

VALORISATION DES CENDRES VOLANTES

DANS LE DOMAINE ROUTIER

(Terrassements et couches de chaussées)

M.AFECHKAR : Chef du service Recherche au CNER

M.NAHHASS : Ingénieur au laboratoire du CNER

INTRODUCTION

A l'échelle internationale, la technique routière se préoccupe depuis un certain temps de l'utilisation des déchets et sous-produits d'origines divers (mines et carrières, industrie métallurgique, autres industries...) sans que cette utilisation ne doive nécessairement se substituer à celle des matériaux traditionnels. Son développement doit obéir aux objectifs suivants :

- contribuer à la protection de l'environnement en fournissant un débouché à ces déchets et sous-produits, évitant ainsi leur mise en dépôt.
- contribuer aux économies des matériaux traditionnels.
- Fournir à la construction routière des matériaux de qualité suffisante et ayant une certaine stabilité intrinsèque.

Parmi les déchets et sous-produits industriels qui, sous l'angle d'une évaluation globale de leurs aptitudes d'emploi en technique routière, présentent des possibilités optimales, se trouvent les cendres volantes. Ces matériaux sont en effet susceptibles de présenter les meilleures caractéristiques, soit tels quels, soit traités, soit en combinaison avec d'autres.

Ces cendres volantes constituent un produit minéral pulvérulent résultant du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques qui utilisent du charbon broyé comme combustible. Elle possèdent la propriété d'être pouzzoloniques (cendres volantes silico-alumineuses) provoque, en présence de la chaux, la formation de composés ayant des propriétés liantes comparables à celles d'un liant hydraulique.

Au Maroc ce pendant, seul un faible pourcentage des cendres volantes produites est utilisé (fabrication des ciments) alors que l'accumulation des restes sur les terrils et les bassins de décantation commençait à poser des problèmes sérieux : envolement des poussières, occupation des sols, dégradation des sites, etc.

Pour faire une débauche à ces déchets, plusieurs pays (USA, pays d'Europe, Inde, ...), les valorisent en construction routière, notamment en :

- en terrassements (remblais et couches de forme)
- couches de chaussées (fondation et base)
- enrobés hydrocarbonés (comme filler)
- amélioration des sols(stabilisation mécanique ou chimique)

Dans ce rapport bibliographique, nous se limitons seulement à l'utilisation des cendres volantes en terrassements et couches de chaussées.

I- ORIGINE DES CENDRES VOLANTES ET APPERCU SUR LES CENTRALES THERMIQUES

1- Origine des cendres volantes

Le charbon, contenant des stériles, est pulvérisé et injecté dans la chambre de combustion des chaudières des centrales thermiques. Ces chaudières peuvent être de deux types : soit à fusion de cendres, soit à cendres sèches. Dans les foyers à fusion de cendres, les résidus solides sont recueillis à l'état « fondus » à base du foyer : ces cendres sont ensuite brusquement refroidies dans l'eau. Les centrales de ce type n'existent pas au Maroc.

Dans les foyers à cendres sèches, cas de la totalité des centrales thermiques marocaines à base de charbon, une fraction (10 à 15%) de résidus solide se dépose à la base de la chambre de combustion, il s'agit des cendres de foyer, mâchefers de petites dimensions (30 microns à 30 mm) ; le reste (85 à 90%) se dépose d'abord par effet mécanique le long du trajet du gaz en combustion et des fumées puis est capté par des dépoussiéreurs électrostatiques. Ces poussières sont transportées dans des silos de stockage et d'homogénéisation. Ce sont les cendres volantes proprement dites qui sont abondantes au Maroc et qui nous intéresse dans tout ce rapport.

A partir de ces silos, les cendres peuvent être, soit chargés en citernes à l'état sec (cendres sèches), soit humidifiées (8 à 12%)-cendres humides- pour être livrées aux clients ou être évacuées vers les terrils.

En général, les cendres provenant de la houille, comportent une forte teneur en silice et en alumine et une faible teneur en chaux et sulfates ; Ce sont les cendres dites silico-alumineuses, cas des cendres marocaines. En revanche, les cendres provenant de la combustion du lignite sont caractérisées par des teneurs beaucoup plus faibles en silice et alumine mais plus élevées en chaux et sulfates ; Ce sont les cendres dites sulfo-calciques, qui ne sont pas produites au Maroc. Dans la suite de ce rapport nous parlerons que des cendres volantes silico-alumineuses.

2- Centrales thermiques marocaines a charbon

Le parc de production de l'ONE se constitue de trois centrales thermique à charbon (Jorf lasfar, Mohammedia et Jrada), les autres centrales utilisent d'autres combustibles (fioul, gasoil, gaz naturel,...).

2.1- Centrale thermique de Jorf lasfar (CTJL)

C'est la plus grande centrale thermique au Maroc, située à 20 km d'El jadida. Elle brûle du charbon importé généralement de l'Amérique, l'Afrique du sud, la Colombie et la Russie. La centrale produit aujourd'hui 460000t/an de cendres dont une partie est valorisée par certaines cimenteries nationales.

	1999	2000	2001	2002	2003	2004
cendres produites en tonne	277 326	263 826	405 000	438 746	400 962	475 169

2.2- Centrale thermique de Mohammedia (CTM)

Elle est située sur la route côtière de Casablanca Mohammedia au KM 18. Cette centrale est constituée de 4 groupes, deux fonctionnent au fioul et les deux autres au charbon importé de l'Amérique, l'Afrique du sud, la Colombie et la Russie.

Les cendres volantes et les cendres lourdes (mâchefers) produites par cette centrale sont jusqu'à ce jour, évacuées vers la mer, et dans le cadre des orientations gouvernementales en matière de la protection de l'environnement, l'ONE a décidé de mettre en place un système pour la récupération de ces cendres. Cette installation sera opérationnelle en 2007.

Année	Cendres volantes en t	Mâchefers en t
2003	63 760	11 252
2004	63 760	11 252
2005	53 133	9 376

2.3 - Centrale thermique de Jrada (CTJ)

Située à 70 km de Ouajda, elle fonctionnait, depuis sa mise en service (années soixante-dix), avec de l'anthracite des mines de Jrada. Après l'année 2000 et avec la fermeture de ces mines, la centrale brûle du charbon importé de l'Amérique, l'Afrique du sud, la Colombie et la Russie.

Les cendres volantes et les cendres lourdes produites par cette centrale sont mélangées et transportées hydrauliquement vers un barrage de décantation. Un premier barrage est déjà rempli et reboisé, un nouveau barrage a été réalisé et il est en cours d'exploitation.

II- CARACTERISTIQUES DES CENDRES VOLANTES

1- Caractéristiques physiques

1.1- Structure minéralogique

La matière initiale (stériles du combustible) est généralement constituée de silice cristallisée sous forme de quartz et de minéraux phylliteux du groupe des argiles (schistes). Au cours de la combustion, ces minéraux, étant donné la finesse de broyage du combustible et les températures atteintes dans la flamme, changent de structure et donnent naissance à une faible partie cristallisée sous forme de mullite et une partie amorphe. Le quartz inerte ne change pas de structure et reste sous cet état.

1.2 - Forme et état de surface des grains

Les cendres volantes sèche se présentent sous forme de poudre fine, veloutée, douce au toucher, analogue à une poudre de ciment. Les cendres volantes humides ont l'aspect d'un sable très fin.

Au microscope, elles apparaissent comme un mélange de grains de formes et de couleurs variées ; Elles sont constituées d'une forte proportion de billes pleines ou creuses, avec parfois des grains anguleux avec boursouffures et vides, coquilles ouverts. D'une façon générale, la surface des cendres volantes est lisse et brille.

1.3-Finesse

La dimension des grains des cendres volantes s'échelonne de 0.5 à 200 microns. Leur finesse varie en fonction de la nature du charbon (friabilité, teneur en matières volatiles), du type de chaudières et de l'état de broyeurs.

La surface spécifique Blaine est le plus souvent comprise entre 2200 et 4500 cm²/g, elle est analogue à celle d'un ciment.

1.4-Densité

Le poids du mètre cube de cendres sèches en vrac varie, suivant le tassement de 0.55 à 0.85 t atteignant une tonne avec vibration et compactage. Les cendres volantes sont donc un matériau particulièrement léger en travaux publics.

- La densité apparente moyenne des grains varie de 1.90 à 2.4 g/cm.
- La densité de la matière est de l'ordre de 2.65 à 2.80 g/cm³.

2- Caractéristiques chimiques

2.1-Teneur en imbrûlés

La combustion n'est jamais totalement complète, il subsiste des petits grains de charbon entraînés avec les cendres. La teneur en imbrûlés des cendres peut varier de 1 à 6% ; dans des cas exceptionnels (de marche faible allure), et en présence d'un charbon pauvre en matières volatiles, cette teneur peut atteindre 10%.

2.2-Composition chimique élémentaire

Les cendres volantes sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de faibles quantités d'oxyde alcalin et alcalinoterreux dont la chaux à l'état combinée. Leur composition chimique varie dans la fourchette ci-dessous en fonction de la provenance du charbon.

SiO ₂	43	à	54 %
Al ₂ O ₃	22	à	32 %
Fe ₂ O ₃ + TiO ₂	4	à	15 %
CaO	1	à	8 %
MgO	1	à	3 %
K ₂ O	2	à	5 %
Na ₂ O	0.5	à	1 %
SO ₃	0.2	à	2 %

2.3-Pouvoir pouzzolanique

A la température ordinaire, les cendres volantes fixent la chaux pour donner un liant hydraulique faisant prise en présence d'eau. Ce pouvoir pouzzolanique se manifeste par deux phénomènes : combinaison avec la chaux donnant des composés insolubles, durcissement.

Cette propriété est utilisée pour l'emploi des cendres volantes en couches de chaussées.

3- Caractéristiques géotechniques

3.1-Granularité

Les cendres volantes sont des matériaux très fins, leur courbe granulométrique est très peu différente de celle d'un limon. En outre cette granularité est relativement serrée, presque la totalité du matériau étant comprise entre 5 et 20 microns. Le refus au tamis de 80 microns est généralement entre 10 et 20 % en poids et le refus au tamis de 50 microns est entre 15 et 40%.

A noter qu'au sein d'une même production la granularité des cendres paraît assez variable.

3.2-Limites d'Atterberg , Equivalent de sable

Les limites d'Atterberg qui ont été mises au point pour des sols contenant des minéraux argileux et qui rendent compte des liaisons entre l'eau et ces minéraux, n'ont pas de signification dans le cas d'un matériau artificiel comme les cendres volantes. On ne peut pas donc parler d'indice de plasticité pour les cendres.

L'équivalent de sable des cendres volantes varie de 12 à 30. Il ne doit cependant pas être considéré comme significatif car les cendres bien que ne comportent pas d'éléments colloïdaux contiennent beaucoup de grains inférieurs à quelques microns.

3.3-Perméabilité, Angle de frottement interne

Les cendres volantes sont relativement perméables par comparaison avec une argile. Le coefficient de perméabilité des cendres compactées est de l'ordre de $0.5 \text{ à } 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$, analogue à celui des sables fins pollués et des limons.

L'angle de frottement interne des cendres volantes, non tassées, a des teneur en humidité moyennes de 25 à 30% est $\leq 20^\circ$ ce qui correspond à une cohésion faible. Après compactage, il atteint 30 à 40°.

3.4 - Sensibilité à l'eau

Les cendres volantes sont hydrophiles : elles peuvent absorber des quantités d'eau notables (jusqu'à 20 à 25%) sans perdre leur stabilité mécanique. Mais dès que la teneur en eau atteint une valeur voisine de 40% les cendres forment une boue liquide. Elles sont sensibles à l'eau : l'excès d'eau réduit la résistance et accroît leur déformabilité. C'est ainsi que les essais de portance CBR effectués directement après moulage , donnent des valeurs du CBR peut atteindre 15 à 20, alors qu'après quatre jours d'immersion les cendres ont une portance nulle et se présentent sous forme de pâte.

3.5- Poids spécifique, poids spécifique apparent et caractéristiques de compactage

Le poids spécifique de la matière constituant les cendres volantes est de $2,60 \text{ g/cm}^3$ mais a cause de la présence de sphérules creuses, on trouve par méthodes habituelles des poids spécifiques plus faibles, allant de 2 à $2,15 \text{ g/cm}^3$ en générale. Dans les conditions habituelles de transport des cendres destinées à des travaux routiers, c'est à dire transport en vrac en camion à une teneur en eau comprise entre 12 et 15%, le poids spécifique apparent des cendres humides est seulement de $0,95 \text{ à } 1 \text{ g/cm}^3$. Même après compactage, les poids spécifiques apparents secs obtenus sont très faibles : de $1,20 \text{ à } 1,40 \text{ g/cm}^3$ (matériau très léger).

Les courbes proctor des variations des densités sèches des cendres volantes compactées en fonction de la teneur en eau sont très plates, ce qui permet une tolérance sur le dosage de l'eau.

- à 100% du proctor normal, la teneur en eau optimale varie entre 28 a 30% et la densité sèche maximale varie entre 1,15 a 1,18 g/cm³.
- à 100% du proctor modifié, la teneur en eau optimale varie 22 a 25% et la densité sèche maximale varie de 1,21 a 1,25g/cm³.

III. UTILISATION DES CENDRES VOLANTES DANS LES TERRASSEMENTS

1 - Aspects généraux

Les cendres volantes ont souvent été utilisées en terrassements (remblais et couches de forme), en particulier sur sols compressibles du fait du faible poids spécifiques des cendres conduisant à des tassements moindres.

Pour la couche de forme et pour bien remplir ces fonctions (assurer la traficabilité et le compactage des couches supérieures), l'emploi des cendres volantes nécessite un traitement aux liants hydraulique. La couche de forme peut aussi réaliser en cendres volantes traitées à la chaux et au gypse, technique également utilisée en couche de fondation (cf utilisation des cendres volantes en couches de chaussées).

Les cendres volantes sont rangées, selon le guide français de la réalisation des remblais et couches de forme, dans la classe des sols organiques et sous-produits industriels, sous classe F2. Le guide marocain des terrassements routiers (GMTR) a retenu la même classification (F2) sans donner des détails sur les états du matériau et les conditions de son utilisation en terrassements routiers.

Le comportement des cendres volantes en terrassement nécessite une adaptation de certains indicateurs, ainsi les cendres volantes sont sensibles à l'eau, le passage de l'état moyen à l'état humide est brutal et il est donc fondamental de définir la teneur en eau limite correspondante une étude Proctor/ CBR.

A noter que la teneur en eau pondérale des cendres volantes varie rapidement du fait d'un poids spécifique plus faible que celui des sols naturels.

Les cendres volantes à la production sont récupérées à l'état sec. Cependant, le transport et le stockage en bassin se font par voie hydraulique et l'expédition des cendres volantes stockées en silos se fait après humidification. En conséquence, préalablement à toute utilisation en terrassement, il est nécessaire :

- de terminer la teneur en eau limite marquant le passage de l'état humide par une étude proctor/ CBR.
- D'amener les cendres volantes dans un état d'humidité moyen qui couvre une gamme étendue de teneur en eau par :
 - un essorage des cendres volantes de bassin après arrêt de l'alimentation. Le temps d'essorage est long (plusieurs mois) et doit être entrepris bien avant le début des travaux de terrassements.
 - une humidification au chargement des cendres volantes sèches de silos suffisante et homogène.

Les dispositions à prendre pour l'utilisation des cendres volantes en couche de forme figurent dans le même guide. L'utilisation de ces cendres en couche de forme nécessite un traitement aux liants hydrauliques. Les moyens de traitement (en place et en centrale), de repandage et de compactage peuvent être effectués avec les engins courants sur les chantiers de terrassement.

La protection de la couche de forme est indispensable, compte tenu de la susceptibilité de ce matériau aux intempéries. Pour réduire les risques de dessèchement et d'érosion du matériau, ce type de couche de forme ne doit pas subir de sollicitations trop agressives. Le manque d'expérience de la tenue sous trafic conduit à ne prévoir ce type de couche de forme que pour des circulations de chantier modérées.

2- Recommandations et règles pratiques

2.1-Utilisation en remblai

Les conditions générales d'utilisation des cendres volantes en remblais sont regroupées dans le guide français des terrassements routiers.

L'origine des charbons d'alimentation des centrales thermiques étant diverses, le comportement des cendres volantes sur chantier peut varier et en conséquence, il est nécessaire de procéder dans ce chaque cas à la détermination des paramètres teneur en eau limite, densité de référence. Des précautions particulières doivent être prises dans leur emploi :

➤ Approvisionnement des cendres

Par temps sec, on doit arroser, non seulement pour bien compacter mais aussi à cause de la poussière soulevée par le vent ou par les engins de transport. Par temps très sec, on doit même arroser les cendres chargées sur camions au départ des terrils, pour éviter que celles-ci ne s'envolent pendant le transport.

➤ Plate forme de remblai

Si la nappe phréatique est proche du terrain naturel, il est nécessaire de mettre en place une couche anticapillaire de l'ordre du mètre en grave ou en sable propre avant la mise en œuvre des cendres volantes.

➤ Exécution des remblais

Les cendres volantes à l'état moyen se réemploient facilement en remblai, sauf en cas de pluies moyennes ou fortes, voire de pluies légères, si la teneur en eau est proche de la teneur en eau limite.

Les conditions de repandage (épaisseur des couches) et de compactage (nombre de passes) se figurent dans le tableau ci-après. Compte tenu du manque d'expérience d'utilisation des cendres volantes, il est conseillé de tester l'atelier choisi sur le chantier pour adopter les conditions de son fonctionnement.

De manière générale, les compacteurs à pneus et les cylindres vibrants conviennent pour compacter les cendres volantes. Les engins les plus lourds permettent une mise en œuvre en forte épaisseur (0,5 m), mais compte tenu du coefficient de foisonnement important, des problèmes de traficabilité sont possibles. Pour éviter le ravinement, il faut veiller au bon compactage des flancs (la solution meilleure est d'opérer par surlargeur).

Dans le cas de zones à teneur en eau excessive, il est possible de traiter ponctuellement les cendres volantes humides à la chaux s'il existe des disponibilités en matériel sur chantier.

➤ Stabilité des talus de remblai

La pente a priori est de 3/2, mais doit être vérifiée. En cours de réalisation du remblai, pour éviter l'érosion, il faut évacuer par des descentes d'eau (goulottes préfabriquées...) les eaux de ruissellement provenant de la plate forme dressée afin d'éviter l'érosion des talus.

Après achèvement de la construction du remblai, il faut recouvrir le talus de terre végétale (0,30 m) et d'engazonnement (projection...) pourraient être utilisées après expérimentation.

En cours de réalisation du remblai, il peut s'avérer nécessaire, pour protéger l'environnement contre les poussières, d'entretenir la teneur en eau des cendres.

➤ Protection de surface

Dans le cas d'interruption de la mise en oeuvre des remblais sur plusieurs jours ou de la réalisation différée d'une couche de forme, il est nécessaire de protéger la plate forme de remblai par repandage d'une émulsion de bitume sablée (circulation légère possible) ou non sablée (pas de circulation).

2.2 - Utilisation en couche de forme

Les conditions générales d'utilisation des cendres volantes en couches de forme sont traitées dans le guide français des terrassements routiers.

La sensibilité à l'eau des cendres volantes implique un traitement aux liants hydrauliques pour obtenir une couche de forme de bonne portance et insensible à l'eau. Le traitement au ciment permet d'obtenir rapidement ces objectifs. Une étude spécifique est nécessaire pour définir le dosage en ciment, à titre indicatif un dosage de 7% permet d'obtenir des performances mécaniques élevées.

Les cendres volantes se prêtent bien au traitement en place au ciment à l'aide d'un malaxeur à axe horizontal. Cette technique est particulièrement bien adaptée pour traiter la partie supérieure d'un remblai aux cendres volantes. Le traitement en centrale de malaxage est également possible dans la mesure où une telle centrale est disponible sur chantier.

Le répandage s'effectue avec des moyens courants (niveleuse, boteuse). Le compactage aux rouleaux à pneus donne de bons résultats.

Ainsi qu'il a déjà été signalé, une protection superficielle de la couche, efficace contre une circulation de chantier importante, est difficile à réaliser. Le dessèchement et l'érosion du matériau sont possibles, ce qui conduit dans un premier temps à limiter l'emploi de ce type de couche de forme.

Par temps sec, il peut se former une pellicule poudreuse en surface de la couche qui empêche toute adhérence de la couche de cure. Il est alors nécessaire d'arroser avant de répandre l'émulsion.

IV. UTILISATION DES CENDRES VOLANTES EN COUCHES DE CHAUSSEES

1. Aspects généraux

La pouzzolanité des cendres volantes traitées à la chaux permet de les utiliser en couches de chaussées, suivant deux techniques :

- Par traitement des cendres à la chaux et au gypse, pour les couches de fondation uniquement.
- Par traitement aux cendres et à la chaux des graves, pour couches de fondation et de base.

1.1- La technique cendres volantes –chaux-gypse

Les cendres volantes-chaux-gypse sont utilisables, avec un dimensionnement approprié, en couche de fondation au même titre que les sables ou graves traitées au ciment.

La résistance mécanique des cendres traitées à la chaux ne se développe que très lentement le premier moi et rend la couche trop vulnérable à la circulation de chantier. Afin de palier cet inconvient, un accélérateur de prise, le gypse, est incorporé au mélange (voir graphiques).

Les expériences internationales ont permis de constater que :

- pour les couches de fondation économiques, le dosage en chaux de 4% est suffisant.
- le dosage optimal en gypse est voisin de 5%. Un surdosage n'apporte aucun gain de résistance.

Les deux graphes suivants illustrent l'influence du dosage en chaux et l'effet de l'addition de différents pourcentages de gypse sur la résistance à la traction des mélanges cendres volantes chaux.

La chaux vive est utilisée de préférence à la chaux éteinte. Elle est chère au départ, sa densité plus forte (0.95 au lieu de 0.5 pour la chaux éteinte) diminue par deux le volume de stockage et surtout le coût de transport. Son utilisation nécessite des précautions spéciales, notamment au chargement des silos et l'on exigera sur la centrale de fabrication un capotage efficace du tapis d'approvisionnement du malaxeur, évitant toute perte de chaux vive dans l'atmosphère.

1.2-La technique graves cendres volantes chaux

Les graves cendres volantes chaux sont utilisables en couches de fondation et de base avec un dimensionnement approprié au même titre que les graves traitées au ciment.

Les performances de ce type de graves dépendent de plusieurs paramètres, parmi lesquels :

- l'angularité
- la granulométrie
- le dosage en chaux
- le dosage en liant (cendres + chaux)
- la qualité de la chaux
- les caractéristiques de mise en œuvre (variation de la teneur en eau, variation de la densité, délai de compactage...)

Les expériences internationales ont montré que :

- l'étude du dosage optimal en chaux a conduit à retenir un rapport chaux/cendres de 1/4
- l'étude du dosage optimal en liant a conduit à retenir un dosage de 15%
- la formule couramment utilisée est :

85%	de granulats
12%	de cendres
3%	de chaux

2. Recommandations et règles pratiques

2.1- Technique cendres volantes-chaux-gypse

Pour réussir cette technique, l'expérience internationale attire l'attention sur les points suivants :

- Les cendres volantes sont de préférence de fraîche production. Elles peuvent néanmoins provenir de stockage, mais l'emploi de ces dernières nécessite des précautions particulières du fait de la présence de mottes de grosseurs variables.
- Le contrôle des cendres volantes porte essentiellement sur la teneur en eau qui doit être inférieure à 20% pour avoir un bon écoulement en trémie.
- Le stockage des cendres volantes peut nécessiter un bâchage dans le cas d'un environnement sensible. L'utilisation d'engins type bouteur, même léger, est à prescrire pour éviter les phénomènes de mottage.
- Fabrication : il sera opportun, s'ils n'existent pas, de prévoir sur la centrale les aménagements et dispositions suivants :
 - sur les trémies doseurs de cendres volantes et du gypse mises en place, de deux vibreurs, l'un en bas, l'autre en haut de la trémie, fonctionnant en cas de difficultés d'écoulement des cendres.
 - Angle des parois de la trémie aussi fermé que possible et ouverture de trappe aussi grande que possible.
 - surveillance permanente du bon écoulement des cendres
 - le nombre de silos à chaux doit être calculé d'après la consommation journalière augmentée d'une capacité de stockage nécessaire pour faire reposer la chaux au minimum six heures. Ils doivent être équipés de trémie tampon fonctionnant réellement à charge constante.
- Mise en œuvre : les cendres volantes-chaux-gypse, ont un délai de prise relativement long, ce qui rend aisée leur mise en œuvre sur chantier mais rend susceptibles ces mélanges aux effets de l'eau.
- Protection des couches réalisées : Il est nécessaire de protéger la couche réalisée avec une émulsion sablée avant la mise en place de la couche de base en graves cendres volantes.

2.2-Technique graves cendres volantes chaux

Les caractéristiques des granulats constituant le squelette de la grave cendres volantes chaux ont un influence important sur les performance de ce matériau. Ces granulats doivent répondre à des caractéristiques de résistance mécanique, d'angularité et de granulométrie adaptées au trafic. En France ces caractéristiques sont fixés par une « recommandation » SETRA-LCPC. Les courbes et les tableaux ci-après sont extraits de cette recommandation.

Comme dans la technique cendres volantes chaux gypse, les cendres volantes sont de préférence de fraîche production. Les cendres stockées peuvent être utilisées dans la mesure où toutes les précautions sont prises pour éviter le mottage et assurer la fourniture d'un matériau pulvérulent.

Avant chaque utilisation, il faut toujours contrôler les caractéristiques des cendres volantes et de la chaux.

Les dispositions à prendre au niveau de la fabrication sont, en ce qui concerne les cendres volantes, identiques à celles prises pour la technique cendres volantes chaux gypse.

Le répandage et le compactage nécessitent le même matériels que les techniques classiques de graves traitées aux liants hydrauliques.

Les couches de graves cendres volantes chaux doivent être protégées contre l'agression du trafic de chantier. Cette protection peut être obtenue par un enduit superficiel classique.

CONCLUSION

Comme nous avons vu dans ce rapport bibliographique, les cendres volantes des centrales thermiques à charbon peuvent être valoriser en construction routière, notamment en tant que :

- matériaux de remblais.
- matériaux pour couches de forme, généralement traités aux liants hydrauliques.
- matériaux pour couche de fondation mélangés avec la chaux et le gypse
- liant combiné à la chaux pour les graves de la couche de base.

Ces cendres volantes peuvent trouver leurs applications, au niveau du Maroc, surtout dans les régions proches des lieux de leur production. La région DOUKKALA ABDA, par exemple, peut être considérée comme une région idéale pour les utiliser, et ce du fait que cette région est :

- proche du lieu de production des cendres volantes (centrale thermique de Jorf Lasfar).
- proche des gisements de gypse naturel (provaince d'Asfi).
- proche du lieu de production du gypse artificiel (phosphogypse), sous produit de la fabrication de l'acide phosphorique à Jorf Lasfar.
- région déficitaire en matériaux naturels.

Du fait de manque d'expériences au niveau marocain, l'utilisation des cendres volantes sur des chantiers nationaux doit être précéder par :

- l'identification des cendres volantes nationales.
- réalisation des études au niveau laboratoire.
- réalisation des sections expérimentales pour suivre leur comportement.