



TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES



Joseph ABDO

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




LE CONTEXTE





LA ROUTE, UNE NÉCESSITÉ

- La route : moyen de communication nécessaire au développement.
 - Mais, sa construction et son entretien nécessitent beaucoup de matériaux et surtout des Granulats.
- Les matériaux :
 - Matériaux non liés comme la Grave Non Traitée GNT,
 - Matériaux traités au bitume comme les Graves-Bitumes GB et les Enrobés Bitumineux,
 - Matériaux traités aux Ciments ou aux Liants Hydrauliques Routiers pour faire des Graves-Ciment GC, des Graves-Liants Hydrauliques Routiers GLHR ou du Béton de ciment.





LA ROUTE CONSOMMATRICE DE MATÉRIAUX

Pour étendre et entretenir le réseau routier en France :

- 200 Millions de tonnes de Granulats sont puisées annuellement dans les ressources naturelles, soit un volume de 100 Millions de m³,
- 3,5 Millions de tonnes de bitume (sources GPB),
- 2 Millions de tonnes de liants hydrauliques (sources SFIC).





LES IMPACTS DES PROJETS ROUTIERS





LES IMPACTS SUR LE SITE D'EXTRACTION

Impacts importants sur le milieu naturel :

- **Perturbation ou disparition des écosystèmes** des rivières dans lesquelles sont dragués les matériaux (Ballastières),
- Réduction des réserves en granulats,
- Nuisances générées par les transports et les risques induits par le trafic des véhicules,
- **Extension des carrières** à ciel ouvert,
- **Pénurie de Granulats** dans certaines régions.



LES IMPACTS DURANT LA CONSTRUCTION ET L'ENTRETIEN DE LA ROUTE

- Les étapes :
 - **Extraction et fabrication** des constituants élémentaires (Granulats et liants),
 - **Transport** des constituants élémentaires jusqu'aux Centrales de malaxage,
 - **Fabrication** des matériaux routiers (GB, BB, GC, GLHR, BC),
 - **Transport** des matériaux routiers de la Centrale au Chantier,
 - **Mise en œuvre** des matériaux pour la construction ou l'entretien de la Route.
- Conséquences :
 - Épuisement des ressources naturelles : **Énergie, eau, granulats,**
 - Impacts sur le milieu naturel : **Déchets, acidification, eutrophisation, écotoxicité,**
 - Impacts sur l'environnement : **Gaz à effet de serre, ozone.**





LES SOLUTIONS CIMENT/LHR POUR RÉDUIRE CES IMPACTS





LA FILIÈRE DE LA VALORISATION DES MATÉRIAUX

Aujourd'hui, il est possible d'atténuer ces impacts tout en réalisant des économies substantielles, en considérant les matériaux des sites à aménager comme un gisement que l'on peut valoriser par un traitement approprié.

Plusieurs filières de valorisation des matériaux se sont développées, et en particulier, la technique de traitement des sols en place à froid aux liants hydrauliques.





VALORISER LES MATÉRIAUX POUR CONSTRUIRE LES ROUTES

Le **Traitement des sols** aux ciments ou aux liants hydrauliques routiers :

- Permet de valoriser des matériaux aux caractéristiques inadaptées et non utilisables à l'état naturel tels que limons, argiles, sables, marnes, matériaux évolutifs, etc. pour les utiliser en ouvrages de terrassements ainsi qu'en assises de chaussées,
- Consiste à incorporer un liant dans le sol, avec éventuellement un complément en eau, et à mélanger le tout plus ou moins intimement jusqu'à l'obtention d'un matériau suffisamment homogène pour lui conférer des propriétés nouvelles.





VALORISER LES MATÉRIAUX POUR CONSTRUIRE LES ROUTES

Épandeur de liant



Malaxeur





VALORISER LES MATÉRIAUX POUR CONSTRUIRE LES ROUTES

Sol avant traitement



Sol après traitement





LE MARCHÉ MONDIAL DU TRAITEMENT

Techniques principalement développées en Amérique du Nord et en Europe. On estime, en effet, que plus de 2000 ateliers sont en activité dans le monde, dont environ:

- 600 ateliers (un atelier étant composé d'un malaxeur et de la capacité d'épandage associée) évoluent sur l'Amérique du Nord,
- 600 ateliers en Europe, dont 200 en France.



LES ASPECTS TECHNIQUES





CONSTITUANTS

- Sols
- Produits de traitement
- Eau conformément à la norme NF P 98-100





SOLS

Principaux paramètres d'identification vis à vis du traitement (GTR)

- **Granularité** : D mm
- **Argilosité** : VBS - IP
- **Etat hydrique** : teneur en eau
- **Teneurs en éléments chimiques** : MO – sulfates – nitrates...
- **Caractéristiques physiques** : dureté - abrasivité





PRODUITS DE TRAITEMENT

- **Liants hydrauliques**

Produit qui, en présence d'eau, donne un durcissement rapide et une prise irréversible

- **Ciments** (NF EN 197-1) : CEM

- Prise rapide
- Constituants principaux (> 65%) : clinker
- Constituants secondaires : filler, laitier, cendres volantes,...

- **Liants hydrauliques routiers** (NF P 15-108) : HRB

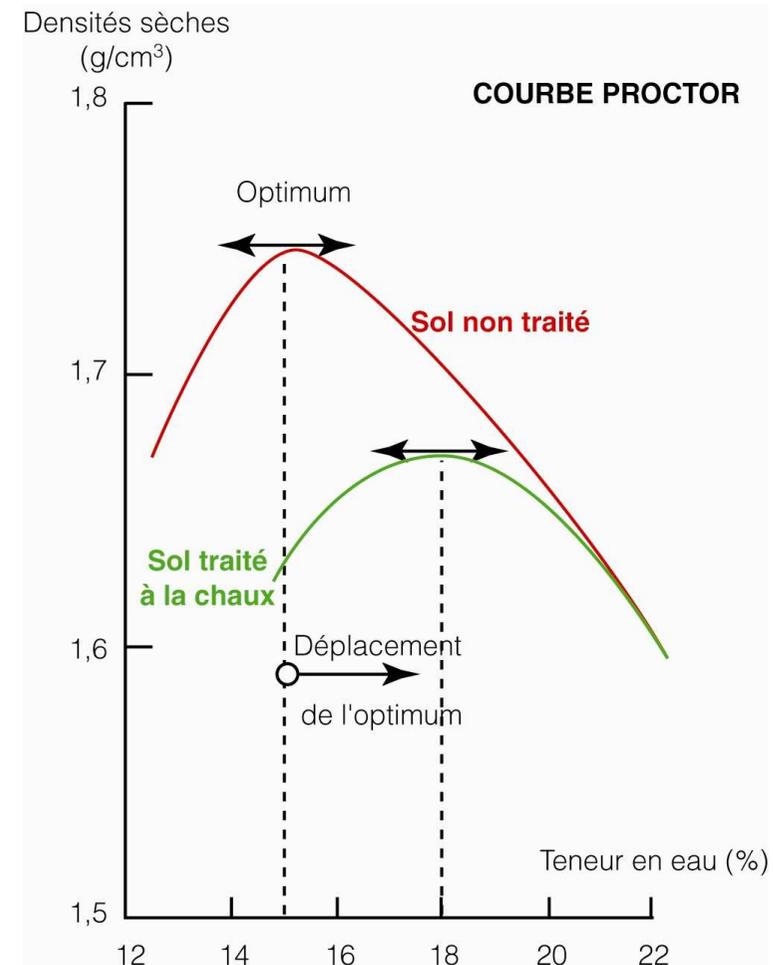
- prise lente
- constituants principaux : clinker, laitier,...
- constituants secondaires : chaux, fillers,...





INTERACTION LIANT - MATÉRIAU

- La chaux floccule les sols fins et modifie leurs propriétés géotechniques,
- Le ciment ou le LHR confère les résistances mécaniques et les performances à long terme.





LES DIFFÉRENTS TYPES DE TRAITEMENT

EFFETS DU TRAITEMENT DES SOLS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

AMÉLIORATION/MODIFICATION

LHR spécifique « Prise rapide »

Dosage: 2 à 3%

- Amélioration différée (délai de prise) de la portance par augmentation de la rigidité,
- Sur tous les sols : augmentation des caractéristiques mécaniques à long terme.

STABILISATION

Ciment, LHR

Chaux + Ciment ou LHR

Dosage 5 à 8%

Transformation à moyen (semaines) ou long terme (années) des caractéristiques mécaniques du sol (résistance mécanique, tenue à l'eau, au gel)

PST, couche de forme, assises de chaussées

Remblais, PST



LES ÉTUDES PRÉALABLES

- **Une étude de reconnaissance :**
 - Prélèvement d'échantillons représentatifs du gisement (sols, matériaux de la chaussée existante, matériaux recyclés),
 - Caractérisation des matériaux prélevés :
 - La granularité,
 - L'argilosité : I_p ou VBs :
 - Traitement au ciment ou LHR si : $I_p \leq 12$ ou VBs $\leq 2,5$
 - Traitement mixte chaux-ciment si : $I_p > 12$ ou VBs $> 2,5$
 - La teneur en eau naturelle,
 - L'optimum Proctor : OPN ou OPM,
 - L'identification d'éventuels produits inhibiteurs de prise.





ÉTUDE DE FORMULATION & PERFORMANCES REQUISES

- **Matériaux pour une utilisation en remblais :**
 - Objectif :
 - vérifier l'aptitude du matériau au traitement (test d'aptitude)
 - déterminer la nature et le dosage du liant pour l'obtention d'une portance immédiate suffisante : $IPI \geq 15, 20$ (nature sol).
- **Performances requises :**
 - **CBR > IPI**
 - Avec IPI au minimum égal à 15 (en fonction du niveau d'arase recherché).
- **Liants :**
 - Liants hydrauliques : matériau « sableux » (VBS < à environ 1),
 - LHR spécifique « prise rapide »
 - Dosage moyen : 3 à 4 %.





ÉTUDE DE FORMULATION

- **Matériaux pour une utilisation en forme :**
 - **Objectif :**
 - Caractérisation de l'homogénéité du gisement,
 - Vérifier l'aptitude du matériau au traitement (test d'aptitude),
 - Déterminer la nature et le dosage du liant pour l'obtention d'une portance immédiate suffisante et d'atteindre les performances mécaniques exigées,
 - Délai de maniabilité,
 - Age autorisant la circulation sur la couche traitée,
 - Résistance à l'immersion au jeune âge,
 - Résistance au gel,
 - Évaluation de la sensibilité aux dispersions d'état.





ÉTUDE DE FORMULATION & PERFORMANCES REQUISES

- **Matériaux pour une utilisation en forme :**
 - **Remise en circulation :**
 $R_c > 1 \text{ MPa}$ (1,5 à 2 pour des trafics lourds importants).
 - **Insensibilité à l'eau :**
 $R_c \text{ immersion} / R_c 60 > 0,6$ ou 0,8 (selon VBS).
 - **Non gélivité :**
 $R_{tB} > 0,25 \text{ MPa}$.
 - **Caractéristiques mécaniques :**
« R_t / E » à 90 jours, au minimum classe 5





L'ÉTUDE DE FORMULATION

- **Matériaux pour une utilisation en Assises de chaussées :**
 - **Objectif :**
 - **Sols concernés :**
 - Sols fins de type A1 et A2,
 - Sols sableux de type B5, B6 à $VBS < 2,5$ et B2 à $VBS < 1$,
 - Sols graveleux B5, B6 à $VBS < 2,5$ et B3 ou B4 à $VBS < 1$.
 - Caractériser l'homogénéité du gisement,
 - Application des références de la norme NF EN 14227,
 - Performances mécaniques (R_c , R_{it} , R_t et modules),
 - Résistance à l'eau et au gel.





ÉTUDES PRÉALABLES – FAISABILITÉ

- Homogénéité du gisement des matériaux

- Aptitude d'un sol au traitement (NF P 94-100)

Type de traitement	Aptitude au traitement	Paramètres à considérer	
		Gonflement volumique Gv (%)	Résistance en compression Diamétrale RtB (MPa)
Traitement avec LHR ou ciment Essai « accéléré » : 7 jours – 40°	Apte	$Gv \leq 5$	$RtB \geq 0,20$
	Douteux	$5 < Gv \leq 10$	$0,10 \leq RtB < 0,20$
	Inapte	$Gv > 10$	$< 0,10$



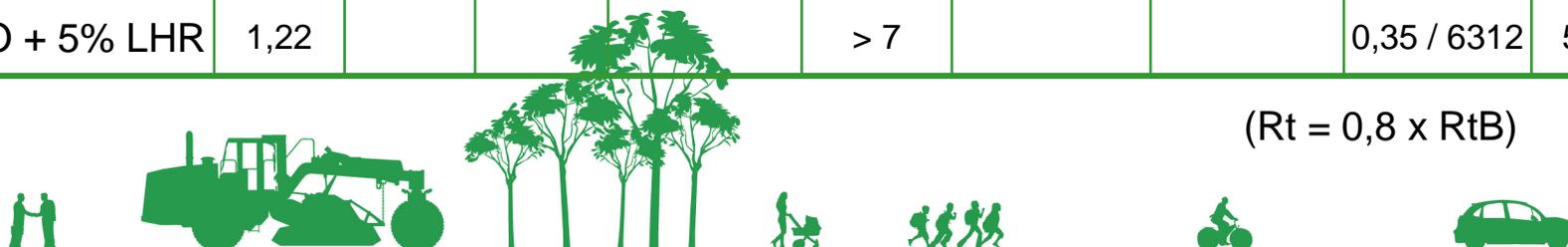


EXEMPLE DE FORMULATION

Exemple de Sable limoneux « **B5** » – D = 20 mm - VBS = 0,48 – OPN = 2,07 à 10,7 %

Compacité	98 % OPN				Délais	96 % OPN			Zone Rt / E à 90 jours
	W % OPN					W % OPN			
Résistance	Rc (Mpa)				circulation	RtB / E (Mpa)			
Date essais	27/07	17/08	18/09			17/08	18/09	18/10	
Délais (jours)	7	28	60	60 (immersion)	jours	28	60	90	
3% LHR	0,72	1,10	1,19	1,05 / 88%	> 23	0,16 / 3697	0,27 / 5112	0,28 / 5301	5 / HZ
4% LHR	1,18		1,70	1,41 / 83%	> 6	0,25 / 4611		0,32 / 6147	5
5% LHR		1,65			> 6		0,38 / 8168	0,40 / 8505	5 (4)
6% LHR	1,46				> 5	0,34 / 8185		0,42 / 9017	4 (5)
1% CaO + 5% LHR	1,22				> 7			0,35 / 6312	5 (4)

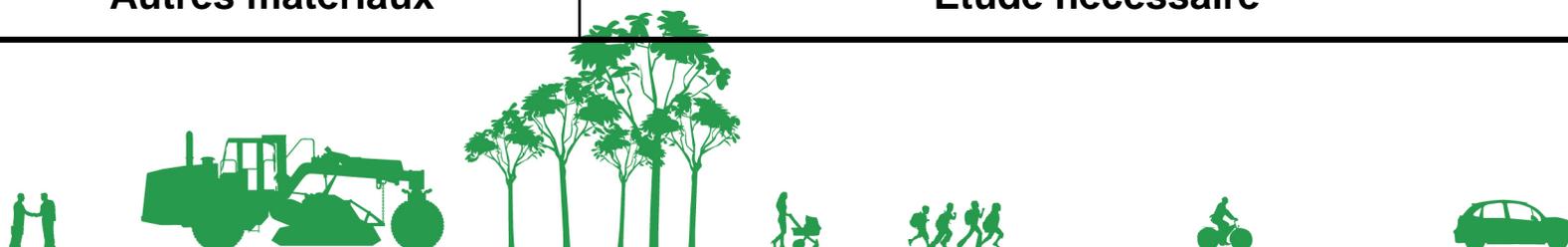
(Rt = 0,8 x RtB)





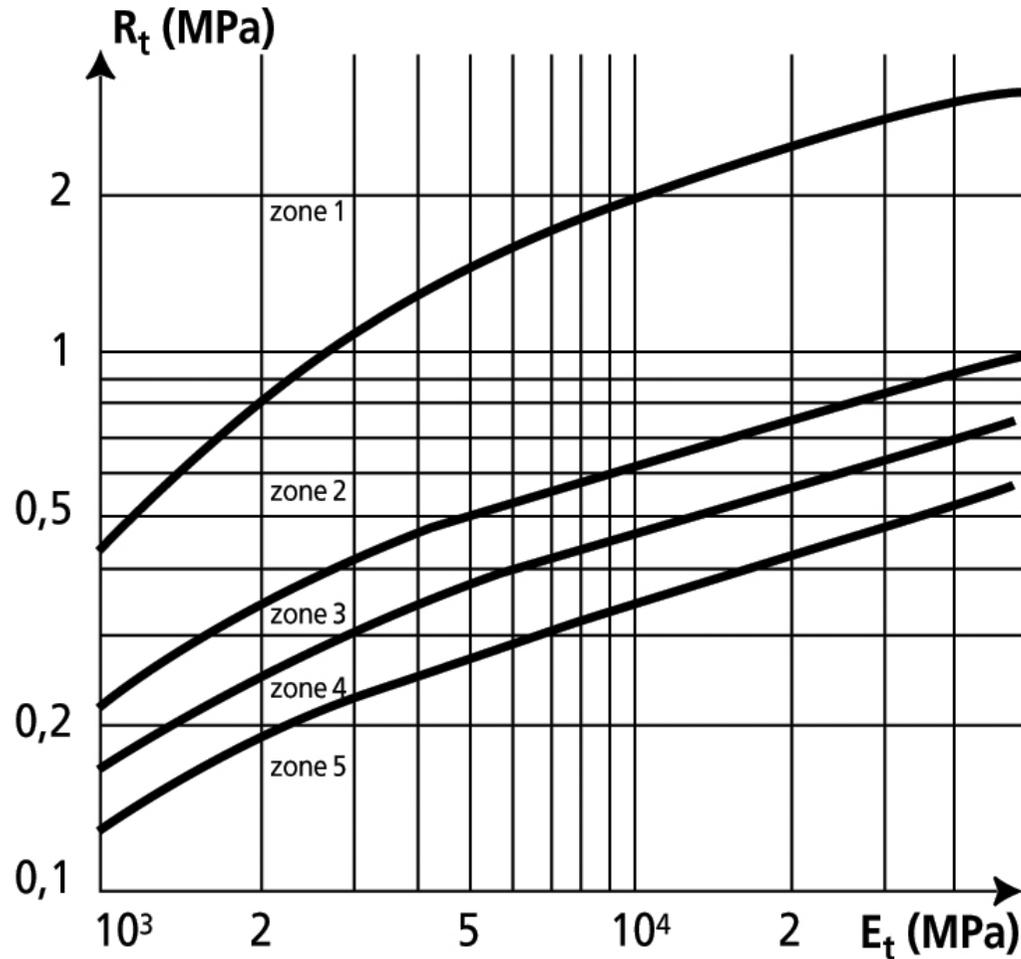
ABSENCE D'ÉTUDE DE LABORATOIRE - CHANTIER DE FAIBLE IMPORTANCE

Classes de sols	Dosages préconisés pour une couche de forme PF2
(C) - A1- B5	1 % CaO + 7 % LHR
(C) – A2 – B6	1.5 % CaO + 7 % LHR
(C) – A3	2 % CaO + 7 % LHR ou 6 % CaO
(C) – B1 – B2 et D1	6 % LHR
(C) – B3 – B4 et D2 – D3	5 % LHR
Autres matériaux	Etude nécessaire





CLASSES MÉCANIQUES – DIAGRAMME «Rt/E»



Classe mécanique	Traitement en centrale	Traitement en place
1	Zone 1	
2	Zone 2	Zone 1
3	Zone 3	Zone 2
4	Zone 4	Zone 3
5	Zone 5	Zone 4

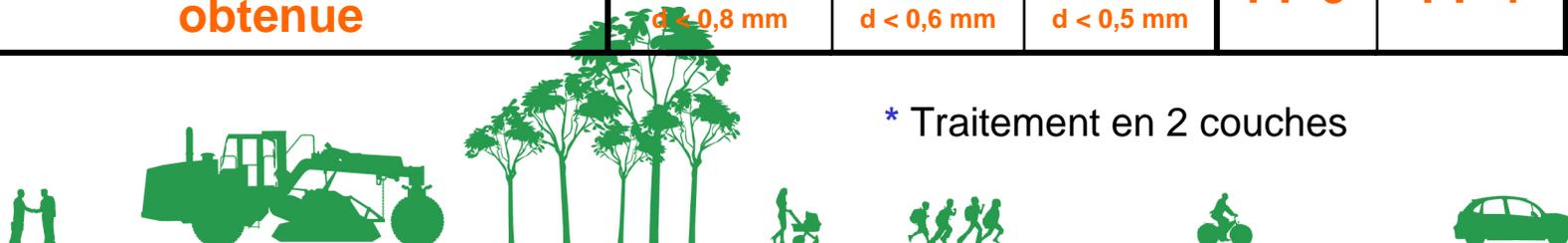




DIMENSIONNEMENT DE LA COUCHE DE FORME

Classe de l'arase		AR 1			AR 2	
Classe mécanique de la couche de forme traitée		Épaisseur de la couche de forme				
	3		30 cm	40 cm	25 cm	30 cm
	4	30 cm	35 cm	45 cm *	30 cm	35 cm
	5	35 cm	50 cm *	55 cm *	35 cm	45 cm *
Classe de plate-forme obtenue		PF 2 d < 0,8 mm	PF 3 d < 0,6 mm	PF 4 d < 0,5 mm	PF 3	PF 4

* Traitement en 2 couches





LES DIFFÉRENTES OPÉRATIONS DU TRAITEMENT EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

CAS DES COUCHES DE FORME ET DE CHAUSSÉES

- Prétraitement à la chaux (si nécessaire),
- Préparation du sol par scarification (si nécessaire),
- Epandage du liant hydraulique,
- Malaxage,
- Arrosage,
- Compactage partiel,
- Fin réglage,
- Compactage final,
- Cloutage (si nécessaire),
- Protection superficielle.

CAS DES REMBLAIS

- Préparation du sol par scarification (si nécessaire),
- Epandage de la chaux ou le LHR spécifique,
- Malaxage,
- Arrosage éventuellement (dans le cas de stabilisation au LHR ou ciment),
- Compactage initial,
- Compactage final (fermeture).





VALORISER LES MATÉRIAUX : LES AVANTAGES TECHNIQUES

- Techniques au point, codifiées à tous les niveaux,
- Obtention de matériaux homogènes, durables et stables, dotés d'une grande rigidité et d'une excellente tenue à la fatigue,
- Bon comportement par temps chaud sans déformation, ni orniérage,
- Bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit.



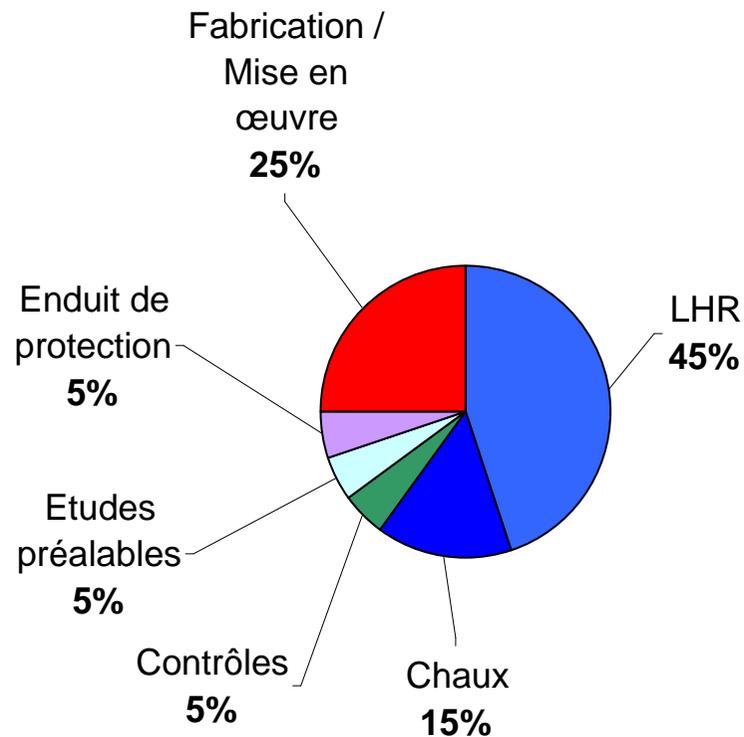
ASPECTS ÉCONOMIQUES





DÉCOMPOSITION DU COÛT D'UN SOL TRAITÉ

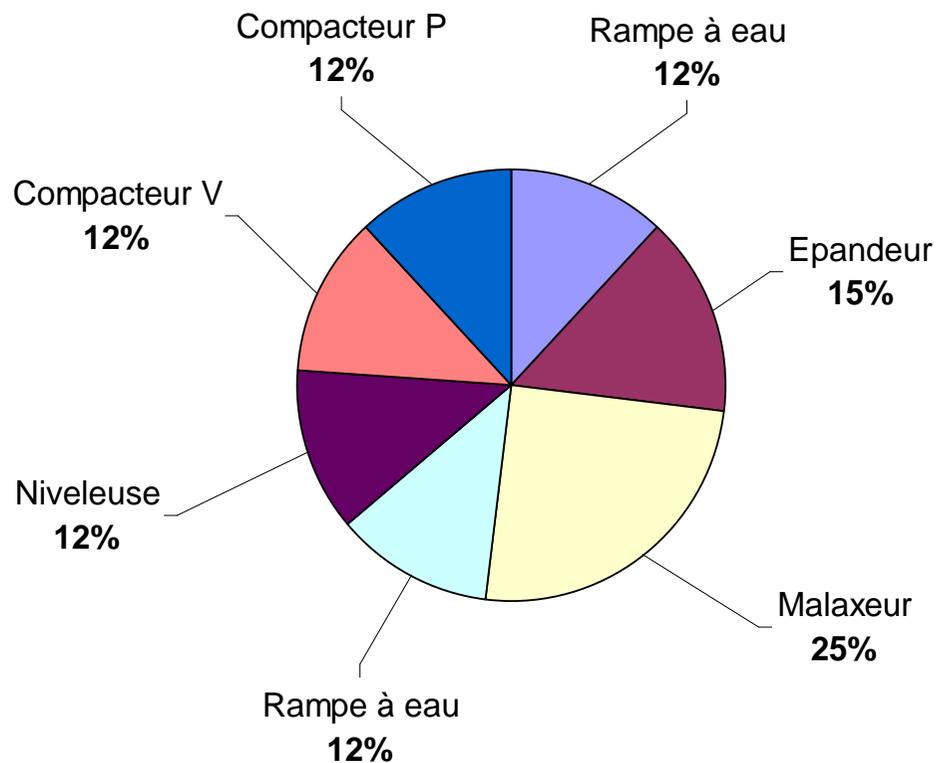
Incidence de chaque poste dans le coût total du sol traité





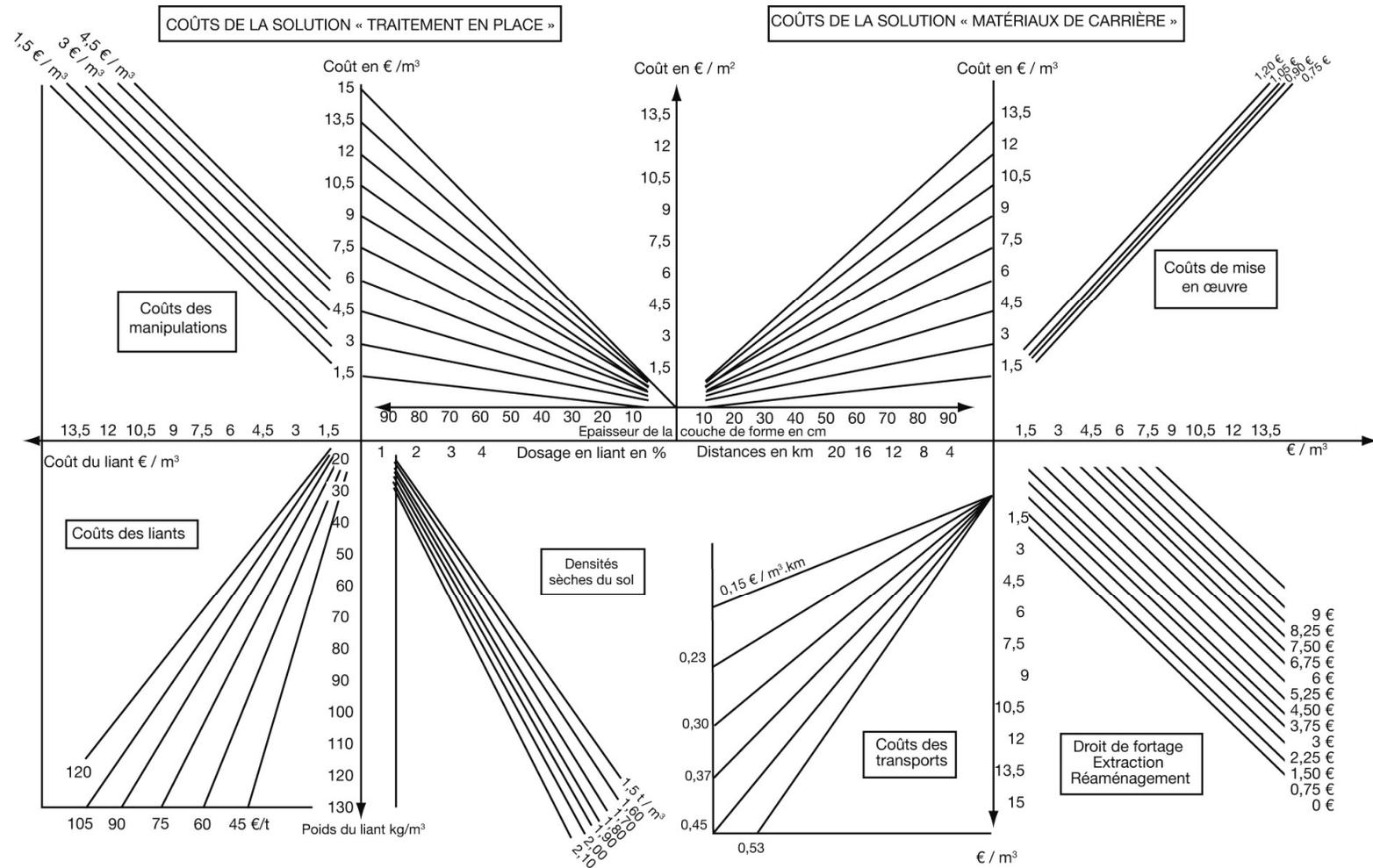
DÉCOMPOSITION DU COÛT D'UN SOL TRAITÉ

Incidence de chaque engin dans le coût de la fabrication et de la mise œuvre du sol traité

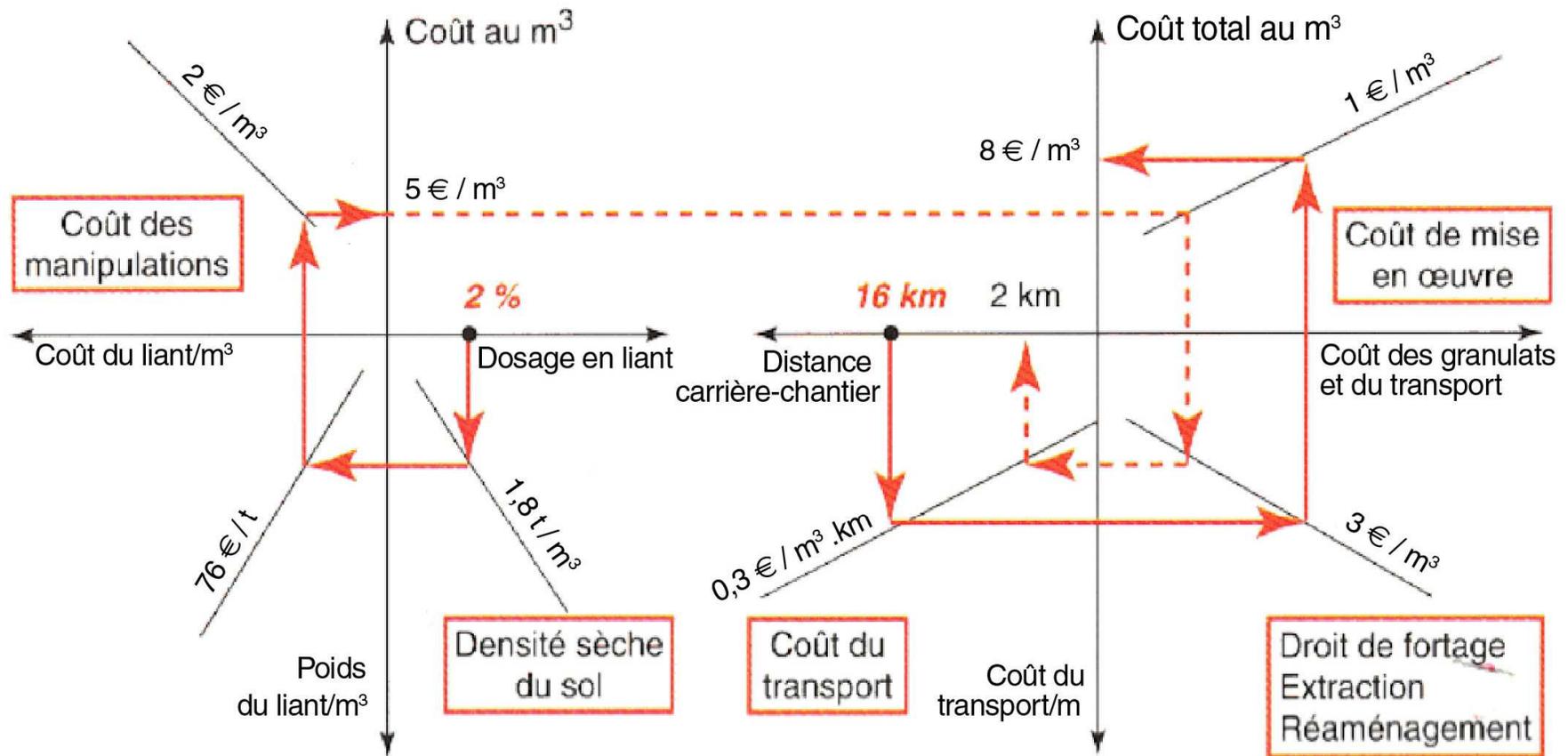




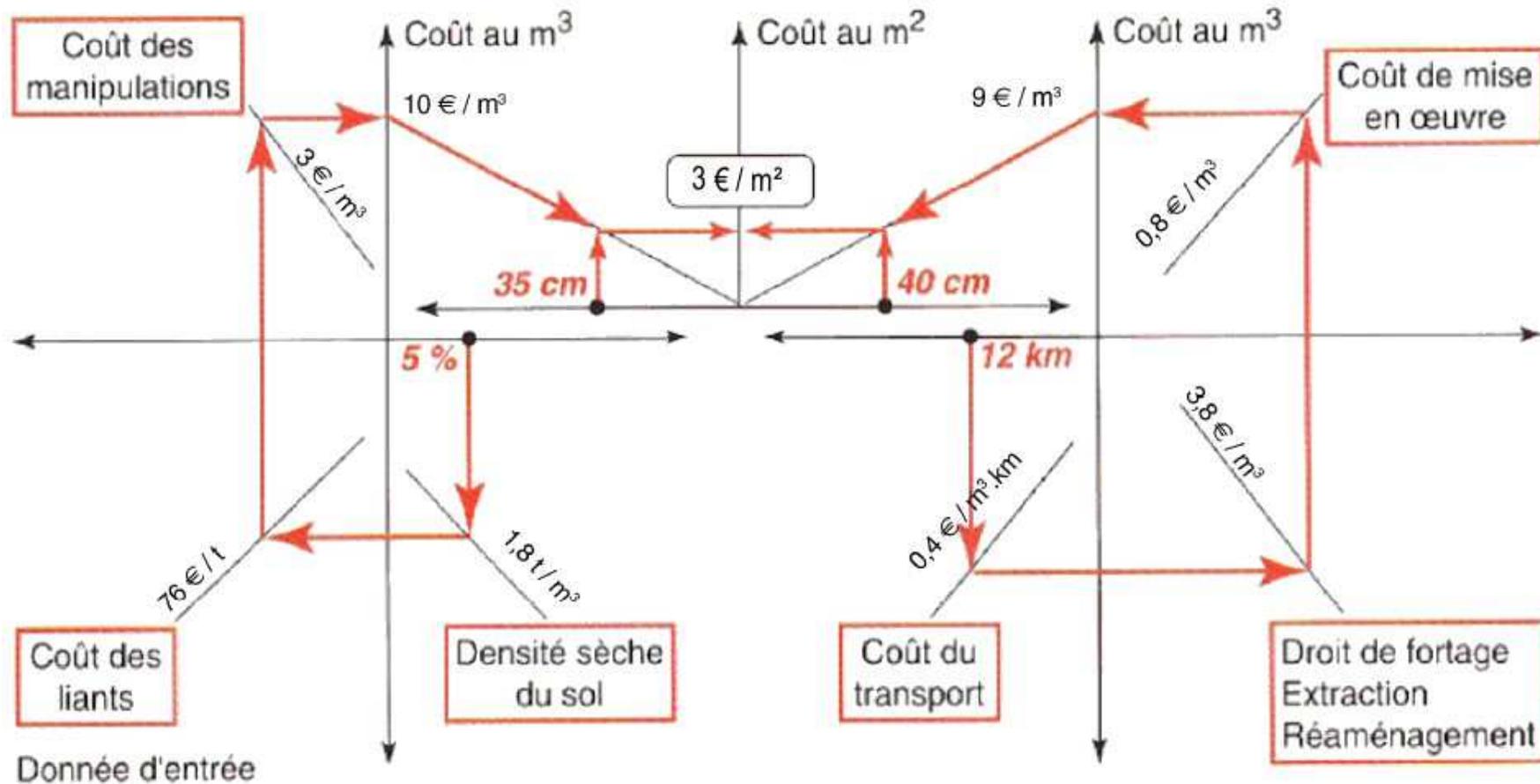
ABAQUE DE COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES COÛTS TRAITEMENT DE SOL VS RECOURS AUX EMPRUNTS



CAS DES REMBLAIS



CAS DES PST ET COUCHES DE FORME



VRNS - GB3/SC3 - Trafic TC6₂₀ (6,5 MPL)



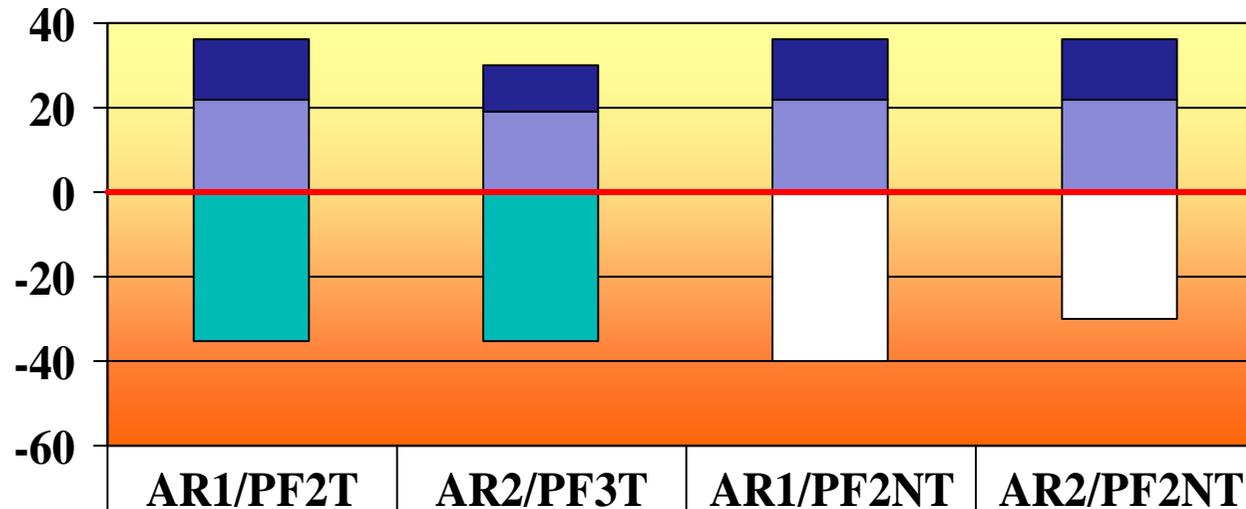
	CdF traitée		CdF non traitée		
PST 3 Arase	AR1	AR2	AR1	AR2	GTR 92
Matériaux CdF	A2 Traité		D21 Non Traité		GTR 92
Cas 1 Epaisseur CdF (m)	0,35	0,35	0,40	0,30	GTR 92
Classement PF	PF2	PF3	PF2	PF2	GTR 92
Chaussée GB3/SC3	14/22	11/19	14/22	14/22	Cat. Struct. 98
Cas 2 Epaisseur CdF (m)	0,50	0,35	0,80	0,50	GTR 92
Classement PF	PF3	PF3	PF3	PF3	GTR 92
Chaussée GB3/SC3	11/19	11/19	11/19	11/19	Cat. Struct. 98



COMPARAISON DES STRUCTURES PF2 & PF3



Cas 1



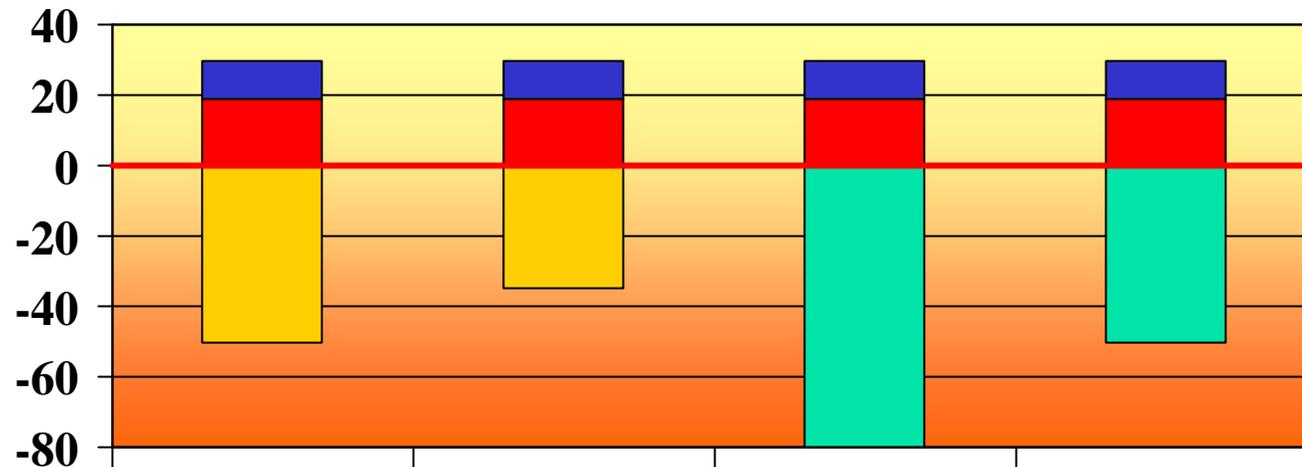
	AR1/PF2T	AR2/PF3T	AR1/PF2NT	AR2/PF2NT
■ GB3	14	11	14	14
■ SC3	22	19	22	22
□ D21 non traité			-40	-30
■ A2 traité	-35	-35		



PLATE-FORMES OPTIMISÉES PF3



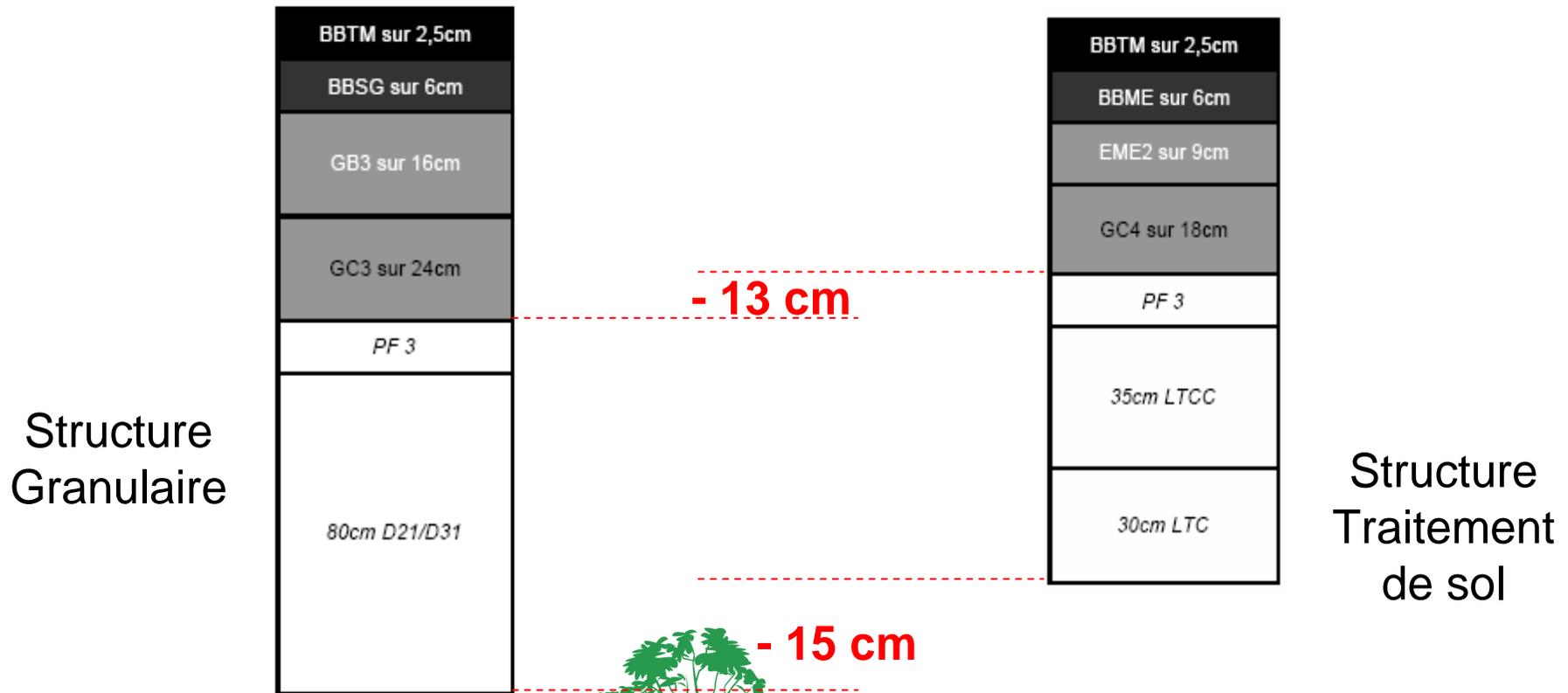
Cas 2



	AR1/PF3T	AR2/PF3T	AR1/PF3NT	AR2/PF3NT
■ GB3	11	11	11	11
■ SC3	19	19	19	19
■ D21 non traité			-80	-50
■ A2 traité	-50	-35		



PLATE-FORMES ET STRUCTURES DE CHAUSSÉES OPTIMISÉES





VALORISER LES MATÉRIAUX : LES AVANTAGES ÉCONOMIQUES

- Réduction au minimum des déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport,
- Absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier, situé au voisinage du chantier,
- Optimisation de la durée des travaux
- Economie réalisée par rapport à une solution classique pouvant atteindre 30 %.



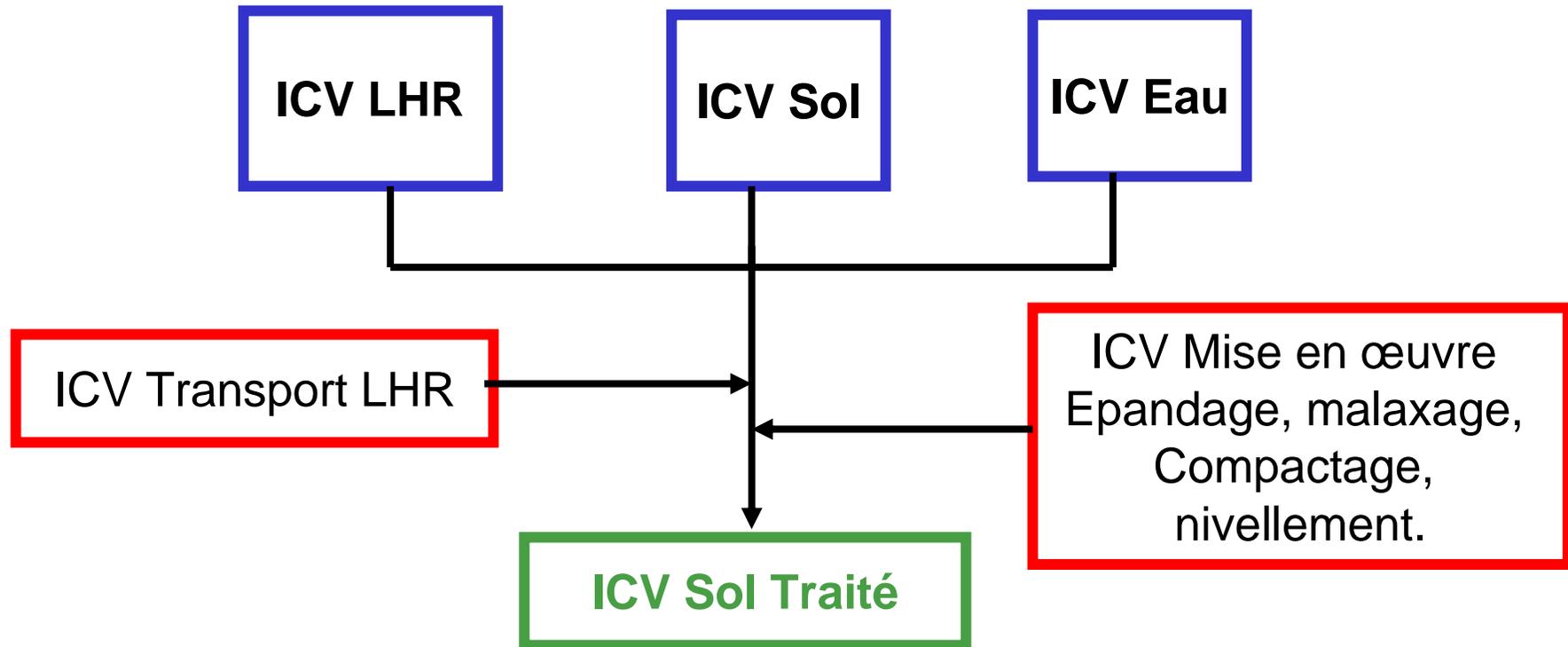


ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

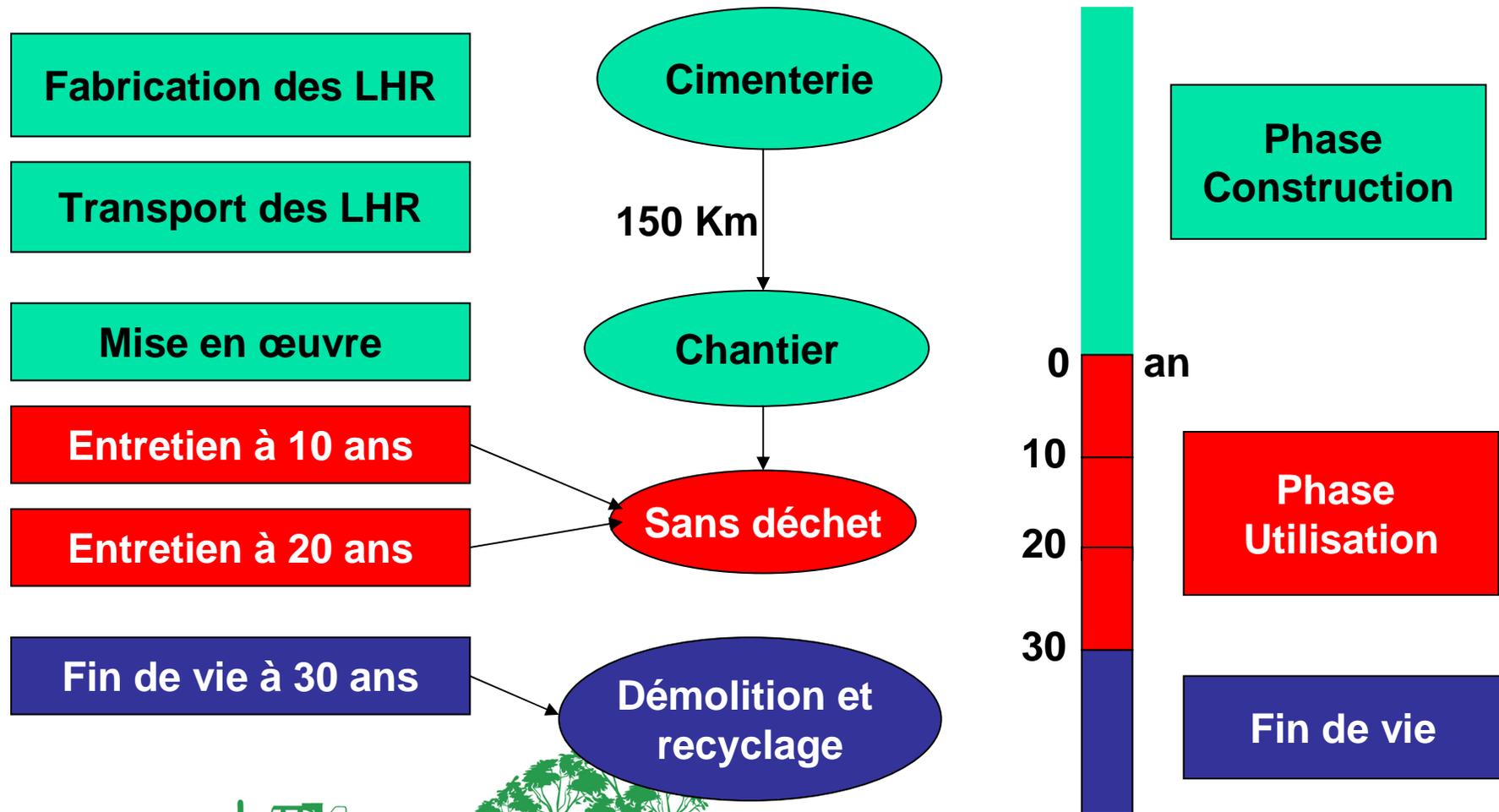




QU'EST-CE QUE L'INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE « ICV » D'UN SOL TRAITÉ ?

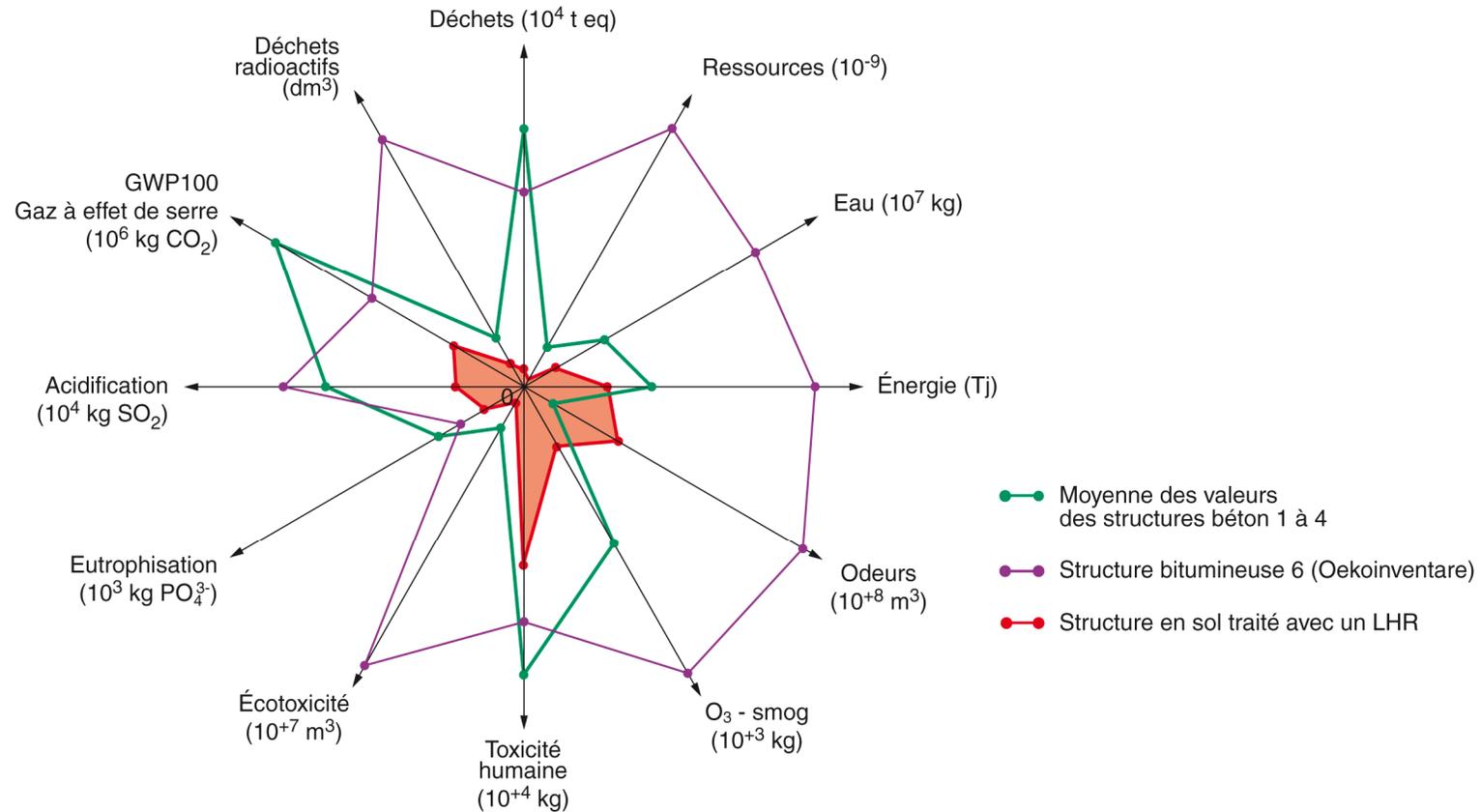


ÉTAPES ET PHASES DE L'ACV D'UNE ROUTE CONSTRuite AVEC DES MATÉRIaux TRAITÉS





STRUCTURE EN SOLS TRAITÉS AUX LHR VS STRUCTURE BITUMINEUSE ET STRUCTURE BÉTON





VALORISER LES MATÉRIAUX : LES AVANTAGES ÉCOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

- La préservation des ressources naturelles non renouvelables (carrières, ballastières) : utilisation des matériaux en place,
- Une importante économie d'énergie globale: réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge (donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains) et de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier,
- Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère.



CONCLUSION





CONCLUSION

Le traitement des sols en place au ciment ou au liant hydraulique routier est une technique:

- **Parfaitement au point** : technique codifiée, normalisée et éprouvée,
- **Compétitive** : moins chère que les techniques traditionnelles (jusqu'à 30%),
- **Respectueuse de l'environnement** : les études d'Analyse de Cycle de Vie "ACV" montrent que son impact sur l'environnement est faible et largement inférieur à celui des techniques traditionnelles.
- C'est une **technique qui ne supporte pas l'improvisation** mais nécessite des études préalables de laboratoire et des contrôles lors de la réalisation des travaux
- Suite à l'expérience acquise dans le domaine des terrassements, son **application est en cours de développement dans les couches d'assises.**



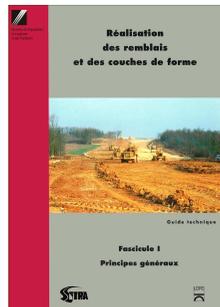


BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

- *Guide Technique Réalisations des remblais et des couches de forme - Fascicule I et Fascicule II* – SETRA / LCPC, 1992.
- *Guide Technique Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application en remblais et couches de forme* – SETRA / LCPC, 2000
- *Guide Technique Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application en assises de chaussées* – SETRA / LCPC, 2007.



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

