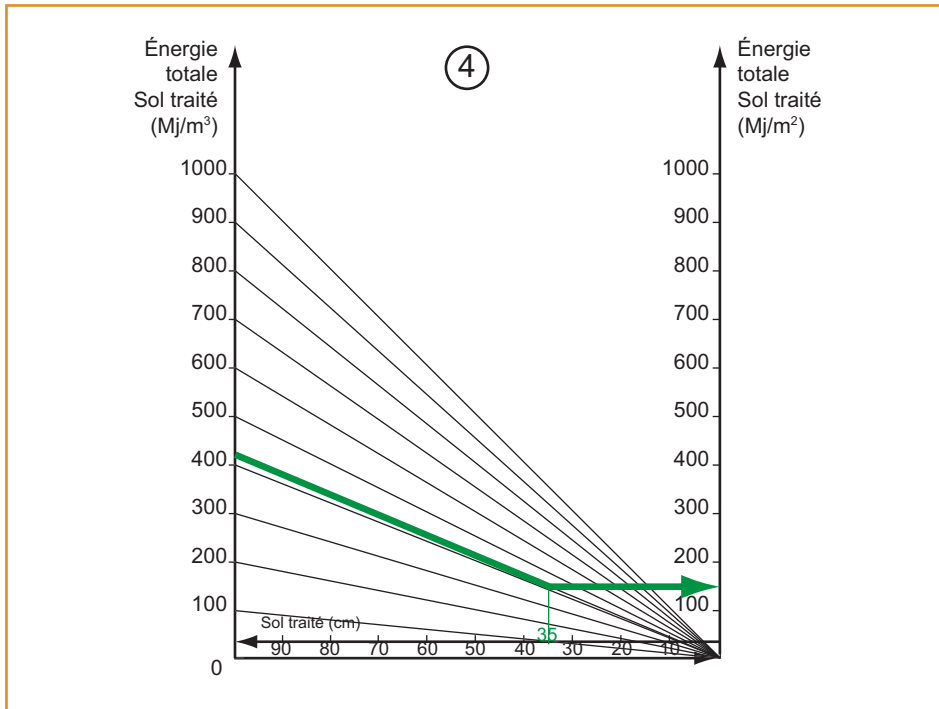


Figure 26 : zone Sol traité - Quadrant Energie totale ( $m^3$  et  $/m^2$ )

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'Énergie totale de la technique de Traitement des sols et celle des Emprunts granulaires, dans le cas de l'utilisation en couche de forme.



### 3.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires

Cette zone se décompose en 4 quadrants numérotés 5, 6, 7 et 8, dont voici les caractéristiques essentielles de chacun.

#### ■ 3.2.1 - Quadrant 5

Il mesure l'Energie des matériaux qui sont :

- les Emprunts granulaires, de la carrière au chantier,
- les sols excédentaires (dont le volume est supposé, dans ce document, équivalent à celui des Emprunts granulaires), du chantier à la décharge.

Les droites de ce Quadrant passent par l'origine et représentent les énergies (exprimées en  $Mj/m^3.km$ ), des différents modes de transports utilisés.

Pour un projet donné, connaissant la distance carrière-chantier ainsi que la distance chantier-décharge, on définit une distance de transport équivalente, somme des distances carrière-chantier et chantier-décharge. Cette distance équivalente déterminée, connaissant l'énergie transport au  $m^3.km$ , ce Quadrant permet la lecture de l'énergie transport d'un  $m^3$  de matériaux, comme l'indique la figure 27.

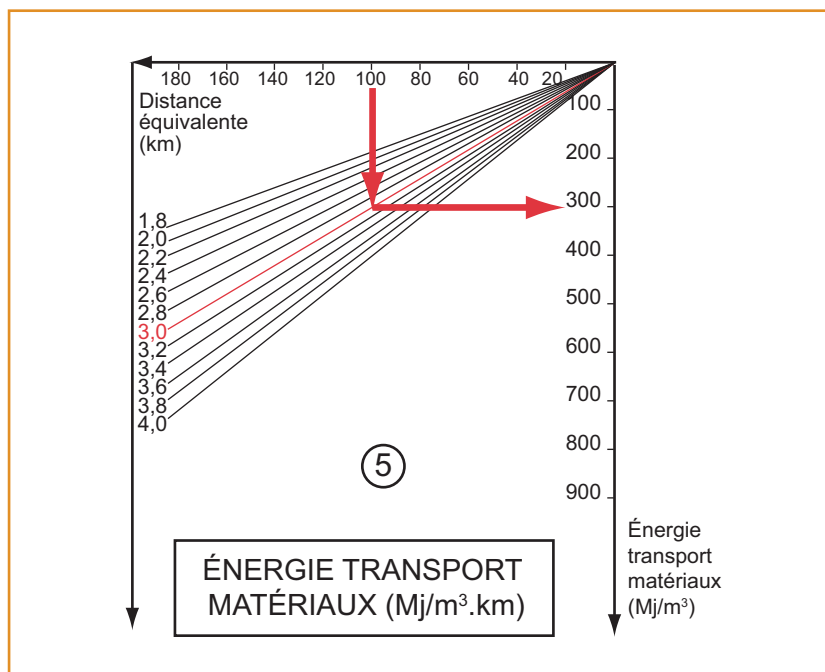


Figure 27 : zone Emprunts granulaires - Quadrant Energie transport matériaux

Si l'on ne connaît pas l'Energie transport au m<sup>3</sup>.km, l'utilisateur pourra la calculer de la manière suivante :

$$F (\text{Énergie, D}) = \frac{\text{Consommation aux 100 km} \times 35 \times 2,2}{\text{Charge utile camion} \times 100}$$

Avec :

**Consommation aux 100 km**

Camion 16 tonnes : 29 litres de fuel

Camion 29 tonnes : 36 litres de fuel

Camion 40 tonnes : 40 litres de fuel

**Charge utile camion**

Camion 16 tonnes : charge utile 8 tonnes

Camion 29 tonnes : charge utile 16 tonnes

Camion 40 tonnes : charge utile 20 tonnes

**Coefficient 35** : c'est la quantité d'énergie (en mégajoules - MJ) libérée par la combustion d'un litre de fuel

**Coefficient 100** : aux 100 km

**Coefficient 2,2** : densité des granulats

■ **3.2.2 - Quadrant 6**

Il mesure l'Energie de l'extraction et de la fabrication d'un m<sup>3</sup> de granulats.

Dans ce Quadrant figurent plusieurs droites parallèles, correspondant aux énergies générées par l'extraction et la fabrication d'un m<sup>3</sup> de différentes natures d'Emprunts granulaires (granulats roulés, granulats concassés, roches dures, roches tendres...).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des énergies des Quadrants 5 et 6 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des Energies qu'elles représentent (figure 28).

L'Energie transport ayant été déterminée au Quadrant 5 et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, les Energies d'extraction et de fabrication, le Quadrant 6 permet d'évaluer, de façon cumulée, l'Energie transport des matériaux, d'extraction et de fabrication des granulats.

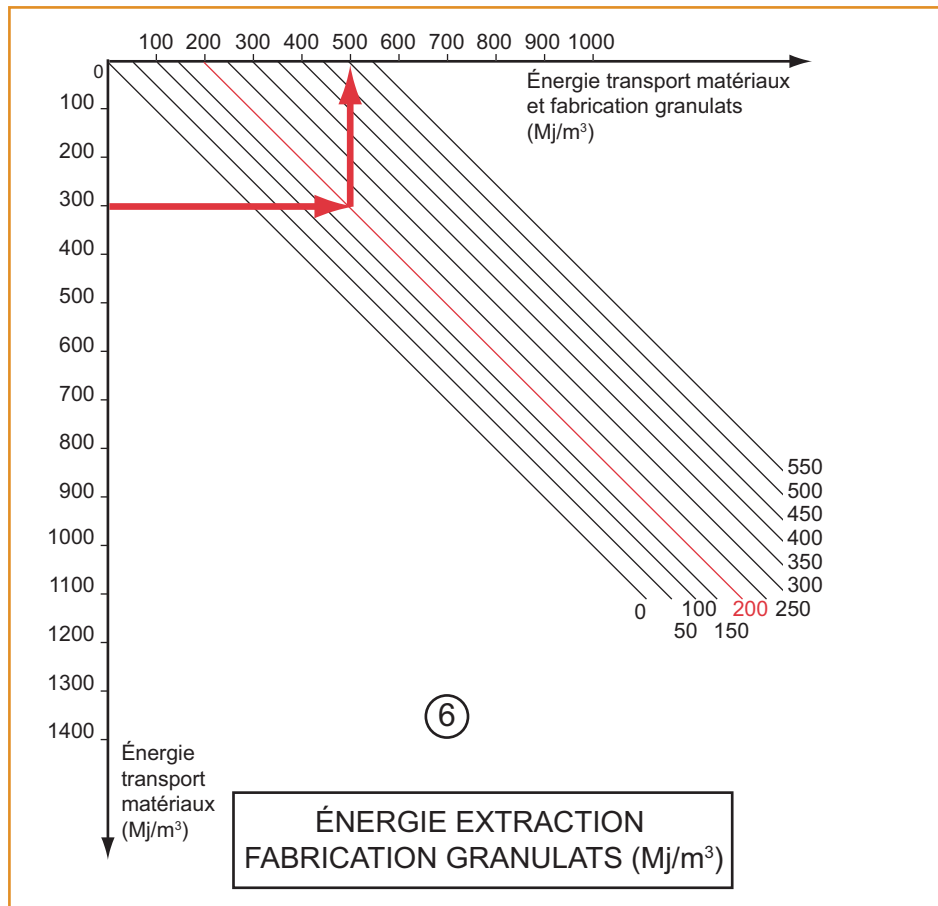


Figure 28 : zone Emprunts granulaires - Quadrant Energie extraction et fabrication granulats

### ■ 3.2.3 - Quadrant 7

Il mesure l'Énergie de la mise en œuvre des Emprunts granulaires.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses, relatives aux énergies de l'atelier de mise en œuvre (niveleuse, arroseuse, compacteur).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des énergies des Quadrants 5, 6 et 7 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des Énergies qu'elles représentent (figure 29).

L'Énergie extraction, fabrication et transport ayant été déterminée au Quadrant 6, et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, l'Énergie de la mise en œuvre, le Quadrant 7 permet d'évaluer, de façon cumulée, l'Énergie totale de transport des matériaux, d'extraction, de fabrication et de mise en œuvre des granulats.

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'Énergie totale de la technique des Emprunts granulaires et celle du Traitement des sols, dans le cas de l'utilisation en remblais.



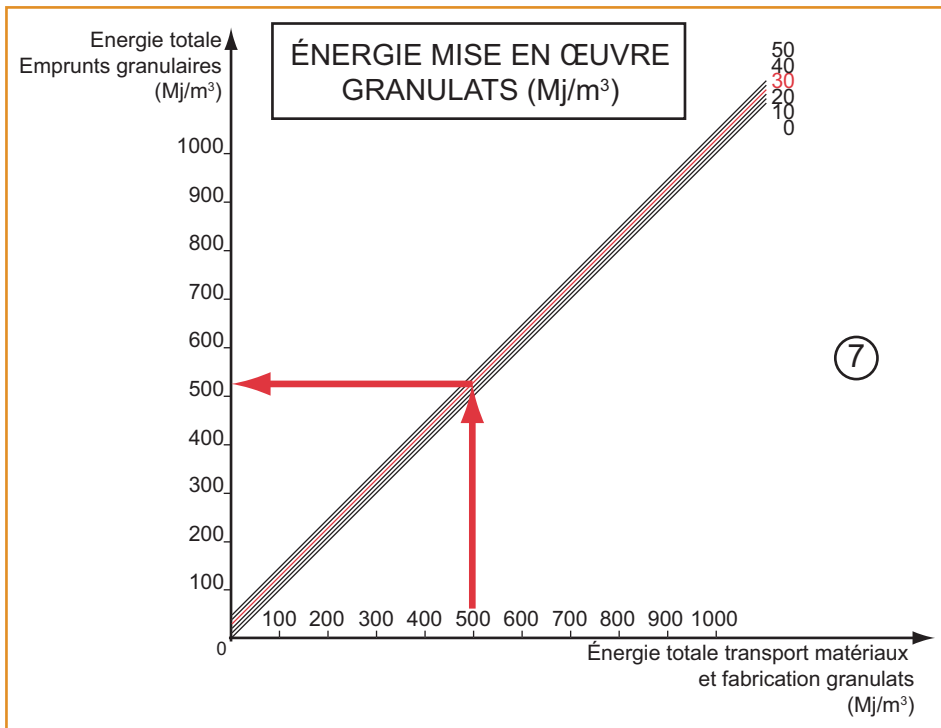


Figure 29 : zone Emprunts granulaires - Quadrant Energie mise en œuvre granulats

### ■ 3.2.4 - Quadrant 8

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'Énergie au m<sup>3</sup> de couche granulaire à l'Énergie au m<sup>2</sup> de couche granulaire (figure 30). C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'Énergie totale de la technique des Emprunts granulaires et celle du Traitement des sols, dans le cas de l'utilisation en couche de forme.

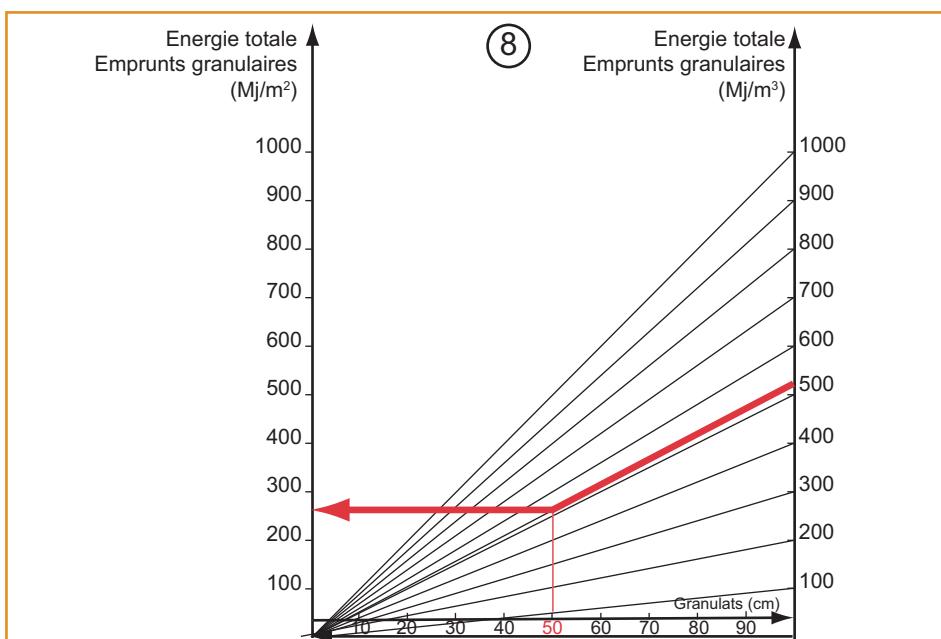


Figure 30 : zone Emprunts granulaires - Quadrant Energie totale (m<sup>3</sup> et m<sup>2</sup>)

### 3.3 - Conclusion

L'application de la méthode sur les 4 Quadrants de la Zone 1 et sur ceux de la Zone 2 permet d'effectuer une comparaison entre les énergies de la technique de Traitement des sols et celles de la technique des Emprunts granulaires telle qu'illustrée sur le diagramme de la page 49.

Pour le cas de l'utilisation en **remblais**, la comparaison s'effectue au **m<sup>3</sup>** de matériau (figure 31).

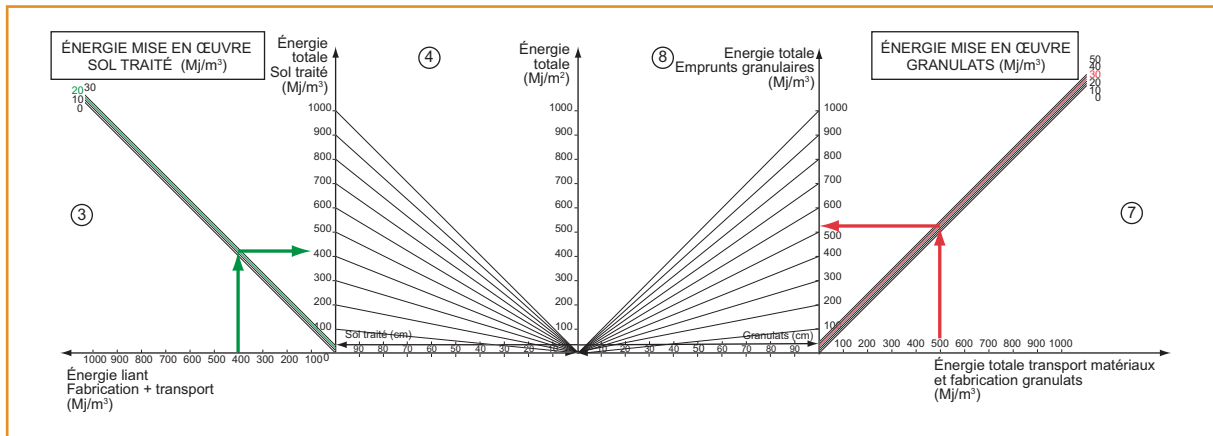


Figure 31 : diagramme de comparaison environnementale (Energie) - Cas des remblais

Pour le cas de l'utilisation en **couche de forme**, la comparaison s'effectue au **m<sup>2</sup>** de matériau (figure 32).

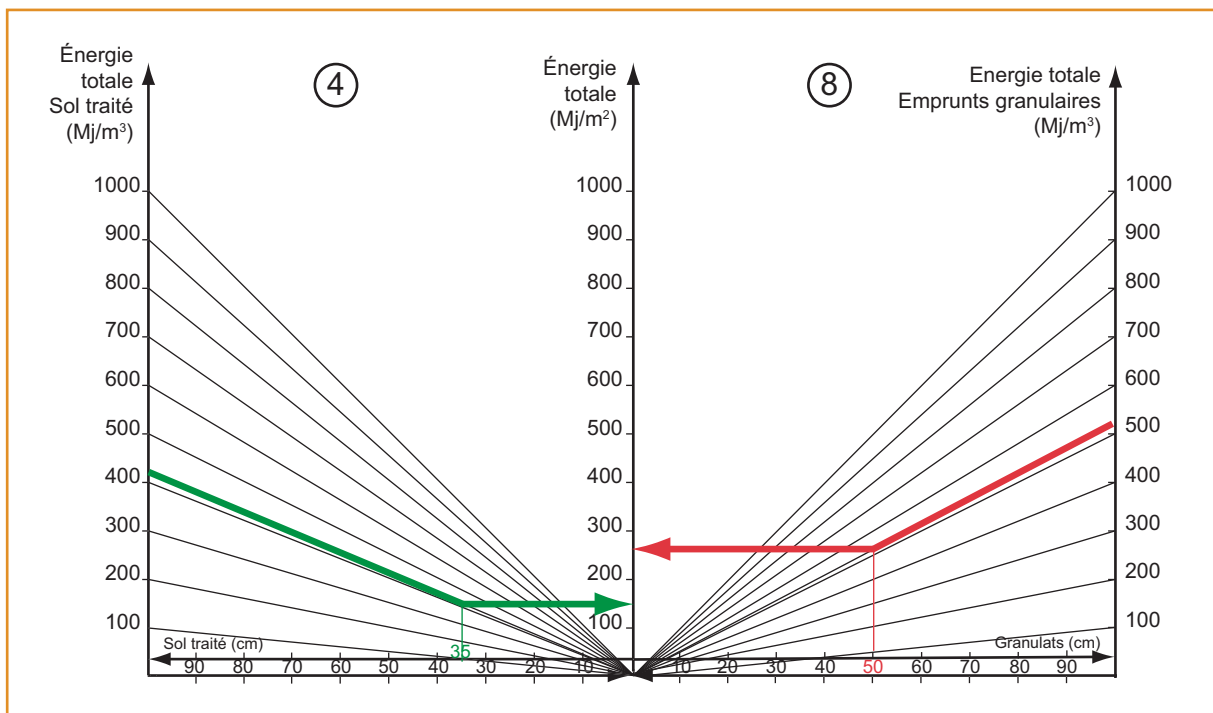
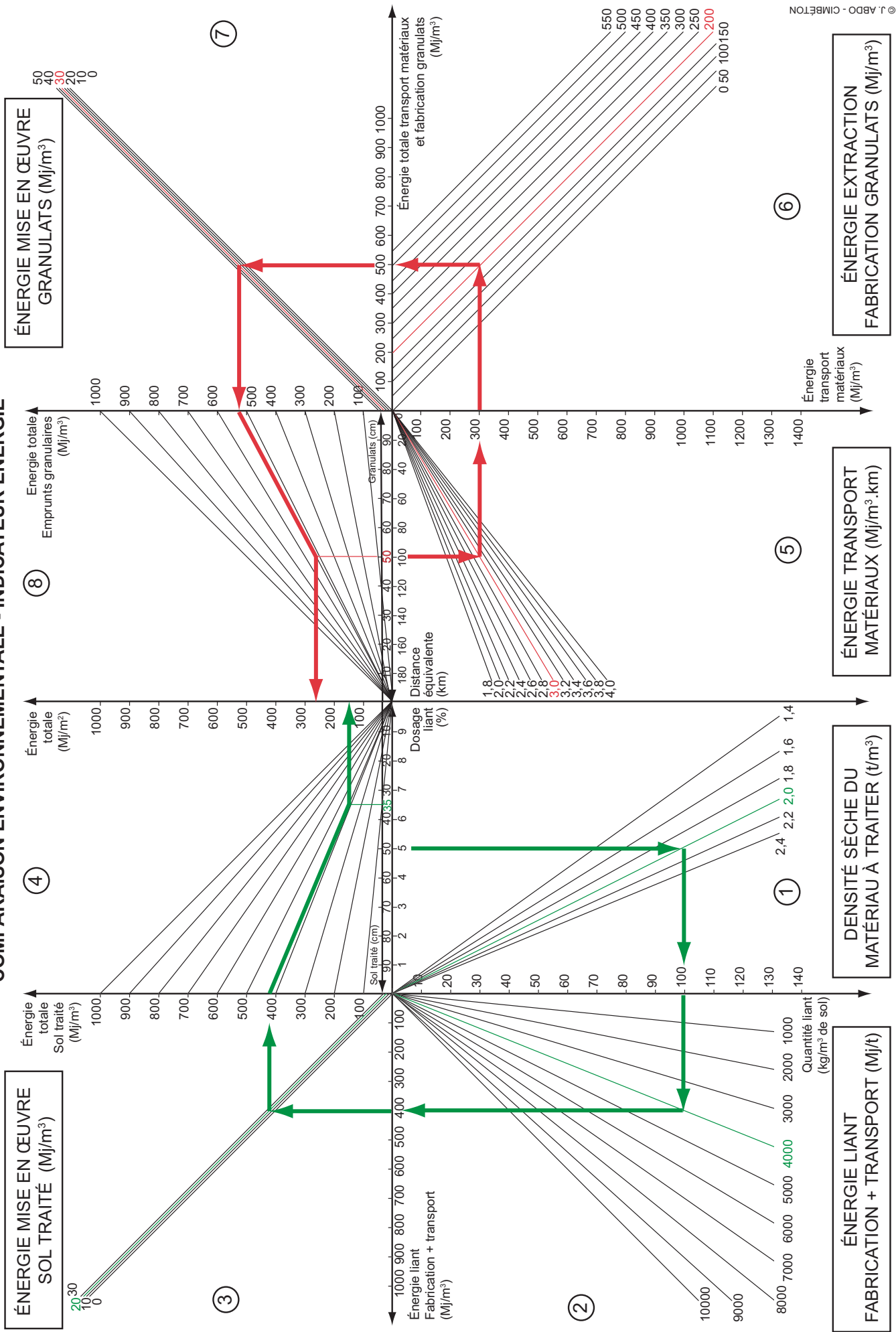


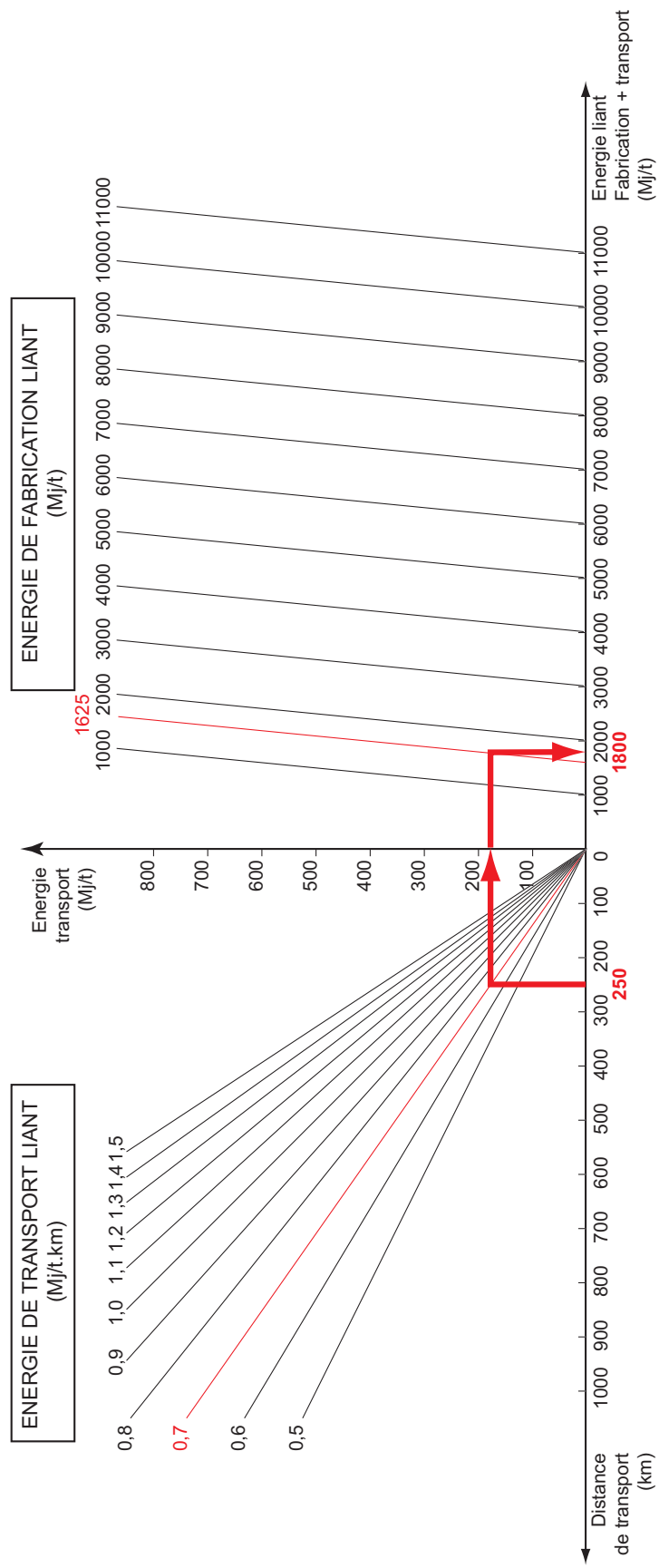
Figure 32 : diagramme de comparaison environnementale (Energie) - Cas des couches de forme

# TRAITEMENT DES SOLS VS EMPRUNTS GRANULAIRES COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE - INDICATEUR ENERGIE

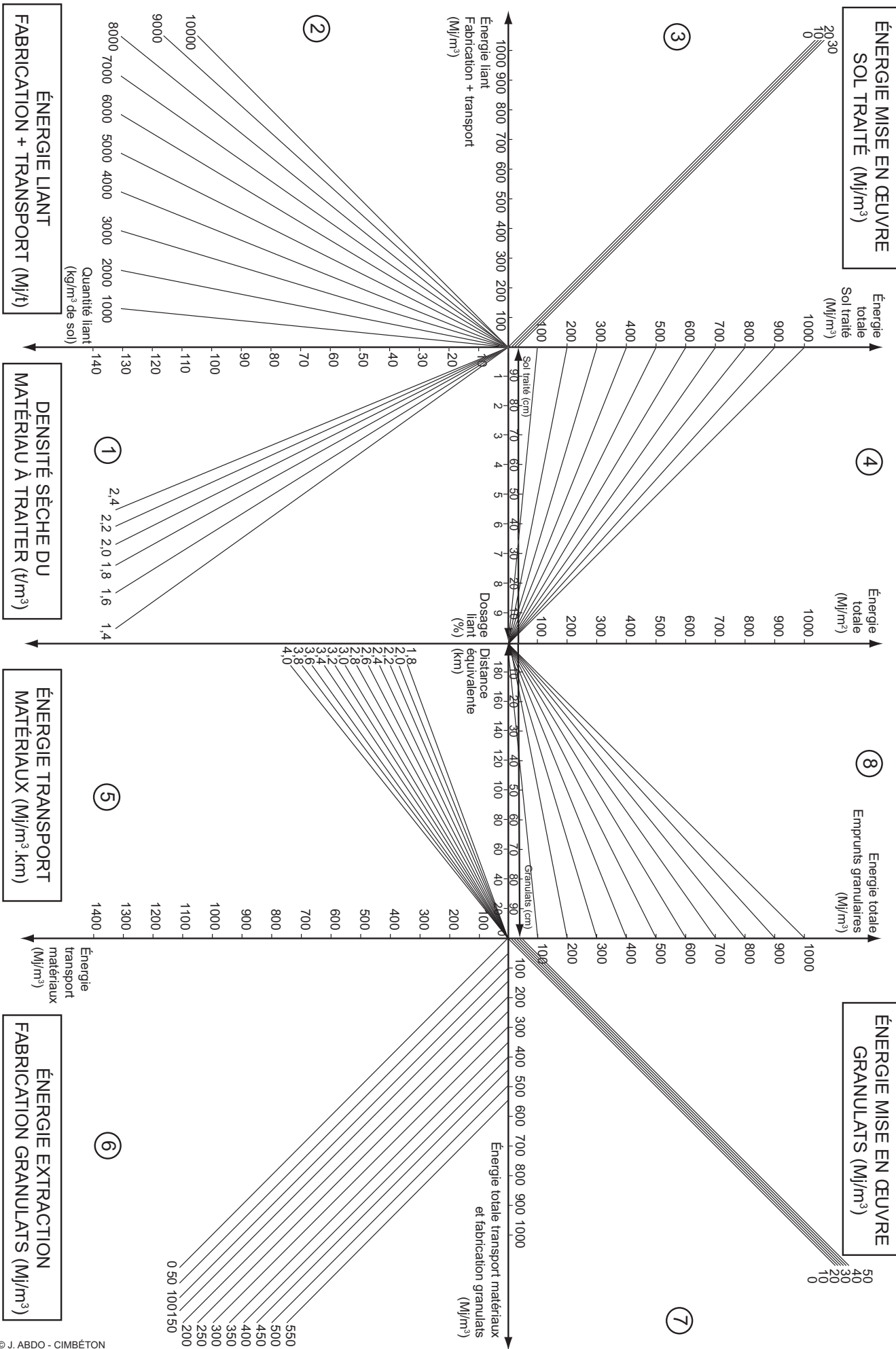


**Pour réaliser vos propres études de comparaison environnementale - Indicateur Energie entre la technique de Traitement des sols et celle des Emprunts granulaires, c'est très simple : il vous suffit de faire une photocopie du graphique vierge de la page 52, d'y intégrer les informations spécifiques à votre étude, puis de lire directement le résultat recherché sur le graphique.**

### Diagramme d'évaluation de l'Energie du liant (fabrication + transport)



# TRAITEMENT DES SOLS VS EMPRUNTS GRANULAIRES COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE - INDICATEUR ENERGIE



# Comparaison environnementale Indicateur CO<sub>2</sub>

## **4.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols**

4.1.1 - Quadrant 1

4.1.2 - Quadrant 2

*4.1.2.1 - L'impact CO<sub>2</sub> transport*

*4.1.2.2 - L'impact CO<sub>2</sub> total (fabrication + transport)*

4.1.3 - Quadrant 3

4.1.4 - Quadrant 4

## **4.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires**

4.2.1 - Quadrant 5

4.2.2 - Quadrant 6

4.2.3 - Quadrant 7

4.2.4 - Quadrant 8

## **4.3 - Conclusion**

## 4.1 - Etude de la Zone 1 - Traitement des sols

Cette zone se décompose en 4 quadrants numérotés 1, 2, 3 et 4, dont voici les caractéristiques essentielles de chacun.

### ■ 4.1.1 - Quadrant 1

Il permet de calculer la quantité de liant nécessaire par m<sup>3</sup> de sol pour obtenir les performances recherchées du matériau traité, dans le cadre du projet étudié.

Dans ce quadrant figurent une famille de droites (passant par l'origine) qui représentent différentes densités sèches, correspondant à une large gamme de matériaux qu'on peut rencontrer dans la nature (figure 33).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît la densité sèche du sol et le dosage en liant, il suffit de tracer une verticale descendante à partir du chiffre du dosage liant jusqu'à l'intersection avec la droite de densité sèche choisie : on lit alors directement, sur l'axe vertical de ce Quadrant, la quantité de liant au m<sup>3</sup> de sol qu'il faut prévoir afin de traiter ce sol.

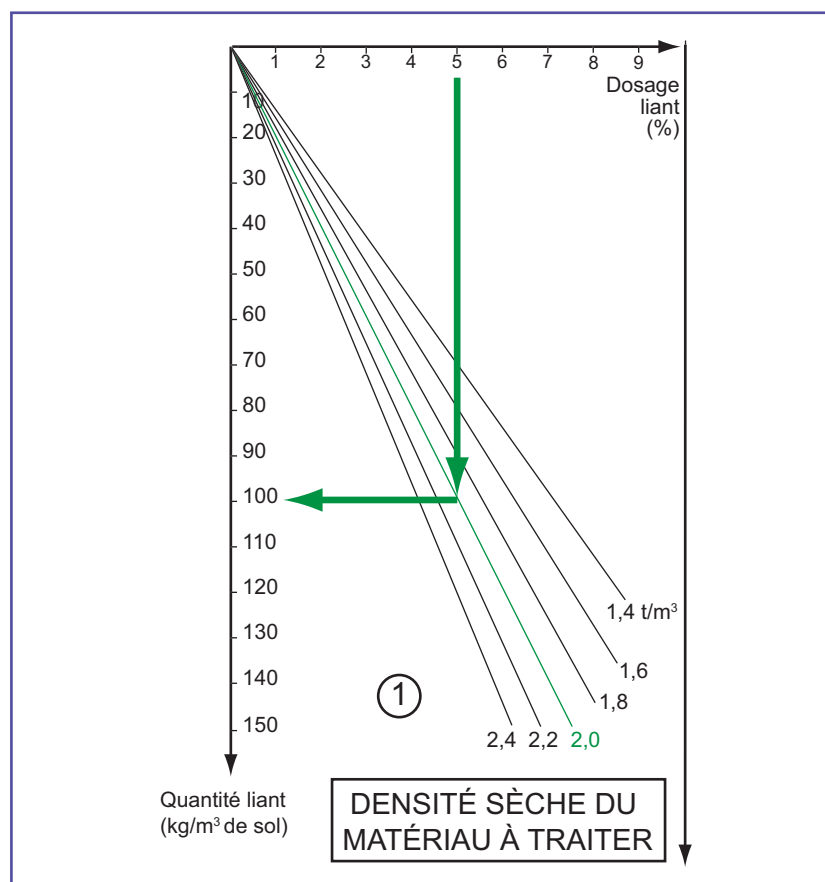


Figure 33 : zone Sol traité - Quadrant densité sèche matériau



Si, pour un projet donné, on connaît la nature du matériau à traiter mais pas sa densité sèche, on peut se référer aux valeurs indicatives du tableau 6.

Matériaux	Densité sèche
<b>Limon</b>	<b>1,6 - 1,8</b>
<b>Argile</b>	<b>1,7 - 1,8</b>
<b>Sable</b>	<b>1,4 - 1,9</b>
sable homéométrique	1,4 - 1,6
sable gradué	1,6 - 1,9
<b>Sol graveleux</b>	<b>1,8 - 2,2</b>

Tableau 6 : densité sèche de différents types de matériaux

#### ■ 4.1.2 - Quadrant 2

La quantité de liant pour un m<sup>3</sup> de sol ayant été déterminée par le Quadrant 1, le Quadrant 2 permet alors de calculer son impact CO<sub>2</sub>.

Dans ce Quadrant figurent des droites (passant par l'origine) qui représentent les impacts CO<sub>2</sub> (exprimés en kg CO<sub>2</sub> eq./t) des différents types de liants (figure 34).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît l'impact CO<sub>2</sub> total (fabrication + transport) d'une tonne de liant, il suffit de prolonger horizontalement la droite du Quadrant 1 jusqu'à l'intersection avec la droite correspondant à l'impact CO<sub>2</sub> choisi : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 2, l'impact CO<sub>2</sub> du liant par m<sup>3</sup> de Sol traité.

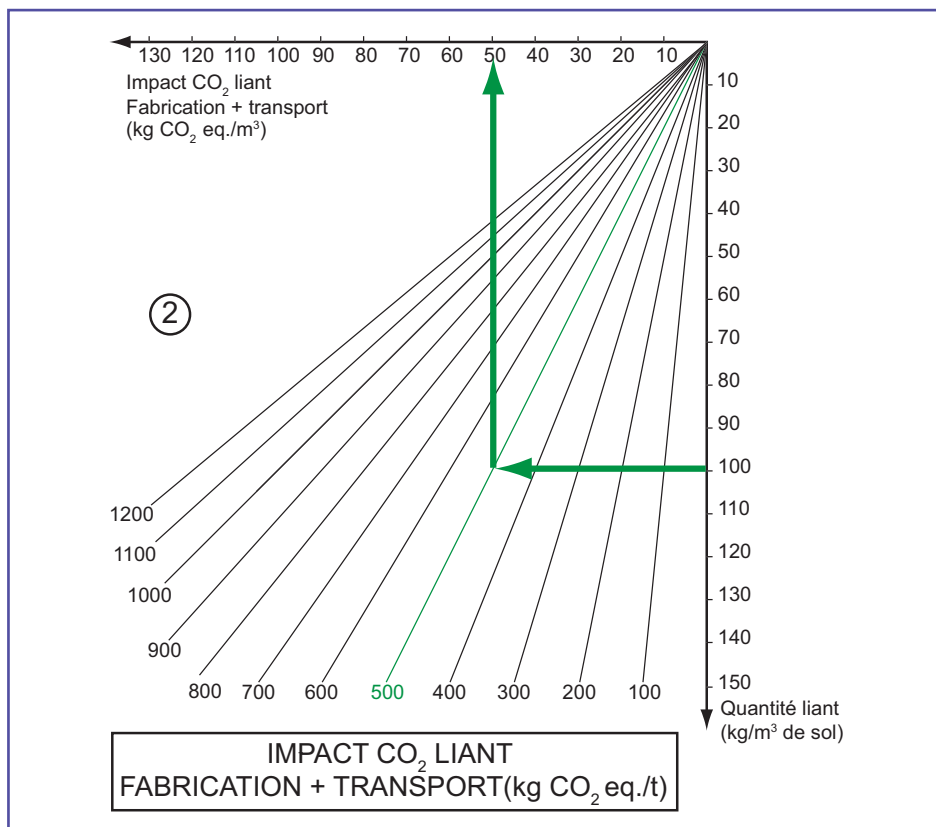


Figure 34 : zone Sol traité - Quadrant impact CO<sub>2</sub> liant

Si l'on ne connaît pas l'impact CO<sub>2</sub> total à la tonne de liant ou si l'utilisateur souhaite le déterminer de façon précise, compte tenu des données locales en sa possession, on peut se référer au diagramme de la figure 35.

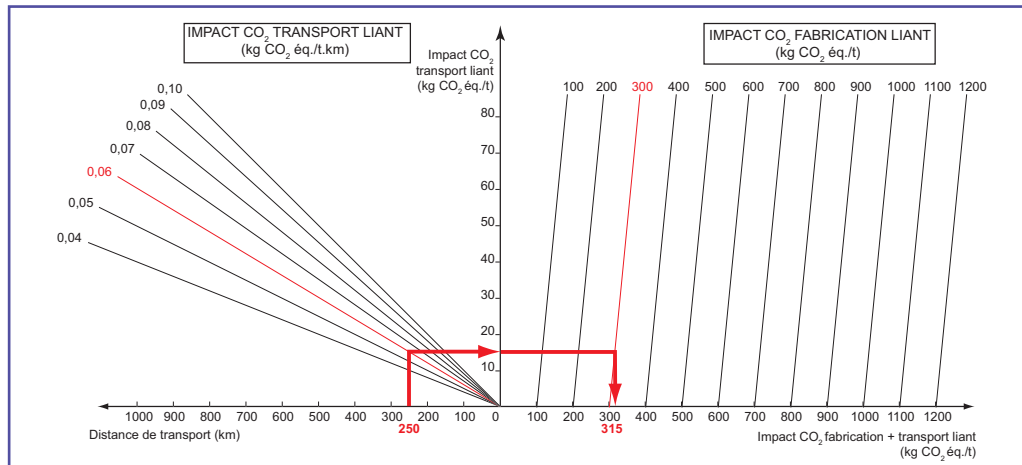


Figure 35 : diagramme d'évaluation de l'impact CO<sub>2</sub> du liant (fabrication + transport)

Ce diagramme permet, connaissant la distance de transport entre l'usine de liant et le chantier, l'impact CO<sub>2</sub> transport en t.km, ainsi que l'impact CO<sub>2</sub> dû à la fabrication d'une tonne de liant, de déterminer successivement l'impact CO<sub>2</sub> transport, puis l'impact CO<sub>2</sub> total fabrication + transport. L'impact CO<sub>2</sub> sera alors reporté sur le Quadrant 2, ce qui permettra de déduire l'impact CO<sub>2</sub> du liant par m<sup>3</sup> de Sol traité.

#### 4.1.2.1 - L'impact CO<sub>2</sub> transport

Si l'on ne connaît pas l'impact CO<sub>2</sub> transport en t.km, l'utilisateur pourra le déterminer au moyen de la formule suivante :

$$F(\text{CO}_2, D) = \frac{\text{Consommation aux 100 km} \times 2,5}{\text{Charge utile camion} \times 100}$$

Avec :

#### Consommation aux 100 km

Camion 16 tonnes : 29 litres de fuel

Camion 29 tonnes : 36 litres de fuel

Camion 40 tonnes : 40 litres de fuel

#### Charge utile camion

Camion 16 tonnes : charge utile 8 tonnes

Camion 29 tonnes : charge utile 16 tonnes

Camion 40 tonnes : charge utile 20 tonnes

**Coefficient 2,5** : c'est la quantité de CO<sub>2</sub> équivalent (en kg) dégagée par la combustion d'un litre de fuel

**Coefficient 100** : aux 100 km

#### 4.1.2.2 - L'impact CO<sub>2</sub> de fabrication du liant

Si l'on ne connaît pas l'impact CO<sub>2</sub> de fabrication d'une tonne de liant, on pourra utiliser les valeurs données à titre indicatif et figurant dans le tableau 7.

Liant	Impact CO <sub>2</sub> de fabrication (kg CO <sub>2</sub> eq./t)
CEM I	868*
CEM II	650*
Liant hydraulique routier LHR 70% Laitier	294*
Liant hydraulique routier LHR 50% Laitier	459*
Liant hydraulique routier LHR 30% Laitier	625*
Liant hydraulique routier LHR 30% Calcaire	614*
Liant hydraulique routier LHR 30% Cendres Volantes	613*
Chaux vive	1 059**

\* Source : ATILH

\*\* Source : Union des Producteurs de Chaux

Tableau 7 : impact CO<sub>2</sub> de fabrication du liant

Pour obtenir l'impact CO<sub>2</sub> réel de fabrication d'une tonne d'un produit donné, nous vous invitons à contacter directement le producteur du liant.

#### ■ 4.1.3 - Quadrant 3

Il concerne l'impact CO<sub>2</sub> de la mise en œuvre.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses relatives aux impacts CO<sub>2</sub> de l'atelier de mise en œuvre (épandeur, malaxeur, arroseuse, compacteur, niveleuse).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts CO<sub>2</sub> des Quadrants 2 et 3 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts CO<sub>2</sub> qu'elles représentent (figure 36).

La valeur de l'impact CO<sub>2</sub> du liant au m<sup>3</sup> de Sol traité ayant été déterminée par la Quadrant 2, il suffit de prolonger verticalement, vers le haut, la droite obtenue jusqu'à l'intersection avec la droite représentant l'impact CO<sub>2</sub> de l'atelier de mise en œuvre : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 3, l'impact cumulé total par m<sup>3</sup> de Sol traité.

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'impact CO<sub>2</sub> total de la technique de Traitement des sols et celui des Emprunts granulaires, dans le cas de l'utilisation en remblais.

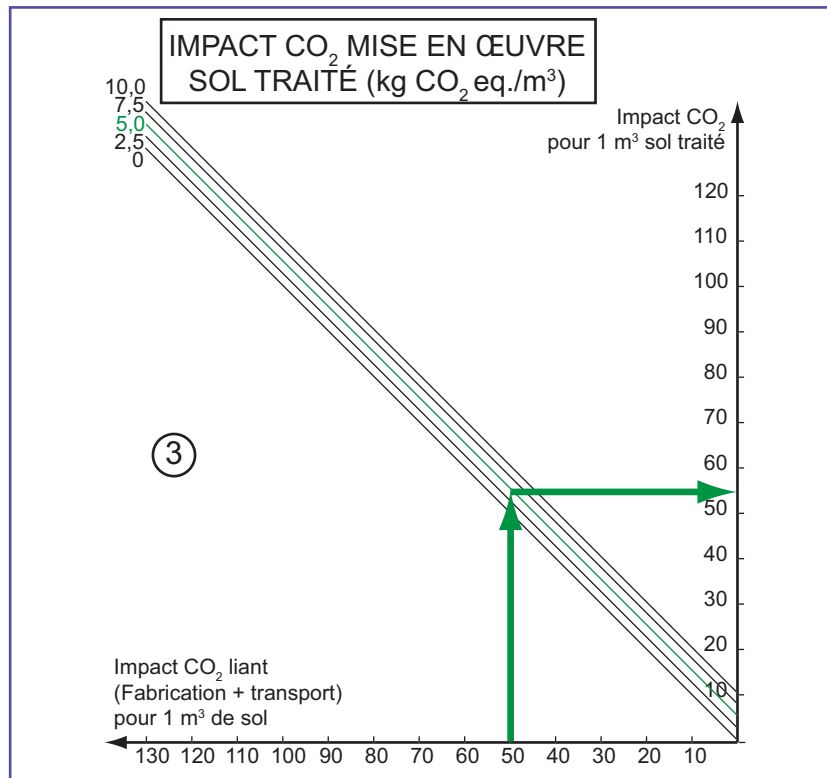


Figure 36 : zone Sol traité - Quadrant impact CO<sub>2</sub> mise en œuvre

Si l'on ne connaît pas l'impact CO<sub>2</sub> de l'atelier de mise en œuvre, l'utilisateur pourra utiliser la méthode de calcul suivante :

$$\text{Impact CO}_2 = 2,5 L$$

Avec :

**Impact CO<sub>2</sub>** : quantité de CO<sub>2</sub> équivalent pour la mise en œuvre d'un m<sup>3</sup> de Sol traité (kg CO<sub>2</sub> équivalent)

**Coefficient 2,5** : quantité de CO<sub>2</sub> équivalent (en kg) dégagée par la combustion d'un litre de fuel

**L** : consommation de fuel par l'ensemble des engins intervenant dans la mise en œuvre du Sol traité (pour 1 m<sup>3</sup>). Les valeurs de **L** sont données dans le tableau 8.

L	Sol
0,7	Sol limoneux/sableux
0,8	Sol argileux
0,9	Sol graveleux
1,0	Sol compact et difficile
> 1,0	Sol blocailleux

Tableau 8 : consommation fuel de l'atelier de mise en œuvre Sol traité en fonction de la nature du sol

#### ■ 4.1.4 - Quadrant 4

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'impact CO<sub>2</sub> au m<sup>3</sup> de Sol traité à l'impact CO<sub>2</sub> au m<sup>2</sup> de Sol traité (figure 37).

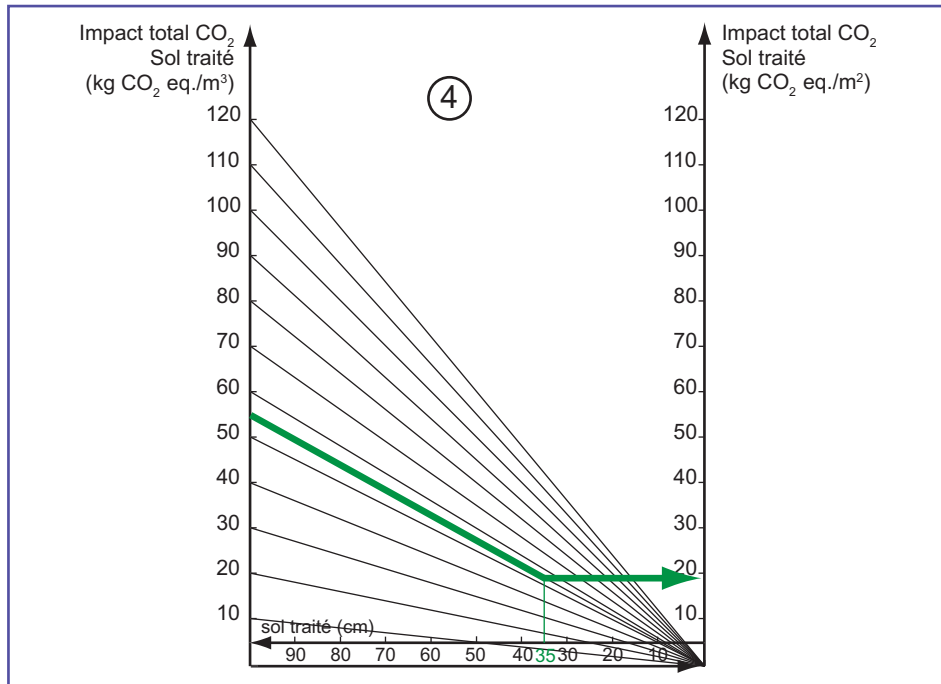


Figure 37 : zone Sol traité - Quadrant impact total CO<sub>2</sub> (/m<sup>3</sup> et /m<sup>2</sup>)

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'impact CO<sub>2</sub> total de la technique de Traitement des sols et celui des Emprunts granulaires, dans le cas de l'utilisation en couche de forme.



## 4.2 - Etude de la Zone 2 - Emprunts granulaires

Cette zone se décompose en 4 quadrants numérotés 5, 6, 7 et 8, dont voici les caractéristiques essentielles de chacun.

### ■ 4.2.1 - Quadrant 5

Il mesure l'impact CO<sub>2</sub> des matériaux qui sont :

- les Emprunts granulaires, de la carrière au chantier,
- les sols excédentaires (dont le volume est supposé, dans ce document, équivalent à celui des Emprunts granulaires), du chantier à la décharge.

Les droites de ce Quadrant passent par l'origine et représentent l'impact CO<sub>2</sub> (exprimé en kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>3</sup>.km) des différents modes de transports utilisés.

Pour un projet donné, connaissant la distance carrière-chantier ainsi que la distance chantier-décharge, on définit une distance de transport équivalente, somme des distances carrière-chantier et chantier-décharge. Cette distance équivalente déterminée, connaissant l'impact transport au m<sup>3</sup>.km, ce Quadrant permet la lecture de l'impact transport d'un m<sup>3</sup> de matériaux, comme l'indique la figure 38.

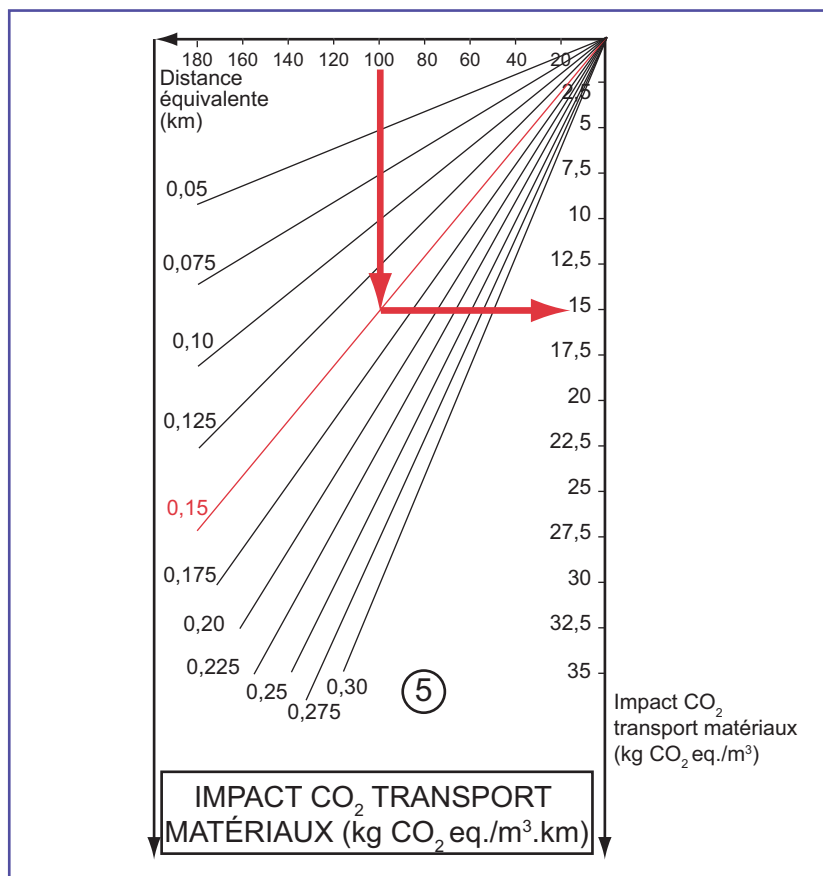


Figure 38 : zone Emprunts granulaires - Quadrant impact CO<sub>2</sub> transport matériaux

Si l'on ne connaît pas l'impact CO<sub>2</sub> transport au m<sup>3</sup>.km, l'utilisateur pourra le calculer de la manière suivante :

$$F(\text{CO}_2, D) = \frac{\text{Consommation aux 100 km} \times 2,5 \times 2,2}{\text{Charge utile camion} \times 100}$$

Avec :

**Consommation aux 100 km**

Camion 16 tonnes : 29 litres de fuel

Camion 29 tonnes : 36 litres de fuel

Camion 40 tonnes : 40 litres de fuel

**Charge utile camion**

Camion 16 tonnes : charge utile 8 tonnes

Camion 29 tonnes : charge utile 16 tonnes

Camion 40 tonnes : charge utile 20 tonnes

**Coefficient 2,5** : c'est la quantité de CO<sub>2</sub> équivalent (en kg) dégagée par la combustion d'un litre de fuel

**Coefficient 100** : aux 100 km

**Coefficient 2,2** : densité des granulats



■ 4.2.2 - Quadrant 6

Il mesure l'impact CO<sub>2</sub> de l'extraction et de la fabrication d'un m<sup>3</sup> de granulats.

Dans ce Quadrant figurent plusieurs droites parallèles, correspondant aux impacts CO<sub>2</sub> générés par l'extraction et la fabrication d'un m<sup>3</sup> de différentes natures d'Emprunts granulaires (granulats roulés, granulats concassés, roches dures, roches tendres...).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts des Quadrants 5 et 6 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts CO<sub>2</sub> qu'elles représentent (figure 39).

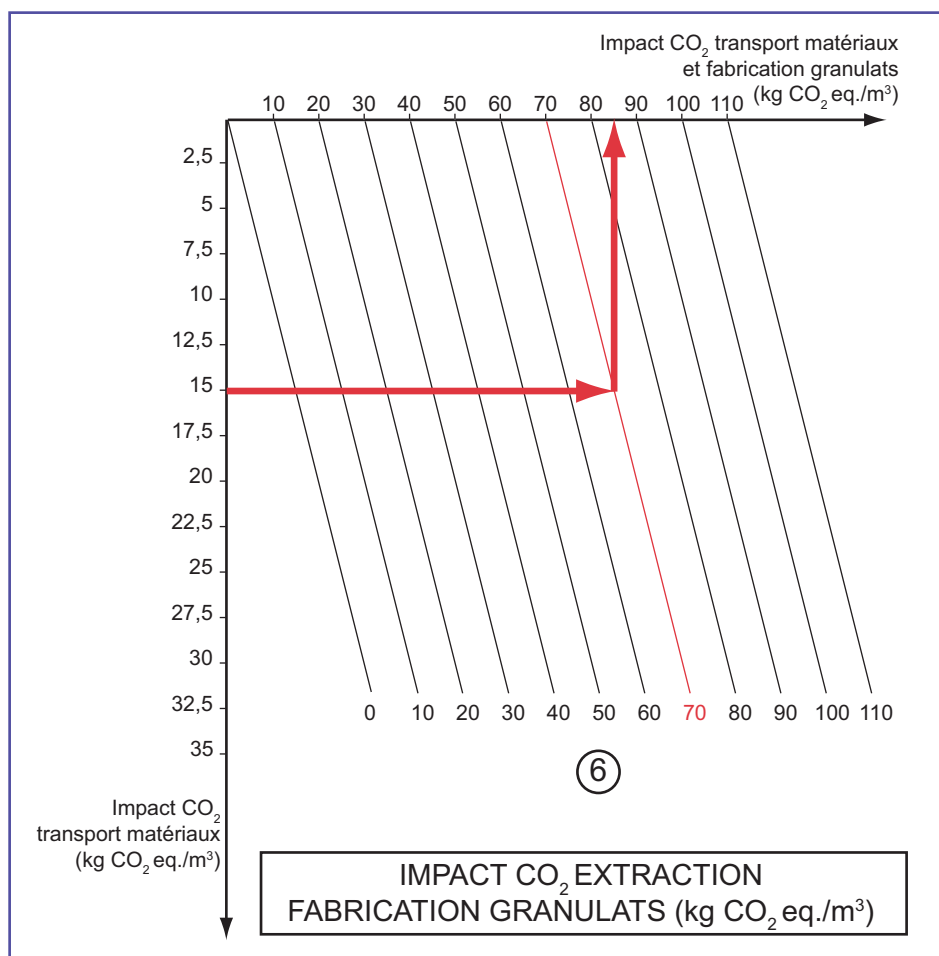


Figure 39 : zone Emprunts granulaires - Quadrant impact CO<sub>2</sub> extraction et fabrication granulats

L'impact CO<sub>2</sub> transport ayant été déterminé au Quadrant 5 et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, les impacts CO<sub>2</sub> d'extraction et de fabrication, le Quadrant 6 permet d'évaluer, de façon cumulée, l'impact CO<sub>2</sub> de transport des matériaux, d'extraction et de fabrication des granulats.



### ■ 4.2.3 - Quadrant 7

Il mesure l'impact CO<sub>2</sub> de la mise en œuvre des Emprunts granulaires.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses, relatives aux impacts CO<sub>2</sub> de l'atelier de mise en œuvre (niveleuse, arroseuse, compacteur).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts CO<sub>2</sub> des Quadrants 5, 6 et 7 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts CO<sub>2</sub> qu'elles représentent (figure 40).

L'impact CO<sub>2</sub> extraction, fabrication et transport ayant été déterminé au Quadrant 6, et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, l'impact CO<sub>2</sub> de la mise en œuvre, le Quadrant 7 permet d'évaluer, de façon cumulée, l'impact CO<sub>2</sub> total de transport des matériaux, d'extraction, de fabrication et de mise en œuvre des granulats.

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'impact CO<sub>2</sub> total de la technique des Emprunts granulaires et celui du Traitement des sols, dans le cas de l'utilisation en remblais.

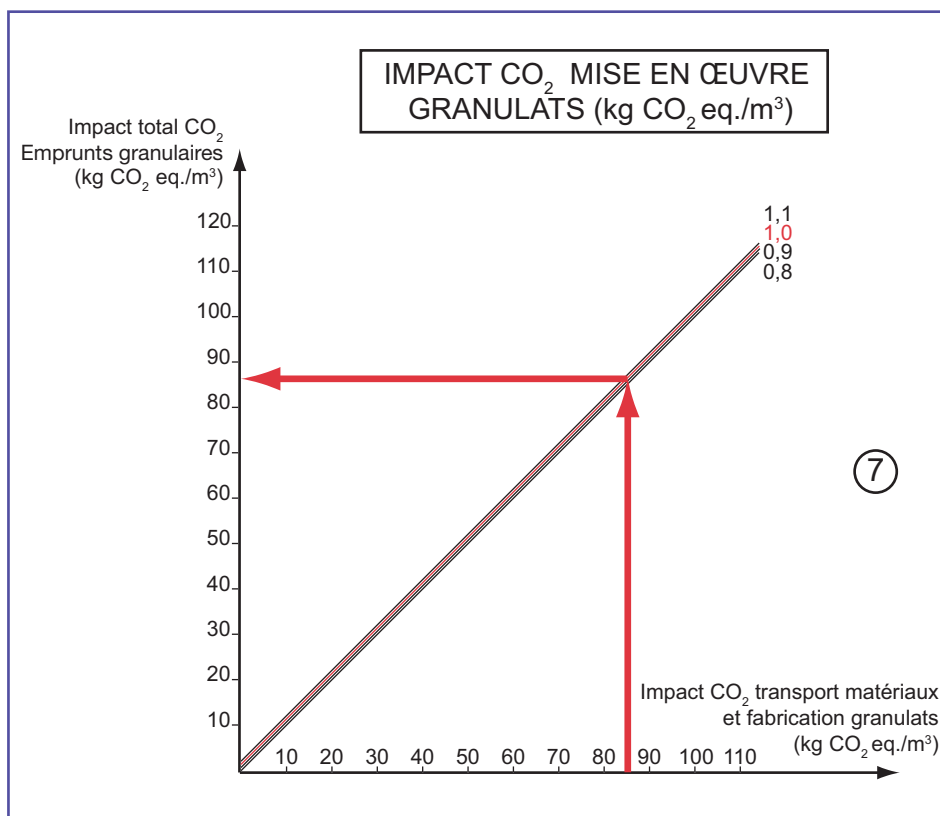


Figure 40 : zone Emprunts granulaires - Quadrant impact CO<sub>2</sub> mise en œuvre granulats

■ 4.2.4 - Quadrant 8

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'impact CO<sub>2</sub> au m<sup>3</sup> de couche granulaire à l'impact CO<sub>2</sub> au m<sup>2</sup> de couche granulaire (figure 41).

C'est cette valeur qui sera considérée pour comparer l'impact CO<sub>2</sub> total de la technique des Emprunts granulaires et celui du Traitement des sols, dans le cas de l'utilisation en couche de forme.

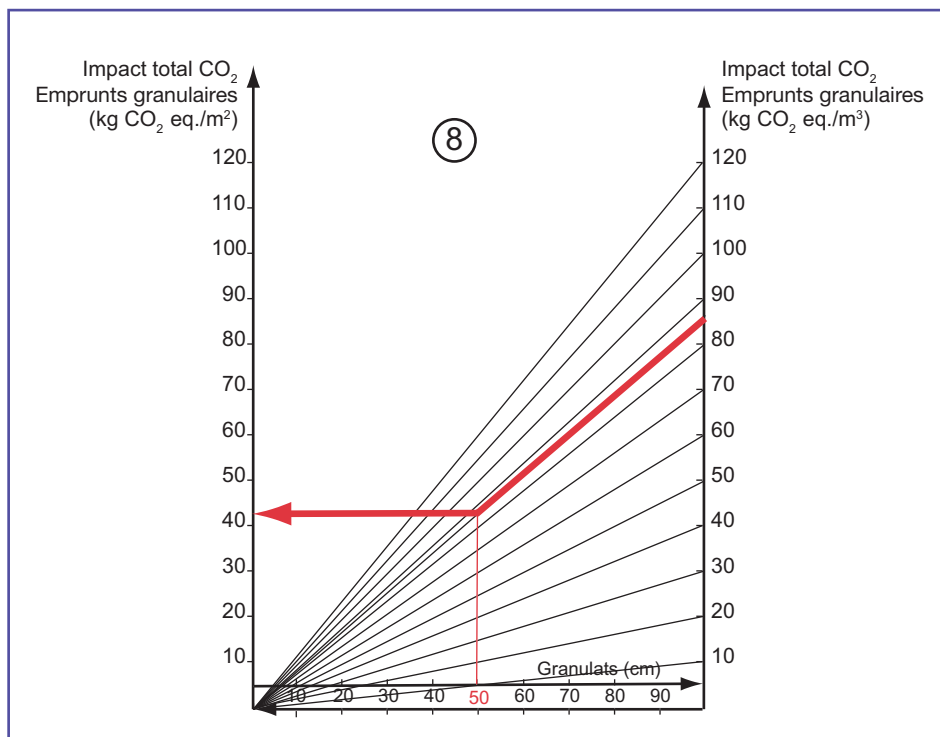


Figure 41 : zone Emprunts granulaires - Quadrant impact CO<sub>2</sub> total (/m<sup>3</sup> et /m<sup>2</sup>)



### 4.3 - Conclusion

L'application de la méthode sur les 4 Quadrants de la Zone 1 et sur ceux de la Zone 2 permet d'effectuer une comparaison entre les impacts CO<sub>2</sub> de la technique de Traitement des sols et ceux de la technique des Emprunts granulaires telle qu'illustrée sur le diagramme de la page 66.

Pour le cas de l'utilisation en **remblais**, la comparaison s'effectue au **m<sup>3</sup>** de matériau (figure 42).

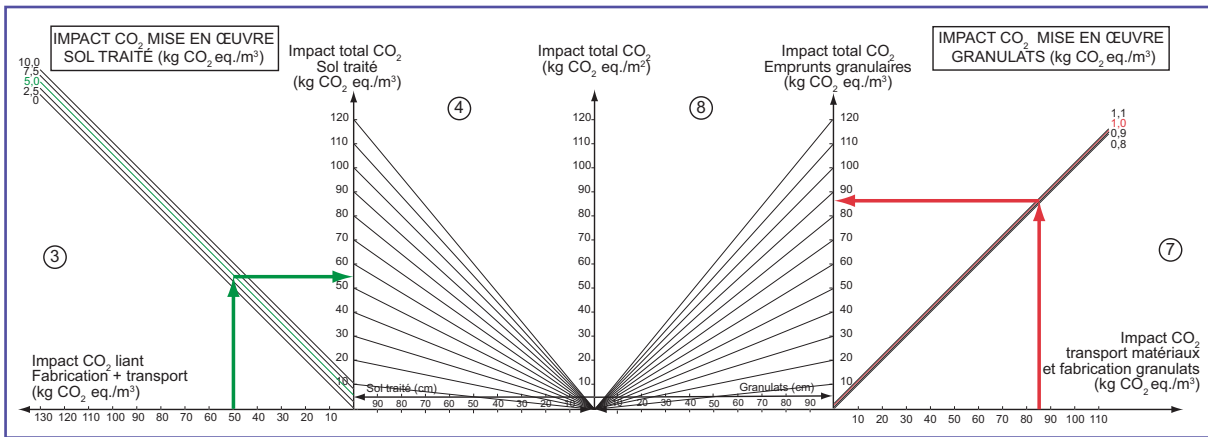


Figure 42 : diagramme de comparaison environnementale (impact CO<sub>2</sub>) - Cas des remblais

Pour le cas de l'utilisation en **couche de forme**, la comparaison s'effectue au **m<sup>2</sup>** de matériau (figure 43).

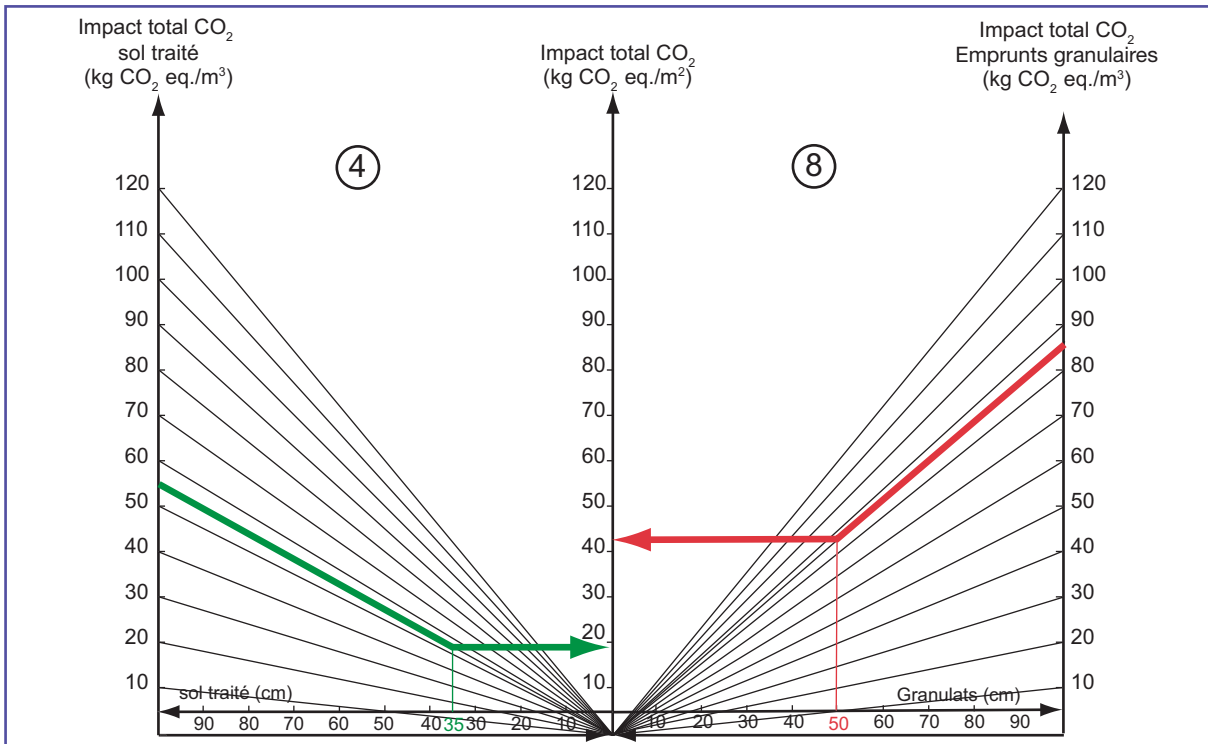
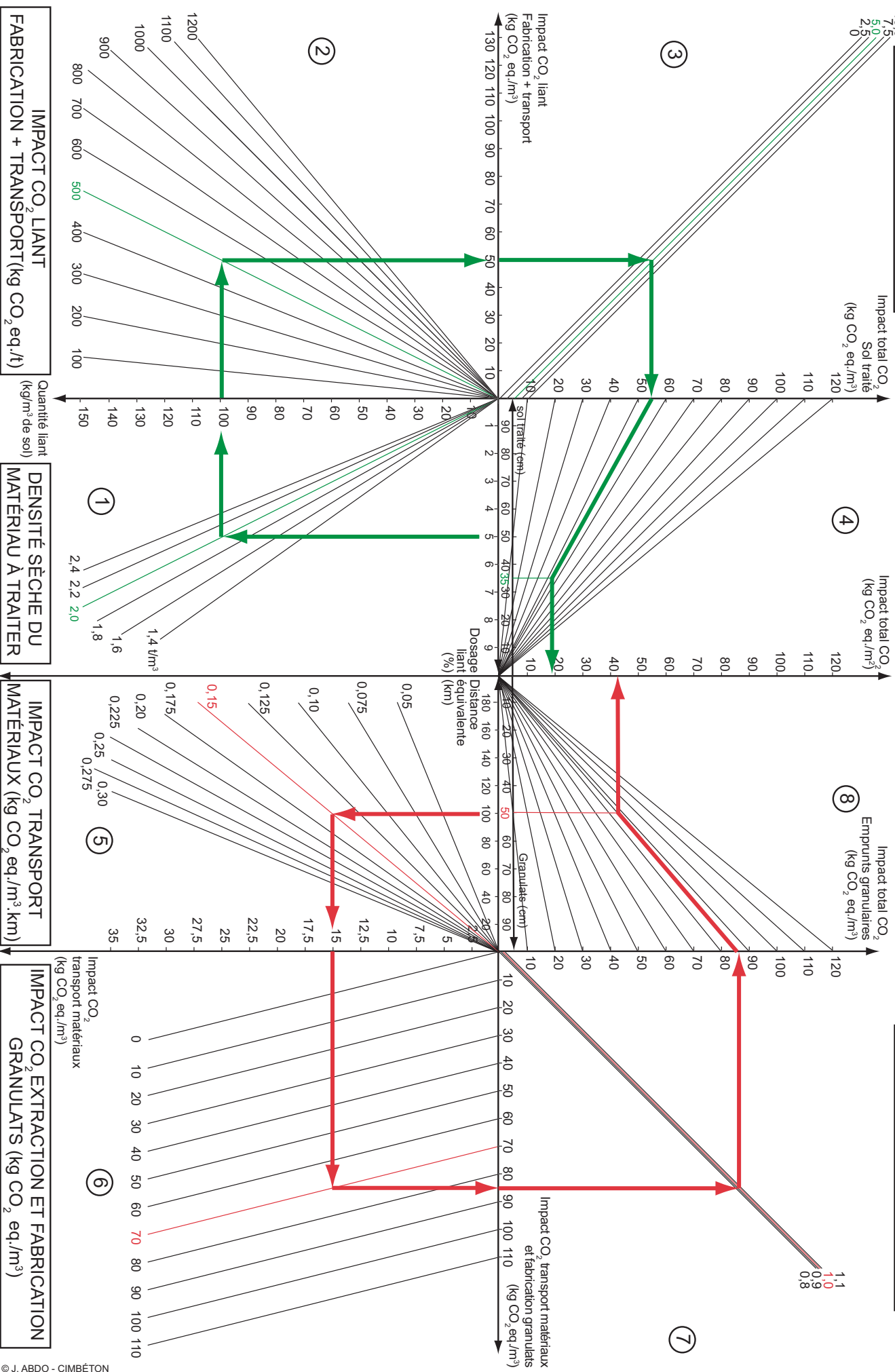


Figure 43 : diagramme de comparaison environnementale (impact CO<sub>2</sub>) - Cas des couches de forme

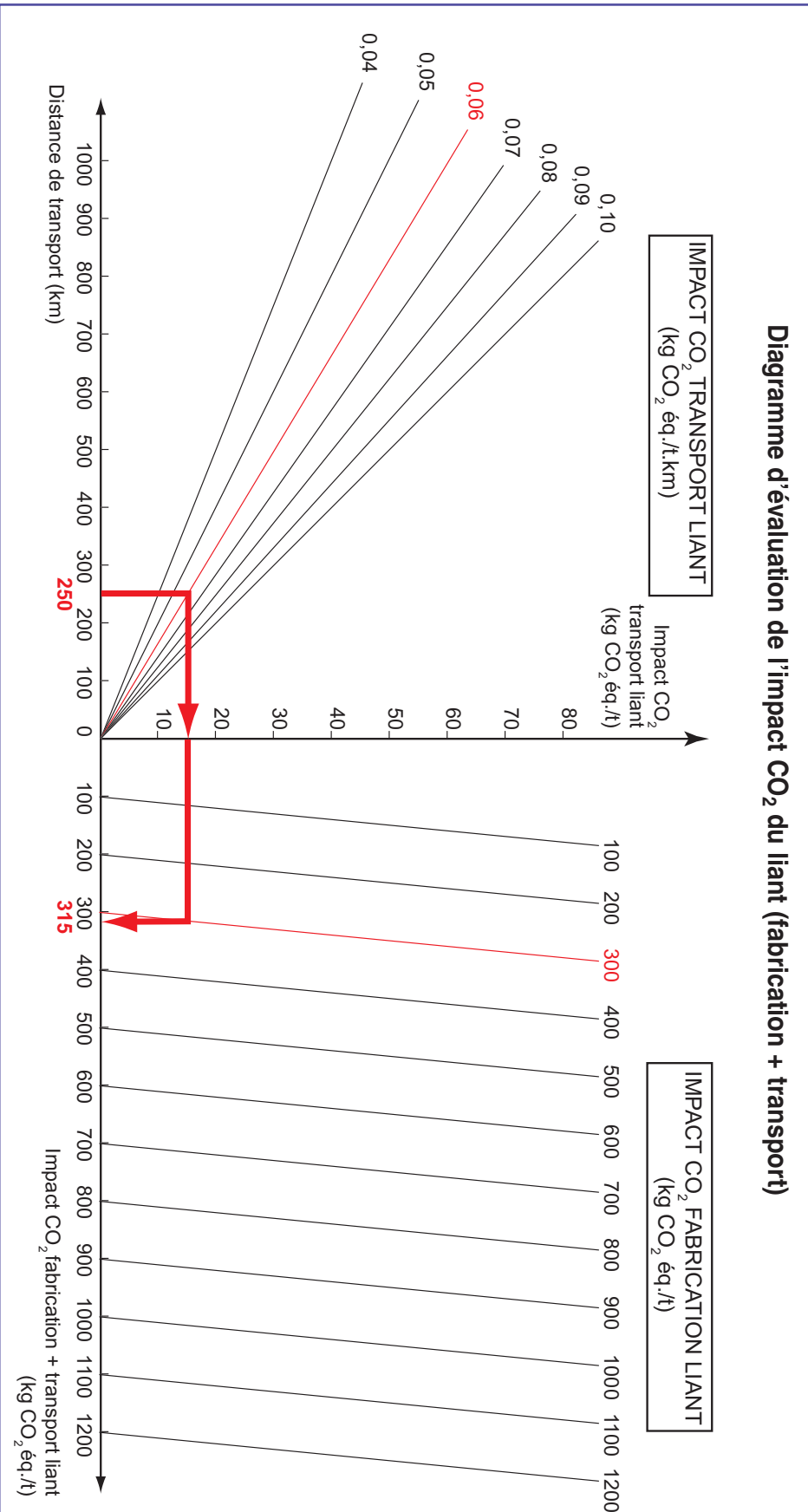
**IMPACT CO<sub>2</sub> MISE EN ŒUVRE  
SOL TRAITÉ (kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>3</sup>)**

**TRAITEMENT DES SOLS VS EMPRUNTS GRANULAIRES  
COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE - INDICATEUR CO<sub>2</sub>**

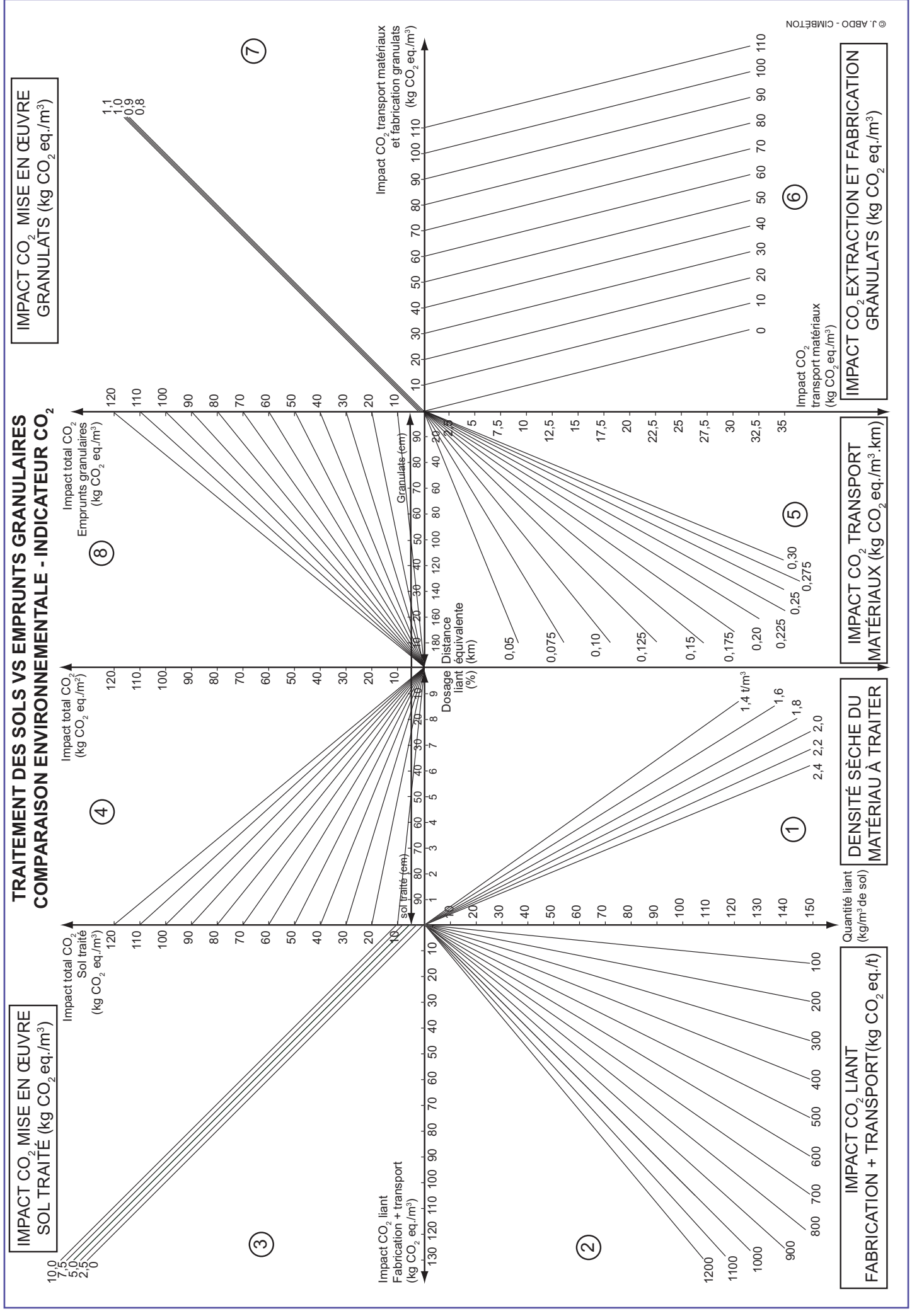
**IMPACT CO<sub>2</sub> MISE EN ŒUVRE  
GRANULATS (kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>3</sup>)**



**Pour réaliser vos propres études de comparaison environnementale - Indicateur CO<sub>2</sub> entre la technique de Traitement des sols et celle des Emprunts granulaires, c'est très simple : il vous suffit de faire une photocopie du graphique vierge de la page 69, d'y intégrer les informations spécifiques à votre étude, puis de lire directement le résultat recherché sur le graphique.**



# TRAITEMENT DES SOLS VS EMPRUNTS GRANULAIRES COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE - INDICATEUR CO<sub>2</sub>







Chapitre

# 5

## Conclusion générale

Cette étude a pour objectif de proposer une méthode visuelle simple, permettant à l'utilisateur de prendre des décisions pertinentes et rapides, quant aux choix des techniques de construction, dans le domaine des terrassements routiers.

Elle traite les trois impacts ou indicateurs qui sont aujourd'hui considérés comme étant les plus importants : l'économie, l'énergie et le CO<sub>2</sub>.

Pour compléter cette étude, d'autres impacts ou indicateurs pourront, dans l'avenir, être étudiés : l'eau, les ressources naturelles, les déchets, l'acidification, l'eutrophisation, l'éco-toxicité, la toxicité humaine...



**Crédits photographiques**

Romualda Holak, Cimbéton, X  
Tous droits réservés

**Mise en page**

Dorothée Picard

**Réalisation**

Îlot Trésor  
RCS Paris B 408 745 149

Édition novembre 2009





**CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS**

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10  
E-mail : [centrinfo@cimbeton.net](mailto:centrinfo@cimbeton.net) • internet : [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)