

LA CHAUX : PRODUIT NATUREL POUR UNE GESTION RESPONSABLE DE NOS RESSOURCES GRANULAIRES ET MATERIAUX DE SCALPAGE

Vincent LELONG Claude JOLY Hughes BAQUET

FEDIEX – Section chaux

Résumé

Vue de l'espace, notre planète démontre d'elle-même combien elle est inextensible et, combien il est important de ne pas en gaspiller les composants. Une de nos premières responsabilités est d'en gérer avec intelligence l'utilisation.

En carrière, le scalpage, co-produits issus du concassage primaire et composé de granulats et de particules argileuses, constitue une fraction, parfois importante, de l'exploitation des gisements de roches massives et est pas ou peu valorisée.

Le traitement à la chaux de ces matériaux de scalpage permet de produire un matériau aux performances accrues, utilisable en remblai courant, en remblai technique de tranchée, en sous-couche, en sous-fondation, ou en assise de chaussée.

De même, certains matériaux extraits en carrière et contenant une fraction granulaire intéressante sont impropres à une utilisation noble en raison d'une teneur en argile trop élevée ; ils sont dès lors évacués dès le traitement primaire.

Le traitement à sec de ces co-produits au moyen de chaux vive permet d'améliorer économiquement le rendement du criblage, d'extraire la fraction granulaire pierreuse et de produire un matériau complémentaire, utilisable en travaux routiers notamment.

Cette technique de traitement à la chaux

- offre aux carriers une solution souple, économique et durable de valorisation d'un produit jadis considéré comme déchet,
- constitue une réelle optimisation des

Samenvatting

Vanuit de ruimte toont onze planeet hoe weinig rekbaar ze is en hoe belangrijk het is de verscheidene componenten niet te verspillen. Een van onze belangrijkste taken is het gebruik ervan op een intelligente manier te beheren.

De scalpings, bijproduct in de steengroeves van de eerste breking en samengesteld uit granulaten en kleiachtig fijn materiaal, bevat een niet te verwaarlozen fractie afkomstig van de exploitatie van een enorme hoeveelheid rotsafzettingen met weinig of geen waarde.

Het kalken van deze materialen laat toe hun prestaties te verhogen zodat ze bruikbaar worden in de wegenbouw voor de aanleg van dijken, als aanvulgrond in sleuven, als onderfunderingslaag, baanbed en funderingslaag.

Eveneens zijn bepaalde materialen afkomstig uit de groeves niet geschikt voor een hoogwaardig gebruik, ondanks hun interessante granulaire fractie, omwille van hun hoog kleigehalte. Deze materialen worden na de eerste behandeling al verwijderd.

Een droge behandeling van deze nevenprodukten met ongebluste kalk laat een economische rendementsverbetering toe van de zeefinstallatie, het herwinnen van de hoogwaardige granulaatfractie die zal verwerkt worden tot een complementair produkt, bruikbaar in o.a. wegenwerken.

Deze toepassingstechniek met kalk geeft aan de groeve-uitbaters

- een flexibele en economisch verantwoorde oplossing ter opwaardering van een produkt dat eertijds aanzien werd als afvalprodukt, en

- ressources naturelles, par le traitement d'une ressource locale, minimisant les flux de transport et les stocks de stériles
- permet une prolongation appréciable de la durée de vie des gisements.
- dit volledig in lijn met de duurzame ontwikkelingsinitiatieven .
- een effectieve optimalisatie van het gebruik van de natuurlijke grondstoffen door middel van de behandeling van lokale grondstoffen, met een verminderde transportstroom tot gevolg, door middel van eveneens een vermindering van de stocks van bijprodukten,
 - een verlenging van de levensduur van de deposito's.

1. Problématique

Les granulats sont élaborés sur des sites carriers soumis à la réglementation des installations classées et à une réglementation environnementale très stricte.

Ils sont utilisés dans des applications très diversifiées mais essentiellement dans deux grands secteurs d'activité : la construction pour la production des bétons et mortiers et l'industrie routière pour la construction et l'entretien des routes, des autoroutes, des voies ferrées et plateformes d'infrastructures de génie civil.

La Directive Européenne des Produits de Construction a conduit à la mise en place de « normes produits » reliant les caractéristiques de chaque matériau à son utilisation propre. Ces normes, dont l'application est obligatoire, ont conduit l'exploitant de carrière à une sélection drastique des matériaux. La réglementation et ces normes restreignent dès lors l'étendue des zones exploitables et le potentiel de départ de la ressource granulaire.

Par ailleurs, de par son contexte géologique, la ressource naturelle disponible, matière première des gisements, est constituée de sols et de roches de nature très diversifiée. On peut classer les matériaux exploitables pour la production de granulats en deux grands ensembles : les matériaux meubles -tels les dépôts alluvionnaires ou les sablières- et les roches massives.

Le rôle du carrier est de mettre en œuvre le processus de fabrication le mieux approprié pour lui permettre, à partir de cette ressource naturelle, de répondre au mieux aux conditions d'accès du gisement et à l'élaboration des produits finis demandés par le marché.

Lors de l'extraction, les matériaux de couverture, aussi appelés matériaux de scalpage, sont éliminés des phases de transformation pour une valorisation ultérieure ou pour assurer le réaménagement futur du site.

Co-produits issus la plupart du temps d'un 1^{er} concassage, ces matériaux sont généralement composés de granulats pollués par des particules argileuses et souvent mal, peu ou pas du tout valorisés. Toutefois, ils représentent une part importante des coûts de production, peuvent contenir une proportion non négligeable de matériaux nobles et leur gestion peut rapidement devenir un casse-tête économique aussi bien qu'écologique pour l'exploitant.

Il convient aussi, dans le traitement de cette problématique, de prendre en considération la nouvelle Directive Européenne Déchets du 17 Juin 2008 qui établit une «hiérarchie» à cinq niveaux entre les différentes options de gestion des excédents, selon laquelle l'option à privilégier est dans l'ordre la prévention, le réemploi, le recyclage, les autres formes de valorisation et en dernier recours, l'élimination sans danger.

2. Les solutions existantes:

Dans cette problématique, plusieurs solutions s'offrent à l'exploitant:

2.1 Le stockage des matériaux.

Il s'agit de mettre en dépôt, sur le site de la carrière ou sur un site externe, ces matériaux. Dépense supplémentaire de transport, coût de « mise au remblai » impact sur le paysage, manque de place, immobilisation de surfaces : telles sont les principales contraintes de cette solution pourtant souvent jugée facile et rapide.

2.2 Le lavage des matériaux.

Effectué durant les phases de concassage/criblage, cette technique, qui permet la récupération de la fraction > 200 microns, présente les contraintes suivantes :

- investissement important,
- nécessité de recourir à une ressource en eau de plus en plus limitée et onéreuse, qu'il convient de recycler après utilisation,
- coûts d'exploitation importants (électricité pour le pompage, filtration, pièces d'usure des équipements, consommation de floculants pour l'épaississement des boues, ...),
- modification de la granulométrie des matériaux,
- immobilisation de terrain importante pour la construction des bassins de décantation ou lagunes et la mise en dépôt des boues non valorisables,
- périodes de gel qui limitent la mise en œuvre du lavage.

2.3 Le traitement à la chaux des matériaux.

Ce traitement, par incorporation à sec de la chaux, permet la floculation des argiles présentes dans le produit. Il est alors possible d'éliminer la fraction argileuse présente dans les granulats.

Ce traitement peut être réalisé en ligne dans l'installation, en cours de production dans un malaxeur ou par reprise et traitement ultérieur des stocks en place.

Le traitement à la chaux permet la valorisation de la **totalité** des matériaux qui entrent dans l'installation de traitement et la production de deux types de matériaux:

- des « **calci-matériaux** » (traité à la chaux) sous forme d'une fraction granulaire 0-d mm, utilisée comme un sol traité.
- un granulat fraction d-D utilisé comme un granulat classique.

3. La valorisation des matériaux de scalpage par un traitement à la chaux :

Le procédé de valorisation à sec des matériaux par un traitement à la chaux est pratiqué depuis de nombreuses années en Europe mais il connaît depuis peu un regain d'intérêt certain lié aux contraintes d'accès et d'exploitation de la ressource granulaire. Le matériel de traitement, mobile ou fixe a également connu des développements techniques importants qui rendent cette technique fiable et parfaitement adaptée aux exigences des contrôles de la qualité requises par la normalisation et le marquage CE.

3.1 Les matériaux bruts

Ces matériaux abondants peuvent représenter 5 à 15 % de la production des gisements de roches éruptives et 10 à 30 % des gisements de roches calcaires.

Ils présentent en général une courbe granulométrique creuse car ils ne comportent pas d'éléments intermédiaires entre les granulats (10/D) et les fines (<80 µm).

- D max = 40 à 120 mm suivant l'ouverture du concasseur ou du crible
- passant à 80 µm = 10 à 20 %
- valeur au bleu (VBS) = de 0,5 à 1,5

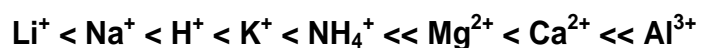
La sensibilité à l'eau de ces matériaux est plutôt élevée et leur comportement mécanique fortement lié à celui de la fraction la plus fine (argile), du fait du rapport des surfaces spécifiques entre fraction fine et grossière. En conséquence, ils sont également sensibles au gel, peuvent être très plastiques et ont une portance très variable en fonction de leur état hydrique, ce qui explique la grande difficulté à les valoriser.

3.2 Action de la chaux aérienne calcique sur les produits de scalpage

3.2.1 Action à court terme (Amélioration)

De même que pour les sols argileux, l'apport de chaux dans un scalpage traité modifie l'activité des fines argileuses par la floculation de celles-ci. L'ajout de chaux calcique dans un scalpage argileux modifie en effet de manière irréversible le système eau/argile en un système eau/calcium/argile.

Dès que la chaux est ajoutée à l'argile, les cations bivalents du calcium (Ca^{2+}) dissous dans l'eau libre du sol, se fixent à la surface de l'argile. De fait, les ions calcium se substituent à la plupart des cations disponibles dans un système aqueux. En effet, il a été établi que les cations de valence supérieure remplacent ceux de valence inférieure et que les cations de plus grande taille se substituent aux cations de plus petite taille ainsi :

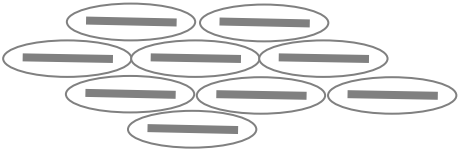



Ainsi, à concentration équivalente, les ions calcium sont 17.5 plus présents à la surface d'une même argile que les ions sodium (Na^+).

L'adsorption immédiate des cations calcium à la surface des feuillets argileux se traduit par une stabilisation et réduction très importante de la couche d'eau fixée autour des feuillets d'argile. Du fait de la substitution d'un système argile/eau à grosses particules argileuses par un système calcium/argile à petites particules, celles-ci peuvent s'approcher les unes des autres et une attraction face/bord, ou floculation, se produit.

De plus, cette floculation est facilitée par la concentration en électrolytes Si^{4+} et Al^{3+} et le pH élevé du système eau/calcium/argile qui permettent les premières réactions pouzzolaniques et la

formation des premiers cristaux CSH (silicate de calcium hydraté) et CAH (aluminat de calcium hydraté). Par ailleurs, la formation de chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et d'ion $\text{Ca}(\text{OH})^+$ se traduit par la formation de « ponts » entre particules argileuses qui favorisent la floculation de l'argile. Ces deux dernières propriétés expliquent pourquoi la floculation est constatée sur des sols argileux et calcaire pour lesquels l'échange cationiques à la surface des feuillets argileux s'est, a priori, produit naturellement.

	<p>Dans un système eau/argile complètement hydraté, les feuillets d'argile sont entourés d'une couche diffuse d'eau épaisse qui les positionne en un arrangement parallèle offrant une très faible résistance au cisaillement.</p>
	<p>Dans un système eau/argile/calcium, l'épaisseur de la couche diffuse d'eau est très réduite, autorisant les extrémités des feuillets d'argile chargés négativement à être attirés par les surfaces des feuillets positifs du fait des cations de calcium (Ca^{2+}) adsorbés.</p>

La floculation des argiles se traduit mécaniquement par :

- un frottement interne entre agglomérats et une résistance au cisaillement des agglomérats plus importants ;
- une bien meilleure maniabilité due au comportement plus sableux du mélange argile/chaux.

La floculation des argiles par la chaux se mesure par des essais géotechniques classiques :

- limites d'Atterberg sur la fraction fine du scalpage et valeur au bleu du matériau;
- Courbe Proctor et Indice Portant Immédiat (IPI).

L'ajout d'un réactif à base de chaux aérienne calcique modifie donc profondément et de façon instantanée le comportement mécanique du scalpage. Le matériau collant et difficile à manipuler dans les installations se comporte, après traitement à la chaux, de façon similaire à une grave ou à un sable

Enfin, pour l'utilisateur final, le scalpage traité est utilisable en technique routière par tout temps, sans problème de traficabilité.

3.2.2 Action à long terme (Stabilisation)

Une partie de l'alumine et de la silice présentes dans l'argile peut être solubilisée en milieu fortement basique. Le système eau/argile/calcium du scalpage traité étant fortement alcalin (le pH atteignant 12.45), il permet à cette fraction dissoute de la silice et de l'alumine de se combiner avec le calcium dissous dans l'eau libre du sol. Tant qu'il y a du calcium résiduel disponible et que le pH du système eau/argile/chaux reste suffisamment élevé, la réaction pouzzolanique continue.

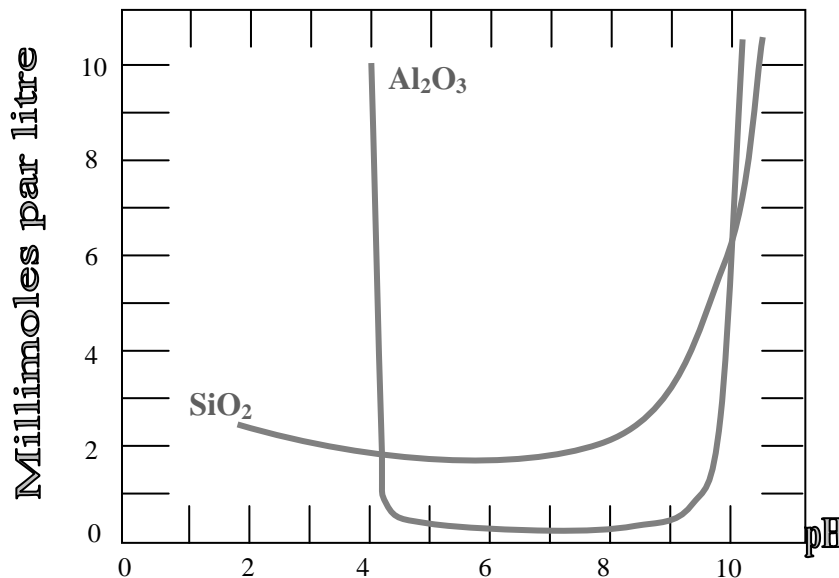
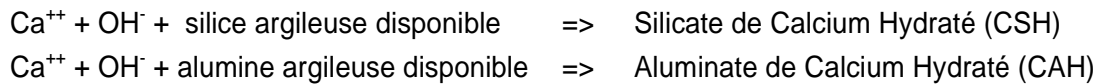


Figure 1–
Solubility of alumina and silica vs pH –
Courbe de solubilité de l'alumine et de la silice en fonction du pH

La formation de cristaux de CSH et de CAH similaires à ceux observés dans les matériaux cimentaires améliore progressivement les performances mécaniques des scalpages traités.

La vitesse des réactions à long terme dépendent de la nature cristallographique des argiles (montmorillonite, illite ou kaolinite réagissent en effet différemment à la chaux) mais aussi de la température ambiante. Elle est en général lente, ce qui autorise le stockage prolongé du scalpage traité avant sa mise en œuvre sans perdre ses propriétés et notamment son insensibilisation à l'eau.

3.3 Performances obtenues et utilisations possibles

3.3.1 Performances en carrière

Au-delà de la valorisation de ce matériau, l'exploitant cherche à modifier le comportement du scalpage de telle façon à pouvoir le traiter sans modifier significativement son process.

Sa crainte principale est le collage et le colmatage de ses installations par la fraction argileuse du scalpage. Une mesure de la valeur au bleu de méthylène (VBS) est une méthode facile pour quantifier cette fraction argileuse: plus la valeur est élevée, plus le matériau est collant et sensible à l'eau. Par ailleurs, l'allure de la courbe Proctor (densité= f(teneur en eau)) renseigne l'exploitant sur la sensibilité à l'eau du matériau : plus celle-ci est pointue plus le matériau est sensible à l'eau (cas des argiles)

Des expériences françaises montrent que la VBS évolue significativement après traitement à la chaux pour des dosages de l'ordre de 0,5 à 2%.

De la même façon on observe, comme pour les sols fins traités à la chaux, un aplatissement de la courbe Proctor du matériau de scalpage.

L'évolution de ces paramètres montre l'action de la chaux calcique aérienne sur le comportement du scalpage : désormais rendu insensible à l'eau et en conséquence de sa réduction de plasticité, ce matériau peut être intégré dans le process d'élaboration des produits de la carrière pour :

- l'utiliser en tant que tel : scalpage traité à la chaux pour les applications routières;
- en extraire la fraction granulaire qui réintègrera la chaîne de production des granulats nobles,
- le retraiter -après stockage- avec un liant pouzzolanique ou hydraulique adapté pour des usages en couches d'assises de chaussées à faible trafic.

Le stockage du matériau de scalpage traité -même pendant une longue durée (plusieurs mois) sur une zone drainée- n'altère pas les propriétés acquises immédiatement après le traitement. Il est à noter l'apparition, en surface des tas, d'une croûte calcaire de quelques millimètres due à la carbonatation de la chaux. Cette croûte a pour propriété de protéger le cœur du tas de l'action des eaux pluviales.

3.3.2 Performances pour l'utilisateur

Le traitement à la chaux des produits de scalpage permet d'améliorer la portance et la traficabilité « tout temps » du matériau. Après traitement à la chaux, le matériau se comporte comme une grave non collante.

Suivant l'application envisagée, le scalpage traité peut être utilisé tel quel ou après un traitement complémentaire au liant hydraulique.

Les performances à vérifier pour les scalpings traités conformément au Guide Traitement des Sols à la Chaux et/ou aux liants hydrauliques [4] sont:

- pour les usages en partie supérieure de terrassement (PST), il convient de vérifier que le rapport CBR (4jours immersion)/IPI > 1,
- pour les usages en couche de forme, il convient également de s'assurer que l'indice portant immédiat (IPI) soit supérieur à 20 et de la tenue au gel le cas échéant ($R_c > 2,5$ MPa au moment d'apparition du gel).

Dans le cas d'emploi en couches d'assises, un traitement complémentaire au liant hydraulique est nécessaire ; dans ce cas les valeurs du module élastique et de résistance mécanique en traction seront évaluées pour dimensionner la chaussée.

Les applications des scalpings traités à la chaux sont nombreuses et variées : remblai en grande masse, sous-fondation, remblai de tranchée, remblai technique ou, après traitement aux liants hydrauliques, assises de chaussée destinées au faible trafic.

3.4 Mise en œuvre

L'introduction de la chaux dans le process d'élaboration des granulats d'une carrière peut se faire de différentes façons :

- après production : le scalpage est stocké puis fait l'objet d'une campagne de traitement pour produire des « calci-matériaux » directement commercialisables. Ce procédé ne nécessite aucun investissement ; il comporte une phase de stockage pendant laquelle une prise en eau et donc une surconsommation de chaux est possible.
- en process intégré : l'ajout de chaux s'effectue en cours du process primaire, avant le criblage primaire. Dans ce cas, l'objectif est non seulement d'améliorer les performances du scalpage mais également d'optimiser le rendement de l'installation primaire : moins de collage, meilleure séparation argile/granulat, propreté des produits et fonctionnement de l'installation quelque soient les circonstances atmosphériques.
- en fin de process : après le criblage primaire, le scalpage est traité en ligne par malaxage pour produire des « calci-matériaux ». Dans ce cas l'investissement reste raisonnable. L'emploi de chaux est mieux maîtrisé, et la production au fil de l'eau permet de disposer d'un stock permanent de scalpage traité dont les performances ne seront pas altérées dans le temps.

3.5 Exemple d'application

Le traitement à la chaux a été évalué dans le contexte d'une carrière de grès, dont le gisement principal est recouvert d'une épaisse couche de matériau constitué de grès altéré et d'argile. Ce matériau présente une distribution granulométrique s'étalant de 0 à 70mm.

Cette couche ne fait actuellement l'objet d'aucune valorisation et est simplement mise en dépôt dans un endroit particulier de la carrière. Ce dépôt constitue cependant un volume important et nuit à l'extension de la carrière.

Le traitement de ce matériau de scalpage par l'opération de lavage n'étant pas envisageable, la valorisation du dépôt par un traitement à la chaux, de manière à obtenir un matériau utilisable en remblai, en applications de comblement de tranchée ou utilisable en plates-formes, a été testée, sous deux applications différentes.

Le matériau naturel, prélevé sur la bande transporteuse après criblage à 30 mm, présentait, au moment du prélèvement, une teneur en eau naturelle W_n s'étalant de 13.5 à 15.5%.

La fraction fine du matériau présente un indice de plasticité IP égal à 6, et une valeur au bleu de méthylène de $VBS = 0.56$. Le matériau est dès lors considéré comme faiblement argileux et catégorisé comme appartenant à la classe B5 selon la norme française NF P 11-300 (IP<12 et passant à 80 μm compris entre 12 et 35%), c'est à dire un sable limoneux, matériau a priori apte au traitement à la chaux.

Résultats du premier essai de valorisation

Le matériau 0-70 mm, introduit dans la centrale mobile de traitement, est d'abord criblé à 30 mm. Le refus (30-70 mm avec quelques mottes d'argile) n'est pas valorisé. Le passant est quant à lui traité à la chaux. Le dosage moyen en chaux est de 2% de la masse totale humide du matériau.

Le matériau chaulé présente les caractéristiques suivantes :

- Le traitement à 1% de CaO donne un IPI = 12, un CBR après immersion = 13.
- Le traitement à 2% de CaO donne un IPI = 34, un CBR après immersion = 28.

Productivité : 11.251 tonnes ont été manipulées dont 7.576 tonnes <30mm chaulées à 1,37% (moyenne), conduisant à un prix de revient de ~3,11 €/tonne par tonne manipulée et non traitée et de ~4,48 €/tonne par tonne traitée.

Le tableau 1 montre clairement le résultat négatif généré par la fraction 30-70mm, manipulée - mais non traitée- et mise en dépôt.

Granulométrie	0-20	20 - 40	40 - 70	résultat
Tonnage (to)		7.576	3.675	
Prix revient (€/to)		4,48	3,11	
Prix vente (€/to)		5,00	0,00	
Marge		3.940 €	-11.429 €	-7.490 €

Tableau 1: résultats financiers de l'essai 1

Résultats du second essai de valorisation

Le refus (30-70 mm avec quelques mottes d'argile) a été traité avec un dosage moyen en chaux de 2% de la masse totale humide du matériau. Ce traitement a été réalisé à la pelle mécanique, puis le matériau chaulé, après maturation d'une heure, est passé sur la ligne de criblage pour tamisage à 0-20, 20-40 et > 40mm. Le coût de ces manipulations est estimé, dans une installation fixe adaptée, à 3,35 €/tonne.



Photo 1: Matériau (criblage immédiat)

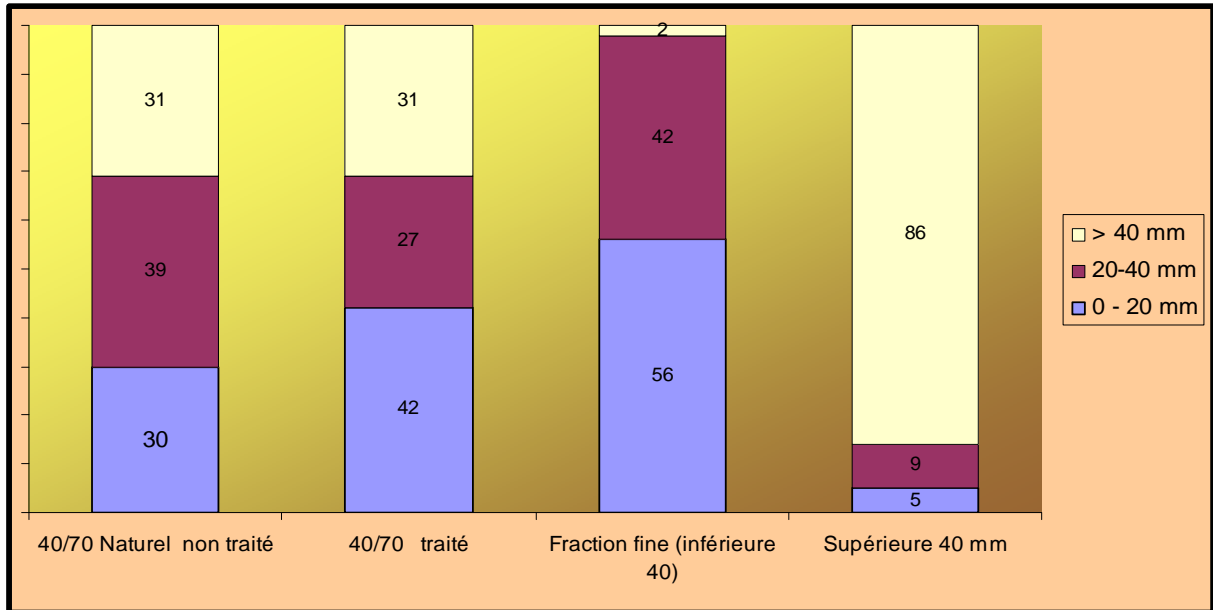


Tableau 2 : répartition granulométrique

Le tableau 2 ci-dessus, permet de visualiser l'optimisation de la ressource granulaire et le tableau 3 permet d'extrapoler les résultats positifs générés par la valorisation de la fraction granulaire.

Granulométrie	0-20	20 - 40	40 - 70	résultat
Tonnage (to)	5.331	4.780	1.140	
Prix revient (€/to)	3,35	3,35	3,35	
Prix vente (€/to)	5,00	10,00	10,00	
Marge	8.796 €	31.787 €	7.581 €	48.164 €

Tableau 3 : extrapolation des résultats financier de l'essai 2

4. Conclusion

Le traitement à la chaux de matériaux de scalpage de carrières est une technique simple permettant, sans modification significative des process d'élaboration des granulats et sans les contraintes des solutions classiques (mise en dépôt ou lavage), de résoudre les problèmes de valorisation des scalpages argileux :

- la fraction argileuse des granulats devient moins sensible à l'eau,
- les carrières épargnent leur espace,
- le gisement est mieux valorisé,
- le rendement de l'installation est amélioré en particulier en période hivernale.

Le traitement des scalpages à la chaux contribue ainsi à l'optimisation de l'exploitation de la ressource granulaire, permet de faire une économie d'apport de matériaux nobles et

offre des alternatives aux prescripteurs, maîtres d'ouvrage et utilisateurs qui s'inscrivent parfaitement dans la définition du développement durable.

REFERENCES

- 1] *Valorisation des produits de scalpage*, Note d'information SETRA n°38 (février 1988)
- [2] Little, D. *Handbook for stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*, (1995) Kendall-Hunt Publishing Company
- [3] Chaix, C. et Cantegrel, B. *Valorisation des stériles de carrières calcaires*, Revue Générale des Routes et aérodromes (Novembre 2004)
- [4] Guide Technique SETRA / LCPC, 2000 « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques »
- [5] UNICEM Nord Pas-de-Calais « Les scalpages traités » année ? n°?
- [6] Le Port J-P., *CBS mise sur ses stériles pour améliorer sa politique environnementale*, Recyclage et Valorisation (Mars 2004)
- [7] *La chaux pour la valorisation des matériaux de scalpage des carrières*, La lettre de l'industrie de la Chaux (Mai 1995)