

2 -REVUE DE DOCUMENTATION

2 -1 Introduction

Les déchets de construction et de démolition du BTP génèrent une grande diversité de déchets. Aujourd'hui environ 90% sont éliminés en décharge. Le recyclage impose des contraintes de tri et de collecte alors que les gisements sont dispersés, et que les procédés de démolition génèrent en général des déchets en mélange. Certains de ces déchets, en particulier les déchets minéraux, peuvent être réutilisés après tri et traitement particulier, dans les infrastructures routières.

Les pratiques actuelles de sélection et de valorisation amènent à traiter à part :

- Les bétons de démolition de bâtiments ou d'ouvrage d'art ;
- Les matériaux issus de démolition de couches de chaussée en grave non traitée et en matériaux traités aux liants hydrauliques ;
- Dans certaine région, les sols sous chaussées et les déblais de tranchés présentent de bonnes caractéristiques de propreté, qui permettent de les introduire dans les mêmes circuits de recyclage et de valorisation.

Après traitement approprié, ces produits peuvent être assimilés, en fonction de leur caractéristiques intrinsèque et de fabrication, à de matériaux de pré criblage, grave non calibrées, grave 0/D, sable, gravillons ou cailloux. Ils peuvent alors être utilisés pour les terrassements routiers et dans les couches de chaussées.

Ces matériaux peuvent être classées en deux catégories selon leur aptitude à être déposés dans le milieu naturel avec un risque limité pour l'environnement :

- ✓ Les matériaux dits inertes, qui n'évoluent pas dans le temps (béton, brique, tuile, pierre, verre, céramique),
- ✓ Les matériaux qui évoluent avec le temps ou qui représentent une gêne visuelle pour l'environnement (plâtre, bois, papier, carton, métal, matière synthétiques).

Quatre possibilités permettent d'évacuer l'ensemble de ces matériaux :

- ✚ La décharge de résidu urbain, c'est la plus simple et la plus commode puisqu'elle est apte, réglementairement et techniquement, à recevoir pratiquement tous les matériaux de démolition,
- ✚ L'incinération des produits inflammables ; papier, carton, bois, plastique,
- ✚ La décharge de résidus inerte,
- ✚ Le recyclage, axé sur la fabrication de granulats.

Les trois dernières possibilités ne sont pas opérationnelles que si l'on possède à un tri préalable et parmi celles-ci, notamment pour les matériaux dits inerte, le recyclage est sans doute la filière la plus contraignante.

2 -2 Nature des matériaux recyclables

Les producteurs ont une politique de sélection des matériaux de démolition à la réception, les matériaux refusés étant mis en décharge par les entreprises de démolition. Cette notion de qualité est fondée sur deux critères : la propreté et l'homogénéité, ce qui permet de distinguer cinq catégorie de matériaux :

- ❖ Le béton propre, armé ou non, sans enduit ni plâtre,
- ❖ Les matériaux propre, mais composites (enrobés, briques, tuiles, graves, pierres et blocs rocheux...),
- ❖ Les matériaux mélangés, avec une faible teneur en plâtre et en bois (maçonnerie, béton armé...),
- ❖ Les mauvais matériaux, avec une teneur en plâtre et en bois (maçonnerie, béton armé...),
- ❖ Les autres (matériaux terreux...).

Généralement, les matériaux réceptionnés sont stockés selon leur qualité et leur facilité de traitement. Ils sont composés à plus de 90% de matériaux propres et à 60% de bétons propres.

2 -3 Conditions économiques de rentabilité

Le coût d'élaboration des granulats recyclés est supérieur à celui des granulats naturels en moyenne, à qualité égale, et résulte de deux principaux facteurs :

La nécessité d'adjoindre aux fonctions traditionnelles de concassage criblage, un certain nombre d'opérations, destinées à faciliter le traitement des matériaux et à améliorer la qualité des produits finis, notamment :

- le stockage sélectif des matériaux réceptionnés,

- la préparation avant concassage (réduction du volume de gros éléments, cisailage des ferrailles...).
- En cours d'élaboration, le défeuillage (magnétique) ainsi que le tri manuels et mécaniques (épurateur, table densimétriques) des papiers, des bois et des plastiques,

D'autre part, l'efficacité moindre des matériels d'une installation de recyclage par rapport à celle d'une installation de granulats naturels.

- Le recyclage des matériaux de démolition s'effectue en zone urbaine ou péri-urbaine, c'est à dire à l' proximité immédiate, des grands centres de consommation de granulats.

En conséquence, le prix rendu sur les lieux d'utilisation des matériaux recyclés est très voisin du prix du départ de l'installation, ce qui n'est pas le cas, généralement, des granulats naturels qui doivent supporter un transport plus ou moins long.

L'égalité des prix est satisfaite sur pour un transport de granulats naturels sur une distance de l'ordre de 20 kilomètres. La règle de compétitivité peut se traduire de la façon suivante, à prix égal rendu sur le chantier de mise en œuvre :

Les granulats recyclés supportent un sur coût, au départ de l'installation, qui correspond à une distance de transport de 20km, environ, Ce qui revient à dire que les granulats naturels bénéficient d'une possibilité de transport supplémentaire de 20km, environ.

Cependant il s'agit d'un ordre de grandeur car les prix de départ des granulats varient d'une région à une autre. D'autre part, les conditions de circulation dans certaines agglomérations peuvent conduire à calculer les coûts de transport non seulement en fonction de la distance parcourue, mais aussi en fonction du temps écoulé.

Ainsi, la différence de coût constatée au niveau de l'élaboration peut être plus ou moins compensée par l'économie faite au niveau du transport, de telle sorte que, sous certaines conditions, les granulats de recyclage sont économiquement compétitifs.

2 -4 Perspectives

Malgré une évolution ascendante de la production, le développement du recyclage de la fraction inerte des matériaux de démolition n'est pas acquis. En effet la différence entre granulats " anciens " est principalement d'ordre économique. Pour que l'utilisation des granulats

de recyclage s'accroisse, il faut que celle-ci ne soit pas plus coûteuse que l'utilisation des matériaux naturels.

A cet égard, ce sont les grandes métropoles qui offrent les conditions les plus favorables :

- Approvisionnement en matériaux de démolition abondant et régulier,
- Consommation en granulats importante, avec des sources d'approvisionnement en granulats naturel souvent éloignées,
- Coût de mise en charge élevé.

Dans ce contexte, le recyclage peut être rentable, d'autant plus qu'il permet :

- d'économiser une matière première d'accès souvent difficile aux environs des grandes métropoles,
- de réduire l'encombrement des décharges de résidus urbains,
- de réduire, au moins partiellement, le transport en milieux urbain ou pré-urbain.

Ailleurs, où le potentiel de recyclage est plus ou moins diffus, des solutions techniques sont envisageables, mais les risques d'échecs sont importants :

- ✓ le recyclage par une installation mobile, outre le fait qu'il nécessite des chantiers de démolition importants (30 000 tonnes au minimum), présente des difficultés au niveau de la commercialisation des produits, pour plusieurs raisons :

Compétitivité souvent moins favorable que dans les grandes métropoles,
Délais d'évacuation des matériaux courts (durée du chantier),
Offre des produits se situant en marge du circuit organisé,

- ✓ le recyclage par une installation fixe collectant les matériaux de démolition sur une vaste aire géographique (la moitié d'un département, par exemple) est réalisable techniquement mais plus incertaine sur le plan économique car le coût de collecte doit être plus attractif que le coût de mise en charge. Ainsi pour un chantier de démolition situé à 50 km de l'installation de recyclage, le coût de mise en décharge, pour être dissuasif, devrait être supérieur au coût du transport à l'installation.

Conclusion

Le développement du processus de recyclage de la fraction inerte des matériaux de démolition repose sur la promotion de projets économiquement viables, des projet construits non pas sur la

recherche d'opportunités, mais sur l'étude des conditions susceptibles d'assurer la compétitivité de l'installation (proximité des centre de consommation, possibilité d'une collecte régulière d'une matière première sélectionnée et peu éloignée, compétence technique dans les granulats pour une bonne intégration dans les circuits de commercialisation). Ceci suppose :

- une action de promotion visant à diffuser auprès des maîtres d'ouvrage et maître d'œuvre les possibilités d'utilisation, sans risques, de ces granulats de recyclage,
- des mesures d'accompagnement de types réglementaire et inactif,
- une parfaite intégration dans le milieu environnant pour que la filière recyclage ne puisse être rejetée loin des grands centres urbains et être privée, ainsi, d'un atout économique important.

2 -5 Caractéristique de fabrication

Les installations de production de granulats recyclés ne sont pas tellement différente des installations de concassage des granulas naturel ; par contre, on doit porter une attention particulière à la présence d'impuretés dans les matériaux.

Pour enlever ces impuretés, on procédera à différents moments au cours du processus de concassage, à des opérations de triage manuel ou mécanique. Les plus gros débris comme les plaques de métal, les panneaux de bois, les aciers d'armature, le papier, le plastique, etc. sont enlevés à la main avant l'entrée des matériaux au concasseur primaire, tandis que pour enlever les impuretés légères, Quebaud (1996) propose deux procédés : l'épuration à l'air et l'épuration par voie humide. Pour la première solution, les granulats sont entraînés par un courant d'air sur des distances variables selon leur forme et leur nature. Par contre, ces installations demandent des frais d'investissement élevé. Dans le deuxième cas, l'épuration par voie humide (flottation) , la séparation est réalisée au moyen d'un bain dit « aquamator » dans lequel les granulats recyclés sont transportés par bande immergée et les fractions légères qui flottent sont séparés par des jets d'eau à contre-courant. On peut aussi ajouter au circuit de concassage des électro-aimants pour enlever les débris métalliques. Ces électro-aimants seront installés à la sortie des concasseurs et recueilleront les éléments métalliques comme les aciers d'armature.

Pour ce qui est de concassage en tant que tel, on peut procéder en système ouvert ou en circuit fermé. L'inconvénient d'un système ouvert est que la granulométrie du produit fini est moins bien contrôlée. Le RILEM (1988) recommande donc un circuit fermé, et ce même si le circuit ouvert permet une plus grande capacité de production (fig. 2.1). Le nombre de concasseurs utilisés dépendra de la qualité des granulats que l'on veut obtenir. L'utilisation d'un seul concasseur nous donnera des matériaux de plus ou moins bonne qualité, et ce, même si le

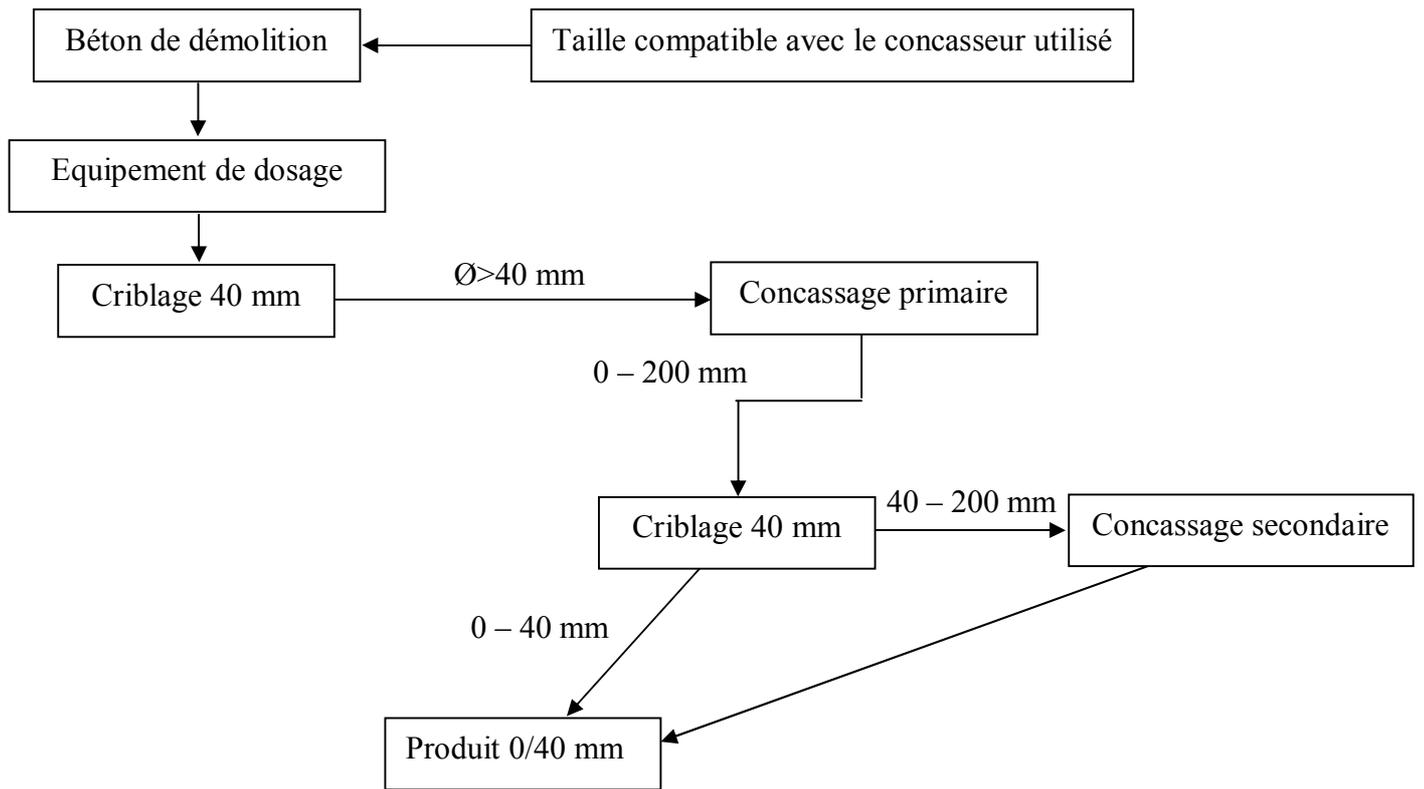
matériau de départ est relativement propre. De plus, procéder à un seul concassage n'enlèvera pas toutes les impuretés, seuls les débris métalliques seront enlevés grâce à l'électro-aimant. Donc l'utilisation d'un deuxième concasseur permettra de procéder à une deuxième opération de tirage (manuel et magnétique), ce qui donnera un matériaux beaucoup plus propre. Pour obtenir une plus grande propreté, le RILEM (1998) propose donc d'enlever la fraction inférieure à 10 mm après le premier concassage et de diriger le retenu vers le deuxième concasseur.

Le choix des concasseurs est aussi un élément important de la production de ce type de granulats. Au départ, les concasseurs doivent traiter des blocs de 0.8 à 1 mètre de diamètre, ce qui implique que l'usure du concasseur est beaucoup plus rapide et que le débit de production est plus faible qu'en carrière. Selon Quebaud (1996), le concassage primaire est souvent assuré par un concasseur à mâchoires ou à percussion alors que le concassage secondaire est assuré par un concasseur à mâchoires, à percussion ou, rarement, de type conique. A l'exception de la distribution granulométrique, les autres propriétés (la densité, la masse volumique, l'absorption...) ne sont pas affectées par le type de concasseur ou le circuit de concassage proprement dit, et tous les concasseurs produisent à peu près la même quantité de particules cubiques, si évidemment, les granulats originaux du béton de ciment n'ont pas de tendance particulière à développer des particules plates et allongées.

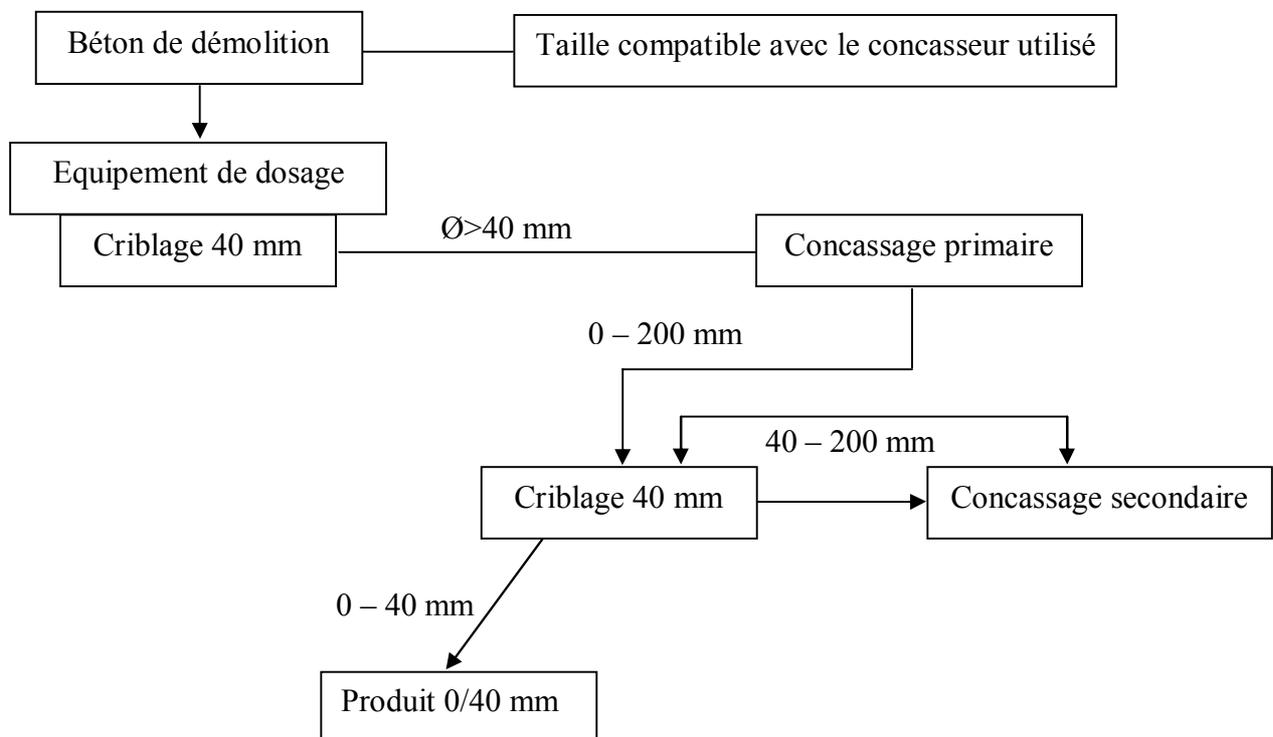
Les concasseurs à mâchoires donneront à eux une granulométrie plus grossière, rendant ainsi la réduction de la granulométrie insuffisante, ce qui nécessitera un deuxième concassage. Par contre, le RILEM (1998) affirme que ce sont ces concasseurs qui donneront la meilleure distribution granulométrique pour la production de granulats recyclés fabriqués à partir de béton de ciment.

Les concasseurs à impacts (ou à percussion) permettent une bonne réduction de la granularité lors du premier concassage et séparent très bien les armatures du béton ; cependant, ils subissent une usure très importante et les dimensions des matériaux à concasser sont limitées. Il faut noter qu'ils donneront une très bonne distribution granulométrique pour les usages routiers. Ces deux premiers types de concasseurs génèrent à peu près une quantité de particules fines (<80).

Le troisième type de concasseur, à cône, est beaucoup moins utilisé, mais il est très utile comme concasseur secondaire avec des granulats entrant de grosseur maximale de 200 millimètres.



(a) Système ouvert



(b) Système fermé

Figure 2.1 : système de concassage : a) système ouvert et b) système fermé

Le type de matériaux à concasser aura aussi une incidence sur le choix des concasseurs. Si on broye du béton de ciment, la quantité de pâte de ciment entourant les granulats naturels sera ou moins importante dépendamment du type de concasseur utilisé. De plus, Quebaud (1996) affirme que le concasseur à percussion brise aussi bien les granulats que la gangue de ciment, mais ne détache pas cette dernière des granulats naturels tandis que, de par leur action combinée de frottement écrasement, les concasseurs à mâchoires donneront un pourcentage de pâte de ciment plus important dans les fractions fines. On aura donc, à la sortie du concassage, des granulats ayant une grande proportion de particules fines.

Pour sa part, un matériaux bitumineux qui n'est pas concassé sur la place et entreposé en pile de réserve aura tendance à durcir, à se recimenter et deviendra plus difficile à manipuler. Si c'est possible, le matériau devrait être mélangé au plus tôt avec d'autres granulats pour enrayer ces problèmes. De plus, par temps chaud, les mâchoires de concasseur s'enduisent de bitume et ont tendance à perdre de leur efficacité. Le concassage est donc beaucoup plus efficace par temps frais.

En guise de conclusion sur la fabrication de ce type de granulats, Cimpelli(1996) propose un résumé des différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage sur l'île-de-France :

- Sélection et stockage des produits bruts ;
- Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un marteau hydraulique ;
- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires suivi d'un déferrailage électromagnétique ;
- Selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné à retirer les impuretés ;
- Eventuellement, concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire.

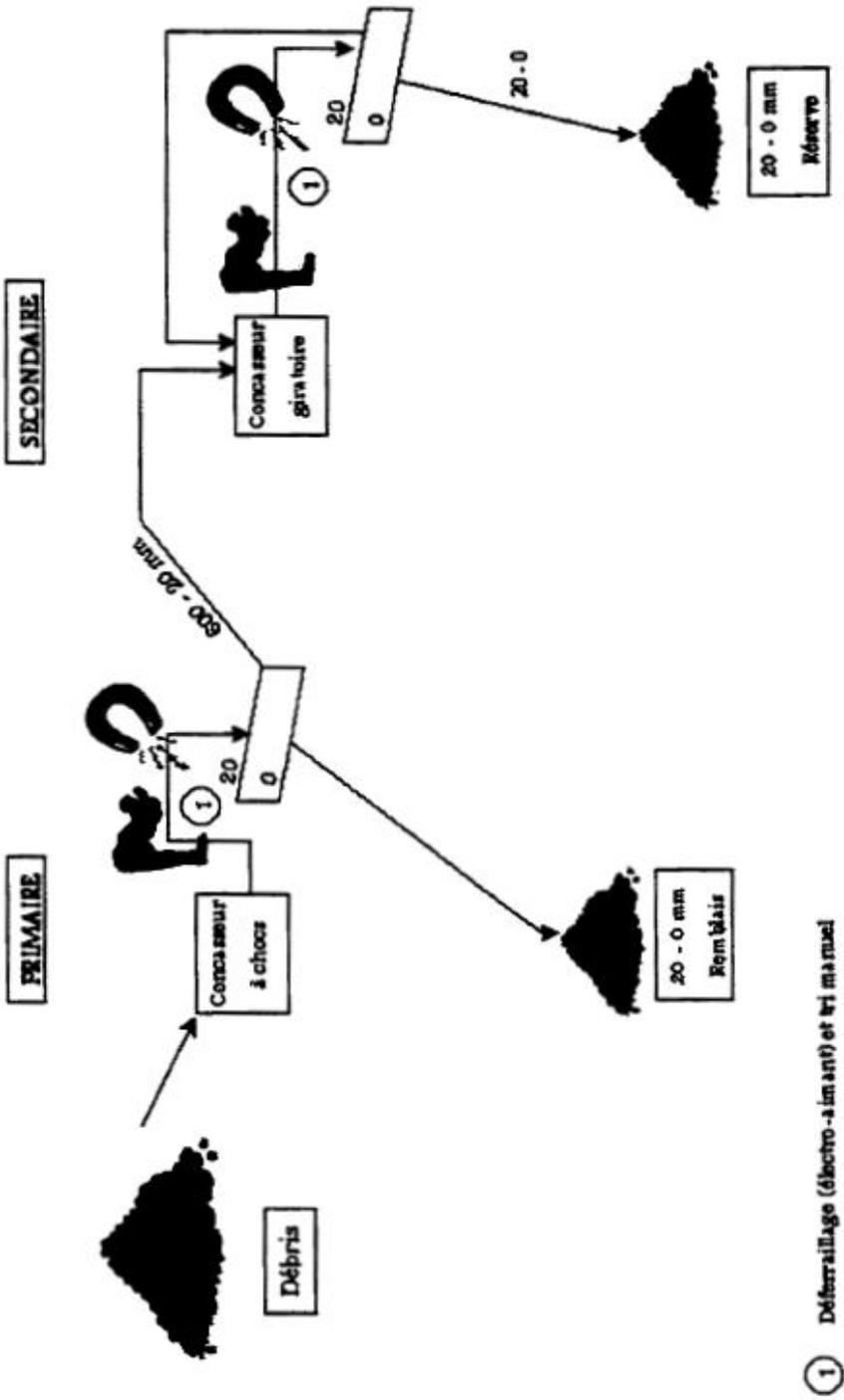


Figure 2-2 : Schéma de l'unité de concassage des matériaux provenant de la démolition d'une infrastructure

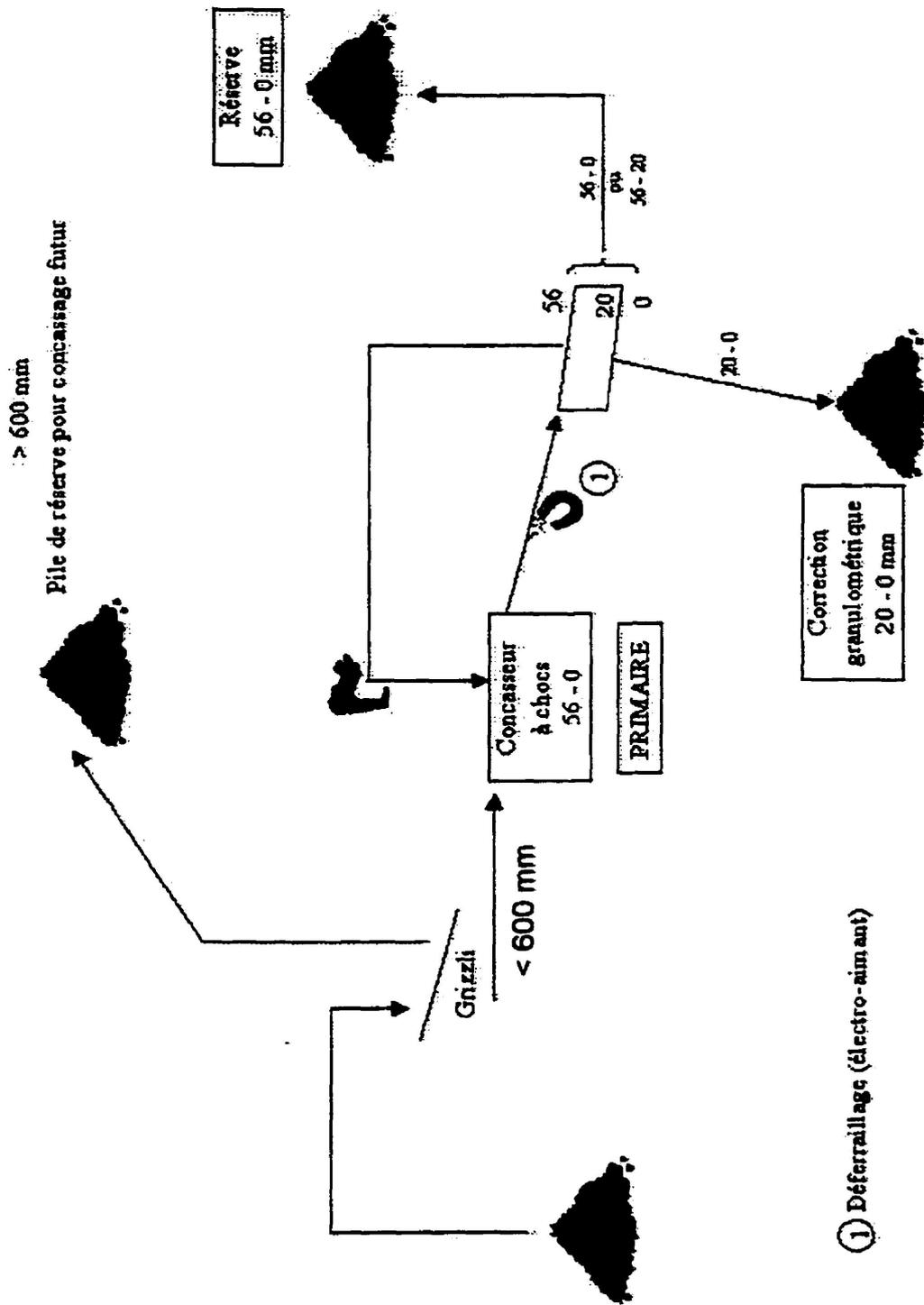


Figure 2-3 : Schéma de l'unité de concassage des matériaux provenant de la démolition d'un bâtiment

2 -6 Caractéristiques générales

Les matériaux recyclés qui sont maintenant concassés qui se retrouvent sous forme de granulats ont des propriétés mécanique et chimique particulières. Pour être utilisée dans la structure de la chaussée, les granulats devront répondre à une série d'exigence relatives à ces usages. Il faut donc procéder à des essais pour mieux connaître les caractéristiques de ces granulats.

2 -6.1 Caractéristiques générales des granulats de béton de ciment

En général, les matériaux de béton de ciment sont générés par la démolition de pavages, de bâtiment, de structures routières, etc. De plus, dans la région métropolitaine, on peut ajouter comme sucres les trottoirs, les éléments de voiries et de stationnements. Ces bétons de ciment sont fabriqués avec des granulats de bonne qualité qui composent entre 60 % et 75% du volume total du béton, qui ont une granulométrie relativement bien étalée et qui sont liée par une pâte de ciment.

Les différences de qualité des granulats recyclés proviennent donc surtout de la qualité des granulats qui composent le béton, de la grosseur de ces granulats, de la résistance en compression du béton original et de son uniformité. Par exemple, les bétons préfabriqués contiennent généralement de plus petits granulats, et ont une meilleure résistance en compression et les variations de résistance et des autres propriétés sont plus faibles que les bétons coulés sur place. Le béton recyclé peut aussi montrer des signes de faiblesse due aux réactions alcali-granulats. De plus, dans plusieurs régions où l'utilisation des sels déglaçant est pratique courante, les granulats recyclés produits par de ces bétons peuvent contenir des niveaux élevés de chlorures. Malgré ces variations, les essais indiquent que les granulats de béton de ciment concassés ont des propriétés qui ressemblent à celles des matériaux granulaires naturels et qu'ils réagiront de façon similaire lors de leur mise en oeuvre.

Le volume occupé par la pâte de ciment adhérant aux granulats naturels est de 25 à 35 % pour les particules comprises entre 16 et 32 mm, autour de 40 % pour les particules de 8 à 16 mm et d'environ 60 % pour les particules de 4 à 8 mm et ces pourcentages ne varient pas beaucoup en fonction du rapport eau/ciment du béton original (**RILEM, 1988**) , de plus, environ 45 à 65 % de la pâte de ciment est comprise dans la fraction 0/300 μ m.

Finalement, si on compare les granulats naturels, normalement utilisés dans les bétons conventionnels, et les granulats de béton de ciment recyclé, on peut conclure que les granulats de béton recyclé sont :

- ❖ moins denses;
- ❖ moins propres;
- ❖ plus exigeants en eau (plus absorbants);
- ❖ plus poreux et hétérogènes.

2 -6.2 Caractéristiques générales des granulats bitumineux

Les propriétés des granulats bitumineux dépendent largement des propriétés des constituants du vieux pavage (granulats et bitume). Étant donné que les granulats bitumineux peuvent provenir de différentes sources, la qualité de ceux-ci peut varier énormément. La quantité de bitume à l'intérieur des enrobés bitumineux est généralement de 3 à 7 % en masse, mais selon des études réalisées aux États-Unis (**Turner-Fairbank 1999**), les granulats bitumineux obtenus à partir de la majorité des couches de roulement ont en moyenne de 4,5 à 6 % de bitume (en masse). Les propriétés mécaniques des granulats bitumineux et d'un mélange granulaire non lié contenant de tels granulats évoluent avec le temps et varient de façon significative en fonction du contenu en enrobé bitumineux. De plus, comme les granulats bitumineux sont composés de plus de 90 % de granulats naturels, leurs propriétés dépendront grandement de celles des granulats naturels qui les composent.

2-7. Utilisation des matériaux recyclés dans les bétons de ciment

2 -7.1 Influence des granulats de béton de ciment recyclés dans la fabrication des bétons de ciment

Les bétons de ciment recyclés sont peu utilisés dans les bétons de ciment. Ce type de granulat est pourtant un produit de démolition très répandu. De plus, les nouveaux bétons comportant ces matériaux recyclés sont encore peu étudiés. Pour faire un béton avec de bonnes résistances mécaniques et une bonne durabilité, il est essentiel de respecter quelques règles de fabrication en utilisant un bon granulat, une quantité d'air suffisante pour résister aux cycles de gel/dégel, un rapport E/C adéquat.

L'utilisation de bons granulats est essentielle dans la confection d'un bon béton. Ce sont eux qui vont régir une bonne partie de la résistance mécanique. Dans notre cas, mentionnons qu'il faut utiliser les meilleurs granulats recyclés possibles pour ne pas affaiblir le nouveau béton.

Une étude effectuée par **Quebaud [1996]**, à l'université d'Artois, démontre que les mélanges fabriqués avec ce type de granulats aboutissent à des bétons plus exigeants en eau et un peu moins résistants mécaniquement que les bétons classiques.

Un béton se doit de posséder de bonnes résistances mécaniques et une qualité importante. D'après une étude menée par **Bérubé et al. [1998]** les bétons fabriqués avec des granulats de béton recyclé obtiennent de bonnes résistances mécaniques. Ces nouveaux bétons peuvent atteindre des résistances à la compression équivalente à celle d'un béton normal, soit des résultats de 30 à 40 MPa. Bien sûr, plus la quantité d'air entraînée et le rapport E/C augmentent dans un mélange, plus la résistance mécanique va baisser.

L'autre facteur pouvant influencer la performance d'un béton est sa quantité d'air entraîné dans le mélange. Cette quantité est très importante au niveau de la durabilité du béton face au gel. Il faut donc en entraîner suffisamment dans le mélange, soit de 5 à 8 % selon son utilisation. D'après **Bérubé et al. [1998]** il est plus difficile d'entraîner de l'air dans un mélange comportant des granulats de béton recyclé. Il faudra alors utiliser des mesures pour remédier à ce problème, comme par exemple utiliser un agent entraîneur d'air en quantité appréciable pour que le béton résiste mieux au climat du gel/dégel.

De plus, d'après ces mêmes auteurs, les prismes de béton conçus avec du béton recyclé et sans air entraîné réagissent assez mal aux cycles de gel/dégel, soit l'essai d'expansion ASTM C666. Les prismes ont tendance à prendre de l'expansion et à se fissurer facilement. Notons que l'utilisation dans le mélange, d'un béton recyclé avec air entraîné mène à de meilleurs résultats. Ces prismes ainsi construits se fissurent moins et prennent beaucoup moins d'expansion.

Pour conclure, d'après **Quebaud [1996]**, les bétons conçus avec des granulats de béton de ciment recyclé présentent des caractéristiques bien particulières si on les compare aux bétons classiques. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Des résistances à la compression et à la traction inférieures d'environ 10 à 30 %;
- Des modules élastiques inférieurs d'environ 15 à 40 %;
- Une moins bonne adhérence entre la pâte de ciment et le granulat.
- Des retraits plus élevés de l'ordre de 50 à 100 %.

2 -7.2 Influence des granulats asphaltique dans les bétons de ciment

Les granulats asphaltiques sont très peu utilisés dans les bétons de ciment. Les alternatives sont de les utiliser dans le retraitement en place des chaussées ainsi qu'en usine (grave bitume). Très peu de recherches sont effectuées dans le but de les utiliser dans les bétons

conventionnels puisque, d'après **Pilon [1998]**, ces granulats asphaltiques influencent beaucoup les résistances mécaniques.

D'après des études effectuées par **Tremblay [1996]**, **Pilon [1998]** et **Marchand et coll. [1997]** au Centre de recherche interuniversitaire sur le béton de l'Université Laval (CRIB): un des paramètres les plus influents sur les propriétés mécaniques du béton retraits en place serait la teneur en granulats asphaltiques. Cette teneur est exprimée selon le rapport **A/G**: soit l'épaisseur d'asphalte par rapport à l'épaisseur totale des matériaux décohésionnés.

Quelques résultats tirés de l'étude de **Tremblay [1996]** sont présentés au tableau 2-8. Ces résultats démontrent très bien l'influence de la teneur en granulats asphaltiques sur les propriétés mécaniques des bétons fabriqués. Notons que dans le cadre de cette étude, les bétons ont été fabriqués à maniabilité constante et non à rapport E /C constant.

Tableau 2-1 - Propriétés mécaniques de bétons à 28 jours de cure en fonction du rapport A/G (Tremblay [1996])

Rapport A/G *	Rapport E/C	Compression simple (MPA)	Flexion (MPA)	Module élastique (MPA)
0.00	0.51	45.5	5.6	33000
0.15	0.61	17.8	3.6	18600
0.33	0.58	12.6	3.5	-----
0.60	0.56	8.6	2.6	7600

* Rapport de l'épaisseur d'asphalte sur l'épaisseur totale des matériaux décohésionnés

D'après ces résultats, on remarque que plus le mélange contient des granulats asphaltiques, plus les propriétés mécaniques diminuent, soit la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module élastique. Mais, pour une application routière, les résultats obtenus pour la résistance à la flexion demeurent très acceptables.

De plus, l'étude menée par **Tremblay [1996]** [démontre que la présence de granulats asphaltiques tend à faire augmenter le retrait de séchage par rapport à un béton conventionnel.

Quebaud [1996] comme dans le cas de Tremblay, a remarqué que la présence de bitume dans la constitution des granulats réduisait considérablement les résistances mécaniques du béton. Par exemple, une addition de 2 % de bitume dans le volume total des granulats impliquait une réduction de 15 % de la résistance à la compression du béton.

D'après ce même auteur les mélanges confectionnés à l'aide de ces matériaux démontreraient les caractéristiques suivantes :

- Une baisse de la résistance à la compression;
- Une baisse de la résistance à la flexion;
- Une baisse du module élastique;
- Une augmentation du retrait de séchage (p/r à un béton conventionnel);
- Une bonne liaison pâte/granulat.

Finalement, d'après **Pouliot et al. [1998]** malgré la faible résistance à la compression des bétons, la résistance à la flexion demeure très acceptable pour une utilisation routière.

2 -8 Utilisation de matériaux recyclés dans les chaussées

2 -8.1 Retraitement en place des chaussées

2 -8.1.1 Technique utilisées

Le retraitement en place des chaussées est une méthode de plus en plus utilisée dans les différentes municipalités du Québec et ailleurs dans le monde, notamment en France pour la reconstruction des routes. Cette méthode consiste à recréer, à partir d'une ancienne chaussée dégradée, une structure stable et homogène. Ainsi, on traite en place les matériaux existants, soit ceux de la route, et ce avec un apport éventuel de matériaux complémentaires comme de nouveaux granulats et un liant (simple ou mixte). La technique se limite cependant aux routes à trafics faible et moyen dont la structure ancienne présente des qualités suffisantes. Il en découle plusieurs techniques comme la « grave-bitume » (en usine), le retraitement haute performance (RHP) et la stabilisation au liant simple ou mixte. Il faut noter que la technique de « grave-bitume », bien qu'élaborée en usine, utilise tout de même les matériaux du chantier.

A) - Grave-bitume

La technique « grave-bitume » est un procédé qui utilise un mélange fabriqué en centrale d'enrobage à chaud (en usine). Elle est caractérisée par sa faible teneur en bitume, soit **3,5 %**, comparativement à un enrobé conventionnel qui lui, en contient de 5 à 6 %. Le mélange obtenu par ce procédé est composé d'environ 50 % de produit de planage (enrobé bitumineux contenant environ 5% de bitume) et 50 % de nouveaux granulats. Ces nouveaux granulats proviennent généralement d'une nouvelle source et non directement de la fondation de la route comme dans les autres techniques. Un ajout de 1 % de nouveau bitume est donc ajouté au mélange de granulats pour obtenir la teneur en bitume résiduelle de 3,5 % mentionnée ci-dessus. Cette méthode est utilisée dans le but d'augmenter la capacité structurale (portante) de la chaussée et d'en diminuer l'épaisseur.

B) - Le retraitement haute performance (RHP)

Le retraitement haute performance ou RHP se définit comme étant une technique de décohesionnement et de retraitement des chaussées au coulis de ciment. Cette technique consiste à décohesionner le pavage, constitué d'enrobé bitumineux, et une partie de la fondation pour en faire un mélange avec un coulis de ciment. Ce type de mélange est de type BCR (béton compacté au rouleau). Une chaussée fabriquée à l'aide de cette technique constitue une alternative intéressante puisqu'elle allie économie et performance. Elle s'effectue en cinq étapes, présentées Figure 2.4.

Dans un premier temps, il y a un décohesionnement initial du tronçon de la route réhabilité. Cette étape consiste à décohesionner la structure, soit le pavage souple et une partie de la fondation, et ce jusqu'à une profondeur d'environ 200 à 300 mm (schéma 1a).

Par la suite, un échantillonnage et une caractérisation du matériau sont effectués pour évaluer sa qualité (granulométrie, teneur en bitume, propreté, matières organiques, etc.).

Notons que la quantité de granulats bitumineux ne devrait pas dépasser 50 %. À cette étape, des corrections peuvent être apportées si les matériaux ne sont pas conformes (schéma 1 b).

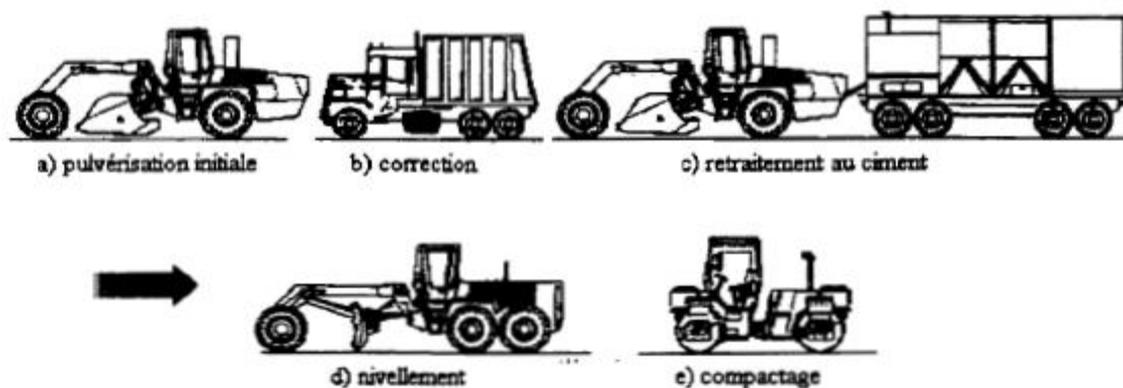


Figure 2.4 : Les étapes du retraitement à haute performance

[Pilon 1998]

La troisième étape consiste à homogénéiser le matériel et à introduire le coulis de ciment. Ces manoeuvres sont effectuées lors du deuxième passage de l'appareil de décohesionnement. Le dosage en ciment est contrôlé de façon précise par un débitmètre à la sortie de l'unité. À ce stade des opérations, des adjuvants (agent entraîneur d'air, etc.) sont ajoutés dans la plupart des mélanges (schéma 1c).

Une fois ces opérations terminées, on procède immédiatement à la mise en place des matériaux. C'est à cette phase du procédé qu'il y a nivellement et compactage de ceux-ci.

Le nivellement est effectué à l'aide d'une niveleuse conventionnelle et le compactage à l'aide d'un rouleau compacteur avec ou sans vibration, selon la maniabilité du mélange. Le produit fini donne une dalle de béton compactée (BCR) dont la capacité portante est très bonne (schéma 1d et 1e).

Finalement, après un mûrissement de 2 à 3 jours de la dalle, il y a application d'une couche de roulement en enrobé bitumineux afin d'assurer un confort de roulement et protéger la surface de la chaussée.

C) - Stabilisation au liant simple ou mixte

Ce type de retraitement est de plus en plus utilisé dans la construction du réseau routier au Québec.

La technique impliquée s'apparente beaucoup à celle du RHP. Le RHP est un retraitement stabilisé au ciment. Le procédé de fabrication est sensiblement le même avec un liant simple ou mixte. Les routes sont étudiées cas par cas et sont construites selon les normes.

Bon nombre d'options s'offrent au fabricant de route quant à l'utilisation de liants simples ou de liants mixtes. Il existe aujourd'hui plusieurs types de liants sur le marché ainsi que plusieurs façons de les utiliser. Les Liants retrouvés sur le marché sont l'émulsion de bitume, un ciment Portland, la chaux, un bitume « moussé » et un bitume standard.

L'émulsion de bitume est constituée principalement d'eau et de fines gouttelettes de bitume. Le produit final est un liquide homogène de couleur noire. Il est utilisé à froid dans les mélanges. Le bitume « moussé » ressemble fortement à l'émulsion, mais il a une texture différente. Le bitume standard est utilisé à chaud comme dans la pose d'un pavage conventionnel. Le ciment Portland et la chaux sont des produits bien connus et sont utilisés selon des dosages prescrits.

Les liants peuvent être mélangés entre eux pour obtenir des mélanges de qualité supérieure. D'après **Bergeron [1998]**, les mélanges les plus couramment utilisés sont l'émulsion et le ciment, l'émulsion la chaux et le bitume, la mousse de bitume et la chaux. Ces liants peuvent être ajoutés au mélange de plusieurs façons, par le biais d'un coulis (liquide), par épandage à sec directement sur le sol ou lors de la fabrication du mélange dans une cuve servant à leur préparation. De toutes ces méthodes, la dernière option reste la plus intéressante pour l'entrepreneur. De cette manière, le mélange est plus homogène et donne de meilleurs résultats.

2 -9 Matériaux générés et utilisés

Le procédé de retraitement en place des chaussées consiste à décohesionner le pavage et à mélanger les matériaux asphaltiques à une certaine épaisseur des matériaux de la fondation existante. Les matériaux asphaltiques sont réduits à une grosseur de particules équivalentes à un 0/20 mm ou un 0/40 mm selon le cas. Les matériaux de fondation ont déjà une granulométrie adéquate pour ce type de projet. Ils ne posent donc aucun problème, à condition qu'ils respectent la quantité de fines recherchée et un bas niveau de matières organiques.

D'après **Bergeron [1998]**, il est recommandé d'utiliser des matériaux de fondation comportant moins de 15 % de passant 80 μ m. De plus, le mélange généré par les deux types de granulat, soit ceux asphaltiques et ceux de la fondation, devrait contenir des particules jusqu'à 40 mm. Ce maximum semble plus valable et plus réaliste pour un entrepreneur car, lors du décohesionnement de la chaussée, il est difficile d'obtenir une granulométrie se rapprochant exactement d'un 0/20 mm. On se contente alors d'un 0/40 mm ou on fait les corrections nécessaires pour obtenir une granulométrie plus fine. Pour en arriver à de tels résultats, on doit tamiser le matériel ou redécohesionner le mélange, ce qui est plus coûteux et plus long.

2 -10 Avantage et inconvénients du retraitement en place des chaussées

❖ Avantages

Le retraitement en place des chaussées est une nouvelle technique qui nécessite encore beaucoup d'études mais qui est, jusqu'à maintenant, performant assez bien. D'après **Vautrin [1986]** voici les principaux avantages de cette technique.

- Son premier avantage est l'utilisation des matériaux en place, ce qui conduit à l'économie de granulats naturels et à la diminution des coûts de transport.

- De plus, le remplacement d'une partie de la fondation et parfois même de la sous-fondation permet la réalisation d'une nouvelle structure à capacité portante améliorée. Avec cette nouvelle base, l'ancien patron de fissuration est détruit et la route devient plus durable et moins sujette à la fissuration.
- Le niveau d'une route restaurée à l'aide des méthodes courantes, soit l'ajout d'une couche de roulement neuve ou un simple ajout granulaire, est haussé considérablement, ce qui n'est pas le cas du retraitement en place.

Finalement, les qualités visées avec cette technique sont une bonne capacité portante, la résistance au gel et un coût de réalisation abordable

❖ Inconvénients

Les techniques de retraitement en place utilisées lors de la restauration des anciennes routes comportent aussi des difficultés. Les résultats obtenus lors de l'utilisation de ces techniques dépendent principalement de la qualité de la structure de la route déjà existante. En effet, la qualité du produit fini va être grandement influencée par la qualité des matériaux de la structure ainsi que de l'infrastructure. Voici les principaux inconvénients reliés au traitement en place des chaussées :

- Comme le remarque **Vautrin [1986]**, l'inconvénient le plus remarqué dans le retraitement des chaussées est la piètre qualité des matériaux traités. L'utilisation de liants peut toutefois valoriser beaucoup ces granulats de composition souvent variable.
- Autre aspect négatif, le problème relié au gel dans les sols supports. D'après **Vautrin [1986]**, la reconstruction d'une route à l'aide des techniques de retraitement en place des chaussées, produit une structure routière d'épaisseur équivalente ou plus faible que celle de l'ancienne route. Ce faible apport de matériaux rend la structure plus gélive. Pour régler ce problème, on peut jouer avec l'épaisseur de la fondation. En épaisissant la structure de la chaussée, on limite habituellement les effets du gel. Cependant, des normes d'esthétisme et des contraintes monétaires s'imposent. Une structure trop rehaussée signifie des coûts élevés pour l'entrepreneur et un paysage modifié. On peut aussi régler partiellement le problème en entraînant une quantité d'air suffisante dans le béton pour lui permettre de mieux se comporter face aux cycles de gel/dégel.

- D'après **Quebaud [1996]**, les granulats de béton de ciment recyclé vont demander un apport en eau plus grand qu'un granulats conventionnel quand ils vont être utilisés dans la fabrication de nouveaux bétons. Donc les mélanges effectués avec ce type de granulats vont demander beaucoup plus d'eau lors de leur fabrication.

- Le dernier problème est celui du temps de prise de la dalle de béton ou des matériaux traités. En effet, selon les essais effectués par le **CRIB** (Centre de recherche interuniversitaire sur le béton) sur la rue Borne et le Chemin Benoît, entre 1997 et 1999, le temps de durcissement d'une dalle de béton compacté au rouleau peut varier entre 2 à 3 jours avant de permettre la pose d'une couche de roulement. La couche de roulement est installée pour protéger la structure et pour le confort des usagers. Notons que les autres méthodes utilisées dans la réhabilitation des chaussées comportent des temps de cure beaucoup plus élevés, ce qui est défavorable pour un entrepreneur et surtout pour les usagers. C'est pourquoi cette méthode n'est utilisée que pour des routes à faible débit.

2 -11 Agrégats recyclés et béton d'agrégats recyclés

2-11.1 Introduction

L'idée de recycler des matériaux de démolition n'est pas nouvelle. Pendant la seconde guerre mondiale, les gravats provenant des bâtiments détruit par les bombardements étaient employés en grande Bretagne et en Allemagne pour la restructuration. Les granulats obtenus par ce recyclage comportaient un forte de brique compte tenu de la nature des constructions de l'époque [BOUCHARD. M(1984) &PIMIENNTA. P, TRAN. T, (1997)]. Un travail de recherche a lieu mondialement et a fait l'objet de plusieurs conférences internationales dans l'utilisation de béton démolis et déchets de maçonnerie comme agrégats dans le béton.

Actuellement, la valorisation des déchets de démolition a dépassé le stade d'expérimentation et connaît un développement assez important. Le taux de recyclage dans différents pays Européens en 1992 est résumé dans le tableau 2.2

Tableau 2-2: Taux de recyclage en Europe [QUEBAUD.M, COURTAIAL. M & BUYLE-BODIN (1996)]

Pays	Déchets de démolition en million de tonnes par an	Matériaux recyclés en millions de tonne par an	Pourcentage de recyclage par rapport à la production de déchets	Pourcentage de recyclage par rapport à la production des granulats naturels
Pays-Bas	12.2	8.5	73	2.6
Royaume-Uni	24	11	45.8	3.8
Allemagne	58	14.9	34.6	3.6
Belgique	7.5	2.2	29	5.8
Danemark	05	1.25	25	4.25
France	25	03	13	0.75
Espagne	13.5	0.5	3.7	0.2
Total	145	42	Moyenne = 31	21.0

2.11.2 Historique et expérience étrangères

Il est connu que le principe de recyclage des matériaux n'est pas nouveau car il est déjà utilisé par les romains. Le principe consistait en général en la destruction des statuts des dieux qui n'étaient pas vénérés et les matériaux récupérés servaient à en faire nouvelles.

Devant le fait des villes sinistres pendant et après la seconde guerre mondiale, le recyclage des matériaux s'est présenté comme une solution envisageable et connu son début en Europe et plus précisément en Allemagne et en Grande-Bretagne.

Cette période d'après guerre est suivi d'une période assez longue passée dans les études, jusqu'à la publication par "BUCK" d'un rapport de recherche 1973 [BOUCHARD. M (1984)], puis la présentation par le même auteur d'une communication en 1976 [BOUCHARD. M, (1984) PIMIIENTA. P, DELMOTTE. P, VIMON. E & COLOMBARD-PROUT.M 1997).] Sur l'étude des granulats de béton recyclé.

A partir de 1975, les premiers tentatives de recyclage ont débuté aux Etats-Unis et plus précisément dans le domaine routier, ou ils utilisaient les granulats recyclés provenant du concassage de béton armé et non armé dans les couches de fondation de chaussées.

La première utilisation de béton recyclé était pour les sous couches des voies de circulation en Californie et la composition comportait du béton recyclé, d'asphalte et de 8% de ciment. En 1976, la première réussite de l'utilisation d'agrégats recyclés et celle d'un ancien béton de 41ans d'âge pour la formulation d'un nouveau béton toujours de chaussée [HANSEN. TC, (1992)].

Après la bonne réussite de 1976, les travaux de recherches dans ce domaine (recyclage de béton de chaussées) ont évoqué jusqu'à ce que les Américains tentaient un grand projet de recyclage d'une longue chaussée en béton pour les couches de fondation d'une nouvelle en Illinois [HANSEN. TC, (1992)]. De 1980 à 1985, plusieurs autres états ont pris l'exemple et ont utilisé le béton recyclé pour les fondations de nouvelles chaussées.

- ❖ **En Allemagne**, Sshutz [HANSEN. TC,(1992)], reportait qu'en ex-RFA, il n'était pas autorisé d'utiliser les agrégats de béton recyclé à cause de la légèreté de ces derniers mais en 1985, il y avait 60 stations de recyclage avec une capacité de 10 millions de tonnes par an. En 1992, 43 millions de tonnes de matériaux de démolition ont été obtenus en ex-RFA, 35% de ces matériaux de démolition sont recyclés. L'objectif fixé était d'arriver à 60% en 1995. Actuellement en Allemagne, les granulats recyclés sont très utilisés et bien adaptés au domaine routier, mais non pas pour le béton hydraulique, car celui-ci demande des granulats de bonne qualité et par conséquent un prix de revient élevé. Cependant l'Allemagne encourage les expériences de démolition sélective, visant ainsi une meilleure récupération des matériaux pour le recyclage.

❖ **Pays-Bas**

Une des actions récentes de la politique environnementale néerlandaise a été de mettre en place un plan national de mise en œuvre « déchet de chantier » basé sur la participation de l'ensemble des intéressés dans le domaine de la construction. Le recyclage des déchets de chantier, et plus particulièrement des matériaux minéraux, est l'un des objectifs principaux de ce plan, 90% des déchets de chantiers devant être recyclés en 2000. Les premières installations fixes de recyclage concassage datent du début des années 60 [BUTENWIZER.I& FAVENNEC. M, (1995)].

Dès 1986, des recommandations pour les granulats recyclés dans le béton ont été élaborées, et sont exigées si on dépasse les 20% des granulats recyclés et substitués.

En 1993, on comptait 72 installations de recyclage concassage au Pays-Bas [BUTENWIZER.I& FAVENNEC. M, (1995)].

L'origine des matériaux de démolition provient dans 38% des déchets de chantier (dont 88% pour la démolition des bâtiments non résidentiels), et dans 33.5% des travaux routiers et hydrauliques (construction, rénovation et démolition). (Tableau 2.3)

Tableau 2-3: Répartition de la production des déchets de chantiers selon l'origine en 1993 (en milliers de tonnes) [BUTENWIZER.I& FAVENNEC. M,(1995)].

Origines	Bâtiments		Travaux routiers et hydrauliques	Total déchets de chantier	Sol
	Résidentiel	Non Résidentiel			
Construction	848	766	NC	-	-
Rénovation	1354	524	NC	-	-
Démolition	552	4163	NC	-	-
Total	2754	5453	4170	12377	3100

NC : Non communiqué

Pratiquement toutes la production de granulats recyclés est actuellement destinée aux travaux routiers et hydrauliques, et à peine 2% à l'industrie du béton (0.2% en 1990).

❖ Le Royaume-Uni (Grande Bretagne)

Dans le secteur de la construction, le gouvernement encourage la réutilisation et le recyclage des matériaux considérés comme déchets là ou ils peuvent se substituer à l'emploi de minéraux naturels neufs.

En 1991 [CANAT. D & CHEVET. H, (1995)], les estimations des quantités des déchets dues aux activités de construction et de démolition étaient de 24 millions de tonnes par ans. La figure 2.1 résume la Répartition des quantités de déchet au Royaume-Uni.

Royaume-Uni [CANAT. D & CHEVET. H,], en1995 il y avait 36 centre fixes [HANSEN. TC,]. Ils produisent 368 tonnes par jour de produits utilisables soit, pour 216 journées de travail, une production annelle de 2.8 millions de tonnes. Selon les estimations d'Humphrys, les 63% de déchet de construction/démolition recyclées de 1995 pourraient attendre 75% l'an2000, et les granulats recyclés passeront à 5 millions de tonnes.

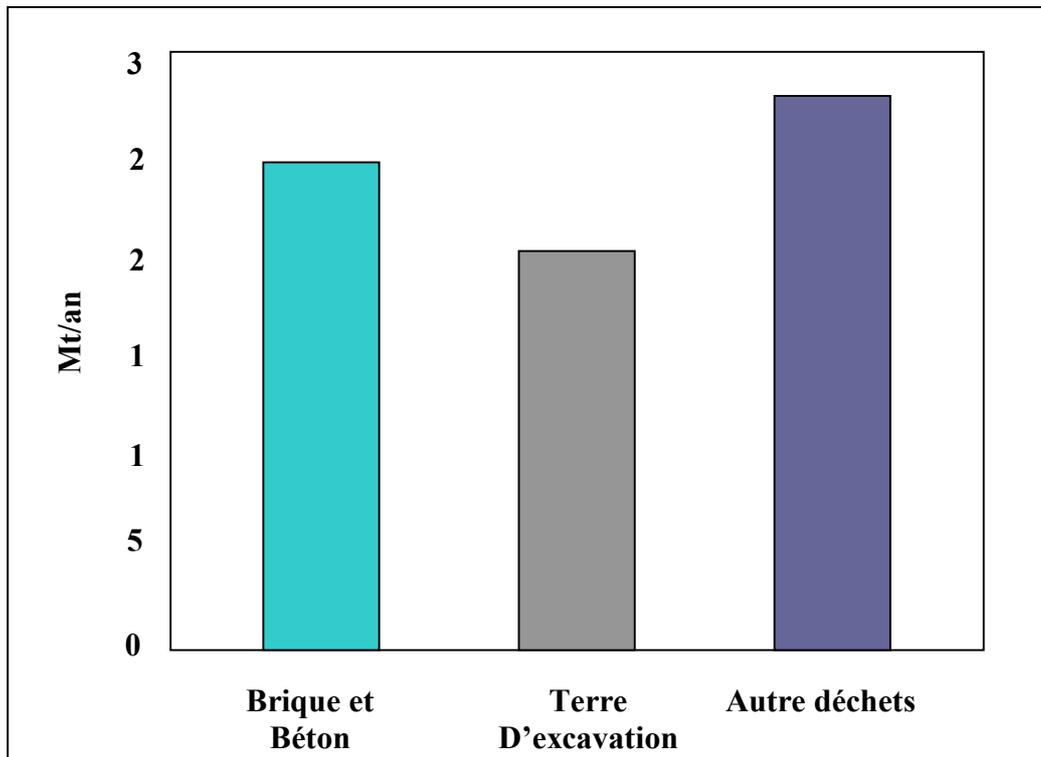


Fig. 2-5 : Répartition des quantités de déchets par types en 1991 au Royaume-Uni

❖ La Belgique

La recherche en matière de recyclage des déchets de construction et de démolition a débuté en Belgique il y a plus d'une vingtaine d'années [CANAT. D & CHEVET. H, (1995)]. Aux années 80, un mur de soutènement a été recyclé et reconstruit lus largement au même endroit [HANSEN, TC, (1992)]. En 1987, avec l'aide du CSTB (centre Scientifique et Technique de la reconstruction), un projet très important avait vu le jour en Belgique pour la construction d'une nouvelle écluse à Anvers avec la démolition de 80 000 m³ de béton armé et le recyclage d'une partie de débris de béton comme agrégats employés à la fabrication du béton servant à la construction des murs de l'écluse. Depuis, une véritable industrie de recyclage vu le jour en Belgique.

Les décrets flamands du 2 juillet 1981 et Wallon du 5 juillet 1985 ainsi que l'ordonnance bruxelloise du 7 mars 1991, relatifs à la prévention et à la gestion des déchets, ont encouragé la valorisation des déchets.

La production annuelle de granulats naturels (Carriers) s'élève à 64 million de tonnes. Les déchets de démolition et de construction sont estimés à 75 millions par ans jusqu'à l'année 1995, et environ 2.3 millions de tonnes de débris de démolition sont traités annuellement par concassage, soit 30% de la quantité totale de débris produits, ceci pour une capacité totale des installations de 4.4 millions de t /an [CANAT. D & CHEVET. H, (1995)].

Les granulats recyclés provenant des stations mobiles (concasseurs à mâchoires) sont principalement utilisés utilisées dans les travaux routiers pour les fondations en empierrements et comme ajout dans les maigres de fondation de routes. La réutilisation du béton dans le bâtiment est encore au stade de développement.

❖ **Le Danemark**

Aujourd'hui encore, des projet de « maison recyclés » c'est-à-dire bâtiments construits à partir de matériaux à base de granulats recyclés (béton recycles par exemple) sont construit en danemark.

Le recyclage a été encouragé depuis 1971 dans les domaines des emballages alimentaires, puis en dés 1983, la première expérience de recyclage de béton a lieu : Les pistes d'atterrissage de l'aéroport de Copenhague ont été reconstruites à partir de béton recyclés provenait des anciennes pistes. En 1991, 135 communes avaient élaboré une réglementation spécifique aux déchets de construction et 17 centres sur le territoire Danois [BUTENWIZER. I & FAVENNEC. M, (1995)].

En effet en 1987, le ministre de l'environnement a élaboré un plan d'action en comparaison à 1985 et qui signifie que la répartition des déchets en 2010 devrait être la suivante : 74% recyclés, 15% incinérés et 11% seulement mise en décharge.

Selon le rapport PROBA publié par le ministère de l'environnement en1990 [HANCEN, TC, (1992)], les déchets de chantier représentent environ 4.4 millions de tonnes. Leur provenance est majoritairement de la démolition, la réhabilitation et la construction neuve. Le traitement des ces déchet est résumé dans la figure 2.6.

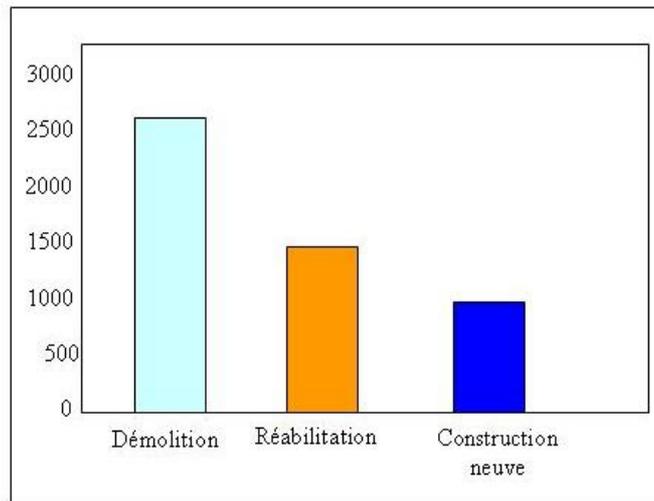


Fig. 2-6 : Evaluation de l'origine des déchets de chantier au Danemark

La nature des déchets de chantier est résumée dans la figure 2-7

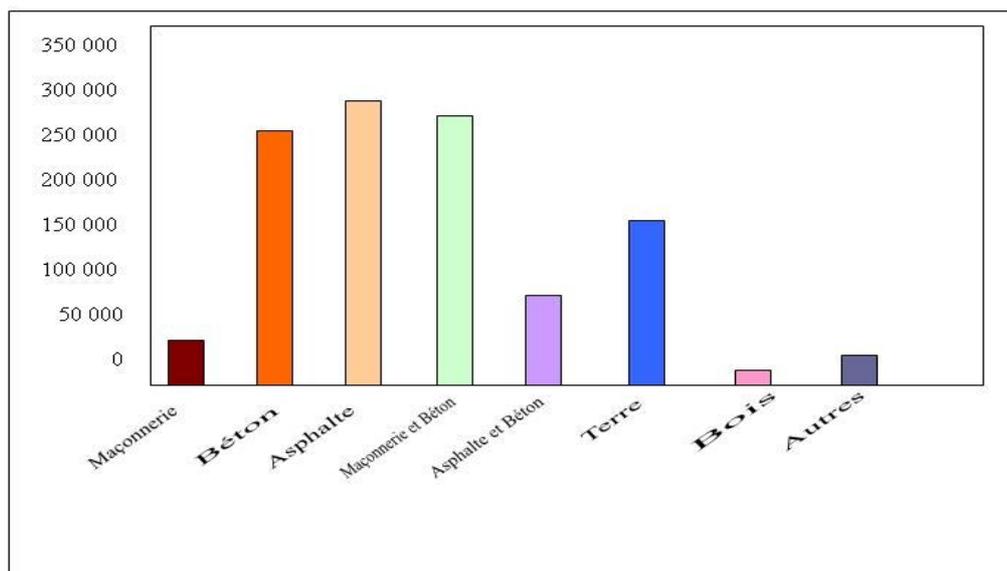


Figure 2-7 : Déchet livré dans les centres de recyclage concassage 1992 au Danemark

La destination des déchets de chantier est résumée dans la figure 2-8

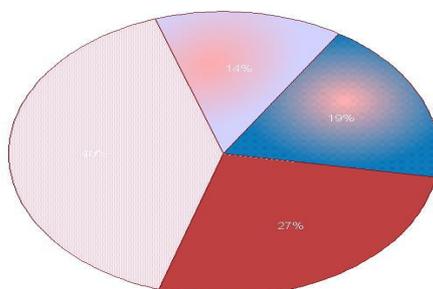


Fig 2.8 : Destination des déchets de chantiers en 1992 au Danemark

Jusqu'à 1992 la production des granulats recyclés au Danemark était de 30% d'asphalte suivi par celle de granulats de béton (26%) et brique mêlées au béton 22%.

Les matériaux recyclés sont principalement utilisés dans les routes (75%), puis pour le terrassement 20% et enfin en tant que granulats pour béton (5%) [BUTENWIZER. I & FAVENNEC. M,(1995)].

❖ France

L'extraction de granulats recyclés a commencée d'une façon industrielle en 1982. Cependant en 1976, la première installation mobile est née à Paris et en 1981 la première installation fixe a été créée à l'occasion de la démolition des abattoirs de la Villette. A partir de 1985, l'activité s'est développée à raison de trois à cinq nouvelles installations créées par an. En 1991, le nombre était de vingt sociétés de recyclage [QUEBAUD. M, COURTIAL. M& BUYLE-BODIN. F, (1996) JAVAURTIN. J.C, (1995)]

La production annuelle en granulats recyclés est comprise entre 3 et 4 millions de tonnes, ce qui représente 20 à 30% du potentiel de matériaux de démolition inertes estimés recyclables (10 à 15 millions de tonnes) [QUEBAUD. M, COURTIAL. M& BUYLE-BODIN. F,(1996)]. L'Île de France, le nord, l'Alsace et la région de Rhône-Alpes sont les principales productrices. Les granulats recyclés représentent moins de 1% de consommation totale en granulats et 25% de production de granulats non issus de carrière, contre 15% de production de granulats non issus de carrière, contre 15% en 1987.

❖ L'ex URSS

Des stations de recyclage de 720.000m³ /an sont couramment en opération [HANCEN, TC, (1992)]. Les gros agrégats recyclés sont utilisés dans les fondations et pour la production de nouveau bétons de structure avec une résistance caractéristiques de 20 MPa et les agrégats fins sont utilisés comme filer dans l'asphalte.

❖ Le Japon

Jusqu'à 1985, les agrégats recyclés été utilisés uniquement dans la construction routière à cause des autorités Japonaises qui n'avait pas encore approuvé la réglementation pour l'utilisation d'agrégats recycles et béton d'agrégats recyclés. A partir de cette année, l'activité de recyclage s'est développée en arrivant dans ces dernières années à raison de cinq fois plus de nouvelles installation de concassage. Aujourd'hui, le Japon est le pays qui utilise le plus d'agrégats recyclés après les Pays-Bas, l'Allemagne et la Belgique [HANCEN, TC, (1992) YANAGIBASHI. K& YONEZAWA. T(1999)].

❖ L'Algérie par rapport aux autres pays Européens

En Algérie, des bâtiments publics, des immeubles et des ponts sont démolis après des sinistres naturels comme le séisme et les crues ou par le vieillissement et les actions de bombes. Les matériaux de démolition sont, pour l'instant rarement recyclés. L'industrie de construction généré aussi une quantité importante de déchets (briques et béton en particulier) qui sont rarement valorisés. Les quantités générées par la démolition et les déchets de chantier restent inconnues. Cependant, l'Algérie connaît un déficit important en matériaux de construction et en particulier » les agrégats et le ciment. Le déficit entre l'offre et la demande en granulats est de l'ordre de 10% ces dernières années, et dépassera les 20% de la production 2000. Selon les mêmes projections la production dépassera jusqu'à 38.5 millions de m³ d'ici l'an 2000 alors que la demande grimpera jusqu'à 53.5 million de m³ durant la même période [DEPAW.C, (1982)]

Au cours de la deuxième moitié de ce siècle et en 1980, la ville algérienne d'El Asnam (chlef actuellement), a été secouée par deux tremblements de terre intenses qui l'on quasiment réduit en un énorme tas de gravats. En 1981, L'expérience acquise par la Belgique en matière de recyclage des déchets de construction et de démolition, a permis au CSTC (Centre scientifique et technique de la construction) de proposer aux autorités algériennes d'effectuer une étude sur

les possibilités de recyclage des décombres de la ville. Alors, face à quels milliers de bâtiments (38 % des bâtiments) qui devaient être démolis et par la suite l'évacuation de plusieurs centaines de milliers de tonnes de débris, l'opération pilote de recyclage menée par la recherche du CSTC, a démontré qu'il est possible de recycler les débris en blocs de construction de qualité convenables [DEPAW.C, (1982)].

Il faut aussi noter le manque de politique de gestion des déchets en général et des déchets non ultimes en particulier et de leur valorisation. Selon les informations disponibles, aucune étude de valorisation des déchets de construction ou de démolition comme agrégats en béton n'a été réalisée à ce jour en Algérie.

2.11.3 Source et production d'agrégats recyclés

2.11.3.1 Source d'agrégats recyclés

En Europe, on estime que la durée de vie moyenne d'une habitation est de cinquante ans ; les bâtiments industriels et les ouvrages d'art ont une durée de vie encore supérieure [QUEBAUD. M, COURTIAL. M & BUYLE-BODIN. F, (1996)]. La figure 2-9 illustre en gros les sources des granulats recyclés.

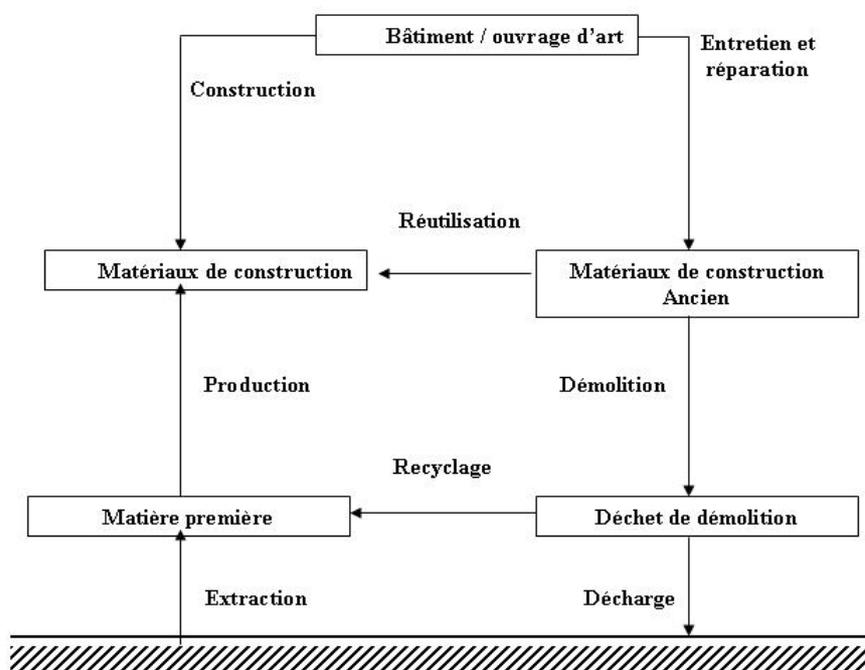


Fig. 2-9 : Modèle du cycle de vie d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art

La composition des produits de démolition varie selon la nature des ouvrages démolis (bâtiment industriel, bâtiment résidentiel, ouvrage d'art ; etc.) et leur date de construction. Ainsi une construction du XIX^{ème} siècle repose sur un gros œuvre en pierre, en brique et en métal mais une construction de la deuxième moitié du XX^e siècle est principalement en béton.

Dans le passé, la quasi-totalité des déchets de démolition provenait de bâtiments industriels. Actuellement, le rapport entre les bâtiments industriels et les bâtiments résidentiels démolis est 5/1 [QUEBAUD. M, COURTIAL. M& BUYLE-BODIN. F, (1996)]. Dans l'avenir, les déchets de démolitions seront composés de plus en plus de substances légères et de matériaux composites.

De la démolition à l'élaboration d'agrégats recyclés, l'industrie de recyclage des déchets de construction démolition avaient comme deux génération de matériels de traitement qui ne diffèrent pas trop des matériels de concassage utilisé pour la production d'agrégats naturels. Il incorpore divers types de concasseurs, écrans, équipement de transfère et dispositifs pour l'enlèvement de matière étrangère. La première génération comportait deux système : un ouvert et l'autre fermé, les deux systèmes sont gérés dans la réhabilitation de chaussées et projet de recyclage.

2.11.3.2 Matériel de production

La production de granulats recyclés, se base en général sur trois type :

- Installation fixe : Installation avec un ou plusieurs concasseurs, une assez grande capacité.
- Installation semi- mobile : Installation transportable avec 1 ou 2 concasseurs d'un assez grande capacité.
- Installation mobile : Petite installation transportable avec un concasseur d'un faible capacité.

Le traitement des déchets de construction/ démolition est résumé dans la figure 2-9.

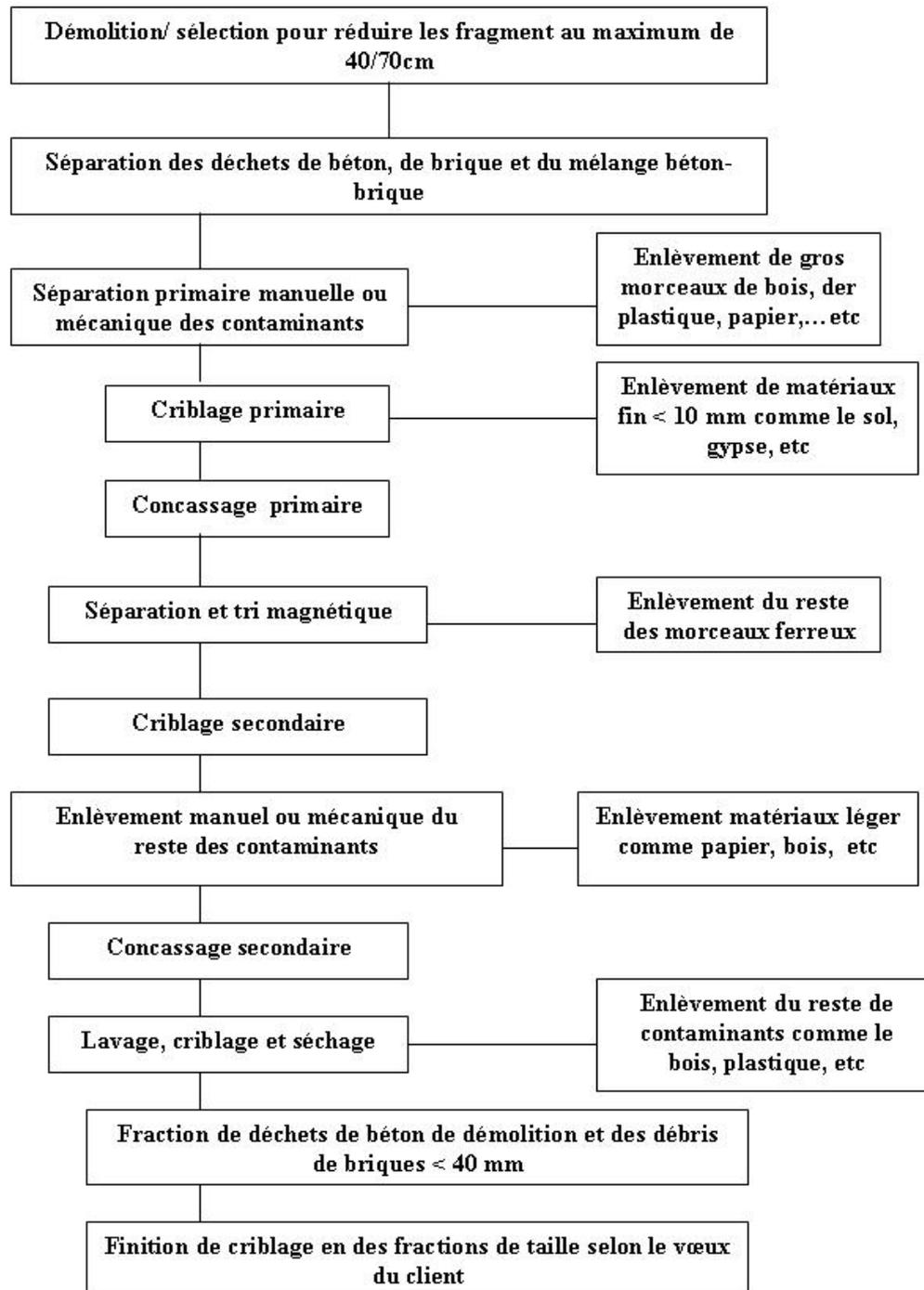


Fig. 2-10 : Procédure de criblage des déchets de construction / démolition

2.11.3.3 Les différents types de concasseurs

Pour la fragmentation des matériaux secs, différents types de concasseurs peuvent être envisagés.

Concasseurs à mâchoire

Avec ce type de concasseurs, le matériau est cassé par pression entre les deux machines, l'une fixe et l'autre en mouvement. Ces concasseurs ont tendance à produire des agrégats de forme plate (surtout pour la maçonnerie). Ils sont, de ce fait peu indiqués comme concasseur secondaire par contre c'est ce type de concasseur qui produit le moins de particules fines (de l'ordre de 10 % max).

Concasseurs à marteaux

Il réalise la fragmentation des matériaux par percussion sur des matériaux articulés sur un ou deux rotors tournants à grande vitesse. Lorsqu'il est utilisé comme concasseur primaire, la hauteur entre la courroie d'alimentation et l'axe de rotor est réglable. Cela permet, en réglant la vitesse du rotor d'assurer une très importante réduction de la dimension des matériaux concassés. La forme des matériaux a une influence sur la dimension et la forme des granulats obtenus. Le niveau de fragmentation est difficilement maîtrisable, la consommation énergétique de l'équipement est plus élevée en comparaison avec le concasseur à mâchoires. Par contre, la séparation de l'acier du béton est meilleure.

Concasseurs à percussion

Un rotor équipé d'un certain nombre de barres d'impact, projette les matériaux à grande vitesse contre les parois de la chambre de broyage garnie latéralement des plaques d'usure et de deux encolures en acier de haute résistance. Les agrégats sont produits par choc et éclatement, ils sont de ce fait très durs et de faible calibre avec une importante quantité de fines (jusqu'à 40% de particules < 6mm).

Concasseur giratoire

Le concasseur opère par écrasement du matériau entre un cône giratoire. Le mouvement à l'intérieure de la chambre de broyage est commandé par un arbre excentrique, ce qui rapproche par le dessous de la machine. La dimension maximale du matériau est limitée à 200mm environ. Sans métal ni bois, cet équipement peut être utilisé comme concasseur primaire et produit des agrégats de forme cubique et une quantité moyenne de fines (< 20 %).

Concasseur à cône

Ce concasseur fonctionne selon le même principe que le concasseur giratoire. Ici un cône tronqué se met autour d'un axe excentrique dans un matériau qui a la forme d'un cône tronqué inversé, de telle sorte que l'espace n'agrandit à nouveau, les petits morceaux tombent par la fente. Ici également, le matériau à concasser doit être exempt d'acier.

2.11.3.4 Les méthodes de séparation des impuretés

Séparation manuelle :

Elle a l'avantage majeur de pouvoir éliminer les éléments indésirables qui ne sont pas facilement séparable par d'autres moyens, il s'agit notamment du verre, des morceaux d'isolants plats, les fils électriques gainés, etc. Par contre elle nécessite du personnel en permanence et le rythme de production doit être adapté à leur vitesse de travail (Par exemple, arrêt momentané de la bande transporteuse si trop d'éléments indésirables passent en même temps).

Séparateur magnétique

Un très puissant aimant permanent enjambe la courroie transporteuse. Il est équipé d'une courroie à lattes contre lesquelles se plaquent les métaux ferreux qui sont ainsi écartés de la voie du concasseur pour tomber à côté de l'installation lorsqu'ils quittent le champ magnétique de l'aimant. Ce système ne fonctionne que pour les métaux ferreux.

Séparation par aspiration

Tous les matériaux légers (tels que bois, textile, plastique de faible densité etc....) sont aspirés dans un système placé à l'extrémité du premier crible, tandis que les matériaux pierreux plus lourds, passent en travers. Son efficacité est notamment améliorée lorsqu'on peut l'utiliser que pour une fraction granulométrique bien définie. Dans ce cas, il permet jusqu'à 95% des éléments indispensables.

Séparation par gravité

La méthode est basée sur la différence de masse volumique des différents composants. Pour pouvoir exploiter la différence de masse volumique, il faut s'intéresser à des volumes comparables et donc de sélectionner une granulométrie limitée. En général, la séparation s'opère en deux niveaux : un étage supérieur pour la fraction 50-150 mm et un étage inférieur pour 20-50 mm

Séparation par décantation

Les granulats traversent une distance avec renfile d'eau. Les matériaux légers flottent tandis que les matériaux pierreux plus tard, tombent au fond. Les éléments indésirables flottant sont raclés en surface tandis que les agrégats propres continuent le circuit. Ce procédé a l'avantage d'éliminer la grande majorité des éléments indésirables ou de fournir un granulat très propre. Par contre il produit une grande quantité de boue qui doit être traité.

La figure 2-11 résume le fonctionnement d'une centrale de concassage :

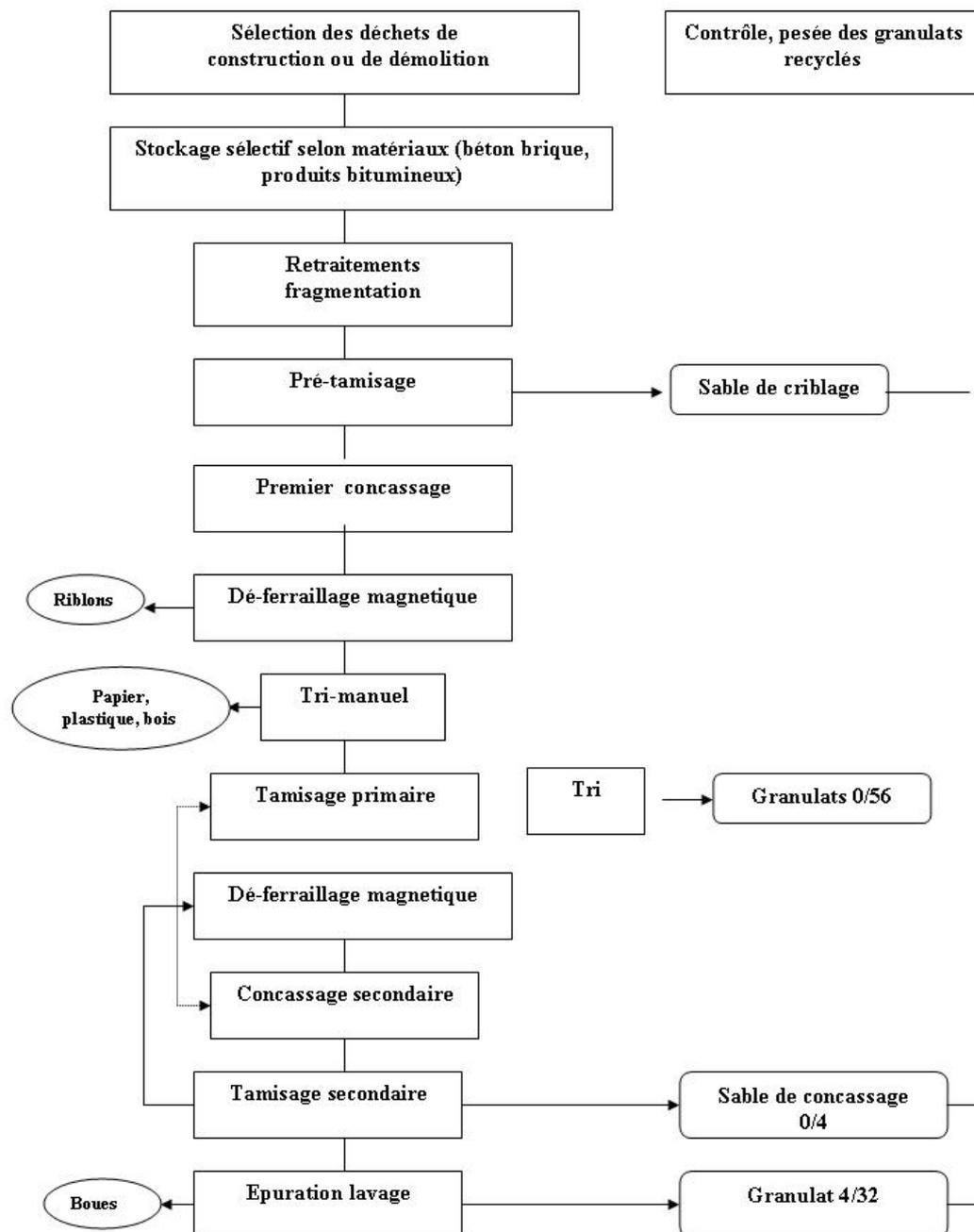


Fig. 2-11 : Schéma de fonctionnement d'une centrale de recyclage / concassage

2-11.3.5 L'élaboration du produit finis

Les matériaux (0/80) issus du concassage secondaire et du lavage sont criblés et concassés. Avant leur passage dans l'installation, les bétons démolis subissent une préparation qui consiste à augmenter les gros blocs à l'aide d'un brise roche et à enlever les ferrailles les plus

importants par découpage au chalumeau. Le concasseur primaire est volontairement surdimensionné afin de faciliter le passage des blocs de béton et de leurs armatures. L'opération de broyage dé-ferraillage proprement dite et réalisée par un double concassage (deux concasseurs à percussion avec scalpage intercalé à 60 mm) et à double dé-ferraillage obtenu par un tri magnétique après chaque concasseur. Les granulats 0/150 sortants du concasseur secondaire sont criblés et séparés en trois fractions 0/6, 6/80, 80/150. Seul la fraction 6/80 est soumise à un nettoyage par passage dans un système de lavage de type « aquamotor » qui sépare les éléments par différence de densité. A ce niveau la plus grande partie des éléments indésirables légers (bois, matières plastique...) est éliminée. La fraction 0/6 qui est relativement plus homogène contourne le circuit de l'appareil de nettoyage, quand au 80/150, elle se réintroduit dans l'installation après concassage.

2.12. Caractéristique des granulats recyclés

2-12.1 Granulation, forme de particules et texture de surface d'agrégats recyclés

Avec un bon ajustement des ouvertures du concasseur, il est facile de produire raisonnablement une bonne granulométrie de gros agrégats recyclés.

Des granulats recyclés ont été obtenus en passant une seule fois le concasseur avec une granulométrie des gros agrégats recyclés (5/25) très proche des limites admissibles préconisées par la norme ASTM C-33. Par contre, la partie fine des agrégats recyclés (< 4 mm), présentait une granulométrie assez différente de celle des limites admissibles tolérées par la norme.

Les particules fines (< 75µm) sont selon différents chercheurs [HANSEN, TC. RILEM]. Dans l'ordre de 0.3 à 6.6% dans les gros granulats et de 4 à 6.6% dans les agrégats fins en comparaison au pourcentage traité par la norme ASTM C-33 qui est de 1.5 à 5% respectivement pour gros et fins granulats.

2-12.2 La Masse volumique

La masse volumique des granulats naturels, varie généralement de 2100 à 2500 kg/m³ pour les gros granulats et de 1970 à 2200 kg/m³ pour les granulats fins [DREUX. G & FESTA. J, EYROLLES, 1995]. La masse volumique d'agrégats de béton recyclé est inférieure de l'ordre de 5 à 10% de celle d'agrégats naturels [HANSEN, TC, (1985). RAMAMURTHY. K & GUMASTE. KS. (1998) HENDRIKS CH.F(1999)]. Cette baisse est relativement à la masse volumique faible d'anciens mortiers attachés aux particules d'agrégats du béton recyclé.

Hansen et Narud, rapportaient [HANSEN, TC. RILEM(1992)] que la densité des gros agrégats recyclés est de l'ordre de 2.340 kg/m³ pour les agrégats 4/8 mm et de 2.490 kg/m³ pour les agrégats 16/32 mm, indépendamment de la qualité de béton original dont la densité de gros et fin agrégats étaient de 2.500 kg/m³ et 2.610 kg/m³ respectivement. Par contre les valeurs de 2.430 kg/m³ pour les gros agrégats recyclés (5/25 mm), et 2.310 kg/m³ pour les agrégats recyclés fin (< 5 mm) ont été reportées par Hasaba et autres dont la densité originale des agrégats était de 2700 kg/m³ et 2500 kg/m³ pour les gros et fins granulats respectivement [HANSEN, TC RILEM(1992)]

2-12.3. Porosité

La proportion importante des grains de mortiers attachés aux granulats recyclés, conduit à des teneurs en eau plus importantes et par conséquent à une porosité élevée. Selon Kazuyuki et autres, [BOUCHARD. M(1984)], la porosité des granulats issus d'une même source d'agrégats naturels mais de structures différentes était la suivante :

	Agrégats Fins			Gros Agrégats		
	Sable naturel	Chaussé	Structure	Gravier naturel	Chaussé	Structure
Porosité (%)	1.3	7.8	10.9	0.8	5.4	5.9

Le tableau suivant résume le coefficient d'absorption trouvé par quelques chercheurs :

Tableau 2-4: Le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés [HANSEN, TC.]

		Agrégats naturels	Agrégats recyclés
Hansen	4/8	3.7 %	8.7 %
	16/32	0.8 %	3.7 %
Hasaba	5/25	7 %	11 %
Narud	fin	/	9.8 %

On voit clairement la différence dans le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés en comparaison aux granulats naturels, et donc il convient de réaliser un pré-mouillage comparable à celui utilisé pour les granulats poreux et les granulats légers.

2-12.4. Mortiers de liaison

Le pourcentage de vieux mortier attaché aux particules de gravier naturel dans les agrégats recyclés, croît en fonction de la résistance du béton original.

La présence de ce mortier a été mise en évidence par des chercheurs par un essai simple, qui consiste à mettre les agrégats recyclés avec un ciment coloré rouge dans un coffrage cubique. Après durcissement, le cube est coupé en tranches puis cirer. Le mortier attaché aux particules de graviers naturel dans les agrégats recyclés peut être distingué clairement entre les particules de graviers originales et la matrice de ciment rouge [HANSEN, TC.1992)].

Le pourcentage de mortiers attaché aux particules de graviers naturels est estimé entre 25 à 35 % pour les agrégats recyclés 16/32mm, autour de 40 % pour 8/16 mm et de 60% pour le reste de 4/8 mm [BARRA. M DE OLIVEIRA & VAZQUEZ. E (1996)].

Selon d'autres chercheurs, par exemple Hasaba et autres [HANSEN, TC. RILEM (1985)], ce mortiers est de 35.5, 36.7, 38.4 % respectivement pour un béton original de résistance à la compression de 24.41 et 51 MPa.

2-12.5. Résistance aux sulfates

La norme américaine ASTM C-33 limite le pourcentage de perte de résistance du à la présence des sulfates de magnésium pour les gros granulats à 18% et à 15% pour les agrégats fin, et le pourcentage de sodium de 10 et 12 % respectivement. Cependant, des travaux menés au Japon [HANSEN, TC RILEM (1992)], ont montré la perte était de 18.4 à 58.9 % pour les gros agrégats recyclés issus de 15 bétons originaux de différente résistance à la compression et concassé dans différents concasseurs .D'autres chercheurs ont trouvés des pertes mois importantes, cette perte de résistance aux sulfates de magnésium de 0.9 à 2 % pour les gros agrégats et de 6.8 à 8.8 % pour les agrégats fins, issus de béton original à base de gros et fin agrégats de perte de 3.9% et 7 % respectivement [GALLIA J. 1999].

Tableau 2.5: Réduction de la résistance à la compression du béton d'agrégats recyclés en fonction du pourcentage d'ajout en sulfates [HANSEN, TC & GALLIA J. 1999]

Pourcentage de béton bitumineux en volume dans les gros agrégats recyclés	Pourcentage de béton bitumineux en volume dans les agrégats recyclés fins	Résistance à la compression (MPa)	Réduction de la résistance à la compression (%)
0	0	49.10	0
17	0	43.50	16.6
21.7	0	41.30	15.8
30.8	0	41.30	15.8
30.8	30.8	34.10	36.6
100	100	11.00	77.5

Economiquement, il est avantageux de recycler les bétons bitumineux séparément des autres bétons dans des équipements d'asphalte pour se débarrasser du gros pourcentage d'asphalte possible. Il n'est donc pas avantageux d'utiliser de bétons bitumineux recyclés pour la production du béton.

Le contenu en sulfate dans les agrégats ordinaires est limité généralement à 0.5% par poids des deux fractions d'agrégats (gros et fins) ou à 4% par poids de ciment. Il est donc suggéré d'appliquer les mêmes limites aux agrégats recyclés. De plus, il est recommandé d'utiliser du ciment portland résistant aux sulfates pour la production de béton d'agrégats recyclés ou les agrégats recyclés sont contaminés par du gypse. Car la présence peut conduire à un gonflement (expansion du sulfate).

Concernant les matières organiques comme le bois, les tissus, le papier, le plastique, la peinture, il est raisonnable de limiter à 2 kg/m³ (0.15% de particules organiques par poids d'agrégats) le contenu de particules dont la masse volumique est inférieure à 1200kg/m³. Les chlorures dans le béton armé peuvent conduire à la corrosion des armatures.

Le ACI limite le contenu en chlorures dans le béton ordinaire à :

- 0.06 % pour le béton précontraint ;
- 0.10 % pour le béton armé conventionnel dans un environnement humide exposé au chlorure ;
- 0.15 % pour le béton armé conventionnel dans un environnement humide non exposé au chlorure.

Et ces mêmes limites peuvent être appliquées pour les agrégats recyclés et béton d'agrégats recyclés.

L'utilisation de plastifiants entraîneurs d'air et retardateur de prise n'ont pas d'effet significatif sur l'affaissement, la quantité d'air, ou le temps de prise du béton d'agrégats recyclés frais.

Le béton démolé est fréquemment contaminé par la terre organique ou l'argile. Il n'a pas raison de croire que les agrégats recyclés contaminés par la terre ne présente aucun effets dans le béton d'agrégats recyclés, mis un bon lavage peut éliminer le problème. Les mêmes limites d'impureté pour les agrégats naturels sont recommandées pour les agrégats recyclés.

Les débris de construction comportent généralement une quantité assez considérable des déchets de conduite en fer, de ferme ou de fixation en en métal. Cependant, il n'est pas avantageux d'avoir un quantité significatives de fer ou d'autres métaux dans la fraction d'agrégats recyclés Ce type de déchets est dangereux en primer lieu sur le matériel de concassage et en second lieu ces débris causent des problèmes néfastes comme la corrosion, le gonflement et fissuration du béton d'agrégats recyclés.

Le béton de démolition est souvent contaminé par les déchets de verre des fenêtres et autre. La présence de ce type de contamination dans les agrégats recyclés prend part dans la réaction alcali silice, ce qui est dangereux sur le béton d'agrégats recyclés à réaliser. Cependant, il est recommandé de faire une sélection de ce type de contamination avant la démolition car ce dernier est très difficile à s'en débarrasser.

2-12.6 Classification de granulats recyclés selon RILEM

Généralement, les granulats recyclés produits dans les installations de concassage sont de différents types. A titre d'exemple, au Pays-Bas la production jusqu'à 1992 été comme le montre la figure suivantes :

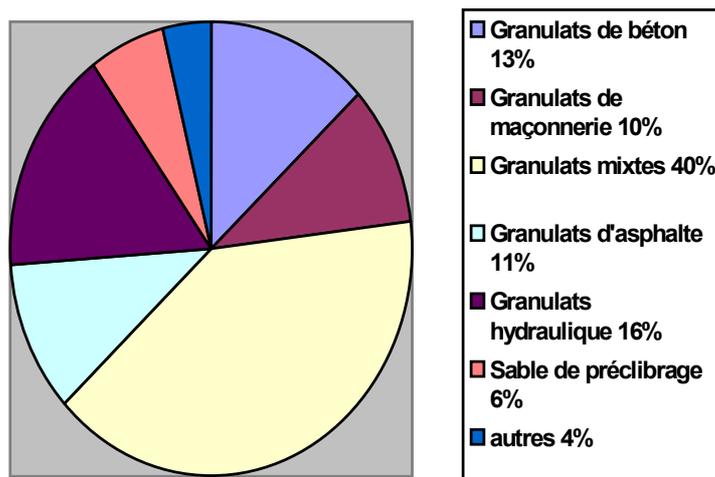


Fig.2-12 : Répartition de la production en granulats recyclés au Pays-Bas en 1992

Parmi les différentes définitions et classifications d'agrégats recyclés, la classification du comité technique (TC121) de la RILEM lors du 3^{ème} congrès sur la démolition et réutilisation du béton et de la maçonnerie au DANEMARK (Odense) 1993[HOSTMANN (1997)], paraît être un des plus convenables pour une application pratique. La RILEM recommandait de classer les gros granulats recyclés en trois types[Tableau 2.6] dans chacun serait sujet de limites spéciales en impuretés en plus des limites imposées par les normes européennes accordées comme le montre le tableau suivants :

Tableau 2.6 : Composition des différents types d'agrégats recyclés proposé par le RILEM [COLLINS. RJ, MAI 1994 & RILEM TC 121-DRG ,1993]

Types d'agrégats	Composition
Type I	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de maçonnerie (brique).
Type II	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton.
Type III	Un mélange d'au moins 80% d'agrégats naturels et pas plus de 10% d'agrégats recyclés de type I (jusqu'à 20% d'agrégats recyclés de Type II).

Les limites proposées sur ces granulats sont résumées au tableau 2.7 suivants :

Tableau 2.7 : Les différentes limites proposées par le RILEM sur les trios classes de béton recyclés [RILEM TC 121-DRG ,1993]

Exigences mandataires	Type I	Type II	Type III
Densité sèche minimum (kg/m ³)	1800	2200	2400
Absorption d'eau max. (%)	15	5	3
Teneur maximale de matériaux à densité sèche < 2200 kg/m ³ (%)	-	10	10
Teneur maximale de matériaux à densité sèche < 1000 kg/m ³ (%)	10	1	1
Teneur maximale on matériaux à densité sèche < 1200 kg/m ³ (%)	2	0.5	0.5
Teneur maximale on matériaux non minéraux (%)	1	1	1
Teneur maximale on matériaux organique (%)	0.5	0.5	0.5
Teneur maximale en élément fins (< 0.8mm) (%)	3	3	2
Teneur maximale en sable (< 1mm) (%)	3	3	3
Teneur maximale en chlorure (%)	0.06	0.06	0.06
Teneur maximale en sulfate (%)	1	1	1
Teneur maximale en matières étrangères (verre, métal,...etc) (%)	5	1	1

Les classes de résistance du béton à base des granulats recyclés recommandés par la RILEM, sont résumées dans le tableau 2.8 suivants :

Tableau 2.8 : Classe du béton recyclés [RILEM TC 121-DRG ,1993]

Classe de béton	Type I	Type II	Type III
C16/20	x	-	-
C50/60	-	x	-

Aucune limite n'est donnée pour le type **III**.

Les coefficient multiplicateurs des propriétés des bétons recyclés par rapport aux bétons d'agrégats naturels proposé par la RILEM , sont comme suite :

Tableau 2.9: Les coefficients multiplicateurs des propriétés des bétons recyclés par rapport aux bétons ordinaire [RILEM TC 121-DRG ,1993]

	Type I	Type II	Type III
Retrait	1.5	1.3	1
Module d'élasticité	0.7	0.8	1
Fluage	1.2	1.2	1
Résistance de traction	0.8	0.9	1

2.13 Propriétés et dosage du béton frais à base d'agrégats recyclés

2.13.1 Ouvrabilité

La masse du mortier d'un béton ancien qui recouvre la surface des gros agrégats recyclés et leurs angularités, sont deux facteurs critiques qui influencent considérablement la consistance du béton recyclés. Toute fois, la confection, la mise en œuvre et l'aspect des bétons de recyclage sont très comparables à ceux des bétons ordinaires.

Logiquement, compte tenu de la porosité élevée des granulats recyclés (gros et fins), la consistance du béton à base de ces agrégats (selon le pourcentage de substitution), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui de béton témoin. Cependant, de nombreux chercheurs ont trouvé que une ouvrabilité comparable à celle du béton d'agrégats naturels si uniquement les gros granulats sont recyclés. Par contre, l'introduction de granulats fins recyclés réduit considérablement l'ouvrabilité.

Selon certain travaux [HANCEN, TC, (1992) RILEM &FN, SPON, 1992. TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO. K & HASBA. S, 1984], la demande supplémentaire en eau était de l'ordre de 5 % pour le béton à base de gros granulats recyclés et jusqu'à 15 % pour le béton à base de gros et **fins granulats recyclés**.

Une augmentation de 21% en eau de gâchage est reportée pour un béton à gros et fins granulats recyclés dont l'absorption est de 25 % [CSTC, 1979-1981]. Si les gros et fins agrégats recyclés sont de la brique cuite, la demande en eau supplémentaire peut atteindre 20 % [NEWMAN. AJ, (1995) HOBBS.G, CILLINS. RJ, BLACKWELLB.Q & ATKINSON C.J, 1997) DEVENNY.A & KHALAF F.M 1999].

2.13.2 La compacité

Les masses volumiques des bétons recyclés sont toujours nettement plus basses que celle des bétons témoins [COQUILLAT. G, 1984], ce qui est logique puisque les granulats de base sont plus légers ; il en résulte que les bétons recyclés ont des performances physiques et mécaniques différentes de celles des bétons originaux.

Plusieurs chercheurs [HANSEN, TC. (1985) NEWMAN. AJ(1995)] affirment que la densité du béton recyclé à l'état frais est inférieure d'environ 15% et que le pourcentage d'air occlus augmente jusqu'à 0.6% par rapport au béton d'agrégats naturels.

2.14 Propriétés mécanique du béton durci

2.14.1 Résistance à la compression

Il est connu que le béton à base d'agrégats recyclés a une résistance à la compression plus faible que celle du béton témoin fabriqué avec des granulats naturels et ayant la même ouvrabilité. En général, il y a une perte de résistance et de 20 à 40% par rapport à un béton à granulats naturels [HANSEN, TC(1992) TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO. K & HASBA. S, (1984) CSTC, 1979-1981].

Selon d'autres chercheurs [HANSEN, TC(1992) TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO. K & HASBA. S,(1984) CSTC, 1979-1981. DESSY. P, NIRONI. L(1999)] et pour une même plasticité du béton frais, la résistance à la compression du béton recyclé à base de gros agrégats recyclés et sable naturel est inférieure de l'ordre de 14 à 30 % que celle du béton original. Cependant lorsqu'il s'agit de béton à base de granulats fins recyclés, la résistance à la compression ne chute que de 15 à 25 % par rapport à celle de béton original, et lorsque le béton recyclés est composé des deux types d'agrégats recyclés (gros et fins), la chute de résistance à la compression arrivera jusqu'à 40 % par rapport à celle du béton témoin.

2.14.2 Résistance à la traction

Comme pour la compression, la résistance à la traction du béton recyclé est plus faible que celle de béton d'agrégats naturels ayant la même ouvrabilité. La résistance à la traction décroît en fonction du pourcentage d'agrégats recyclés (gros et fins) intervenant dans la composition du béton et chute d'environ 10% par rapport à celle du béton original lorsqu'on utilise que les gros agrégats recyclés et environ 20% lorsqu'on utilise des gros et des fins agrégats recyclés [CSTC, 1979-1981].

La résistance à la traction par flexion du béton d'agrégats recyclés dépend en général du rapport E / C et de la période de malaxage [TAVAKOLI. M & SOROUSHIAN. P(1996),]. La nature des agrégats recyclés (béton de structure ou de chaussée) influe considérablement sur le taux de chute de cette résistance par rapport à celle du béton ordinaire. La résistance à la traction du béton recyclé est comme celle du béton ordinaire de l'ordre de 1/5 à 1/8 par rapport à celle de compression [HANCEN, TC,(1992) RILEM LONDON, E & FN, SPON, 1992. TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO. K & HASBA. S, 1984].

II.14. 3 Module d'élasticité

Les bétons de recyclage, compte tenu de leurs légèreté, ont toujours des modules d'élasticité inférieurs de 20 à 40% que celle du béton comparable comportent des granulats naturels.

Les modules d'élasticité trouvés par Coquillat [COQUILLAT.G1984]sont de 29GPa pour le béton recyclé de granulats de béton démolis, de 25GPa pour le béton de brique et de 24GPa pour le béton de brique et béton démolis en comparaison à un module d'élasticité de 40GPa pour le béton témoin.

2-15 Propriétés physiques

2.15. 1 Le retrait plastique

Les retrait en air sec des bétons recyclés sont toujours nettement plus importants que ceux des bétons témoins (de granulats naturels). L'augmentation du retrait est de l'ordre de 10 à 30% pour les bétons de concassé de béton démolis, de 40 à 60 % pour les béton de brique concassée et arrive jusqu'à 80% pour un béton de mélange concassée de brique et béton démolis [QUEBAUD. M, COURTIAL. M & BUYLE-BODIN. F, (1996) TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO. K & HASABA. S,(1984) COQUILLAT.G 1984].

A ouvrabilité constante, d'autres chercheurs [HANSEN, TC (1992). TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO. K & HASABA. S, (1984) COQUILLAT.G 1984] ont trouvé que le retrait plastique du béton de gros agrégats recyclés est supérieur de 50% que celui du béton original et de l'ordre de 70% pour le béton de gros et fin agrégats recyclés.

2.15. 2 Le Fluage

La présence d'ancien mortier qui recouvre à 50% les agrégats recyclés, augmente le fluage du béton par rapport au béton original. Selon plusieurs chercheurs, cette augmentation de fluage du béton à base de gros et fins agrégats recyclés a été trouvée de l'ordre de 30 à 60% supérieurs à celui du béton original d'agrégats naturels et qu'elle plus importante lorsque les gros et fin agrégats sont utilisés [HANSEN. TC 1945-1985].

2.15.3 La Perméabilité et l'absorption d'eau

L'introduction de matériaux recyclés dans la composition du béton, provoque une légère diminution de la densité accompagnée d'une augmentation de la porosité et de la perméabilité entraînant des conséquences néfastes sur la durabilité du béton.

L'augmentation de la perméabilité et de l'absorption de l'eau du béton recyclés par rapport au béton d'agrégats naturels, est due en générale à la présence du mortier d'ancien béton collé aux granulats recyclés et la résistance du béton recyclés. Le béton original à résistance à la compression élevé, produit toujours des agrégats recyclés nécessitant un rapport E / C assez comparable au béton à granulats naturels, et par conséquent un degré d'absorption d'eau moins important.