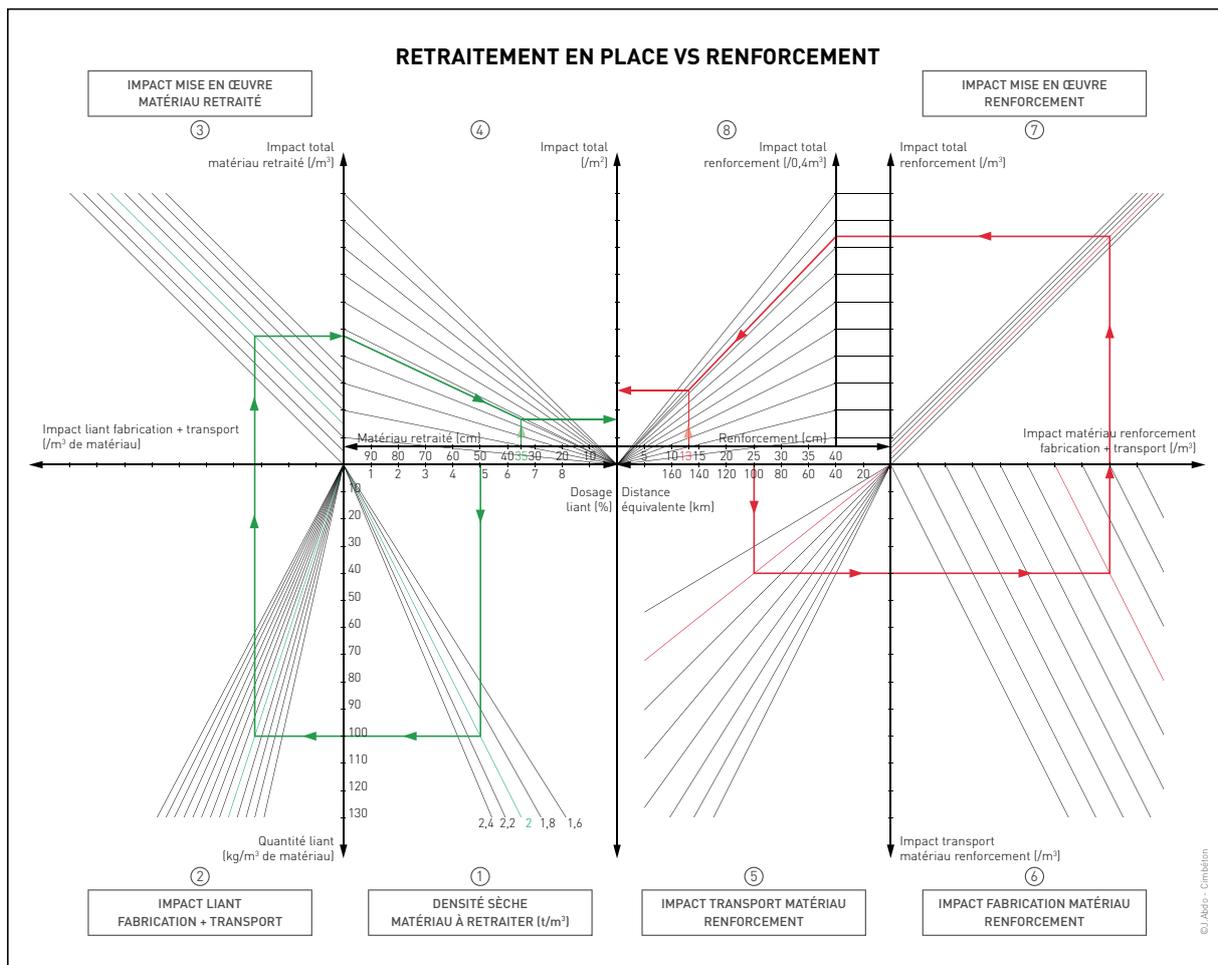


ÉTUDE COMPARATIVE EN TECHNIQUE ROUTIÈRE

RETRAITEMENT DES CHAUSSÉES EN PLACE

VS RENFORCEMENT

Méthode graphique de comparaison économique et environnementale



ÉTUDE COMPARATIVE EN TECHNIQUE ROUTIÈRE
RETRAITEMENT DES CHAUSSÉES EN PLACE
VS RENFORCEMENT

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

David CUINET

Frédéric DIDIER

Antoine GARRIDO

CIMENTS VICAT

LAFARGE CIMENTS

HOLCIM CIMENTS

CIMENTS CALCIA

Avant-propos

● Si le réseau des routes principales est régulièrement entretenu en France, il n'en va pas de même de l'énorme réseau de routes secondaires : 1 000 000 de km de rues, de routes et de chemins ruraux, représentant un capital investi de 100 milliards d'euros. Ce réseau se caractérise par des chaussées de faible largeur (de 3 à 6 mètres) et par un trafic généralement inférieur ou égal à t_3 , c'est-à-dire à 150 poids lourds par jour.

De structure ancienne, ces routes vieillissent et se dégradent : chaque année, 5 % en moyenne doivent faire l'objet de travaux. Parfois, cette usure n'est que superficielle : fissures longitudinales hors des traces de pneus, fissures transversales, arrachements de surface, orniérage à petit rayon. La rénovation de la couche de surface par un enduit superficiel ou un enrobé mince suffit, dans ce cas, à assurer l'étanchéité de surface et à améliorer l'adhérence de la chaussée tout en protégeant sa structure.

Mais, très souvent, c'est la structure même de la chaussée qui est atteinte : les causes en sont l'âge, bien sûr, mais aussi l'hétérogénéité des matériaux utilisés - briques, gravats, pierres -, les remontées en place d'un sol souvent argileux ou limoneux, et surtout l'effet dévastateur du trafic de poids lourds ou d'engins agricoles en période de dégel, après un hiver rigoureux.

La dégradation structurelle d'une chaussée se reconnaît à des symptômes tels que :

- les fissures longitudinales dans les traces de pneus ;
- les fissures transversales importantes ;
- les déformations permanentes et les nids-de-poule ;
- le faïençage ;
- les affaissements et les flaches ;
- les orniérages à grand rayon.

Pour entretenir la structure de la chaussée dégradée, il existe deux solutions techniques :

Le renforcement épais, c'est-à-dire le rechargement de l'ancienne chaussée par une couche épaisse de matériau, éventuellement après rabotage d'une certaine épaisseur de l'ancienne chaussée. Cette solution présente néanmoins quelques inconvénients : réduction du tirant d'air des ouvrages et de la largeur de roulement, présence de seuils en zone urbaine, sans compter la difficulté croissante pour trouver des ressources en granulats proches du chantier.

Le retraitement en place au ciment ou aux liants hydrauliques routiers : cette technique repose sur l'exploitation optimale du "gisement" de matériau représenté par la chaussée à restructurer et sur son retraitement "en place", c'est-à-dire sur le site même.

Elle consiste tout d'abord à défoncer l'ancienne chaussée et à la remettre au profil. Ensuite, on incorpore à ce matériau de base un ciment ou un liant hydraulique routier, éventuellement un correcteur granulométrique, et de l'eau, puis on malaxe l'ensemble

jusqu'à obtention d'un matériau homogène. Enfin, on nivelle et on compacte la nouvelle assise de chaussée, sur laquelle on applique ultérieurement une couche de surface.

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

La technique du renforcement fait appel à des matériaux élaborés et nobles à base de granulats (matériaux non traités, matériaux traités avec un liant bitumineux ou hydraulique).

Dans le cas d'un renforcement en matériaux non traités, dont l'extraction et la fabrication n'ont que peu d'impact en matière économique et environnementale, la technique d'entretien peut être handicapée par les impacts générés :

- par le transport des granulats (un produit pondéreux) de la carrière jusqu'au chantier,
- par le transport des matériaux rabotés, du chantier jusqu'au site de recyclage.

Dans le cas d'un renforcement en matériaux traités avec un liant (bitumineux ou hydraulique), la technique d'entretien peut être handicapée par les impacts générés :

- par la fabrication et le transport du liant de l'usine de production jusqu'à la centrale de malaxage,
- par la fabrication et le transport des granulats (un produit pondéreux) de la carrière à la centrale de malaxage,
- par la centrale de malaxage, en particulier dans le cas d'une centrale d'enrobage dont la température de fabrication des mélanges est généralement de l'ordre de 150°C,
- par le transport des matériaux traités de la centrale de malaxage jusqu'au chantier,
- par le transport des matériaux rabotés (un produit pondéreux) du chantier jusqu'au site de recyclage.

La technique du retraitement des chaussées en place aux liants hydrauliques ne nécessite, en général, que l'apport 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 matériaux élaborés.

Ainsi, en fonction du contexte propre à chaque projet (distance carrière-centrale, distance centrale-chantier ou 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 CO₂) entre la technique de retraitement en place des chaussées et la technique de renforcement.

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 Retraitement en place des chaussées ou renforcement est la plus adaptée sur le plan économique ou environnemental.

Cette méthode de comparaison prend en compte les impacts de fabrication (liant, granulats), de transport (liant, granulats, matériaux rabotés excédentaires) et de mise en oeuvre des matériaux (matériau retraité, matériaux élaborés). Elle ne prend pas en compte la couche de surface qui est supposée, dans ce document, identique dans les deux techniques (même nature et même épaisseur).

En outre, elle n'intègre pas certains facteurs qui auraient avantagé la technique de retraitement en place des chaussées et qui sont : le coût de mise en décharge des matériaux 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 (Énergie et CO₂) 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 réhabilitation des structures routières.

Joseph ABDO
Directeur délégué Routes - Cimbéton



Sommaire

I - Principes fondamentaux de la méthode graphique	9
1.1 - Les 3 graphiques comparatifs	10
1.1.1 - Le graphique Comparaison Economique	10
1.1.2 - Le graphique Comparaison Environnementale - Indicateur Energie	10
1.1.3 - Le graphique Comparaison Environnementale - Indicateur CO ₂	11
1.2 - Le découpage en 2 zones comparatives	11
1.2.1 - La Zone 1	12
1.2.2 - La Zone 2	13
1.3 - Etude de la Zone 1 - Retraitement des chaussées en place	15
1.3.1 - Quadrant 1	15
1.3.2 - Quadrant 2	16
1.3.3 - Quadrant 3	18
1.3.4 - Quadrant 4	19
1.4 - Etude de la Zone 2 - Renforcement	20
1.4.1 - Quadrant 5	20
1.4.2 - Quadrant 6	21
1.4.3 - Quadrant 7	22
1.4.4 - Quadrant 8	23
1.5 - Conclusion	24
<hr/>	
2 - Comparaison économique	25
2.1 - Etude de la Zone 1 - Retraitement des chaussées en place	26
2.1.1 - Quadrant 1	26
2.1.2 - Quadrant 2	27
2.1.3 - Quadrant 3	28
2.1.4 - Quadrant 4	29
2.2 - Etude de la Zone 2 - Renforcement	30
2.2.1 - Quadrant 5	30
2.2.2 - Quadrant 6	31
2.2.3 - Quadrant 7	32
2.2.4 - Quadrant 8	33
2.3 - Conclusion	33

3 - Comparaison environnementale - Indicateur Energie	37
3.1 - Etude de la Zone 1 - Retraitement des chaussées en place	38
3.1.1 - Quadrant 1	38
3.1.2 - Quadrant 2	39
3.1.2.1 - L'Energie transport du liant	40
3.1.2.2 - L'Energie de fabrication du liant	41
3.1.3 - Quadrant 3	41
3.1.4 - Quadrant 4	42
3.2 - Etude de la Zone 2 - Renforcement	43
3.2.1 - Quadrant 5	43
3.2.2 - Quadrant 6	44
3.2.3 - Quadrant 7	45
3.2.4 - Quadrant 8	46
3.3 - Conclusion	47

4 - Comparaison environnementale - Indicateur CO₂	52
4.1 - Etude de la Zone 1 - Retraitement des chaussées en place	53
4.1.1 - Quadrant 1	53
4.1.2 - Quadrant 2	54
4.1.2.1 - L'impact CO ₂ transport du liant	55
4.1.2.2 - L'impact CO ₂ de fabrication du liant	56
4.1.3 - Quadrant 3	56
4.1.4 - Quadrant 4	58
4.2 - Etude de la Zone 2 - Renforcement	58
4.2.1 - Quadrant 5	58
4.2.2 - Quadrant 6	60
4.2.3 - Quadrant 7	61
4.2.4 - Quadrant 8	62
4.3 - Conclusion	62

5 - Conclusion générale	67
--------------------------------	-----------

Principes fondamentaux de la méthode graphique de comparaison

1.1 - Les 3 graphiques comparatifs

- I.1.1 - Le graphique Comparaison Economique
- I.1.2 - Le graphique Comparaison Environnementale
Indicateur Energie
- I.1.3 - Le graphique Comparaison Environnementale
Indicateur CO₂

1.2 - Le découpage en 2 zones comparatives

- I.2.1 - La Zone 1
- I.2.2 - La Zone 2

1.3 - Étude de la Zone 1

Retraitement des chaussées en place

- I.3.1 - Quadrant 1
- I.3.2 - Quadrant 2
- I.3.3 - Quadrant 3
- I.3.4 - Quadrant 4

1.4 - Étude de la Zone 2 - Renforcement

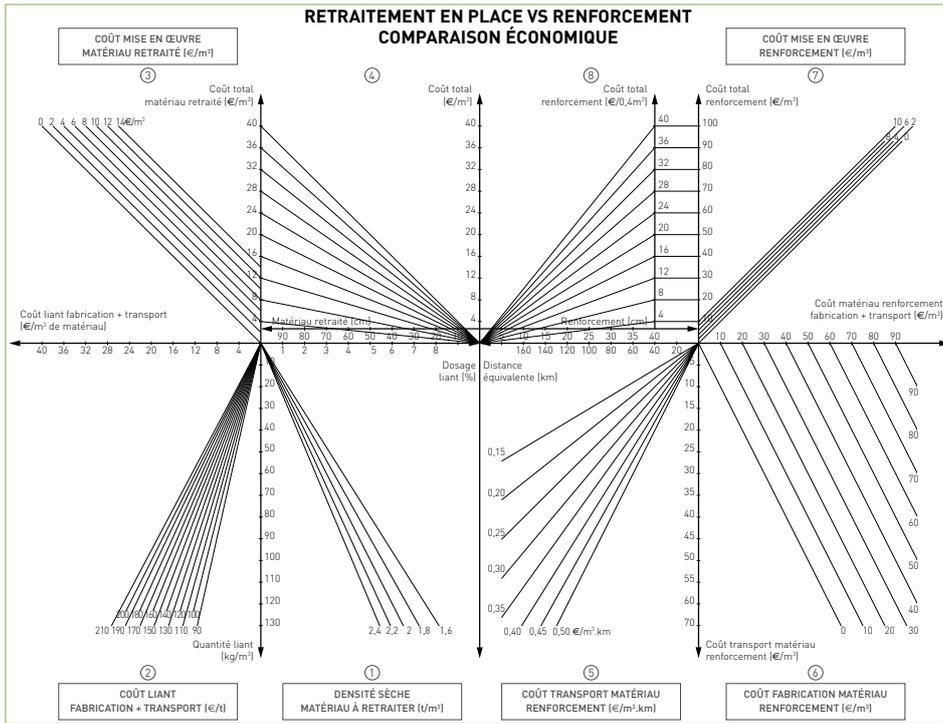
- I.4.1 - Quadrant 5
- I.4.2 - Quadrant 6
- I.4.3 - Quadrant 7
- I.4.4 - Quadrant 8

1.5 - Conclusion

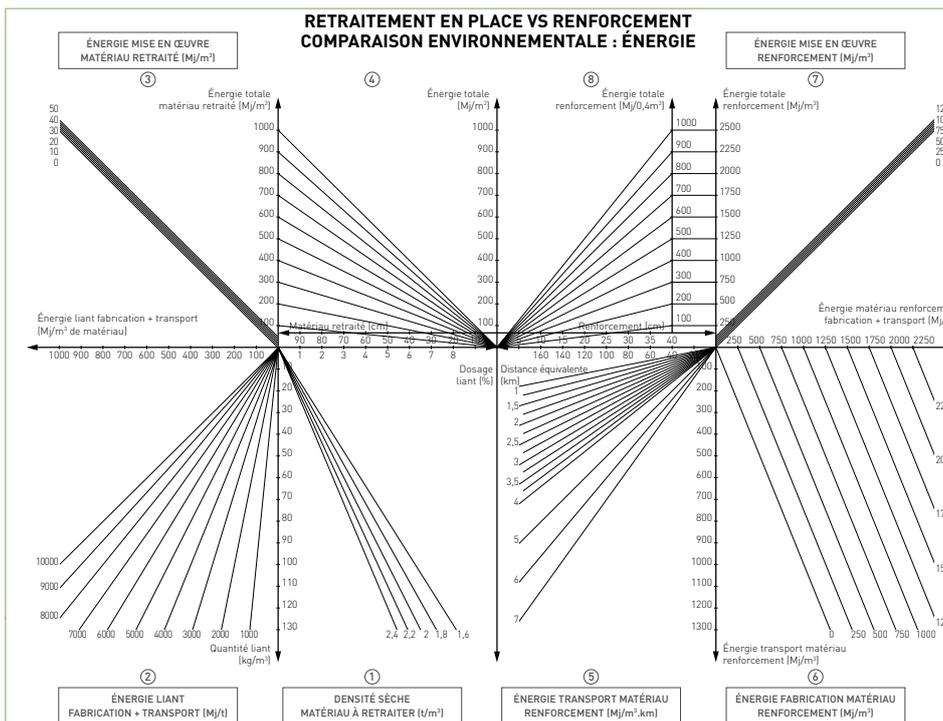
1.1 - Les 3 graphiques comparatifs

Ce document comprend 3 différents graphiques.

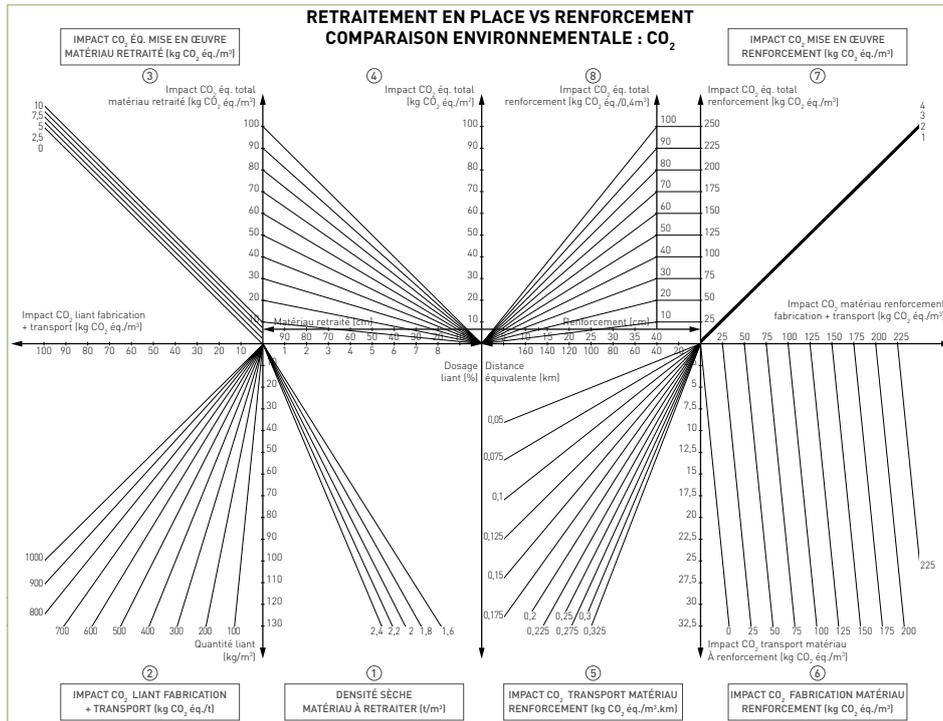
1.1.1 - Le graphique Comparaison Economique



1.1.2 - Le graphique Comparaison Environnementale - Indicateur Energie

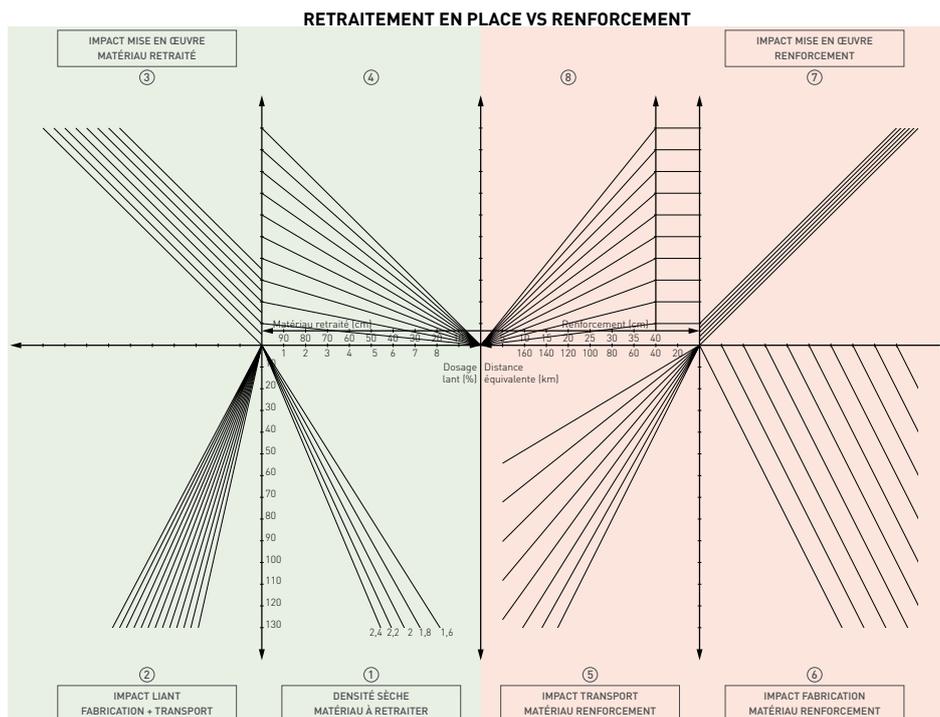


1.1.3 - Le graphique Comparaison Environnementale - Indicateur CO₂



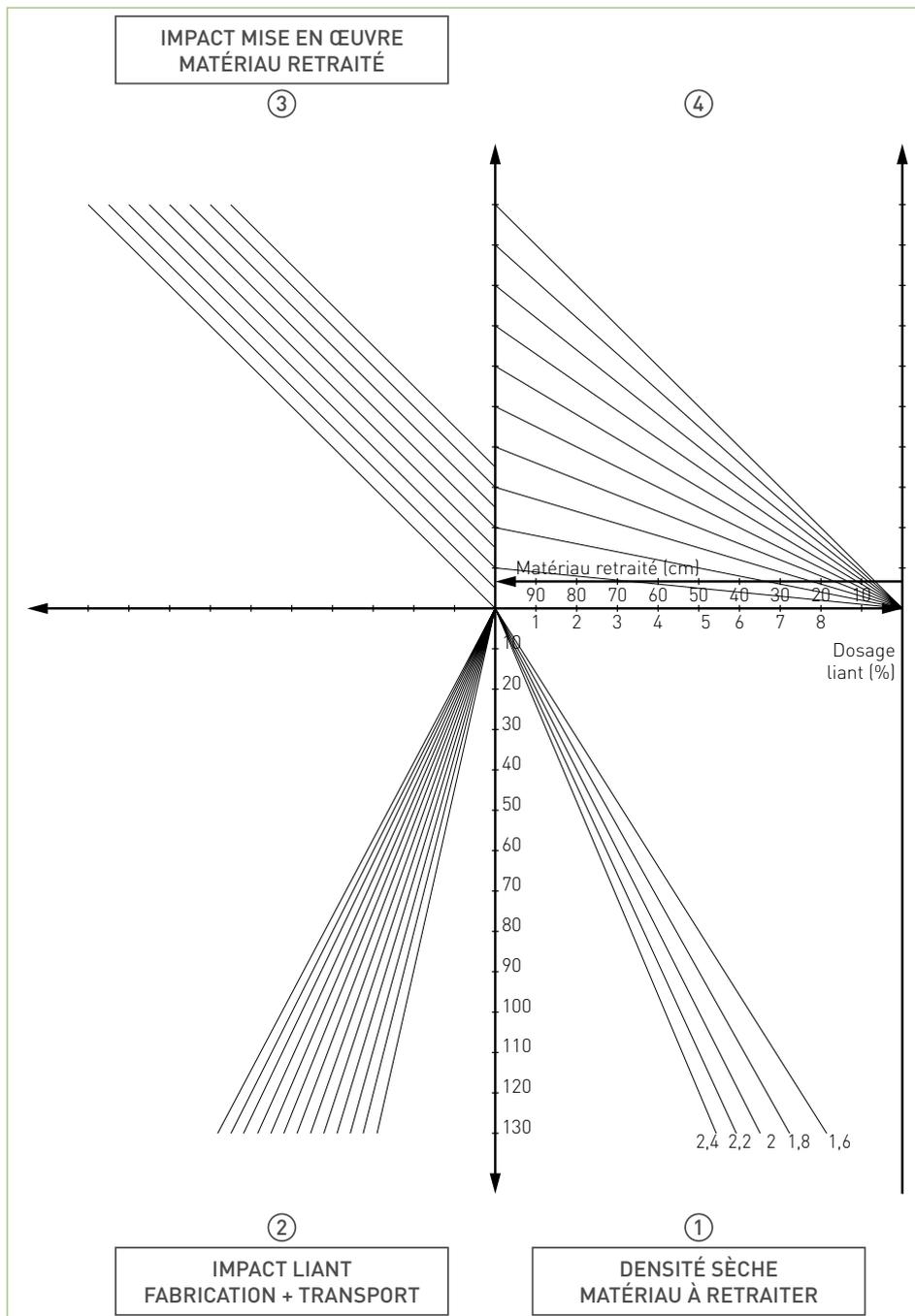
1.2 - Le découpage en 2 zones comparatives

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 Retraitement des matériaux en place**.

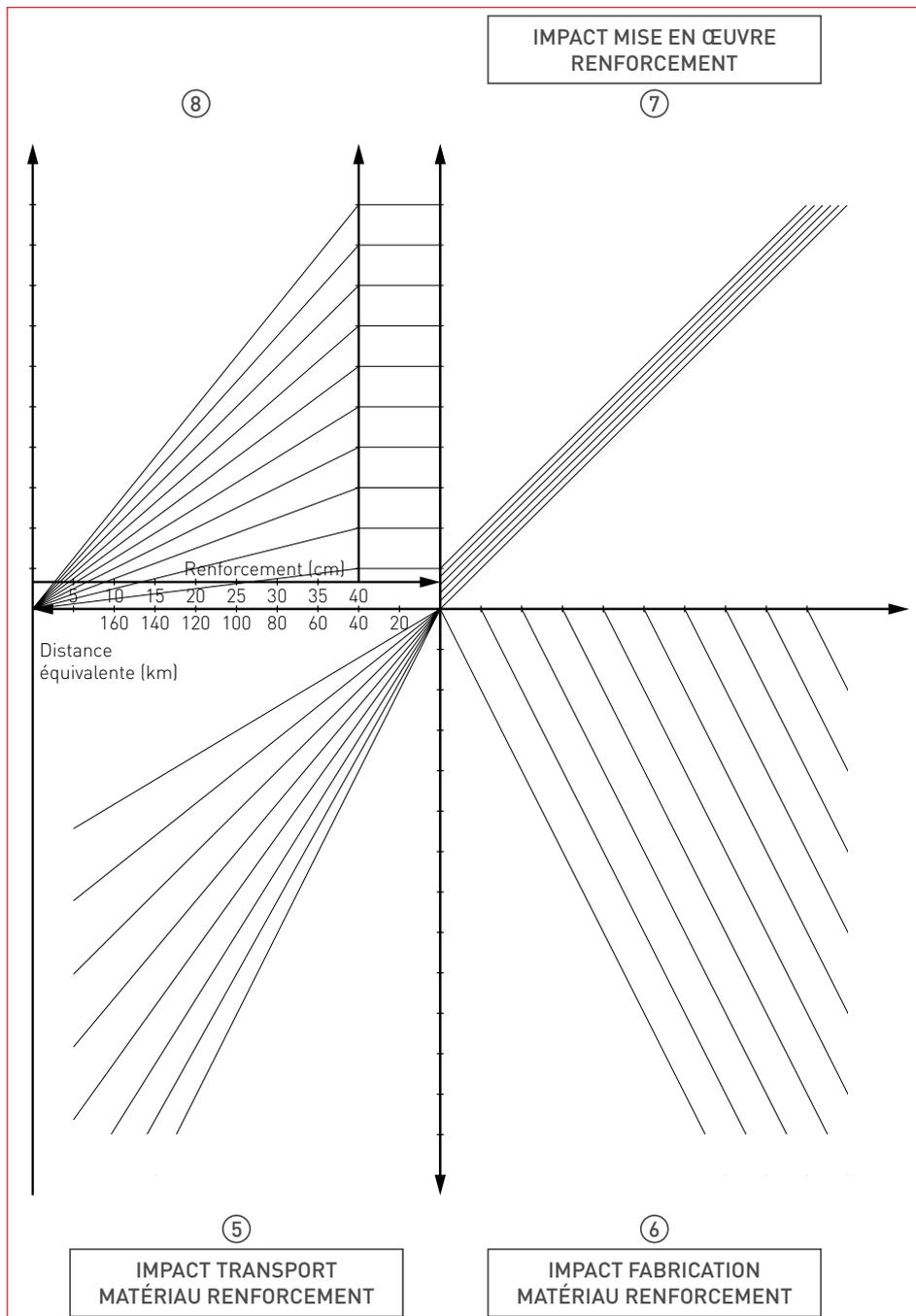


Dans cette zone, le paramètre spécifique et prépondérant est le liant, qu'il faut fabriquer, transporter jusqu'au chantier où le processus de mise en oeuvre (épandage en petites quantités, de l'ordre de 30 kg/m², malaxage, arrosage, nivellement, compactage et cure) est mené jusqu'à son terme. Ceci permet d'obtenir un matériau traité pour une utilisation en couche d'assises (impact évalué au m² de matériau traité).

Dans la Zone 1, il est donc judicieux 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 de Renforcement**.



Dans cette zone, le paramètre prépondérant est la distance équivalente, qui est soit la somme des distances carrière-chantier et chantier-décharge (cas d'un renforcement avec un matériau non traité), soit la somme des distances carrière-centrale, usine liant-centrale, centrale-chantier et chantier-décharge (cas d'un renforcement avec un matériau traité).

En effet, la technique de renforcement avec un matériau non traité nécessite :

- l'extraction et la fabrication des granulats,
- le transport des granulats (matériau pondéreux), de la carrière jusqu'au chantier,
- la mise en oeuvre des granulats (nivellement, arrosage, compactage),
- et éventuellement la mise en décharge des matériaux rabotés.

En outre, la technique de renforcement avec un matériau traité nécessite :

- l'extraction et la fabrication des granulats,
- le transport des granulats (matériau pondéreux) de la carrière jusqu'à la centrale de malaxage,
- la fabrication du liant,
- le transport du liant de l'usine de fabrication jusqu'à la centrale de malaxage,
- la fabrication du matériau traité à la centrale de malaxage,
- le transport du matériau traité de la centrale de malaxage jusqu'au chantier,
- et enfin la mise en oeuvre du matériau traité (nivellement, arrosage, compactage),
- et éventuellement la mise en décharge des matériaux rabotés.

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



1.3 - Etude de la Zone 1 - Retraitement des chaussées en place

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 matériau pour obtenir les performances recherchées du matériau retraité, 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 les structures de chaussées (figure 1).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît la densité sèche du matériau 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 matériau qu'il faut prévoir afin de retraiter ce matériau.

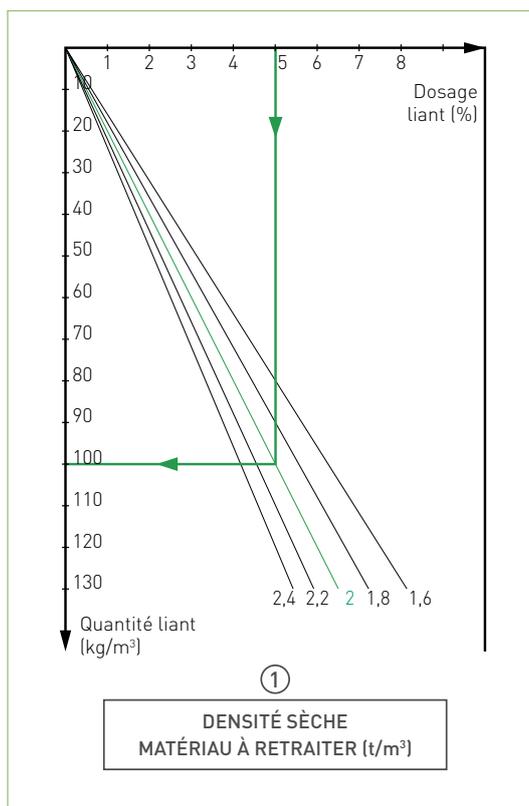


Figure 1 : zone matériau retraité - Quadrant densité sèche matériau

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

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

Tableau 1 : densité sèche de différents types de matériaux

■ 1.3.2 - Quadrant 2

La quantité de liant pour un m³ de matériau 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 CO₂).

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 CO₂).

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 m³ de matériau retraité.

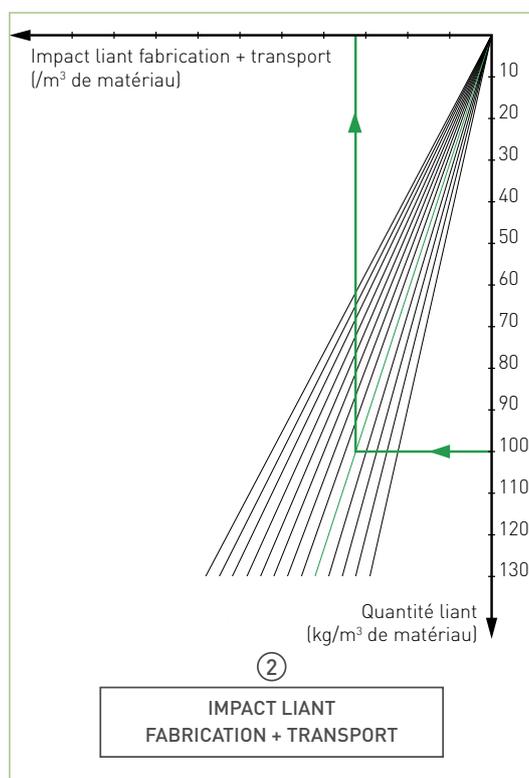


Figure 2 : zone matériau retraité - Quadrant impact liant

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 m³ de matériau retraité.

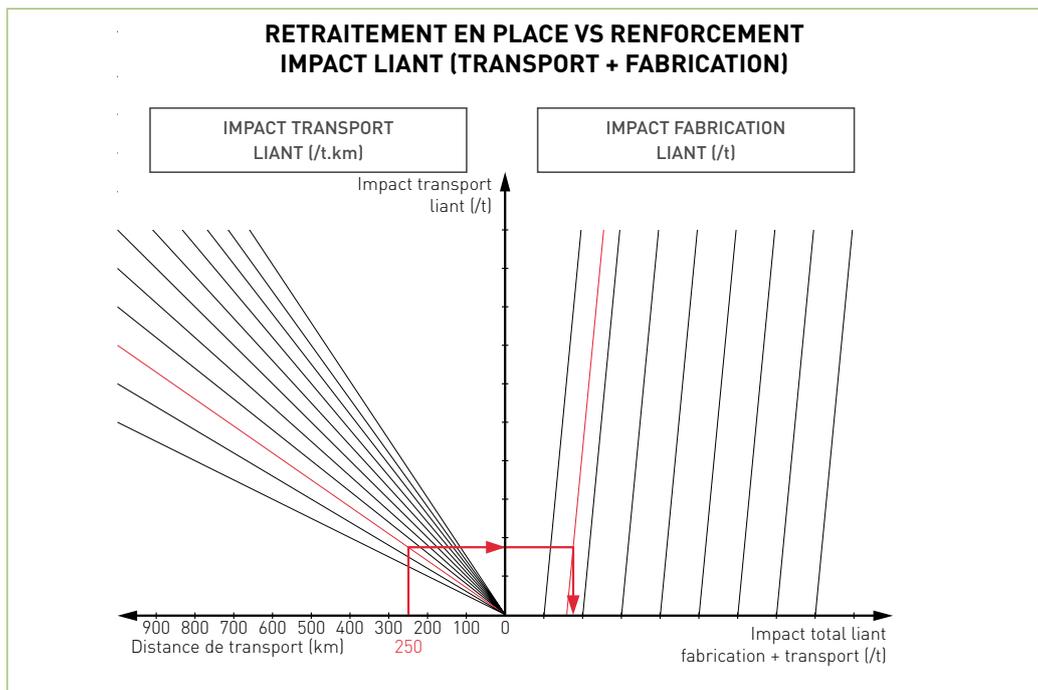


Figure 3 : diagramme d'évaluation de l'impact du liant (fabrication + transport)



■ 1.3.3 - Quadrant 3

Il concerne l'impact de la mise en oeuvre.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses, relatives aux impacts de l'atelier de mise en oeuvre (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 m³ de matériau retraité 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 oeuvre : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 3, l'impact cumulé total d'un m³ de matériau retraité.

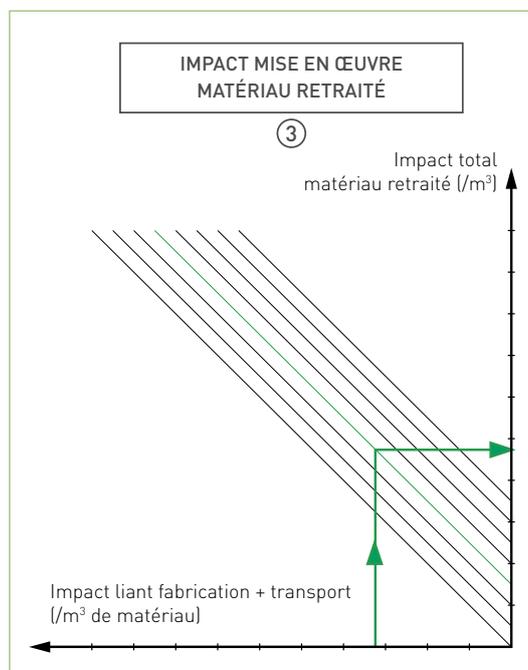


Figure 4 : zone matériau retraité - Quadrant impact mise en oeuvre

■ 1.3.4 - Quadrant 4

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

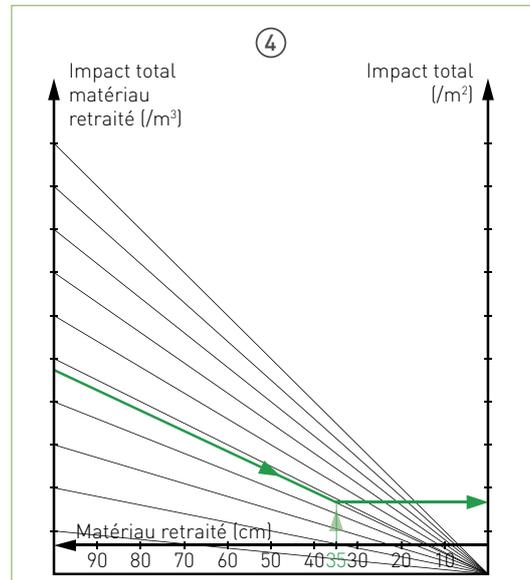


Figure 5 : zone matériau retraits - Quadrant impact total (/m³ et /m²)



1.4 - Etude de la Zone 2 - Renforcement

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 granulats, de la carrière au chantier si le renforcement se fait avec un matériau non traité,
- le matériau traité, de la centrale de malaxage au chantier si le renforcement se fait avec un matériau traité.
- les matériaux rabotés (dont le volume est supposé, dans ce document, équivalent à celui des matériaux rapportés), du chantier à la décharge.

Les droites de ce Quadrant passent par l'origine et représentent les impacts économiques ou environnementaux (Energie ou CO₂) de différents modes de transports usuels.

Pour un projet donné, connaissant la distance carrière-chantier ou centrale de malaxage-chantier ainsi que la distance chantier-décharge (ou site de recyclage), on définit une distance de transport équivalente, somme des distances carrière-chantier ou centrale-chantier et chantier-décharge (ou site de recyclage). Cette distance équivalente déterminée, connaissant l'impact transport au m³.km, ce Quadrant permet la lecture de l'impact transport d'un m³ de matériaux (matériaux rapportés + matériaux rabotés), comme l'indique la figure 6.

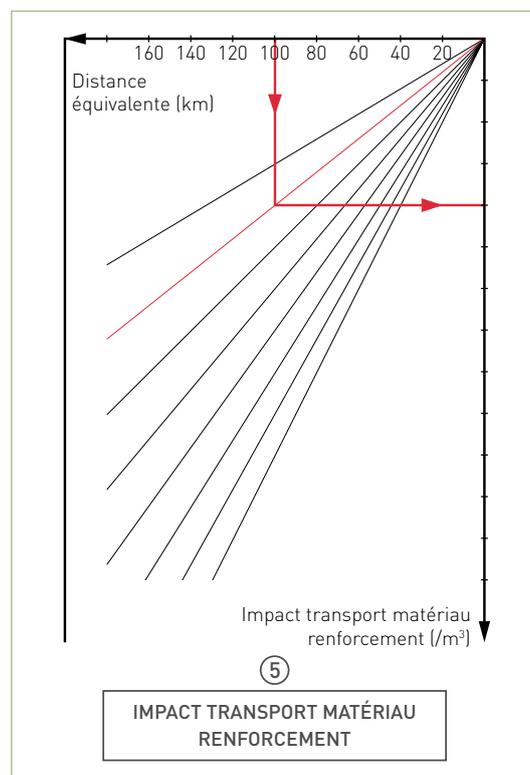


Figure 6 : zone renforcement - Quadrant impact transport matériaux

■ 1.4.2 - Quadrant 6

Il mesure l'impact de l'extraction et de la fabrication d'un m³ de matériaux.

Si le renforcement est envisagé avec un matériau non traité, ce Quadrant représente alors l'impact d'extraction et de fabrication d'un m³ de matériau, le transport ayant été comptabilisé dans le Quadrant 5.

En revanche, si le renforcement est envisagé avec un matériau traité en centrale (grave traitée ou bitume, grave hydraulique), le Quadrant 6 représente alors la somme des impacts générés par :

- la fabrication et le transport du liant de l'usine de production jusqu'à la centrale de malaxage,
- la fabrication et le transport des granulats de la carrière à la centrale de malaxage,
- la centrale de malaxage.

(les transports centrale-chantier et chantier-décharge ayant été comptabilisés dans le Quadrant 5)

Dans ce Quadrant figurent plusieurs droites parallèles, correspondant aux impacts de différentes natures de matériaux (matériau non traité, matériau traité au bitume, matériau traité au ciment, matériau traité au liant hydraulique routier,...).

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, de fabrication et de transport des constituants du matériau (granulats, liant), le Quadrant 6 permet d'évaluer, de façon cumulée :

- l'impact de mise en décharge d'un m³ de matériau raboté,
- l'impact d'extraction, de transport des constituants et de fabrication d'un m³ de matériau.

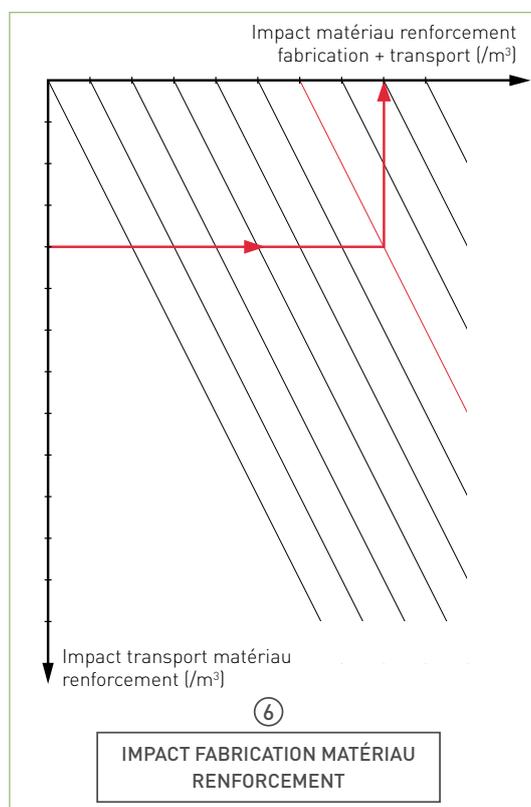


Figure 7 : zone renforcement - Quadrant impact extraction, transport des constituants et fabrication matériau

■ 1.4.3 - Quadrant 7

Il mesure l'impact de la mise en oeuvre des matériaux rapportés et, le cas échéant, l'impact du rabotage de l'ancienne structure.

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

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 oeuvre, le Quadrant 7 permet d'évaluer, de façon cumulée, l'impact total de mise en décharge d'un m³ de matériau raboté et d'extraction, fabrication, transport et mise en oeuvre d'un m³ de matériau rapporté.

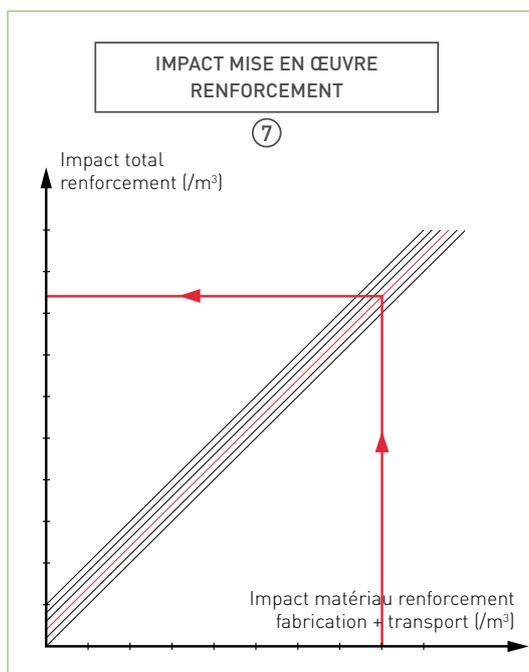


Figure 8 : zone renforcement - Quadrant impact mise en oeuvre matériau

■ 1.4.4 - Quadrant 8

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'impact au m³ de matériau à l'impact au m² de matériau (figure 9).

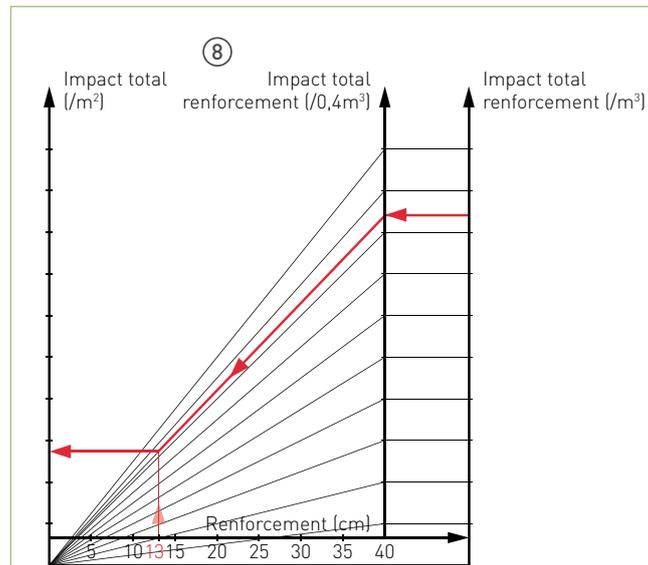


Figure 9 : zone renforcement - Quadrant impact total (/m³ et /m²)

Le renforcement d'une chaussée peut prendre plusieurs formes possibles : soit une couche granulaire non traitée (voiries à faible trafic) dont l'épaisseur peut atteindre 30 cm, soit une grave traitée au liant hydraulique (routes à fort trafic) dont l'épaisseur peut atteindre 25 cm, soit un matériau bitumineux dont l'épaisseur peut varier entre 10 et 20 cm, en fonction de l'intensité du trafic.

Dans ce Quadrant 8, nous allons donc être amenés à étudier des renforcements dont l'épaisseur peut varier de 10 à 40 cm, en fonction du matériau et du trafic.

Pour cela, nous avons volontairement présenté l'axe Renforcement sur la partie 0 - 40 cm, et nous avons opéré une contraction de la partie de l'axe entre 40 cm et 100 cm (zone non utile). Pour que les calculs puissent se faire facilement et correctement, nous avons donc dessiné deux axes d'ordonnées : l'un pointé à 100 cm, l'autre à 40 cm, entre lesquels une transformation par réduction des valeurs a été opérée. Ceci explique la notation sur l'axe des ordonnées faisant passer d'euros par m³ à celui en euros par 0,4 m³.

Cette construction géométrique est valable pour les trois paramètres de comparaison : Économie, Énergie et CO₂.

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, au m^2 de chaussée, de la technique de Retraitement des chaussées en place et ceux de la technique de Renforcement (figure 10).

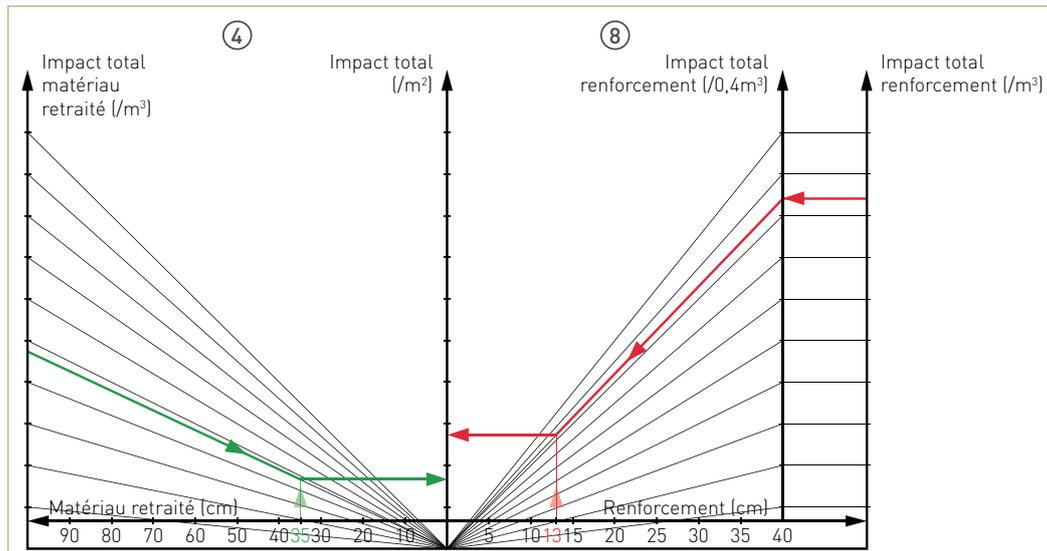


Figure 10 : diagramme de comparaison des impacts

Comparaison économique

2.1 - Etude de la Zone 1

Retraitement des chaussées en place

- 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 - Renforcement

- 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 - Retraitement des chaussées en place

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 matériau pour obtenir les performances recherchées du matériau retraité, 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 les structures de chaussées (figure 11).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît la densité sèche d'un matériau 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 matériau qu'il faut prévoir afin de retraiter ce matériau.

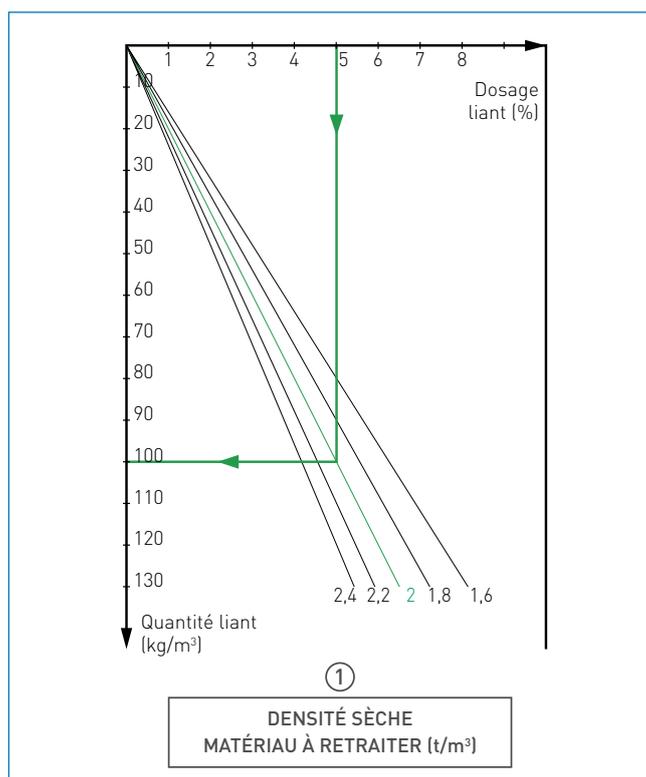


Figure 11 : zone matériau retraité - Quadrant densité sèche matériau

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
Limon	1,6 - 1,8
Argile	1,7 - 1,8
Sable	1,4 - 1,9
sable homéométrique	1,4 - 1,6
sable gradué	1,6 - 1,9
Sol graveleux	1,8 - 2,2

Tableau 2 : densité sèche de différents types de matériaux

■ 2.1.2 - Quadrant 2

La quantité de liant pour un m³ de matériau 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 12).

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 m³ de matériau retraité.

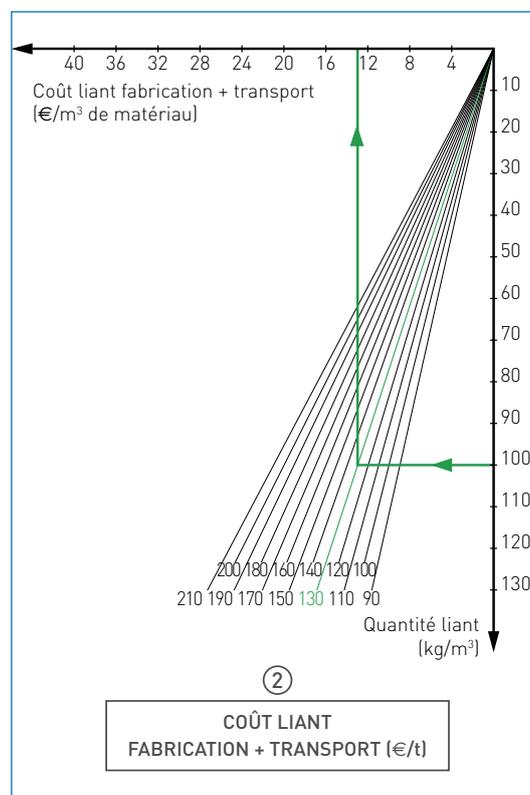


Figure 12 : zone matériau retraité - Quadrant coût liant

■ 2.1.3 - Quadrant 3

Il concerne l'impact de la mise en oeuvre.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses relatives aux coûts de l'atelier de mise en oeuvre (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 13).

Le coût du liant au m³ de matériau retraité 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 oeuvre : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 3, le coût cumulé total d'un m³ de matériau retraité.

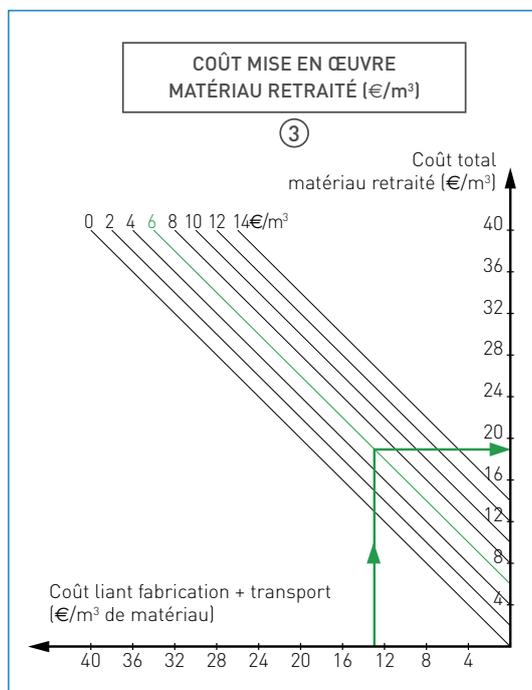


Figure 13 : zone matériau retraité - Quadrant coût mise en oeuvre

2.1.4 - Quadrant 4

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), du coût au m³ de matériau retraité au coût au m² de matériau retraité (figure 14).

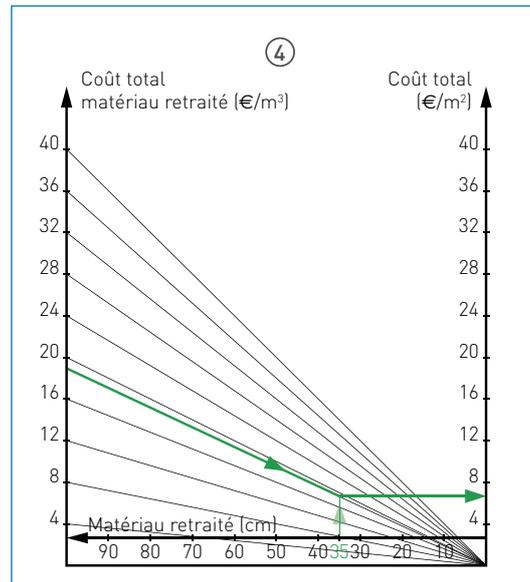


Figure 14 : zone matériau retraité - Quadrant coût total (€/m³ et €/m²)



2.2 - Etude de la Zone 2 – Renforcement

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 granulats, de la carrière au chantier si le renforcement se fait avec un matériau non traité,
- le matériau traité, de la centrale de malaxage au chantier si le renforcement se fait avec un matériau traité.
- les matériaux rabotés (dont le volume est supposé, dans ce document, équivalent à celui des matériaux rapportés), du chantier à la décharge.

Les droites de ce Quadrant passent par l'origine et représentent les coûts (exprimés en €/m³.km) de différents modes de transports usuels.

Pour un projet donné, connaissant la distance carrière-chantier ou centrale de malaxage-chantier ainsi que la distance chantier-décharge, on définit une distance de transport équivalente, somme des distances carrière-chantier ou centrale-chantier et chantier-décharge. Cette distance équivalente déterminée, connaissant le coût transport au m³.km, ce Quadrant permet la lecture du coût transport d'un m³ de matériaux (matériaux rapportés + matériaux rabotés), comme l'indique la figure 15.

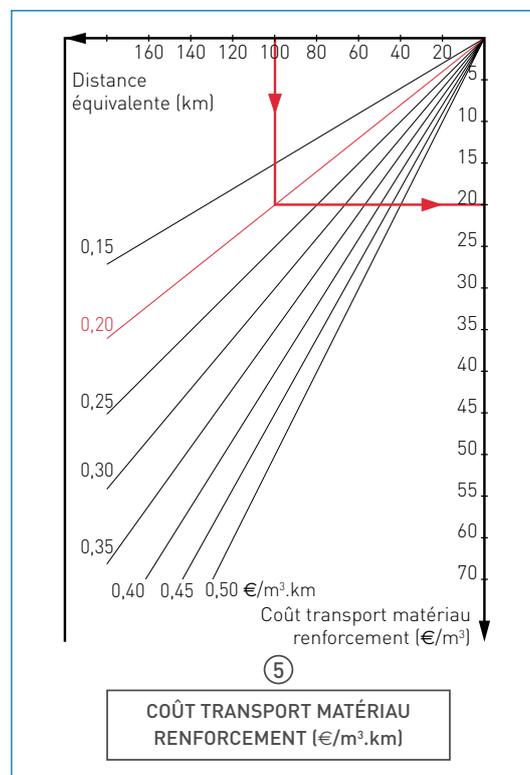


Figure 15 : zone renforcement - Quadrant coût transport matériau

■ 2.2.2 - Quadrant 6

Il mesure le coût de l'extraction et de la fabrication d'un m³ de matériaux.

Si le renforcement est envisagé avec un matériau non traité, ce Quadrant représente alors le coût d'extraction et de fabrication d'un m³ de matériau, le transport ayant été comptabilisé dans le Quadrant 5. En revanche, si le renforcement est envisagé avec un matériau traité en centrale (grave traitée ou bitume, grave hydraulique), le Quadrant 6 représente alors la somme des coûts générés par :

- la fabrication et le transport du liant de l'usine de production jusqu'à la centrale de malaxage,
- la fabrication et le transport des granulats de la carrière à la centrale de malaxage,
- la centrale de malaxage.

(les transports centrale-chantier et chantier-décharge ayant été comptabilisés dans le Quadrant 5)

Dans ce Quadrant figurent plusieurs droites parallèles, correspondant aux coûts d'extraction, de transport de constituants (non pris en compte dans le Quadrant 5) et de fabrication d'un m³ de différentes natures de matériaux (matériau non traité, matériau traité au bitume, matériau traité au ciment, matériau traité au liant hydraulique routier,...), exprimés en €/m³ (figure 16).

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.

Le coût transport ayant été déterminé au Quadrant 5 et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, les coûts d'extraction, de fabrication et de transport des constituants du matériau (granulats, liant), le Quadrant 6 permet d'évaluer, de façon cumulée :

- le coût de mise en décharge (ou site de recyclage) d'un m³ de matériau raboté,
- le coût d'extraction, de transport des constituants et de fabrication d'un m³ de matériau.

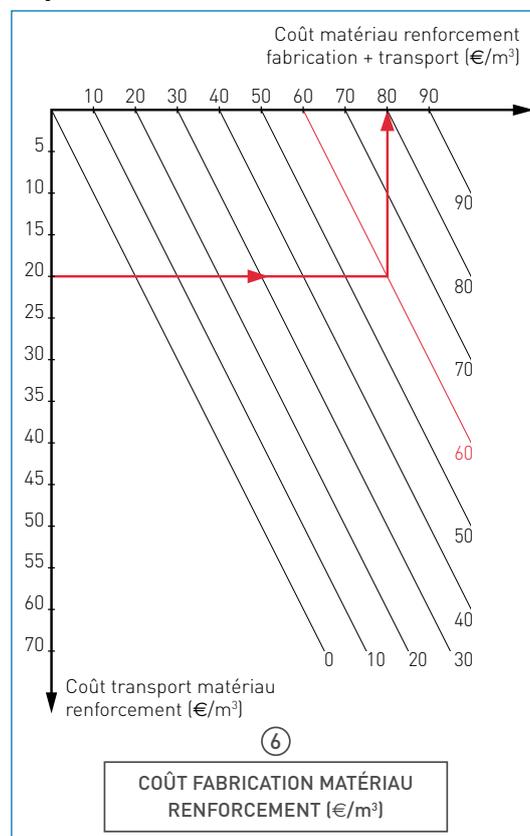


Figure 16 : zone renforcement - Quadrant coût extraction et fabrication matériaux

■ 2.2.3 - Quadrant 7

Il mesure le coût de la mise en oeuvre des matériaux rapportés et, le cas échéant, le coût du rabotage de l'ancienne structure.

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

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 17).

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 oeuvre, le Quadrant 7 permet d'évaluer, de façon cumulée, le coût total de mise en décharge (ou site de recyclage) d'un m³ de matériau raboté et d'extraction, fabrication, transport et mise en oeuvre d'un m³ de matériau rapporté.

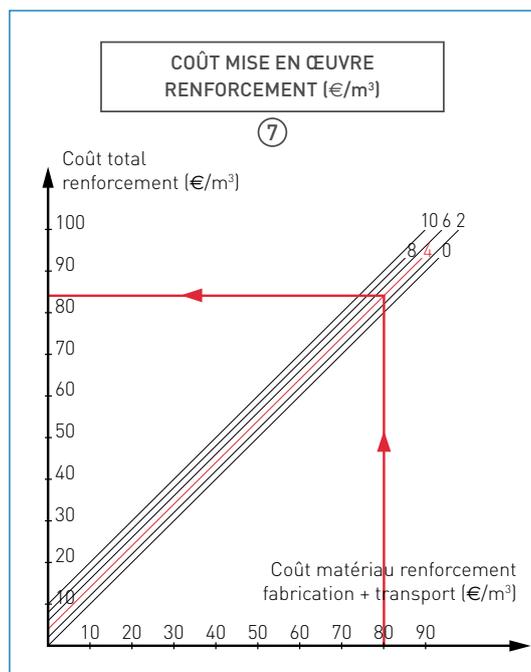


Figure 17 : zone renforcement - Quadrant coût mise en oeuvre matériaux

■ 2.2.4 - Quadrant 8

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), du coût au m³ de renforcement au coût au m² de renforcement (figure 18).

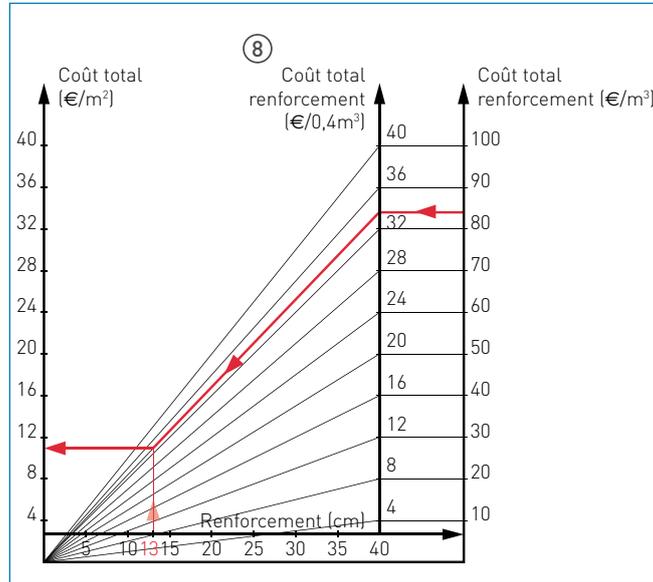


Figure 18 : zone renforcement - Quadrant coût total (€/m² et €/m³)

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 Retraitement des chaussées en place et ceux de la technique de Renforcement, telle qu'illustrée sur le diagramme de la figure 19 et sur le diagramme complet de la page 34.

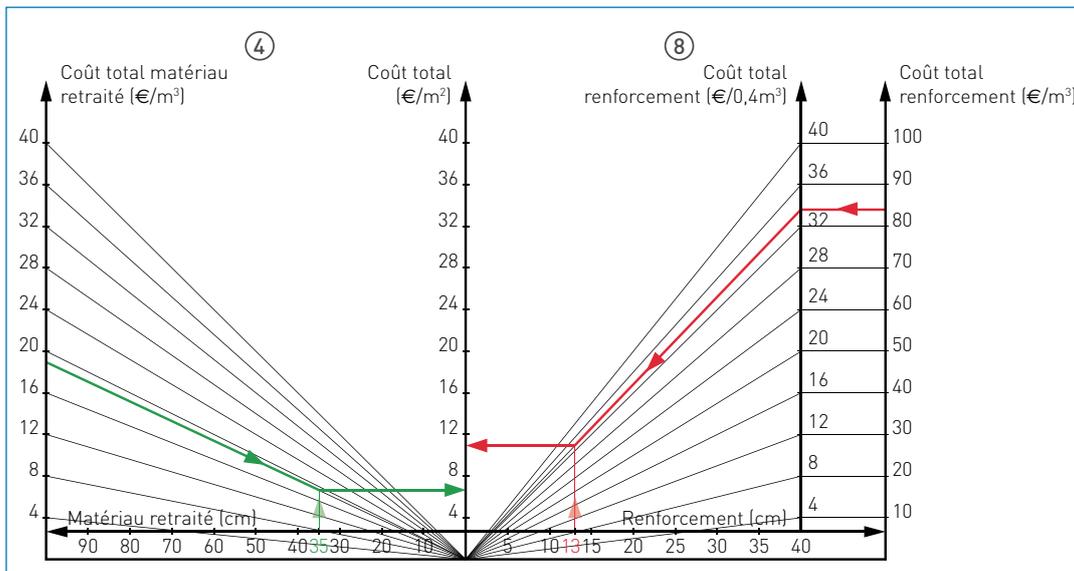
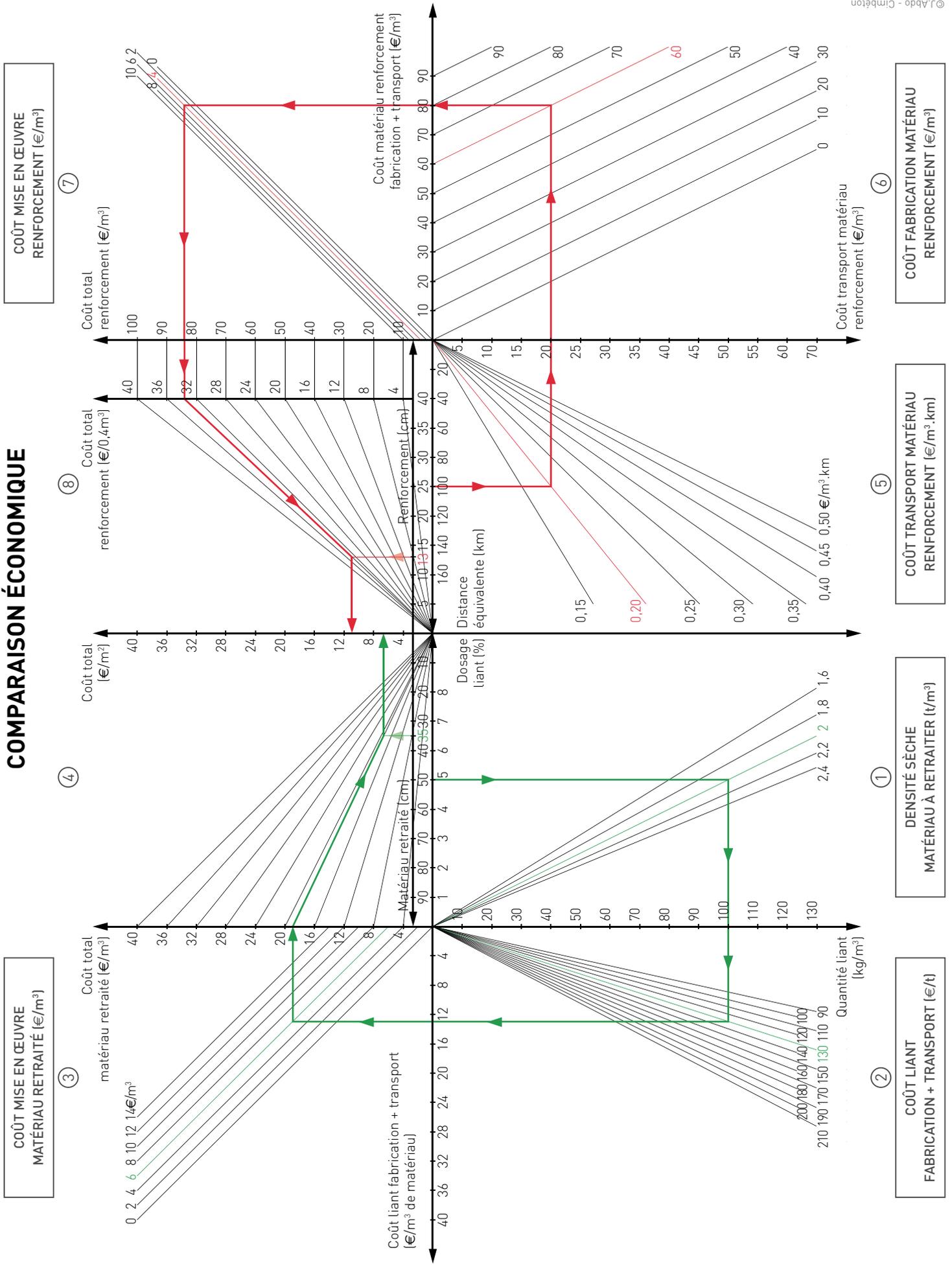


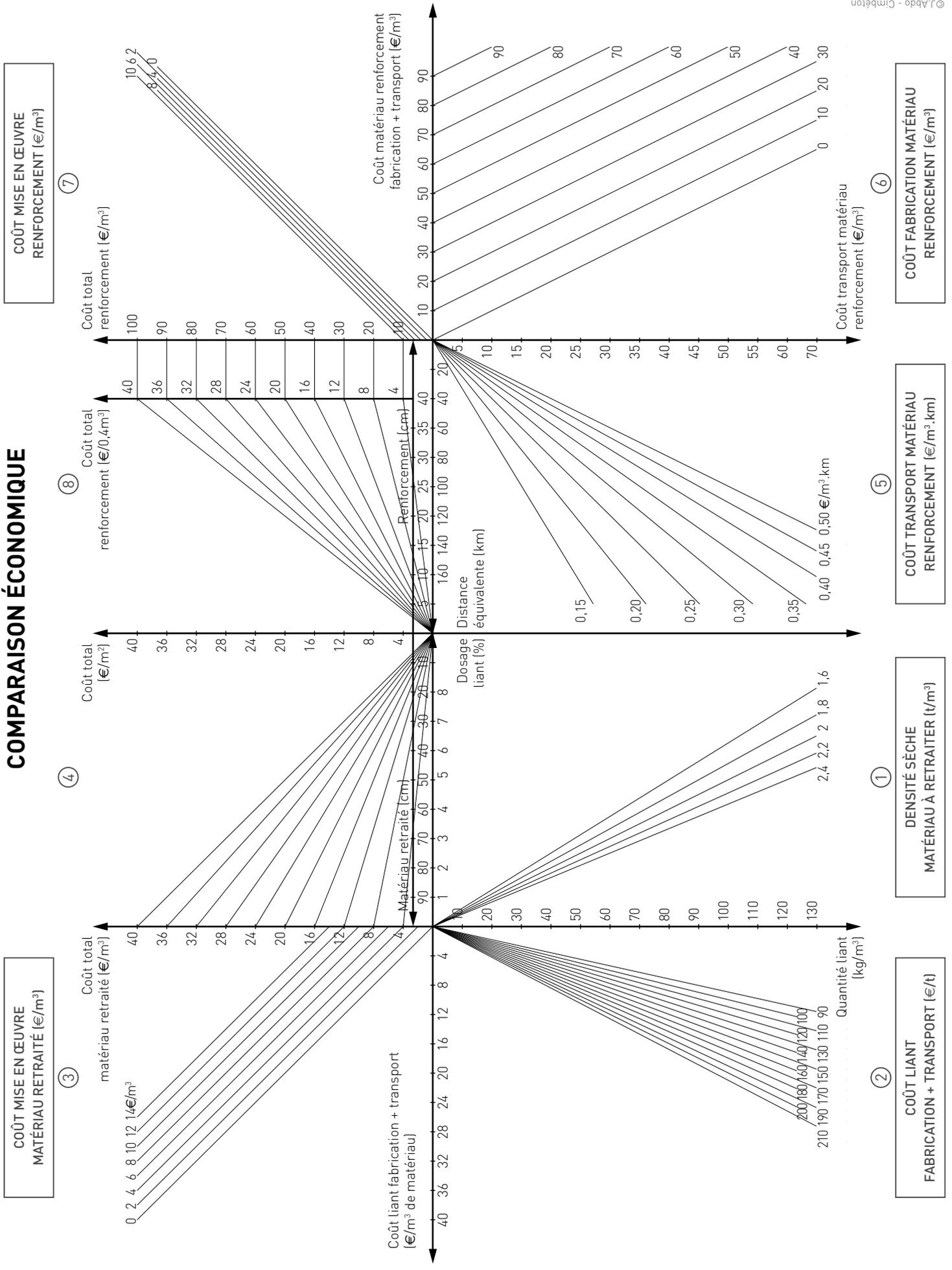
Figure 19 : diagramme de comparaison des coûts.

RETRAIEMENT EN PLACE VS RENFORCEMENT COMPARAISON ÉCONOMIQUE



Pour effectuer une comparaison économique entre la technique de Retraitement des chaussées en place et celle de Renforcement, c'est très simple : il vous suffit de faire une photocopie du graphique vierge de la page 36, d'y intégrer les informations spécifiques à votre étude, puis de lire directement le résultat recherché sur le graphique.

RETRAIEMENT EN PLACE VS RENFORCEMENT COMPARAISON ÉCONOMIQUE



Comparaison environnementale Indicateur Energie

3.1 - Etude de la Zone 1

Retraitement des chaussées en place

3.1.1 - Quadrant 1

3.1.2 - Quadrant 2

3.1.2.1 - L'Energie transport du liant

3.1.2.2 - L'Energie de fabrication du liant

3.1.3 - Quadrant 3

3.1.4 - Quadrant 4

3.2 - Etude de la Zone 2 - Renforcement

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 - Retraitement des chaussées en place

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 m³ de matériau pour obtenir les performances recherchées du matériau retraité, 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 les structures de chaussées (figure 20).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît la densité sèche du matériau 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 m³ de matériau qu'il faut prévoir afin de retraiter ce matériau.

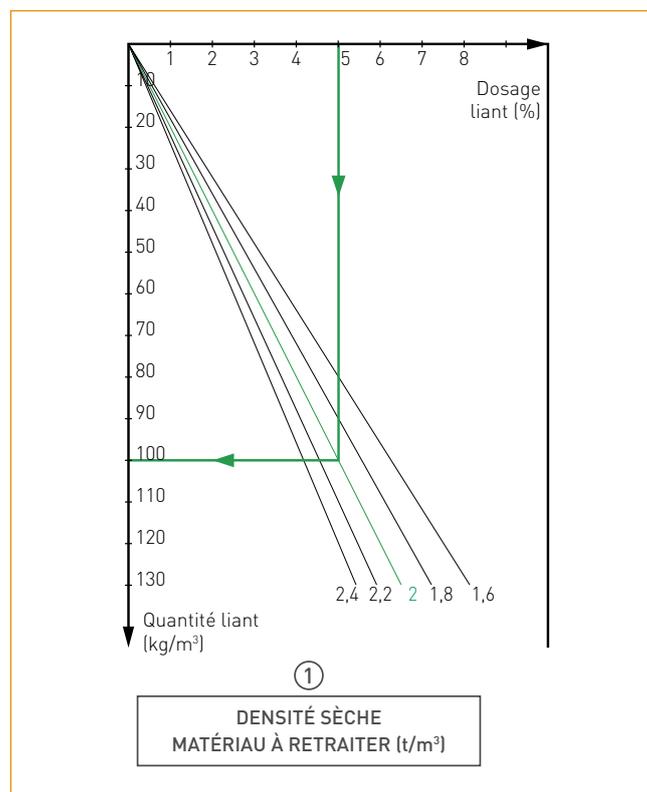


Figure 20 : zone retraitement - Quadrant densité sèche matériau

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

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

Tableau 3 : densité sèche de différents types de matériaux

■ 3.1.2 - Quadrant 2

La quantité de liant pour un m³ de matériau 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 21).

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 m³ de matériau retraité.

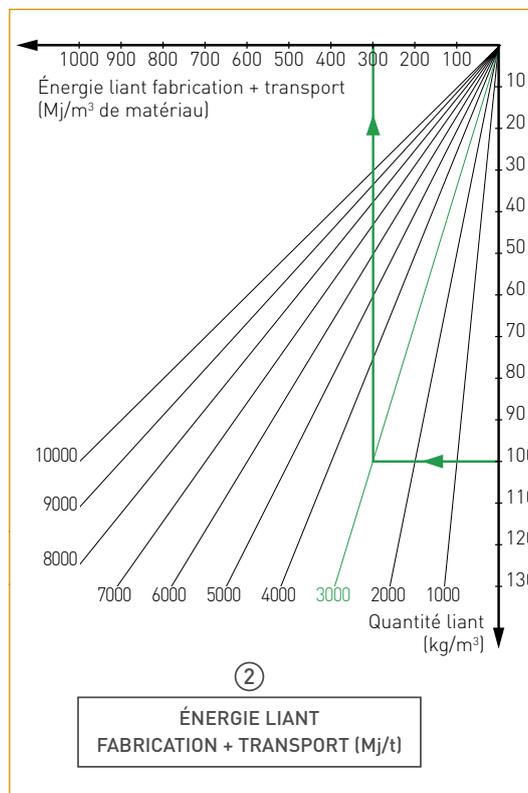


Figure 21 : zone retraitement - Quadrant Energie liant

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 22.

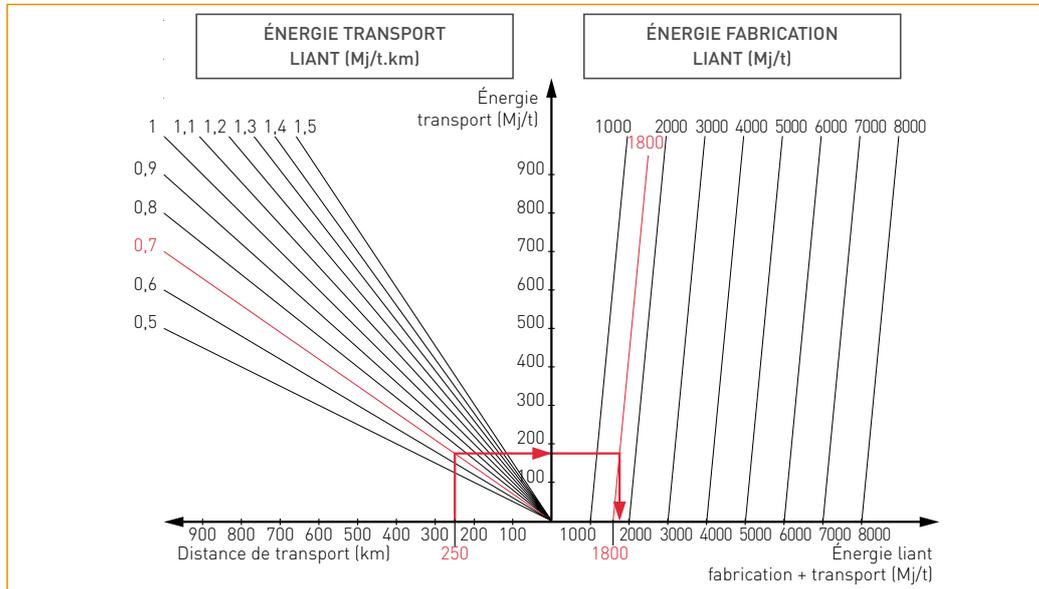


Figure 22 : diagramme d'évaluation de l'Énergie du liant (fabrication + transport)

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 matériau retraité.

3.1.2.1 - L'Énergie transport du liant

Si l'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'Énergie 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.

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

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

■ 3.1.3 - Quadrant 3

Il concerne l'Énergie consommée lors de la mise en oeuvre. Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses relatives aux énergies consommées par l'atelier de mise en oeuvre (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 23).

La valeur de l'Énergie du liant au m³ de matériau retraité 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'Énergie de l'atelier de mise en oeuvre : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 3, l'Énergie cumulée totale par m³ de matériau retraité.

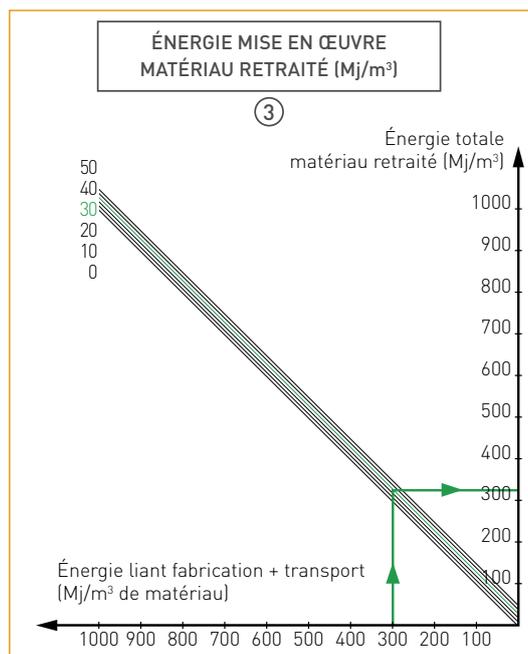


Figure 23 : zone matériau retraité - Quadrant Energie mise en œuvre

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

$$E \text{ (Mj)} = 35 L \text{ (Litre)}$$

Avec :

E : énergie consommée pour la mise en oeuvre d'un m³ de matériau retraité (Mj),

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

L : consommation de fuel par l'ensemble des engins intervenant dans la mise en oeuvre du matériau retraité (pour 1 m³). Les valeurs de L sont données dans le tableau 5.

L	Matériau
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 oeuvre matériau retraité en fonction de la nature du matériau.

■ 3.1.4 - Quadrant 4

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'Énergie au m³ de matériau retraité à l'Énergie au m² de matériau retraité (figure 24).

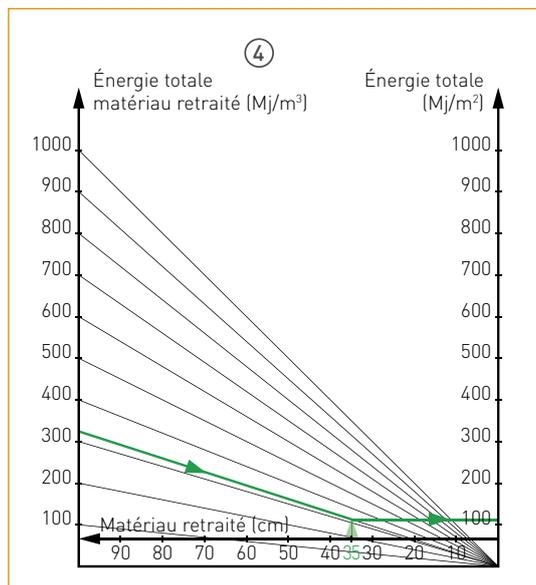


Figure 24 : zone matériau retraité - Quadrant Energie totale (Mj/m³ et MJ/m²)

3.2 - Etude de la Zone 2 – Renforcement

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 de transport des matériaux suivants :

- les granulats, de la carrière au chantier si le renforcement se fait avec un matériau non traité,
- le matériau traité, de la centrale de malaxage au chantier si le renforcement se fait avec un matériau traité.
- les matériaux rabotés (dont le volume est supposé, dans ce document, équivalent à celui des matériaux rapportés), du chantier à la décharge (ou site de recyclage).

Les droites de ce Quadrant passent par l'origine et représentent les énergies (exprimés en $MJ/m^3.km$) de différents modes de transports usuels.

Pour un projet donné, connaissant la distance carrière-chantier ou centrale de malaxage-chantier ainsi que la distance chantier-décharge (ou site de recyclage), on définit une distance de transport équivalente, somme des distances carrière-chantier ou centrale-chantier et chantier-décharge (ou site de recyclage). 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 (matériaux rapportés + matériaux rabotés), comme l'indique la figure 25.

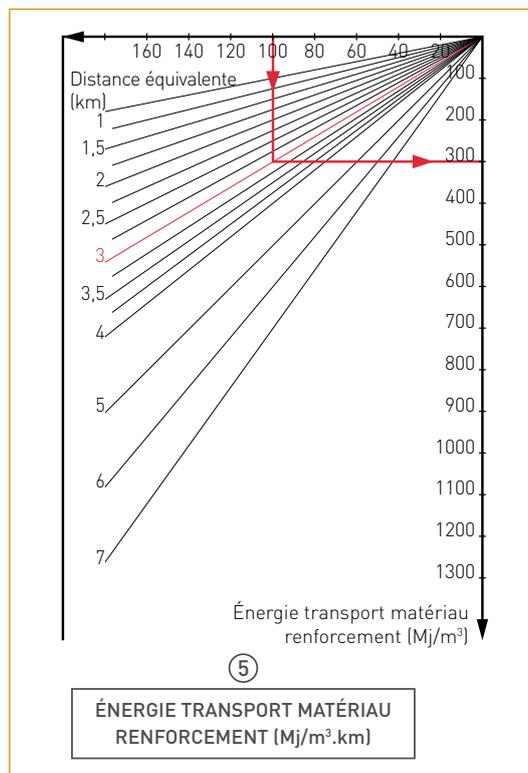


Figure 25: zone renforcement - Quadrant Energie transport matériaux

Si l'on ne connaît pas l'Energie transport au m³.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 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'énergie de l'extraction et de la fabrication d'un m³ de matériaux.

Si le renforcement est envisagé avec un matériau non traité, ce Quadrant représente alors l'énergie d'extraction et de fabrication d'un m³ de matériau, le transport ayant été comptabilisé dans le Quadrant 5.

En revanche, si le renforcement est envisagé avec un matériau traité en centrale (grave traitée ou bitume, grave hydraulique), le Quadrant 6 représente alors la somme des énergies générées par :

- la fabrication et le transport du liant de l'usine de production jusqu'à la centrale de malaxage,
- la fabrication et le transport des granulats de la carrière à la centrale de malaxage,
- la centrale de malaxage.

(les transports centrale-chantier et chantier-décharge ayant été comptabilisés dans le Quadrant 5)

Dans ce Quadrant figurent plusieurs droites parallèles, correspondant aux énergies consommées pour extraire, transporter les constituants non pris en compte dans le Quadrant 5, et fabriquer un m³ de différentes natures de matériaux (matériau non traité, matériau traité au bitume, matériau traité au ciment, matériau traité au liant hydraulique routier,...), exprimés en MJ/m³ (figure 26).

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 énergies qu'elles représentent.

L'énergie transport ayant été déterminée au Quadrant 5 et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, les énergies d'extraction, de fabrication et de transport des constituants du matériau (granulats, liant), le Quadrant 6 permet d'évaluer, de façon cumulée :

- l'énergie de mise en décharge (ou site de recyclage) d'un m³ de matériau raboté,
- l'énergie d'extraction, de transport des constituants et de fabrication d'un m³ de matériau.

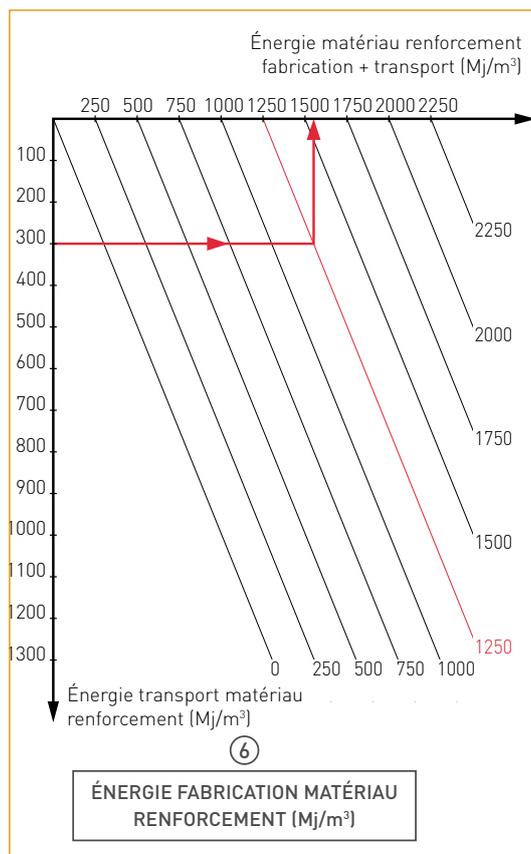


Figure 26 : zone renforcement - Quadrant Energie extraction et fabrication matériaux

■ 3.2.3 - Quadrant 7

Il mesure l'Énergie de la mise en oeuvre des matériaux rapportés et, le cas échéant, l'énergie consommée par le rabotage de l'ancienne structure.

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

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 Energies qu'elles représentent (figure 27).

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 oeuvre, le Quadrant 7 permet d'évaluer, de façon cumulée, l'Énergie totale de mise en décharge (ou site de recyclage) d'un m³ de matériau raboté et d'extraction, fabrication, transport et mise en oeuvre d'un m³ de matériau rapporté.

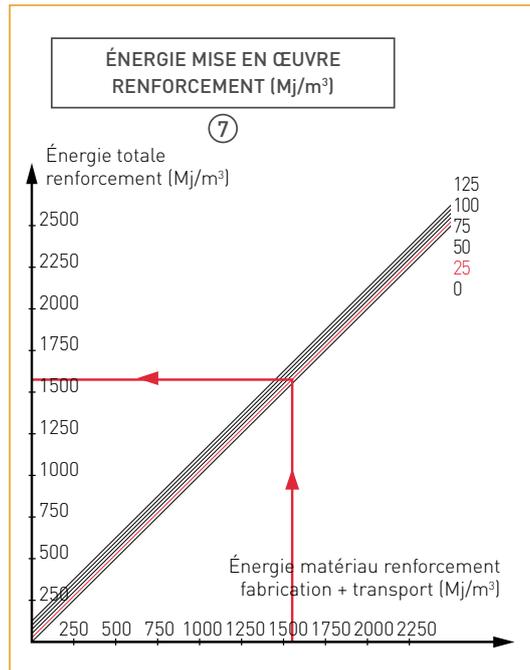


Figure 27 : zone renforcement - Quadrant Energie mise en oeuvre matériaux

■ 3.2.4 - Quadrant 8

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'Energie au m³ à l'Energie au m² de matériau de renforcement (figure 28).

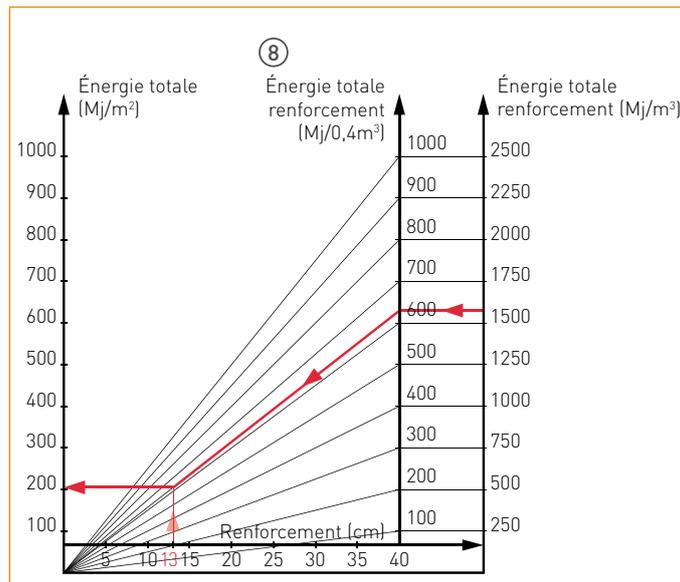


Figure 28 : zone renforcement - Quadrant Energie totale (Mj/m³ et Mj/m²)

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 Retraitement des chaussées en place et de la technique de renforcement telle qu'illustrée sur le diagramme de la figure 29 et, plus globalement, sur le diagramme de la page 48.

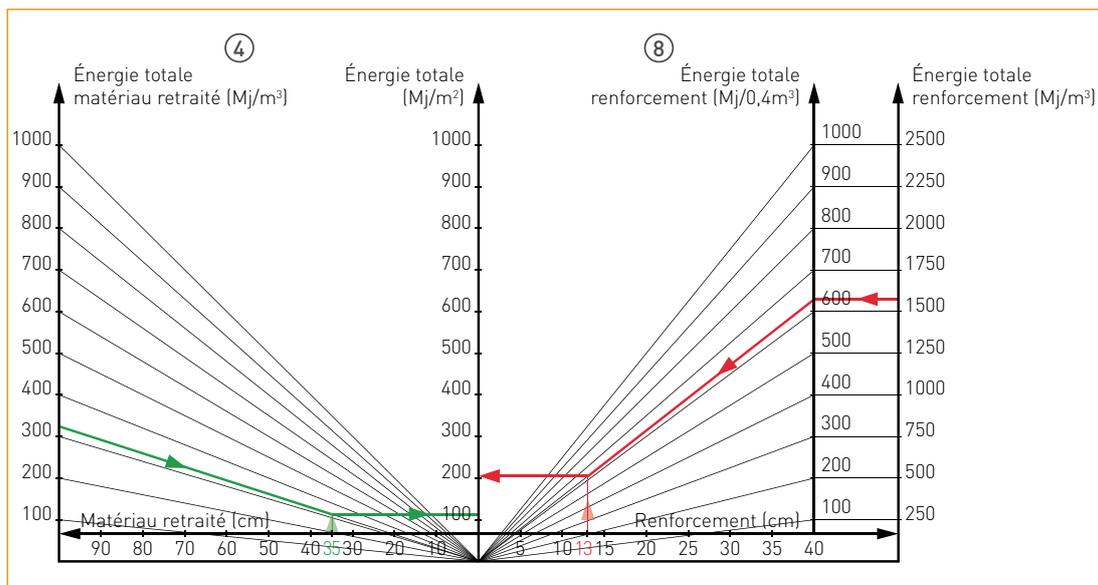


Figure 29 : diagramme de comparaison environnementale (Energie)



RETRAITEMENT EN PLACE VS RENFORCEMENT COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE : ÉNERGIE

ÉNERGIE MISE EN ŒUVRE
MATÉRIAU RETRAITÉ (Mj/m³)

③

Énergie totale
matériau retraits (Mj/m³)



ÉNERGIE MISE EN ŒUVRE
RENFORCEMENT (Mj/m³)

⑦

Énergie totale
renforcement (Mj/m³)



④

Énergie totale
(Mj/m²)



⑧

Énergie totale
renforcement (Mj/0,4m³)



⑤

Énergie totale
renforcement (Mj/m³)



⑥

Énergie transport matériau
renforcement (Mj/m³)



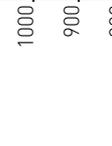
①

Énergie liant fabrication + transport
(Mj/m³ de matériau)



②

Énergie liant
fabrication + transport (Mj/t)



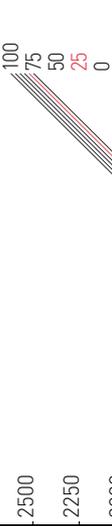
⑤

Énergie transport matériau
renforcement (Mj/m³.km)



⑥

Énergie fabrication matériau
renforcement (Mj/m³)



Pour réaliser vos propres études de comparaison environnementale - Indicateur Energie entre la technique de Retraitement des chaussées en place et celle de Renforcement, c'est très simple : il vous suffit de faire une photocopie des graphiques vierges des pages 50 et 51, d'y intégrer les informations spécifiques à votre étude, puis de lire directement le résultat recherché sur le graphique de la page 51.

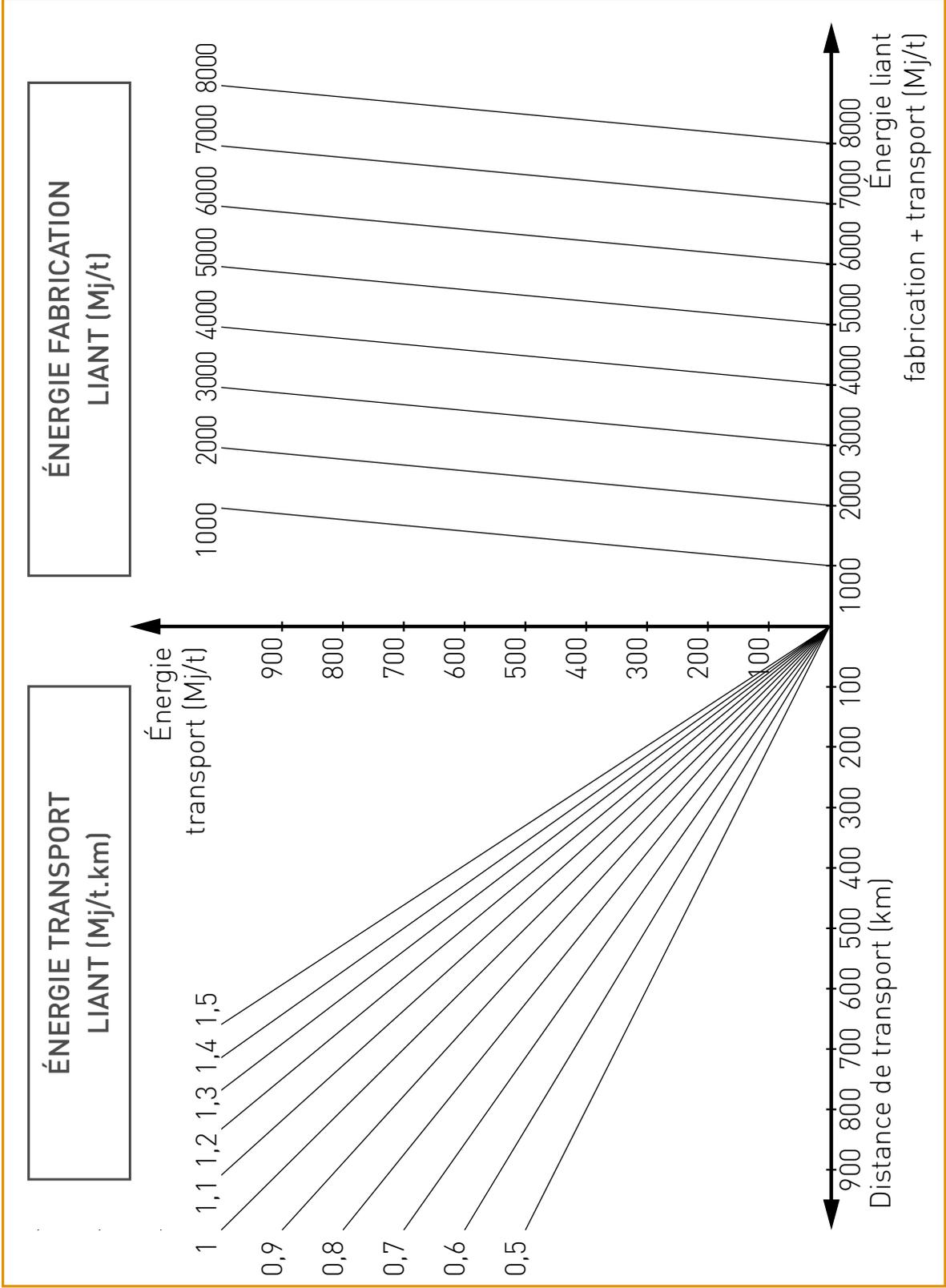


Diagramme d'évaluation de l'Énergie du liant (fabrication + transport)

RETRAITEMENT EN PLACE VS RENFORCEMENT COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE : ÉNERGIE

ÉNERGIE MISE EN ŒUVRE
MATÉRIAU RETRAITÉ (Mj/m³)

③

Énergie totale
matériau retraits (Mj/m³)



ÉNERGIE MISE EN ŒUVRE
RENFORCEMENT (Mj/m³)

⑦

Énergie totale
renforcement (Mj/m³)



④

Énergie totale
(Mj/m²)



⑧

Énergie totale
renforcement (Mj/0,4m³)



①

DENSITÉ SÈCHE
MATÉRIAU À RETRAITER (t/m³)



⑤

ÉNERGIE TRANSPORT MATÉRIAU
RENFORCEMENT (Mj/m³.km)



⑥

ÉNERGIE FABRICATION MATÉRIAU
RENFORCEMENT (Mj/m³)



②

ÉNERGIE LIANT
FABRICATION + TRANSPORT (Mj/t)



Comparaison environnementale Indicateur CO₂

4.1 - Etude de la Zone 1

Retraitement des chaussées en place

4.1.1 - Quadrant 1

4.1.2 - Quadrant 2

4.1.2.1 - L'impact CO₂ transport du liant

4.1.2.2 - L'impact CO₂ de fabrication du liant

4.1.3 - Quadrant 3

4.1.4 - Quadrant 4

4.2 - Etude de la Zone 2 - Renforcement

3.2.1 - Quadrant 5

3.2.2 - Quadrant 6

3.2.3 - Quadrant 7

3.2.4 - Quadrant 8

4.3 - Conclusion

4.1 - Etude de la Zone 1 - Retraitement des chaussées en place

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 par m³ de matériau nécessaire pour obtenir les performances recherchées du matériau retraité, 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 les structures de chaussées (figure 30).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît la densité sèche du matériau 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 m³ de matériau qu'il faut prévoir afin de retraiter ce matériau.

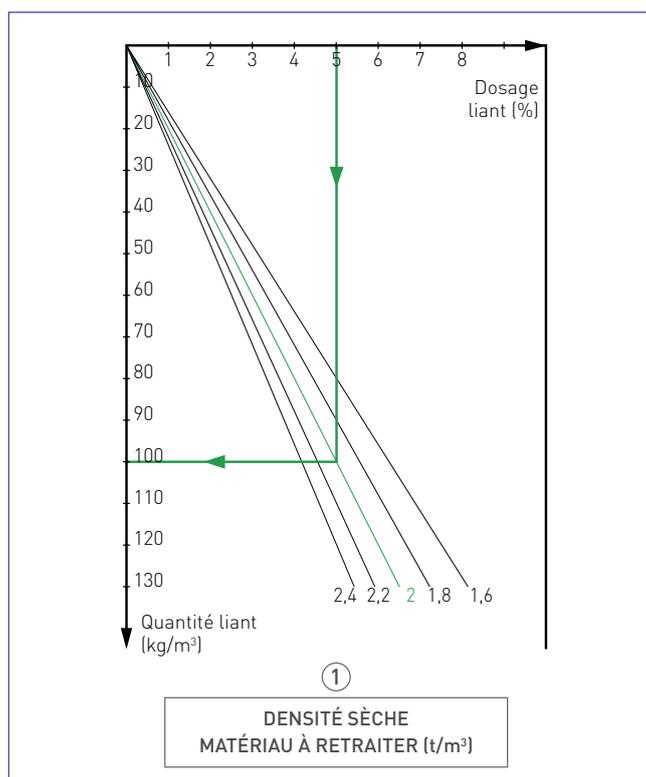


Figure 30 : zone Retraitement - Quadrant densité sèche matériaux.

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

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

Tableau 6 : densité sèche de différents types de matériaux.

■ 4.1.2 - Quadrant 2

La quantité de liant pour un m³ de matériau ayant été déterminée par le Quadrant 1, le Quadrant 2 permet alors de calculer son impact CO₂.

Dans ce Quadrant figurent des droites (passant par l'origine) qui représentent les impacts CO₂ (exprimés en kg CO₂ éq./t) des différents types de liants (figure 31).

Ainsi, pour un projet donné, lorsqu'on connaît l'impact CO₂ 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 CO₂ choisi : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 2, l'impact CO₂ du liant par m³ de matériau retraité.

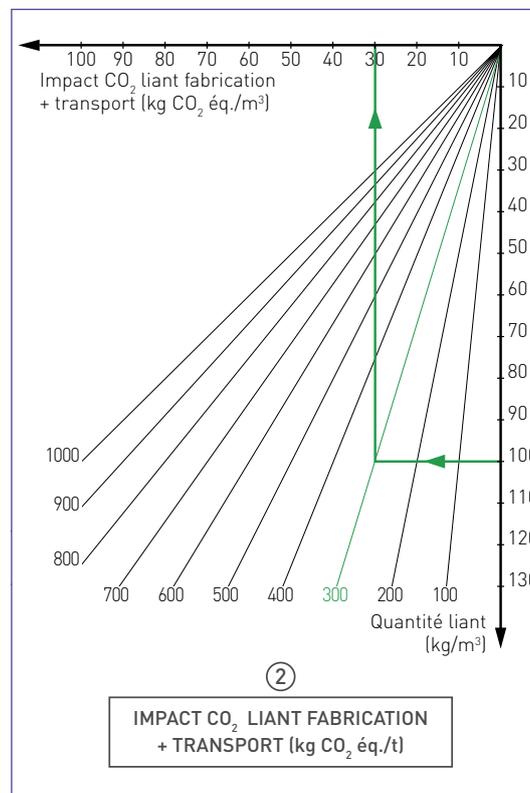


Figure 31 : zone Retraitement - Quadrant impact CO₂ liant

Si l'on ne connaît pas l'impact CO₂ 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 32.

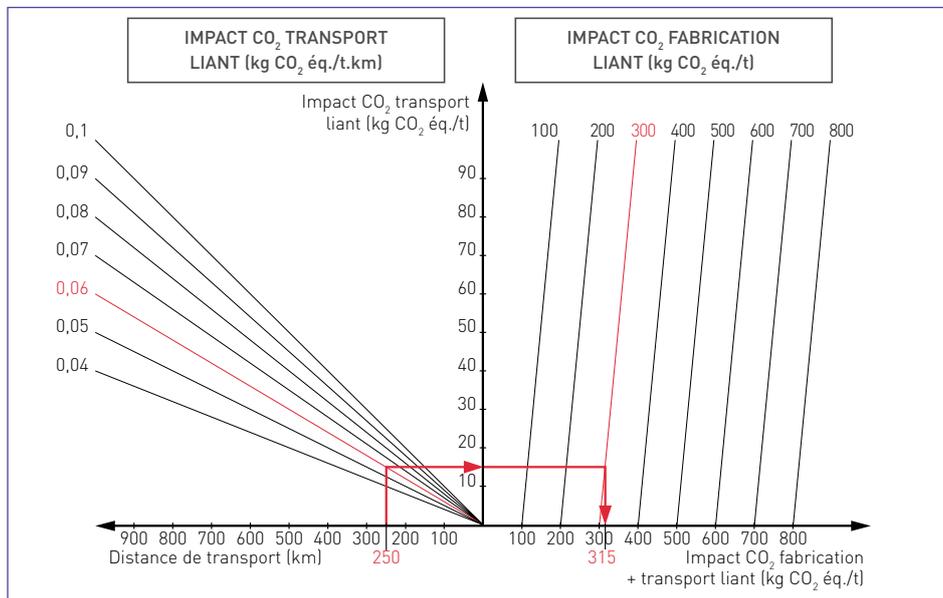


Figure 32 : diagramme d'évaluation de l'impact CO₂ du liant (fabrication + transport)

Ce diagramme permet, connaissant la distance de transport entre l'usine de liant et le chantier, l'impact CO₂ transport en kg CO₂ éq./t.km, ainsi que l'impact CO₂ dû à la fabrication d'une tonne de liant, de déterminer successivement l'impact CO₂ transport, puis l'impact CO₂ total fabrication + transport. L'impact CO₂ sera alors reporté sur le Quadrant 2, ce qui permettra de déduire l'impact CO₂ du liant par m³ de matériau retiré.

4.1.2.1 - L'impact CO₂ transport du liant

Si l'on ne connaît pas l'impact CO₂ transport en kg CO₂ éq./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 CO₂ équivalent (en kg) dégagée par la combustion d'un litre de fuel

Coefficient 100 : aux 100 km

4.1.2.2 - L'impact CO₂ de fabrication du liant

Si l'on ne connaît pas l'impact CO₂ de fabrication d'une tonne de liant, on pourra utiliser les valeurs données à titre indicatif et figurant dans le tableau 7.

Pour obtenir l'impact CO₂ réel de fabrication d'une tonne d'un produit donné, nous vous invitons à contacter directement le producteur du liant.

Liant	Impact CO ₂ de fabrication (kg CO ₂ 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 CO₂ de fabrication du liant

■ 4.1.3 - Quadrant 3

Il concerne l'impact CO₂ de la mise en oeuvre.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses relatives aux impacts CO₂ de l'atelier de mise en oeuvre (épandeur, malaxeur, arroseuse, compacteur, niveleuse).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts CO₂ des Quadrants 2 et 3 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts CO₂ qu'elles représentent (figure 33). La valeur de l'impact CO₂ du liant au m³ de matériau retraité 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 CO₂ de l'atelier de mise en oeuvre : on lit alors directement, sur l'autre axe du Quadrant 3, l'impact cumulé total par m³ de matériau retraité.

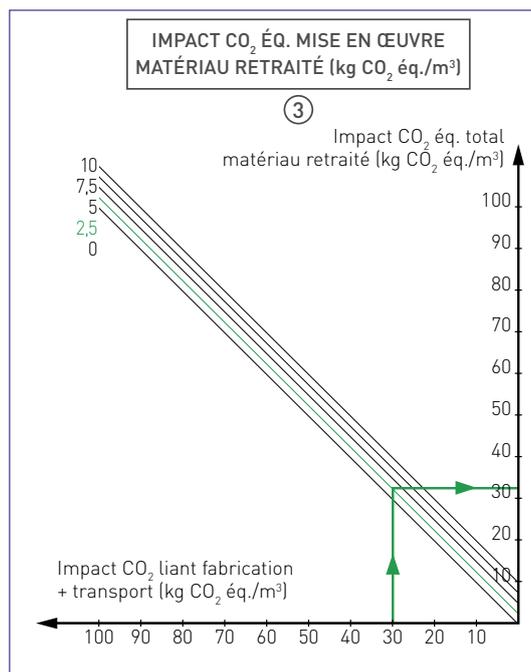


Figure 33 : zone Retraitement - Quadrant impact CO₂ mise en œuvre

Si l'on ne connaît pas l'impact CO₂ de l'atelier de mise en oeuvre, l'utilisateur pourra utiliser la méthode de calcul suivante :

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

Avec :

Impact CO₂ : quantité de CO₂ équivalent pour la mise en oeuvre d'un m³ de matériau retraité (kg CO₂ équivalent)

Coefficient 2,5 : quantité de CO₂ 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 oeuvre du matériau retraité (pour 1 m³). 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 oeuvre en fonction de la nature du matériau à retraiter.

■ 4.1.4 - Quadrant 4

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'impact CO₂ au m³ de matériau retraité à l'impact CO₂ au m² de matériau retraité (figure 34).

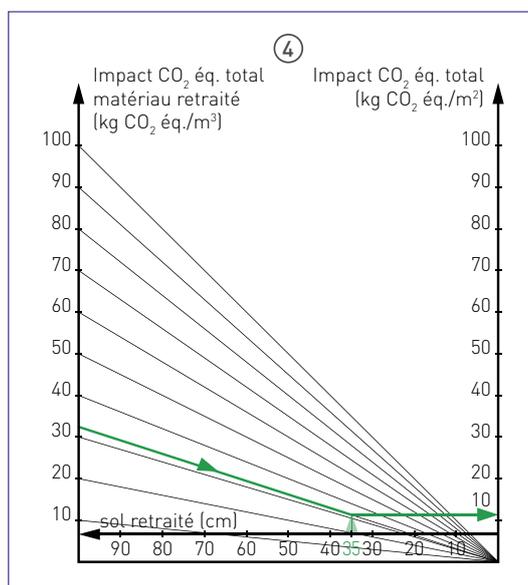


Figure 34 : zone retraitement - Quadrant impact total CO₂ (kg CO₂ éq./m³ et kg CO₂ éq./m²)

4.2 - Etude de la Zone 2 - Renforcement

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 CO₂ engendré par le transport des matériaux suivants :

- les granulats, de la carrière au chantier si le renforcement se fait avec un matériau non traité,
- le matériau traité, de la centrale de malaxage au chantier si le renforcement se fait avec un matériau traité.
- les matériaux rabotés (dont le volume est supposé, dans ce document, équivalent à celui des matériaux rapportés), du chantier à la décharge (ou site de recyclage).

Les droites de ce Quadrant passent par l'origine et représentent l'impact CO₂ (exprimé en kg CO₂ éq./m³.km) de différents modes de transports usuels.

Pour un projet donné, connaissant la distance carrière-chantier ou centrale de malaxage-chantier ainsi que la distance chantier-décharge (ou site de recyclage), on définit une distance de transport équivalente, somme des distances carrière-chantier ou centrale-chantier et chantier-décharge (ou site de recyclage). Cette distance équivalente déterminée, connaissant l'impact CO₂ transport au m³.km, ce Quadrant permet la lecture de l'impact CO₂ transport d'un m³ de matériaux (matériaux rapportés + matériaux rabotés), comme l'indique la figure 35.

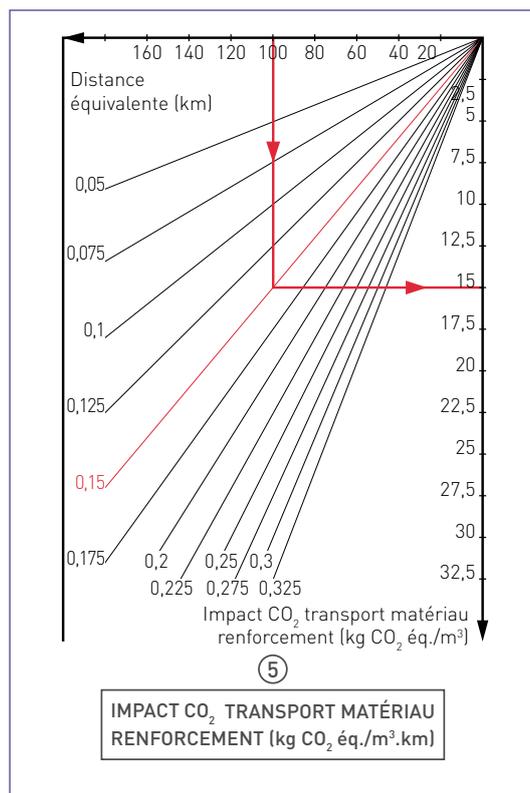


Figure 35 : zone renforcement - Quadrant impact CO₂ transport matériaux

Si l'on ne connaît pas l'impact CO₂ transport au m³.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 CO₂ 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 CO₂ de l'extraction et de la fabrication d'un m³ de matériaux.

Si le renforcement est envisagé avec un matériau non traité, ce Quadrant représente alors l'impact CO₂ d'extraction et de fabrication d'un m³ de matériau, le transport ayant été comptabilisé dans le Quadrant 5.

En revanche, si le renforcement est envisagé avec un matériau traité en centrale (grave traitée ou bitume, grave hydraulique), le Quadrant 6 représente alors la somme des impacts CO₂ générés par :

- la fabrication et le transport du liant de l'usine de production jusqu'à la centrale de malaxage,
- la fabrication et le transport des granulats de la carrière à la centrale de malaxage,
- la centrale de malaxage.

(les transports centrale-chantier et chantier-décharge ayant été comptabilisés dans le Quadrant 5)

Dans ce Quadrant figurent plusieurs droites parallèles, correspondant aux impacts CO₂ générés par l'extraction, le transport des constituants du matériau non pris en compte dans le Quadrant 5 et la fabrication d'un m³ de différentes natures de matériaux (matériau non traité, matériau traité au bitume, matériau traité au ciment, matériau traité au liant hydraulique routier,...), exprimés en kg CO₂ éq./m³ (figure 36).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts CO₂ des Quadrants 5 et 6 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts CO₂ qu'elles représentent.

L'impact CO₂ transport ayant été déterminé au Quadrant 5 et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, les impacts CO₂ d'extraction, de fabrication et de transport des constituants du matériau (granulats, liant), le Quadrant 6 permet d'évaluer, de façon cumulée :

- l'impact CO₂ de mise en décharge (ou site de recyclage) d'un m³ de matériau raboté,
- l'impact CO₂ d'extraction, de transport des constituants et de fabrication d'un m³ de matériau.

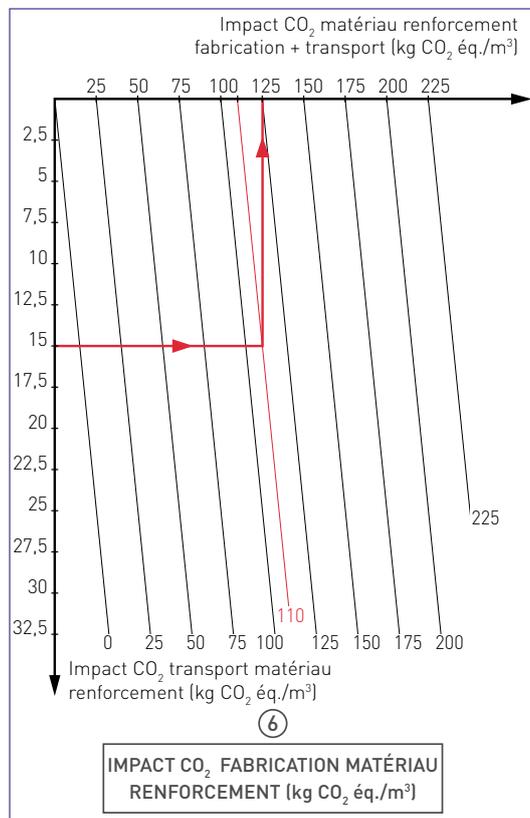


Figure 36 : zone renforcement - Quadrant impact CO₂ extraction et fabrication matériau

■ 4.2.3 - Quadrant 7

Il mesure l'impact CO₂ de la mise en oeuvre des matériaux rapportés et, le cas échéant, l'impact CO₂ engendré par le rabotage de l'ancienne structure.

Dans ce Quadrant figurent des droites parallèles qui correspondent à différentes hypothèses, relatives aux impacts CO₂ de l'atelier de mise en oeuvre (niveleuse, arroseuse, compacteur et éventuellement raboteuse).

Ces droites ont été tracées afin d'intégrer le cumul des impacts CO₂ des Quadrants 5, 6 et 7 : elles sont donc inclinées à 45° et possèdent des ordonnées à l'origine équivalentes aux valeurs des impacts CO₂ qu'elles représentent (figure 37).

L'impact CO₂ extraction, fabrication et transport ayant été déterminée au Quadrant 6, et connaissant localement, dans le cadre de ce projet, l'impact CO₂ de la mise en oeuvre, le Quadrant 7 permet d'évaluer, de façon cumulée, l'impact CO₂ total de mise en décharge (ou site de recyclage) d'un m³ de matériau raboté et d'extraction, fabrication, transport et mise en oeuvre d'un m³ de matériau rapporté.

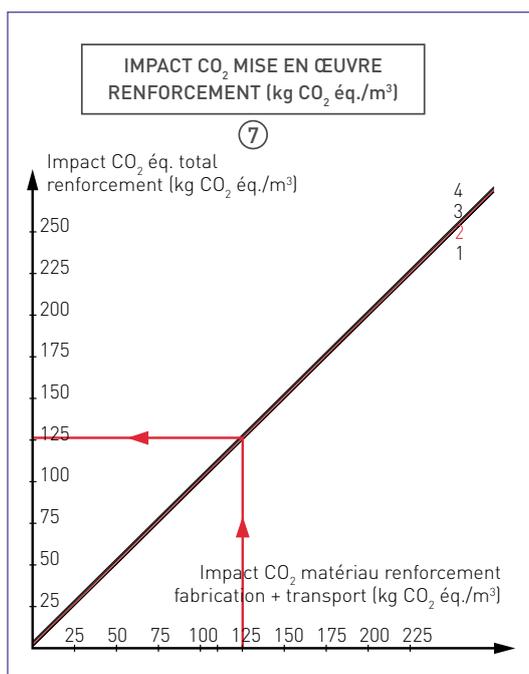


Figure 37 : zone renforcement - Quadrant impact CO₂ mise en oeuvre matériaux

4.2.4 - Quadrant 8

Il permet de passer, moyennant une construction géométrique simple (théorème de Thalès), de l'impact CO₂ au m³ de renforcement à l'impact CO₂ au m² de renforcement (figure 38).

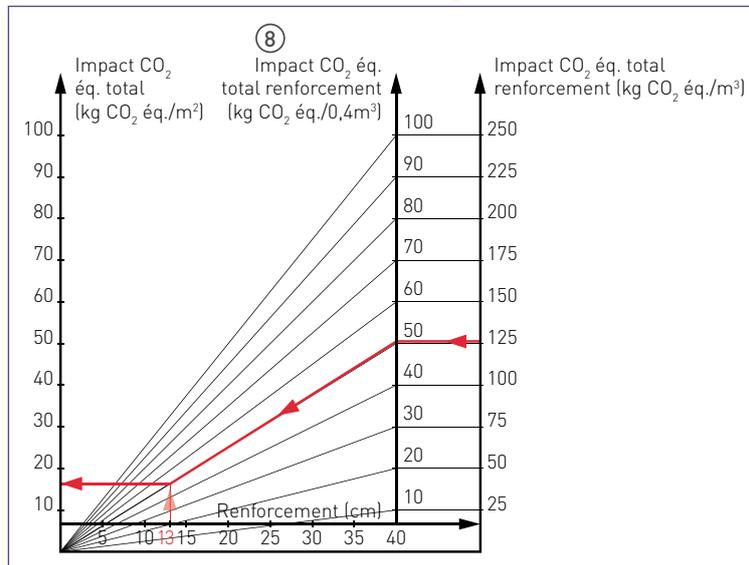


Figure 38 : zone Renforcement - Quadrant impact CO₂ total (kg CO₂ eq./m³ et kg CO₂ eq./m²)

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 CO₂ de la technique de Retraitement de chaussée en place et ceux de la technique de renforcement telle qu'illustrée sur le diagramme de la figure 42 et, plus globalement, sur le diagramme de la page 63.

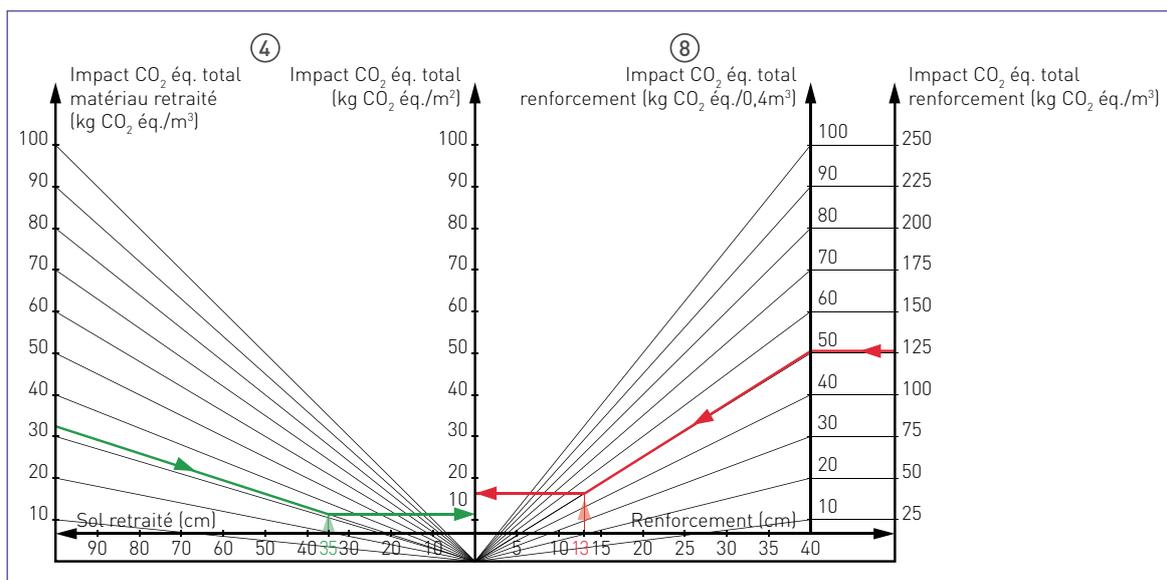
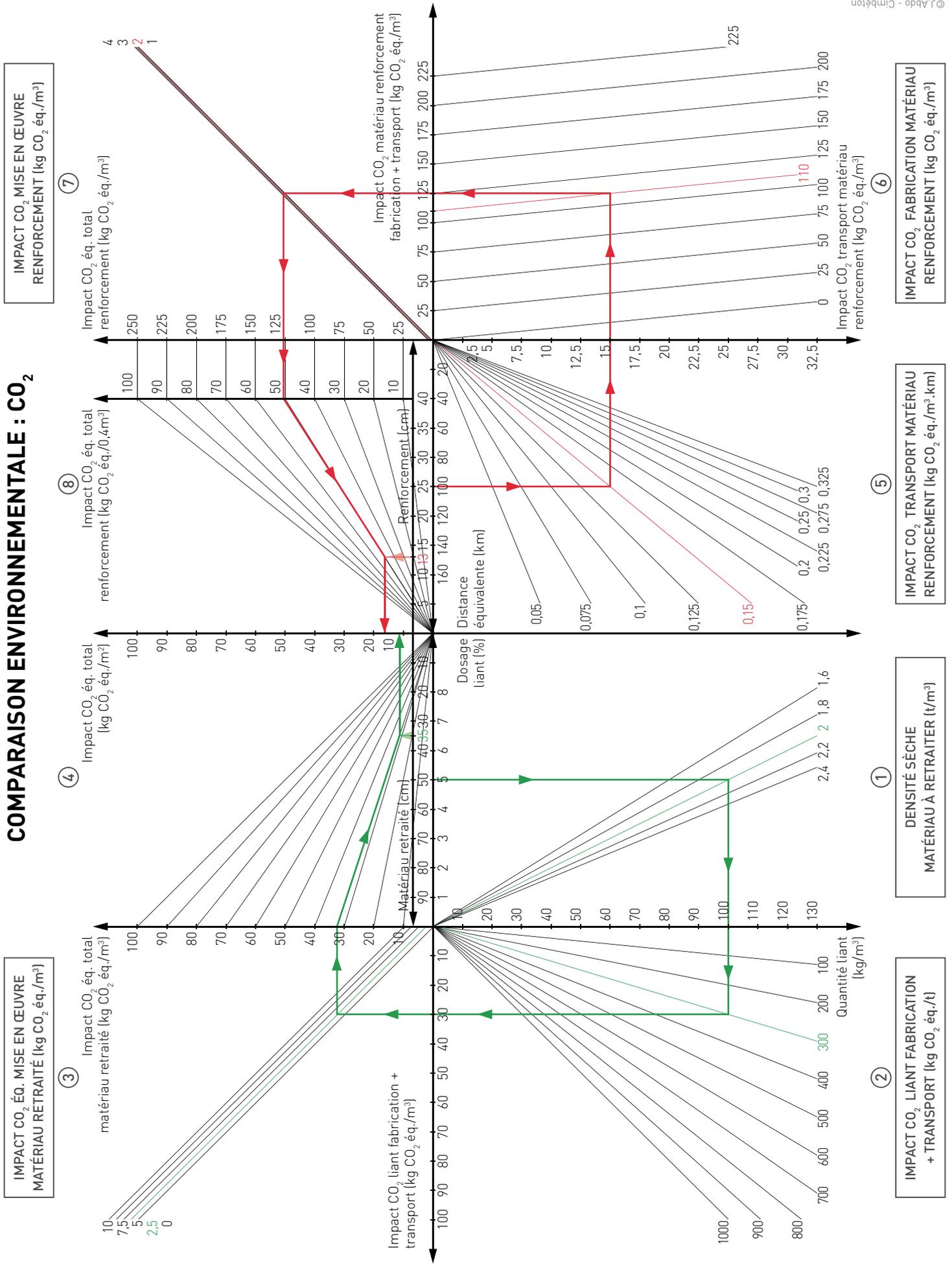


Figure 42 : diagramme de comparaison environnementale (impact CO₂)

RETRAIEMENT EN PLACE VS RENFORCEMENT COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE : CO₂



Pour réaliser vos propres études de comparaison environnementale - Indicateur CO₂ entre la technique de Retraitement des chaussées en place et celle de Renforcement, c'est très simple : il vous suffit de faire une photocopie des graphiques vierges des pages 65 et 66, d'y intégrer les informations spécifiques à votre étude, puis de lire directement le résultat recherché sur le graphique de la page 66.

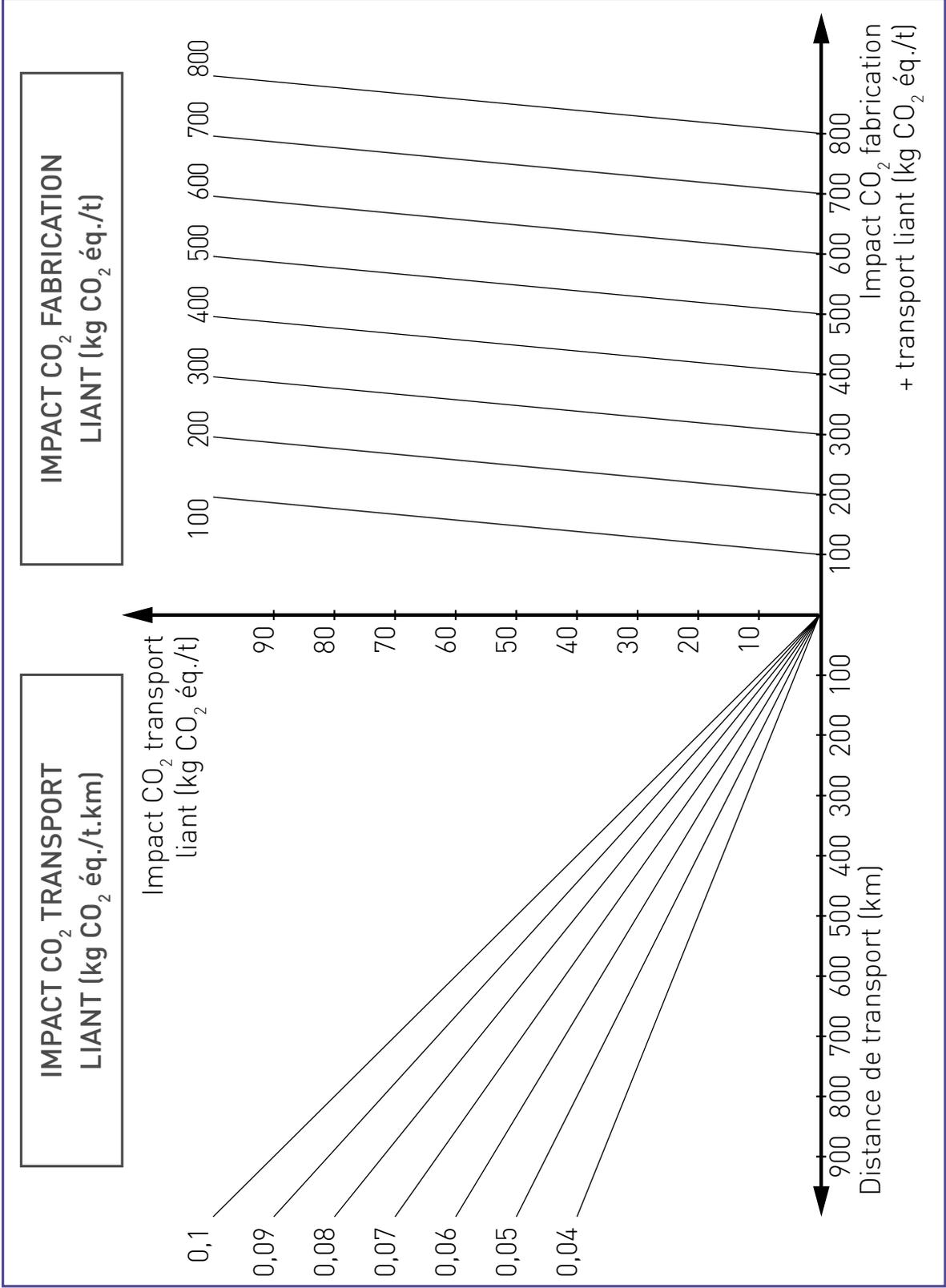
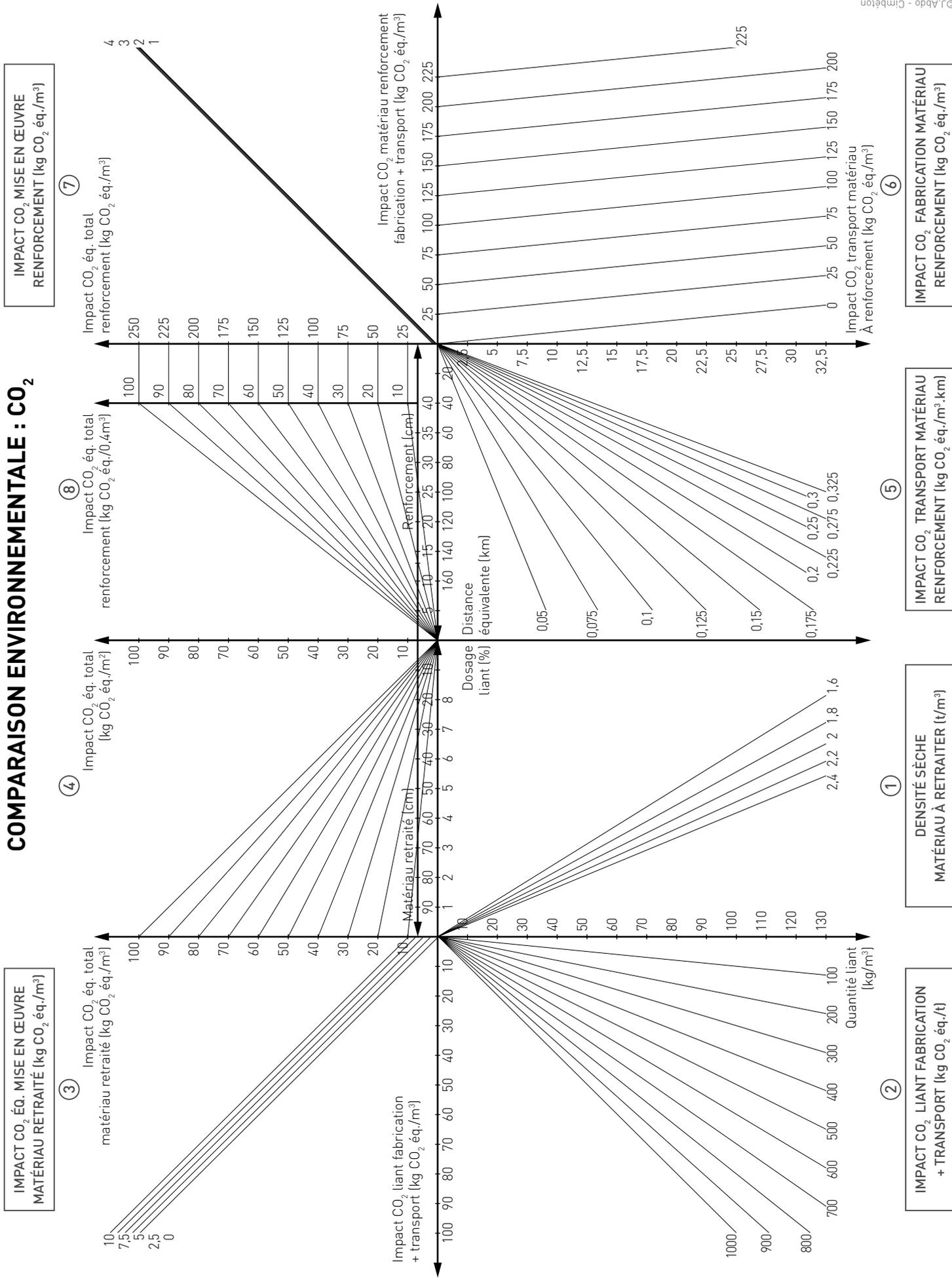


Diagramme d'évaluation de l'impact CO₂ du liant (fabrication + transport)

RETRAIEMENT EN PLACE VS RENFORCEMENT COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE : CO₂



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 d'entretien des structures routières.

Elle traite les trois impacts ou indicateurs qui sont aujourd'hui considérés comme étant les plus importants : l'économie, l'énergie et le CO₂.

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

Réalisation :
Îlot Trésor
RCS Paris B 408 745 149
Édition septembre 2010

CIM *béton*

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 • internet : www.infociments.fr