

TA
455
.F55
B414

Canada

Marchés pour les cendres volantes au Canada



Gouvernement
du Canada

Expansion industrielle
régionale

Government
of Canada

Regional Industrial
Expansion

MARCHÉS POUR LES CENDRES VOLANTES AU CANADA

PAR

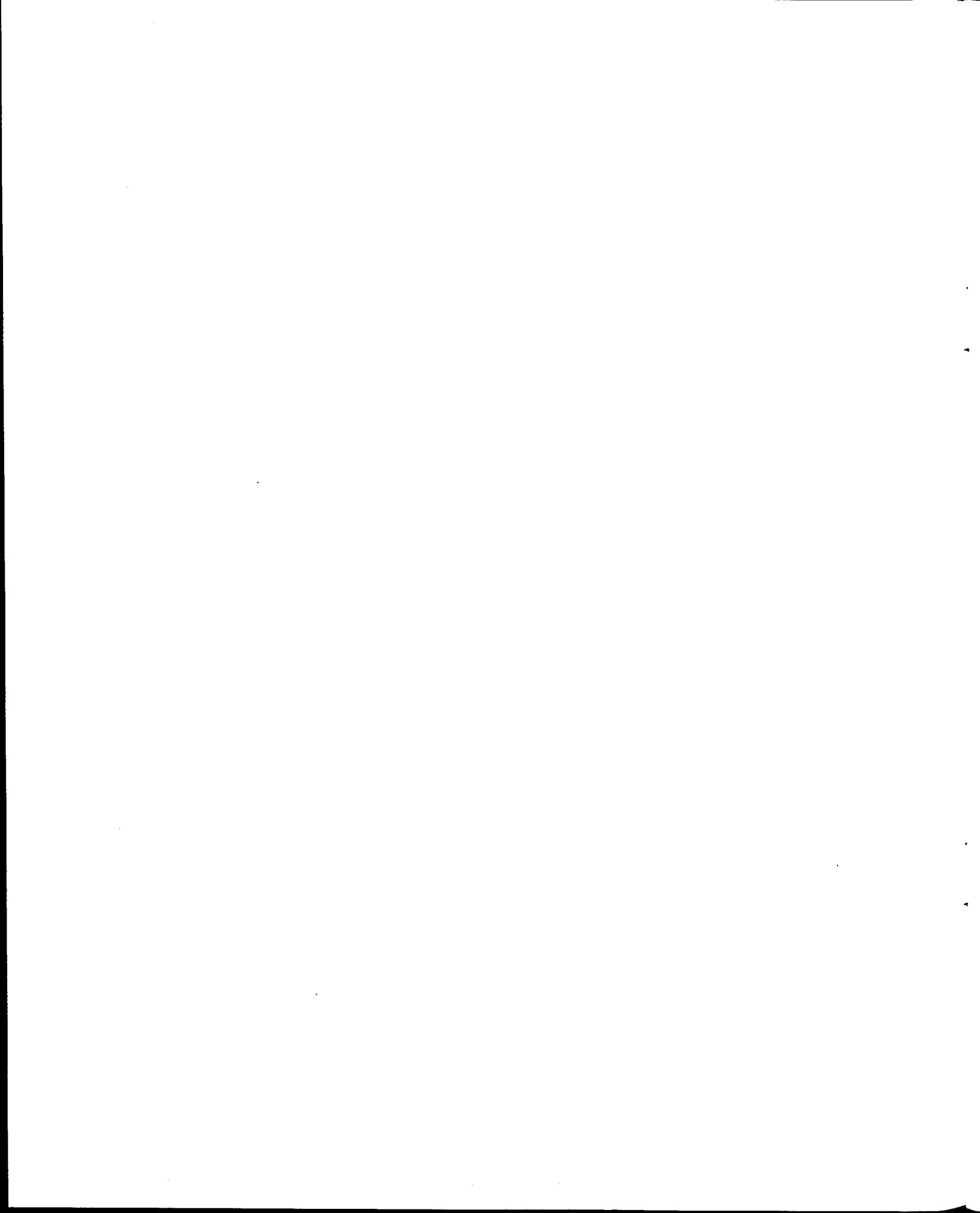
E.E. Berry

**(E.E. Berry et Associés,
Ottawa, Canada)**

Préparé pour :

le Ministère de l'Expansion industrielle régionale

juillet 1985



REMERCIEMENTS

L'auteur remercie de leur contribution les personnes et les organismes suivants qui ont fourni certaines des informations ayant servi à la préparation de ce rapport :

Associated R&D Marketing

B.C. Hydro

Ontario Hydro

Pozzolanic International Ltd.

Saskatchewan Power Corporation

TransAlta Fly Ash Ltd.

M. J.S. Burns

M. E.G.W. Bush

M. J.H.P. Buckingham

M. B.F. McPhalen

M. O.H. Smail

M. A.J. Slessor





TABLE DES MATIÈRES

1.	Rôle des cendres volantes comme matériaux de ressource	1
1.1	Les cendres volantes : leur origine	1
1.2	La nature chimique des cendres volantes	3
1.3	La nature physique des cendres volantes	5
1.4	L'utilisation des cendres volantes comme composant de matériaux de construction	7
2.	Les cendres volantes au Canada	9
2.1	Les sources	9
2.2	Leur utilisation	13
3.	Utilisation des cendres volantes comme matériau de construction . .	16
3.1	La revalorisation des sols	16
3.2	L'utilisation des cendres volantes comme matériau de constitution	19
4.	Utilisation des cendres volantes dans le ciment et le béton	25
4.1	Les mélanges de ciments et les matériaux de cimentation supplémentaires	25
4.2	Le béton en masse	26
4.3	Le béton marin	30
4.4	Le béton pour les travaux de construction	31
4.5	Les matériaux de remplissage à densité contrôlée	31
4.6	L'utilisation des cendres volantes dans les coulis accrochants	32
4.7	Les produits en béton moulé	36
4.8	L'utilisation des cendres volantes pour la cimentation des puits de pétrole	37
5.	Produits de céramique	39
5.1	Les briques d'argile	39
5.2	Les agrégats légers	40
6.	Marchés nouveaux et expérimentaux pour les cendres volantes	41
6.1	La laine minérale et les matériaux d'isolation thermique . . .	41
6.2	Le traitement des eaux usées	42
6.3	La récupération de ressources que renferment les cendres volantes	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Production annuelle approximative per capita de cendres de charbon	9
Tableau 2	Centrales thermiques au charbon au Canada en 1982	10
Tableau 3	Consommation de charbon et production totale de cendres prévues par les services publics canadiens en 1980-1986. . . .	12
Tableau 4	Utilisation des cendres au Canada par province	14
Tableau 5	Production et utilisation des cendres de charbon : principales utilisations des cendres dans le monde (1977) . .	15
Tableau 6	Résumé des principaux effets des cendres volantes sur les propriétés du béton plastique	27
Tableau 7	Résumé des principaux effets des cendres volantes sur les propriétés du béton durci	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Électromicrographie de cendres volantes	5
Figure 2	Répartition granulométrique des particules de cendres volantes et de cendres de fond par comparaison avec les agrégats de sable et de gravier.	6
Figure 3	Emplacement des centrales thermiques au charbon au Canada . .	11
Figure 4	Parc Oakridge, Mississauga - Terrain réaménagé à l'aide de cendres de charbon	18
Figure 5	Le Royal Bank Plaza, Toronto - Exemple d'utilisation de cendres volantes pour la construction de structures en béton à résistance élevée	33
Figure 6	Remblayage à masse spécifique contrôlée pendant la construction de fondations	34
Figure 7	Équipement servant à l'injection d'un coulis de cendres volantes dans l'assise d'une voie ferrée	35
Figure 8	Parpaings en béton dans lesquels la silice a été remplacée par des cendres volantes	36

1. **ROLE DES CENDRES VOLANTES COMME MATÉRIAUX DE RESSOURCE**

La consommation mondiale de charbon dans les centrales thermiques est d'environ 2 400 millions de tonnes par an, ce qui entraîne la production de 250 à 300 millions de tonnes de cendres. Cette consommation devrait atteindre 6 500 millions de tonnes en l'an 2000, avec plus de 700 millions de tonnes de cendres. Il s'agit là d'une augmentation bien supérieure à 100 % en seize ans. L'élimination des cendres est donc une question qu'il s'agit de régler rapidement si l'on veut préserver l'environnement, ce qui représente un coût important pour les producteurs d'électricité.

Depuis le début des années 1970, il est de plus en plus admis que les cendres volantes et d'autres déchets industriels peuvent remplacer ou compléter des matériaux dont la fabrication nécessite une assez grande dépense d'énergie. L'utilisation des cendres pour diverses applications a donc fait l'objet d'expériences de plus en plus nombreuses et d'une documentation au volume croissant.

Le présent document passe en revue les marchés possibles des cendres de charbon sur le plan canadien. La plupart des utilisations envisagées ne sont pas nouvelles, mais certaines d'entre elles le sont au niveau du Canada, tandis que d'autres datent des débuts du développement industriel et que quelques-unes d'entre elles sont devenues classiques.

1.1 Les cendres volantes : leur origine

Lorsque l'on brûle du charbon dans les centrales électriques, les matières organiques jouent le rôle de combustible et sont transformées en gaz de combustion. Les matières inorganiques, non combustibles, forment des résidus solides appelés cendres. Dans les centrales thermoélectriques modernes, le charbon est introduit dans la chaudière sous forme de fines particules en suspension dans l'air (combustible pulvérisé). Le processus de combustion donne deux types de cendres : les cendres de fond ou scories, combinaison des particules des cendres les plus lourdes et des scories fondues qui se forme sur les surfaces internes de la chaudière; les cendres volantes, fines particules qui

sont évacuées de la chaudière dans les gaz de carneau. Généralement, 80 % des cendres formées dans une chaudière moderne sont des cendres volantes, le reste se présentant sous forme de cendres de fond. Afin d'éviter la pollution atmosphérique, les systèmes des centrales comportent des dispositifs collecteurs de poussière qui éliminent jusqu'à 99,9 % des cendres volantes avant que les gaz de carneau ne soient libérés.

Les méthodes les plus courantes pour recueillir les cendres volantes sont les suivantes :

- . épurateurs humides;
- . collecteurs mécaniques;
- . sacs filtrants; et
- . dépoussiéreurs électrostatiques.

Le type de dispositif utilisé joue un rôle au plan de la répartition granulométrique des cendres recueillies. En raison de leur grande efficacité, les dépoussiéreurs électrostatiques recueillent généralement des cendres volantes plus fines que celles que récupèrent les cyclônes.

Les cendres volantes extraites des gaz de carneau à l'aide d'un collecteur humide sont directement acheminées jusqu'à un bassin où elles sont déshydratées ou éliminées. Si elles ont été recueillies à l'aide de collecteurs mécaniques, de sacs filtrants ou de dépoussiéreurs électrostatiques, il faut les transporter jusqu'à un silo de stockage temporaire ou jusqu'à un lieu d'écoulement.

Les propriétés chimiques, physiques et techniques d'un type particulier de cendres volantes peuvent découler des facteurs suivants :

- . le type de charbon et son origine géologique;
- . le degré et le type de préparation du charbon;
- . le concept, le type et le mode de fonctionnement de la chaudière de la centrale; et
- . les méthodes de récupération, de manipulation et d'élimination appliquées.

Il en résulte que les cendres de charbon présentent des propriétés très diverses, qui non seulement varient d'une centrale à l'autre, mais aussi d'une chaudière à une autre dans la même centrale et d'une période à une autre dans la même chaudière.

1.2 La nature chimique des cendres volantes

La composition chimique des cendres est essentiellement fonction de la composition du charbon qui les produit. Les principaux composants d'un charbon sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et le soufre. Ils représentent en général de 70 à 90 % du total et leur teneur est variable. Les principaux éléments forment des produits de combustion gazeux qui sont éliminés pour la plus grande partie en même temps que les gaz de carneau et n'influent que très peu sur la composition des cendres. La plupart des composants secondaires ainsi que le sable, l'argile et le schiste associés au charbon sont incombustibles et forment les résidus solides qui comprennent les cendres.

Plus de 85 % de la plupart des cendres volantes contiennent des éléments chimiques et du verre formés à partir de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO et MgO . Le charbon non brûlé se retrouve avec les cendres volantes dont la quantité est déterminée par le taux de combustion, le rapport air/combustible et le degré de pulvérisation du charbon. Les cendres de fond et les scories ont une composition chimique généralement semblable mais elles contiennent moins de matière vitreuse.

La quantité de cendres produite par une chaudière est fonction de la teneur en matières inorganiques du charbon, qui peut aller de 3 à 30 %. D'une façon générale, les charbons de qualité élevée produisent moins de cendres que ceux dont la qualité est inférieure. On utilise un certain nombre de systèmes de classification des charbons qui permettent de définir différentes qualités. Les types de charbons les plus importants sont :

- . l'anhracite;
- . les charbons bitumineux;

- . les charbons sous-bitumineux;
- . la lignite.

L'anthracite n'est généralement pas employé dans les centrales thermiques au Canada.

Si l'on considère l'utilisation des cendres, il est intéressant de les classer en deux catégories :

Les cendres volantes de type " F ", dérivées de la combustion de charbon bitumineux (ou d'anthracite), souvent caractérisées par leur teneur élevée en fer et leur teneur relativement faible en oxyde de calcium.

Les cendres volantes de type " C ", obtenues par combustion de charbon sous-bitumineux ou de lignite, caractérisées par leur nature " basique " ainsi que par la présence de niveaux élevés d'oxyde de calcium. Les cendres de type " C " réagissent souvent avec l'eau pour former des concrétions solides comme du ciment.

Les propriétés chimiques des cendres de charbon en font des produits utiles sous forme de matières premières dans un certain nombre d'industries de traitement secondaire. Parmi les exemples types des applications qui dépendent des propriétés chimiques, on peut citer :

- . la fabrication du ciment Portland;
- . la fabrication de la laine minérale;
- . la fabrication des produits en céramique et en argile;
- . l'extraction des composants importants et des éléments-traces comme Al, Fe et Ge; et
- . la fabrication de ferrosilicium.

1.3 La nature physique des cendres volantes

La plus grande partie des particules de cendres volantes sont de forme sphérique et leur diamètre varie de 0,5 à 150 μm , dont la figure 1 présente la forme typique. Elles sont la plupart du temps sphériques, certaines d'entre elles étant creuses. Les développements cristallins que l'on aperçoit nettement sur la grosse particule de la figure 1 sont aussi caractéristiques et se sont probablement formés par la suite du dépôt de matériaux provenant des gaz de combustion, au cours de la phase de refroidissement.

Les cendres de fond se présentent généralement sous forme de particules beaucoup plus grosses et de forme très irrégulière. La figure 2 présente la répartition granulométrique des deux types de cendres comparée aux répartition granulométriques des sables vaseux et des argiles, ainsi que du sable et du gravier classés.

La densité des cendres volantes varie de façon importante d'une particule à une autre, allant de 1 pour les particules creuses (appelées cénosphères) à plus de 3 pour les spinelles magnétiques. Ces différences de densité, de dimension de particules et de propriétés magnétiques permettent une amélioration des composants.



Figure 1 : Électromicrographie de cendres volantes
(Agrandissement : 60 000)

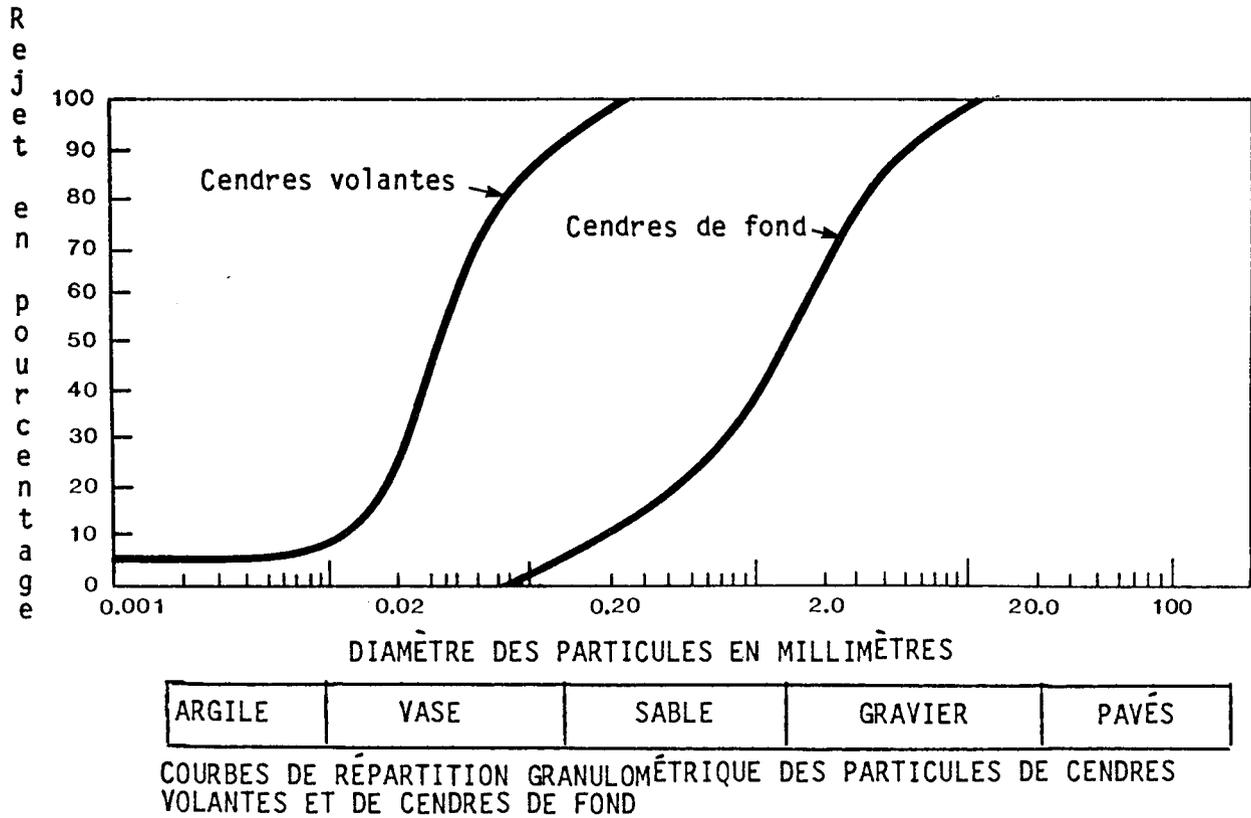


Figure 2 : Répartition granulométrique des particules de cendres volantes et de cendres de fond par comparaison avec les agrégats de sable et de gravier.

Les propriétés physiques des cendres volantes et des cendres de fond sont exploitées dans diverses applications comme les suivantes :

- . charges pour les plastiques et les produits du caoutchouc;
- . remblais;
- . absorbants pour les déversements de pétrole; et
- . traitement de l'eau.

1.4 L'utilisation des cendres volantes comme composant de matériaux de construction

De même que les cendres volcaniques, certaines terres à diatomées, ainsi que les minéraux traités thermiquement de façon artificielle (comme les argiles ou les schistes), les cendres provenant de la combustion du charbon sont fréquemment pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'elles réagissent aux températures ordinaires avec l'oxyde de calcium (calcaire) et l'eau pour former des composés insolubles stables possédant des propriétés de cimentation.

Le terme pouzzolane vient de l'utilisation ancienne d'un tuff volcanique rouge de la région de Pozzoli ou de Pozzuoli (en latin : Puteoli) près de la baie de Naples. Son emploi comme ciment, mélangé à de la chaux, pour des travaux de construction a été décrit par Vitruvius et Pliny. Les Romains et les Grecs connaissaient les propriétés d'accrochage des mélanges de chaux et de cendres volantes et l'utilisation des cendres pouzzolaniques est probablement le moyen connu le plus ancien de former des ciments hydrauliques.

Bien qu'il semble que toutes les cendres de charbon finement divisées présentent une certaine activité pouzzolanique, seules les cendres volantes (cendres de combustibles pulvérisées) sont suffisamment réactives pour présenter des qualités pouzzolaniques pratiques sous la forme selon laquelle elles sont recueillies dans les centrales thermiques. Il n'existe pas une caractéristique unique ou une simple combinaison de caractéristiques permettant de déterminer l'utilisation des cendres volantes à titre de pouzzolane. Cependant, les documents qui traitent de la question s'entendent généralement pour affirmer

qu'un grand nombre de types de cendres volantes sont pouzzolaniques et que le degré d'activité pouzzolanique dépend dans l'ensemble de la composition chimique et de la finesse des particules qui les composent.

La pouzzolanicité des cendres volantes est à la base d'un certain nombre d'utilisations ou d'applications maintenant exploitées dans le monde entier à grande échelle. Les cendres volantes sont, dans ce sens, utilisées comme :

- . agents de stabilisation des sols;
- . composants d'un mortier avec de la chaux ou du ciment;
- . composants d'un matériau de stabilisation des déchets solides et liquides toxiques ou dangereux;
- . constituants réactifs de nombreux ciments non-Portland;
- . composants de ciments Portland à pouzzolane;
- . matériaux supplémentaires de cimentation ajoutés au ciment Portland pour la fabrication de béton et de produits de béton;
- . composants de coulis, mortiers et ciments de remplissage; et
- . composants de ciments pour puits de pétrole.

2. LES CENDRES VOLANTES AU CANADA

2.1 Les sources

Les trois quarts environ du charbon consommé au Canada servent à la production d'électricité dans les centrales thermiques.

Jusqu'à maintenant, la proportion des centrales électriques du Canada fonctionnant au charbon a été inférieure à celle de la plupart des pays industrialisés. Cette situation est due au fait qu'une grande partie de l'électricité est produite ici par des centrales hydroélectriques ou fonctionnant au mazout. La production per capita de cendres de charbon au Canada est donc inférieure à celle de la plupart de ces pays (voir le tableau 1).

TABLEAU 1

PRODUCTION ANNUELLE APPROXIMATIVE PER CAPITA
DE CENDRES DE CHARBON

Pays	Production de cendres per capita (tonnes par an) (1977-1980)
Australie	0,38
République fédérale allemande (Ouest)	0,24
Royaume-Uni	0,22
É.-U.	0,24
U.R.S.S.	0,27
Canada	0,16

En 1982, les services publics canadiens exploitaient 22 centrales thermiques au charbon, d'une capacité totale d'environ 17 300 MW (voir le tableau 2). La même année, les centrales thermiques canadiennes ont consommé près de 33,7 x 10⁶ tonnes de charbon et produit environ 3,5 x 10⁶ tonnes de cendres (1,2 x 10⁶ tonnes de cendres de fond; 2,3 x 10⁶ tonnes de cendres volantes). La figure 3 montre l'emplacement des centrales thermiques au charbon du Canada.

TABLEAU 2

CENTRALES THERMIQUES AU CHARBON AU CANADA EN 1982

Services publics	Centrales	Capacité (kW)	Consommation de charbon (tonnes)
(les numéros se rapportent aux emplacements de la figure 3)			
Nouvelle-Écosse			
1. Nova Scotia Power Corporation	Seabord	111 000	74 221
2. Nova Scotia Power Corporation	Maccan	25 000	5 558
Nova Scotia Power Corporation	Trenton	210 000	400 864
3. Nova Scotia Power Corporation	Lingan	300 000	819 551
Nouveau-Brunswick			
4. Commission hydroélectrique du Nouveau-Brunswick	Dalhousie	200 000	323 202
5. Commission hydroélectrique du Nouveau-Brunswick	Grand Lac	85 000	224 436
Ontario			
6. Hydro Ontario	R.L. Hearn	1 222 500	191 560
7. Hydro Ontario	Lakeview	2 422 500	1 841 763
8. Hydro Ontario	Nanticoke	4 022 500	6 137 234
9. Hydro Ontario	J. Clark Keith	272 500	203 112
10. Hydro Ontario	Lambton	2 022 500	3 283 160
11. Hydro Ontario	Thunder Bay	277 300	826 996
Manitoba			
12. Manitoba Hydro	Selkirk	155 800	21 259
13. Manitoba Hydro	Brandon	237 000	163 045
Saskatchewan			
14. Saskatchewan Power Corporation	Estevan	70 000	339 230
15. Saskatchewan Power Corporation	Boundary Dam	875 000	3 838 259
16. Saskatchewan Power Corporation	Queen Elizabeth	232 000	40 363
17. Saskatchewan Power Corporation	Poplar River	300 000	1 679 278
Alberta			
18. Alberta Power Limited	Drumheller	15 000	1 964 580
19. Alberta Power Limited	Battle River	737 000	2 452 143
20. TransAlta Utilities Corp.	Wabamum	582 000	1 840 022
21. TransAlta Utilities Corp.	Sundance	2 100 000	8 339 531
22. Alberta Power Limited	H.R. Milner	150 000	610 190

Source : Aylsworth, J. "Coal and Coke - 1982", Annuaire des minéraux du Canada - 1982, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, 1984

En 1986, trois nouvelles centrales électriques devraient entrer en production. Il s'agit des centrales de Atikokan (Ontario), Keephills et Sheerness (Alberta). La production totale d'électricité produite à partir du charbon serait alors augmentée de 5,8 % pour atteindre plus de 18 300 MW.

Les prévisions de consommation de charbon et de production de cendres volantes au Canada jusqu'en 1986 sont présentées au tableau 3.

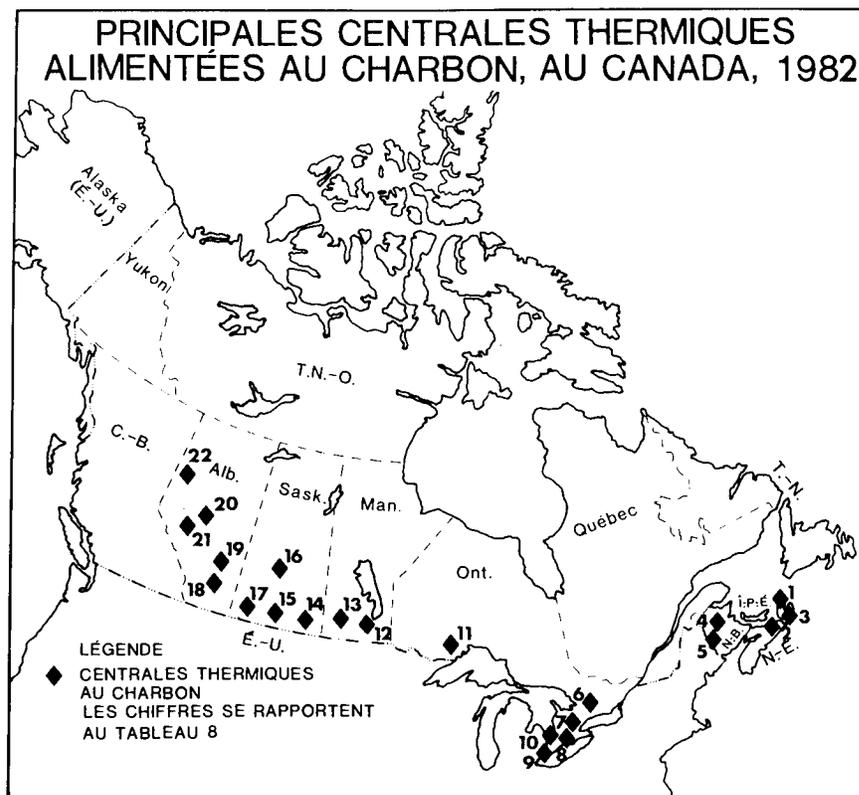


Figure 3 : Emplacement des centrales thermiques au charbon au Canada

Source : Aylsworth, J. "Coal and Coke - 1982", Annuaire des minéraux du Canada - 1982, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, 1984

TABLERAU 3
CONSOMMATION DE CHARBON ET PRODUCTION TOTALE DE CENDRES PRÉVUES PAR LES
SERVICES PUBLICS CANADIENS EN 1980-1986

Province	Consommation de charbon (10 ⁶ tonnes/an)						
	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Nouvelle-Écosse	1,25	1,27	1,49	1,57	1,90	2,10	(2,10)
Nouveau-Brunswick	0,51	0,53	(0,53)	(0,53)	(0,53)	(0,53)	(0,53)
Ontario	10,65	12,84	15,65	13,99	10,69	12,44	12,71
Manitoba*	----- moyenne 0,4 -----						
Saskatchewan	5,80	6,70	6,90	6,70	(6,70)	(6,70)	(6,70)
Alberta	11,00	11,60	11,90	12,20	13,30	14,60	15,80
Total Canada	29,60	33,30	36,50	35,40	33,50	36,80	38,20

Province	Cendres volantes (10 ³ tonnes/an)						
	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Nouvelle-Écosse	90	126	141	153	194	213	(213)
Nouveau-Brunswick	84	88	(88)	(88)	(88)	(88)	(88)
Ontario	733	842	1060	1046	731	828	860
Manitoba*	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)
Saskatchewan	146	199	202	199	199	(199)	(199)
Alberta	1010	1070	1070	1130	1250	1380	1600
Total Canada	2073	2335	2571	2620	2472	2718	2970

Remarque : Les quantités entre parenthèses sont des extrapolations établies en supposant qu'il n'y a pas d'accroissement par rapport aux années précédentes.

*Les données pour le Manitoba ne sont pas plus précises en raison d'une exceptionnelle variabilité.

Source : Berry, E.E., Hemmings, R.T. et J.S. Burns. Coal Ash in Canada: Volume 1, Ash as a Potential Resource, Association canadienne de l'électricité, Rapport du contrat G195, 1983

2.2 Leur utilisation

L'utilisation totale de cendres de charbon au Canada en 1980 a été d'environ 500 000 tonnes (voir le tableau 4). Le total des cendres ayant servi à d'autres utilisations que le remblayage (élimination) a été d'environ 15 % de la production.

L'emploi des cendres à grande échelle a été limité aux provinces de l'Alberta (220 000 tonnes ou 13 % de la production) et de l'Ontario (300 000 tonnes ou 32 % de la production). En Saskatchewan, 30 000 tonnes de cendres ont été utilisées, ce qui représente environ 6,5 % de la production. En Nouvelle-Écosse, le chiffre se monte à quelque 12 000 tonnes de cendres de dépoussiéreur, soit 9% de la production.

Environ 50 % des cendres commercialisées ont été utilisées comme substitut du ciment ou produit de remplacement dans une application quelconque. Environ 27 % ont servi comme matériau de fondation de routes et 20 % comme produit de stabilisation des déchets.

Le tableau 5, établi à partir de divers documents, présente la répartition de l'utilisation des cendres dans un certain nombre de pays, dont le Canada.

A l'échelle mondiale, l'utilisation des cendres comme matériau de remplissage, de remplacement du ciment Portland (comme matériau supplémentaire de cimentation), d'ajout au ciment Portland (mélange de ciment) et de stabilisation des fondations routières représente 59 % des 31 millions de tonnes et plus de cendres employées en 1977.

TABLEAU 4

UTILISATION DES CENDRES AU CANADA PAR PROVINCE¹

PROVINCE	TOTAL DES CENDRES PRODUITES (1980) (TONNES/AN)	CENDRES UTILISÉES (TONNES/AN)	UTILISATION	TOTAL DES CENDRES UTILISÉES (TONNES/AN)
Nouvelle-Écosse	135 000	12 000	Cendres de dépoussiéreur pour décapage et gravillons de toiture	12 000
Nouveau-Brunswick	105 000	non indiqué	-	-
Ontario	930 000	40 000	Remplacement du ciment	226 000 - 376 000
		100 000	Stabilisation des déchets	
		36 000	Routes	
		50 - 200 000 ²	Projets spéciaux	
Manitoba	30 000	non indiqué	-	-
Saskatchewan	460 000	24 000	Béton	30 000
		6 000	Puits de pétrole	
Alberta	1 713 000	150 000	Remplacement du ciment	220 000
		70 000 ³	Projets spéciaux	
TOTAUX	3 373 000	488 000 - 638 000		486 000 - 636 000

1. Comprend les cendres volantes, les cendres de fond, les scories de chaudière et les scories de dépoussiéreur.
2. Demande irrégulière, en fonction de l'activité dans le domaine de la construction.
3. Approvisionnement temporaire pour la construction du barrage Revelstoke.

Source : Berry, E.E., Hemmings, R.T. et J.S. Burns. Coal Ash in Canada: Volume 1, Ash as a Potential Resource, Association canadienne de l'électricité, Rapport du contrat G195, 1983

TABLEAU 5

PRODUCTION ET UTILISATION DES CENDRES DE CHARBON :
PRINCIPALES UTILISATIONS DES CENDRES DANS LE MONDE (1977)¹

	É.-U.	Pologne	Royaume- Uni	Rép. féd. allemande	Rép. dém. allemande	Canada	Monde
<u>Production de cendres</u>							
Total des cendres produites (x 10 ³ tonnes)	61 495	15 000	12 336	15 000	15 000	2 626	278 443
Total des cendres utilisées (x 10 ³ tonnes)	9 079	5 512	5 070	3 413	2 475	711	31 605
% de la production de cendres utilisées	14,8	36,7	41,1	22,7	16,5	27,1	11,4
<u>Utilisation</u> --- (Pourcentage de cendres utilisées) ---							
Remblayage	24,3	0,2	44,8	5,8	--	75,9	18,3
Remplacement du ciment Portland	15,8	9,1	--	9,1	--	18,3	17,7
Ajout au ciment Portland	4,1	1,8	0,6	--	24,2	0,3	12,9
Stabilisation des routes	4,7	38,1	--	--	1,6	--	10,1
Parpaings aérés	--	18,1	32,2	--	1,0	--	5,8
Décapage et gravillons de toiture ²	14,9	--	--	7,8	--	--	5,1
Charge minérale pour asphalte	1,3	--	--	29,3	--	--	3,7
Matière première pour ciment	5,3	--	--	4,6	--	--	3,2
Agrégats légers ³	2,8	--	6,0	--	9,1	--	2,5
Briques et céramiques	--	--	--	6,9	3,4	--	1,8
Toutes les autres utilisations ⁴	26,9	32,7	16,4	36,6	60,6	5,2	30,1

1. Source : Berry, E.E., Hemmings, R.T. et J.S. Burns, Coal Ash in Canada :
Volume 1, Ash as a Potential Resource, Association canadienne
de l'électricité, Rapport du contrat G195, 1983

2. Scories de chaudière et de dépoussiéreur

3. Cendres de fond et cendres agglomérées

4. Agriculture, remplissage, contrôle des glaces, extraction minière, laine
minérale, coulis, etc.

3. UTILISATION DES CENDRES VOLANTES COMME MATÉRIAU DE CONSTRUCTION

On peut utiliser les cendres volantes comme matériau de remblayage pour la revalorisation ou l'aménagement des sols. En combinaison avec d'autres matériaux, ou sous forme de remplissage soigneux, les cendres volantes peuvent très bien servir de matériau de construction pour les structures suivantes :

- . assises et sous-couches de routes
- . accotements
- . routes d'accès et routes de chantier
- . fondations de trottoir
- . assises de pont
- . planchers et fondations d'édifices
- . remblais de routes

3.1 La revalorisation des sols

Avec l'accroissement de la valeur des terrains au voisinage des centres urbains, la demande publique de préservation des terres agricoles et récréatives, ainsi que le développement de la protection et de la remise en état de l'environnement, il y a une demande de plus en plus marquée de revalorisation des sols dévastés. Dans la plupart des cas, ce processus implique la restauration jusqu'à possibilité d'utilisation du sol qui a subi des dégâts en surface, comme dans le cas de l'exploitation minière ou de l'élimination des déchets. Les projets de revalorisation classique ont porté sur la remise en état des emplacements de mines, de carrières ou de décharges abandonnées.

Il arrive souvent que le sol à remettre en état soit dans une région où l'on ne trouve pas de matériaux naturels de remplissage, ou dans des lieux où les règlements environnementaux limitent l'approvisionnement en matériaux de remplissage appropriés. Dans de tels cas, on a beaucoup utilisé les cendres volantes ou des mélanges de cendres volantes et de cendres de fond comme matériaux de remplissage pour amener le sol à un niveau de qualité désiré avant d'y apporter une couverture apte à recevoir la végétation.

Quand on ne peut trouver d'utilisations plus valables, l'élimination réglementée des cendres est un moyen approprié de remettre en état des terres qui seraient autrement inutilisables.

Hydro Ontario a joué un rôle primordial dans l'emploi des cendres pour la revalorisation des terres dévastées à proximité des centres urbains dans le sud de l'Ontario. Au cours des vingt-cinq dernières années, plus de 3,5 millions de tonnes de cendres de charbon ont servi à revaloriser des terres dans les régions de Mississauga et Etobicoke. Les projets ci-dessous ont été réalisés à l'aide de cendres provenant de diverses sources en Ontario.

Parc Oakridge, Mississauga

Entre 1968 et 1970, plus de 450 000 tonnes de cendres de charbon ont servi à la remise en état d'une carrière de gravier abandonnée qui avait été utilisée comme dépotoir sans aucun contrôle. La carrière, située à proximité de la banlieue, a ainsi été revalorisée et sert maintenant de parc public (voir la figure 4).

Parc Birchwood, Mississauga

Le parc Birchwood situé sur l'emplacement d'une ancienne carrière de gravier abandonnée, se trouve sur un terrain qui a été remis en état entre 1970 et 1973 à l'aide de cendres provenant de la centrale thermoélectrique de Lakeview.

Carrière Booth, Etobicoke

Entre 1976 et 1980, près de 700 000 tonnes de cendres de charbon ont servi à la remise en état d'une carrière de schiste abandonnée dans la municipalité d'Etobicoke. Un terrain dévasté a été amélioré au point que l'on y procède à l'heure actuelle à son aménagement final comme parc municipal.



Figure 4 : Parc Oakridge, Mississauga -
Terrain réaménagé à l'aide de cendres de charbon

Carrière Domtar, Mississauga

La remise en état du terrain occupé par une carrière de schiste exploitée par Domtar est l'oeuvre actuelle d'Hydro Ontario, à l'aide des cendres que cette entreprise produit, et les travaux devraient se poursuivre au cours des dix à quinze prochaines années; environ 2 millions de tonnes seront utilisées. La quantité totale de cendres qu'il faudra employer et l'aspect final du terrain une fois fini dépendront dans une certaine mesure des besoins futurs en énergie des centrales thermoélectriques de Lakeview et R.L. Hearn. On prévoit que le terrain servira à diverses applications comprenant des constructions résidentielles et commerciales.

Le premier avantage de l'utilisation des cendres de charbon pour revaloriser les terres est que l'on obtient un remblayage présentant une capacité portante. Après la remise en état, une zone du genre peut se prêter à la construction de routes, d'installations publiques, de résidences ainsi que de complexes

publics, commerciaux et industriels. Cette possibilité de remblayage permet une utilisation finale acceptable du produit mais il est nécessaire de respecter certains critères de conception et certaines normes d'exploitation si l'on veut assurer la protection de l'environnement. Il faut porter un soin particulier au drainage du sol, aux problèmes éventuels de pollution par la poussière et de pollution des eaux et à la capacité portante du terrain ainsi restauré.

3.2 L'utilisation des cendres volantes comme matériau de constitution

Les applications des cendres volantes exposées précédemment portaient sur leur utilisation comme matériau de remplissage dans le but essentiel de fournir une base stable au recouvrement par de la terre arable et une couverture végétale. Les cendres volantes ne se limitent pas à de telles utilisations et l'on a vu que la plupart des cendres peuvent être stabilisées ou agglomérées de façon appropriée, seules ou avec d'autres matériaux, pour devenir un matériau de construction, en soi, capable de supporter des routes et des édifices.

Les propriétés les plus importantes des matériaux servant au remblayage de fondations sont la résistance, la durabilité et la stabilité dimensionnelle. La durabilité se définit comme la capacité d'un matériau de conserver sa résistance et son intégrité dans les conditions environnementales d'utilisation, en particulier les cycles de gel et de dégel, ainsi que l'humidité. La stabilité dimensionnelle se définit comme l'absence de dilatation ou de contraction excessive sous l'effet de variations de température et d'humidité. La résistance et la rigidité s'obtiennent par une conception au plan de la structure, après que les matériaux disponibles ont été soumis à des essais appropriés. Cependant, si les matériaux ne présentent pas la durabilité ou la stabilité dimensionnelle voulue, les structures qui en résulteront se désintégreront avec le temps ou se lézarderont gravement, quelle que soit la méthode de conception ou les soins apportés.

Il est souvent difficile de catégoriser le rôle des cendres dans le domaine de la construction. Elles peuvent constituer le seul matériau de construction, servir à régulariser les propriétés d'un sol boueux ou être mélangées à de la chaux, du ciment, de la terre ou des agrégats pour former une masse stabilisée ou agglomérée. D'une façon générale, l'emploi de cendres comme matériau de construction peut être considéré dans le cadre des applications suivantes :

- . la stabilisation des sols;
- . le remblayage;
- . la stabilisation des assises.

3.2.1 La stabilisation des sols

Les sols qui ne présentent pas de cohésion ont une capacité portante insuffisante pour la construction de routes ou d'édifices. Il convient donc, dans de tels cas, d'améliorer leur capacité portante.

Dans certains cas, les cendres volantes peuvent être utilisées seules, mais, plus souvent, on s'en sert avec de la chaux ou du ciment Portland. Les mélanges de chaux et de cendres volantes permettent de réduire la plasticité et la contraction de nombreux sols, et d'en améliorer les conditions de drainage. De plus, ils peuvent produire une matrice à caractéristique d'accrochage qui améliore encore la résistance et la durabilité d'un sol.

Dans un sol stabilisé, les cendres servent principalement de pouzzolane ou de composante d'un ciment de sol. Dans certains cas, leur nature granulaire entraîne aussi la modification de la plasticité des matériaux.

3.2.2 Le remblayage

Sur le plan de la mécanique des sols, les cendres volantes entrent dans la même catégorie que le limon sableux. La masse volumique des cendres varie beaucoup d'un endroit à l'autre, de 1 900 à 3 000 kg/m³. Les

masses volumiques globales varient aussi beaucoup; la masse volumique des matériaux secs tassés est généralement de l'ordre de 1 120 à 1 440 kg/m³, ce qui est de beaucoup inférieur à celle des matériaux de remblayage courants. Le tassement optimal s'effectue pour un taux d'humidité de 18 à 30 % dans le cas de la plupart des cendres. Des échantillons de cendres compactées avec une teneur en eau supérieure à la valeur optimale présentent une diminution de la résistance au cisaillement. La perméabilité des cendres compactées est de l'ordre de 5×10^{-5} à 5×10^{-7} cm/s.

En raison de leur légèreté et de leur bonne résistance au cisaillement, les cendres volantes se prêtent bien à l'établissement des accotements, en particulier dans le cas des sols mous ou compressibles. De nombreuses cendres volantes présentent une résistance au cisaillement qui les rend idéales comme matériau de remblayage pour charge légère, comme les accotements de route. En Écosse, plus de 600 000 tonnes de cendres volantes ont été utilisées pour la construction d'accotements sur la Motorway M9, simplement en raison de leur légèreté qui les rendait plus pratiques que les matériaux de remplissage classiques comme les rebuts de houillère ou l'argile lourde.

L'une des applications les plus fréquentes des cendres volantes comme matériau de remblayage est son utilisation en appui des butées de pont et autres structures en béton. Les principaux avantages de cette application sont :

- . une faible pression active (en raison de la résistance au cisaillement élevée);
- . une faible masse volumique;
- . des propriétés pouzzolaniques;
- . un faible tassement des cendres en raison de leurs propriétés pouzzolaniques;
- . un tassement inférieur sous les cendres en raison de leur faible poids.

En Europe, les cendres volantes sont très utilisées comme matériau de remblayage à bonne capacité de charge. On peut en faire une assise pour les édifices au-dessus des sols de mauvaise qualité en raison de leur légèreté et de leurs propriétés d'auto-durcissement.

Les principaux problèmes que peuvent présenter les remblayages en cendres compactées sont l'érosion et la liquéfaction des cendres. L'érosion interne par déplacement des eaux souterraines peut être combattue par un drainage bien conçu. L'érosion externe due au vent et à la pluie est minimisée par la végétation ou toute autre couverture matérielle.

On fait aussi état d'autres problèmes : a) certaines cendres sont sensibles au gel et nécessitent donc d'être recouvertes ou stabilisées, et b) les sulfates que contiennent certaines cendres peuvent être suffisamment solubles pour qu'il soit nécessaire de prendre certaines précautions lorsqu'elles sont placées à proximité du béton, la mesure la plus courante consistant à recouvrir le béton d'un revêtement bitumineux.

On a enregistré au Canada au cours des quelques dernières années un certain nombre d'applications à grande échelle des cendres comme matériau de construction.

En 1978, 125 000 tonnes de cendres lagunaires provenant de la centrale électrique J. Clark Keith ont servi à la construction de la masse centrale du pont enjambant la route E.C. Row-Walker à Windsor, en Ontario. Leur légèreté et la proximité du terrain ont été les raisons principales du choix des cendres pour ce projet. Le succès de ces travaux a entraîné en 1980-1981 l'emploi de 250 000 tonnes de cendres volantes provenant de la centrale électrique de Lambton pour la construction d'une rampe d'accès à la route 402 et la rue Front à Sarnia, en Ontario. D'autres projets ont suivi, et les cendres sont maintenant considérées comme un matériau de construction pour plusieurs catégories de routes dans le sud et le sud-ouest de l'Ontario.

Les cendres volantes ont servi de matériau de construction dans le cas des fondations de routes en Saskatchewan. En 1976 et 1977, un tronçon de 3 km de la route 18, à proximité d'Estevan, en Saskatchewan, a été construit à titre d'essai sur une sous-couche composée de cendres lagunaires provenant de la centrale du barrage Boundary de la

Saskatchewan Power Corporation. Ces travaux ont nécessité l'utilisation d'environ 30 000 tonnes de cendres lagunaires qui ont été transportées par camion à trémie et tassées à l'aide de rouleaux à pneus.

Après douze mois de service, quatre fissures transversales seulement avaient fait leur apparition dans ce tronçon. Aucune interaction n'était apparue entre les cendres lagunaires et le béton bitumineux. Les talus ont subi l'action d'une érosion due à l'écoulement de l'eau provenant du revêtement, sur les cendres lagunaires exposées. Les résultats obtenus par l'utilisation de cendres dans la construction du tronçon d'essai de la route 18 ont amené les responsables à utiliser des cendres lagunaires comme sous-couche pour la construction d'un tronçon de 25 km de la route 47, juste au nord d'Estevan.

3.2.3 La stabilisation de la fondation

Il existe une marge étroite entre la stabilisation des sols à l'aide de cendres et la stabilisation des cendres elles-mêmes afin de former un matériau de fondation. Dans ce dernier cas, les cendres jouent le rôle du sol (c.-à-d., d'un agrégat inerte) et de la pouzzolane (c.-à-d., un composant d'un système de ciment).

L'utilisation des cendres volantes dans un système stabilisé se fait surtout au niveau de la construction des fondations et des sous-couches des revêtements routiers où la chaux et les cendres volantes servent à remplacer le ciment pour former un mélange de chaux/cendres volantes/agrégats.

Les mélanges de chaux/cendres volantes/agrégats sont des ensembles d'agrégats, de chaux, de cendres volantes et d'eau, combinés dans des proportions appropriées, qui donnent un matériau dense lorsqu'il est tassé. Pour un ensemble donné de composants, les facteurs qui peuvent varier sont le rapport chaux/cendres volantes et le rapport chaux plus cendres volantes/agrégats.

Les agrégats utilisés sont généralement des pierres, du gravier, du sable ou des scories bien tamisés, et ils ne doivent contenir aucune substance pouvant interférer avec la réaction chimique désirée entre les cendres volantes et la chaux. Dans certains cas, d'autres déchets comme des rebuts de charbon, des scories de chaudière ou des cendres de fond ont été utilisés à titre d'agrégats dans des mélanges de chaux/cendres volantes/agrégats.

Les cendres volantes utilisées seules peuvent être stabilisées par du ciment ou de la chaux et servir de matériau de fondation ou de sous-couche. La réaction pouzzolanique entre la chaux et les cendres volantes peut se produire de nombreuses façons diverses. Dans le cas de la stabilisation par la chaux, cette dernière est ajoutée directement aux cendres volantes, puis on ajoute de l'eau et le mélange est tassé. Dans la stabilisation au ciment, celui-ci est ajouté aux cendres volantes à la place de la chaux; le ciment s'hydrate au contact de l'eau et produit ses propres composés d'accrochage tout en libérant certaines quantités de chaux qui réagissent alors avec les cendres volantes d'une façon pouzzolanique. Certains types de cendres volantes contiennent aussi des quantités non négligeables de chaux libre qui réagit avec d'autres composants des cendres volantes lorsque l'on ajoute de l'eau pour produire des composés à capacité d'accrochage sans ajouter de chaux ou de ciment. Ce dernier processus est connu sous le nom d'auto-durcissement des cendres volantes.

Les cendres volantes qui sont stabilisées avec de la chaux ou du ciment, ou qui ont des propriétés d'auto-durcissement, présentent une résistance au cisaillement qui augmente avec le temps. La compressibilité de la plupart des cendres volantes est semblable à celle des sols cohésifs, bien que les cendres volantes stabilisées ou auto-durcissantes soient moins compressibles, en particulier si elles peuvent subir une maturation avant la mise en charge.

Étant donné que les cendres volantes sont composées de particules dont la dimension est essentiellement analogue à celle des limons, elles sont susceptibles de se gonfler sous l'effet du gel. Cependant, on a

constaté dans un certain nombre d'applications que si elles étaient stabilisées à l'aide d'un ciment approprié les mélanges résultants étaient généralement insensibles au gel.

L'incertitude relative à la susceptibilité au gel des systèmes comportant des cendres volantes stabilisées a grandement empêché leur utilisation au Canada dans la construction des routes publiques. Cependant, on s'en est parfois servi dans la construction de routes privées appartenant à des entreprises de production d'électricité. On espère que le succès de ces applications entraînera des utilisations plus poussées au Canada.

4. UTILISATION DES CENDRES VOLANTES DANS LE CIMENT ET LE BÉTON

Il est devenu courant, tant au Canada que dans le monde entier, d'utiliser des cendres volantes dans les produits du ciment et du béton. En comparaison avec les autres applications à volume important, l'utilisation de cendres volantes comme supplément ou substitut du ciment Portland représente un débouché de taille. Les produits du ciment et du béton peuvent se diviser en un certain nombre de catégories :

- . les mélanges de ciments, les ciments de maçonnerie;
- . le béton pré-mélangé ou autre mélange de ciment, d'eau et d'agrégats coulés à l'emplacement des travaux;
- . les produits de béton moulés;
- . les produits de ciment et de béton traités thermiquement, comme des parpaings, des briques et des tuyaux;
- . les coulis et produits de remblayage;
- . les ciments pour puits de pétrole.

Dans tous ces divers produits, les cendres volantes servent de ciment supplémentaire et contribuent substantiellement à la résistance et à la durabilité du produit fini.

4.1 Les mélanges de ciments et les matériaux de cimentation supplémentaires

Le béton, dont le liant est composé de ciment Portland et d'une certaine quantité de cendres volantes, peut se fabriquer de trois façons :

- . un mélange de ciment préparé;
- . du ciment Portland et un matériau de cimentation supplémentaire ajoutés dans la bétonnière comme composants mélangés à sec séparément;
- . un coulis du matériau de cimentation supplémentaire introduit dans la bétonnière.

Qu'elles soient ajoutées sous forme de mélange de ciment ou de matériau de cimentation supplémentaire, les cendres volantes introduites dans les mélanges de béton touchent tous les aspects des propriétés du béton. En tant qu'élément du composé formant la masse de béton, les cendres volantes jouent le rôle d'agrégats fins ainsi que de composants de cimentation. Elles modifient les propriétés rhéologiques du béton plastique, la résistance, le fini, la porosité et la durabilité de la masse durcie, ainsi que le coût de l'énergie consommée pour la fabrication du produit final. Le tableau 6 résume les effets des cendres volantes sur le béton plastique, et le tableau 7, ceux des cendres volantes sur les propriétés du béton durci.

Jusqu'à maintenant, aucune quantité importante de mélange de ciments contenant des cendres volantes n'a été vendue au Canada, bien que l'intérêt grandissant pour l'utilisation des cendres indique que cette situation pourrait changer rapidement. D'un autre côté, l'emploi de cendres volantes comme matériau de cimentation supplémentaire est bien établi pour toutes les catégories de béton, depuis les matériaux de remblayage à faible rendement jusqu'au béton de construction à résistance élevée. Les exemples suivants présentent des cas intéressants d'utilisation des cendres dans divers types de béton, pour des applications assez variées dans le domaine de la construction.

4.2 Le béton en masse

Dès les débuts de l'utilisation des cendres, on a constaté que l'inclusion de 20 à 40 % de cendres volantes dans le béton en masse permettait de contrôler efficacement l'élévation de la température et la fissuration qui l'accompagne dans les grandes structures comme les barrages et les fondations.

TABLEAU 6

RÉSUMÉ DES PRINCIPAUX EFFETS DES CENDRES VOLANTES
SUR LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON PLASTIQUE

<u>Propriété</u>	<u>Effets</u>
Besoins en eau	Les mélanges à béton contenant des cendres volantes de bonne qualité nécessitent généralement moins d'eau pour un affaissement donné que le béton contenant seulement du ciment Portland. L'introduction de cendres volantes de mauvaise qualité pourra augmenter la demande d'eau.
Teneur en air	La quantité de mélange entraînant l'air nécessaire pour obtenir la teneur maximale en air augmente fréquemment de façon notable lorsque l'on introduit des cendres volantes dans le béton. La demande de ce mélange est fonction de la teneur en carbone des cendres.
Maniabilité	Pour les bétons présentant une résistance et un affaissement égaux, l'introduction de cendres volantes de bonne qualité améliore généralement la maniabilité.
Exsudation et séparation	Les cendres volantes réduisent l'exsudation et la séparation du béton. Cet aspect peut être particulièrement avantageux lorsqu'elles sont utilisées dans des mélanges de béton qui manquent normalement de fines.
Élévation de température	L'hydratation du ciment Portland s'accompagne d'une évolution thermique qui provoque une augmentation de la température dans le béton. Les gradients thermiques résultants qui apparaissent dans la masse des structures en béton peuvent provoquer des fissurations. Il est généralement admis que l'utilisation de cendres volantes pour remplacer partiellement le ciment Portland est un moyen efficace d'éviter ce problème. Cela a amené l'utilisation à grande échelle de cendres volantes dans les structures en béton massives comme les barrages.
Finition	Les cendres volantes de qualité améliorent généralement la finition du béton.
Pompage	De nombreuses cendres volantes améliorent la pompabilité du béton.

TABLEAU 7

RÉSUMÉ DES PRINCIPAUX EFFETS DES CENDRES VOLANTES
SUR LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON DURCI

<u>Propriété</u>	<u>Effets</u>
Résistance	Le ciment Portland et les cendres volantes contribuent tous les deux à la résistance du béton mais à des niveaux différents. Les bétons renfermant des cendres volantes peuvent acquérir une résistance plus lentement que ceux qui contiennent une quantité égale de ciment comme seul liant. Lorsque la teneur en matériaux de cimentation est la seule variable, on peut obtenir une égale résistance dès les premières étapes si la quantité de matériaux de cimentation combinés est supérieure à celle du ciment Portland lorsqu'il est utilisé seul. Le béton maigre est plus avantage par l'ajout de cendres volantes que le béton riche. Les quantités maximales de ciment et de cendres volantes pour tout mélange particulier sont déterminées par le coût relatif des matériaux ainsi que les propriétés requises du béton, et elles devraient être déterminées en procédant à des essais de mélange.
Résistance au gel-dégel	Les cendres volantes n'influent pas sur la résistance au gel-dégel du béton à condition : a) que le béton ait un bon entraînement d'air; b) qu'il ait acquis une résistance suffisante avant l'arrivée du gel.
Perméabilité	Les cendres volantes réduisent la perméabilité du béton, même lorsque la teneur en ciment est relativement faible. Cette diminution est due à la réduction de la séparation et de l'exsudation, ainsi qu'à la réaction entre la chaux et les cendres volantes. Certaines cendres volantes sont plus efficaces que d'autres pour réduire la perméabilité du béton au cours des premières étapes.
Retrait au séchage	L'effet des cendres volantes sur le retrait au séchage du béton est généralement faible. Comme dans le cas du béton qui ne contient pas de cendres volantes, il est fonction de la teneur en eau du béton frais.
Réactivité des agrégats alcalins	L'activité des agrégats alcalins de type alcalins-alcali et alcali-carbonate peut entraîner une dilatation excessive du béton. Certaines cendres volantes permettent un bon contrôle des réactions des types alcali-silice, mais non alcali-carbonate.

L'une des premières applications des cendres volantes dans la fabrication du béton au Canada a été la construction de la centrale hydro-électrique de Squaw Rapids sur la rivière Saskatchewan. Le barrage a nécessité l'utilisation de 76 500 m³ de béton, et les cendres volantes ont représenté 20 % du composant à capacité d'accrochage de ce béton. Tout le béton du projet hydro-électrique du barrage Gardiner (Coteau Creek), sur la rivière Saskatchewan contenait des cendres volantes, et l'on envisage d'utiliser jusqu'à 20 000 tonnes de cendres volantes dans les 268 685 m³ de béton qui doivent être coulées pour la nouvelle centrale hydro-électrique de Nipawin située elle aussi sur la rivière Saskatchewan; la première étape est déjà terminée.

Les centrales hydro-électriques de Colombie-Britannique contiennent aussi d'importantes quantités de cendres volantes dont la plus grande partie provient de centrales thermiques de l'Alberta. On a d'abord utilisé des pouzzolanes pour la construction du barrage de la rivière Peace (Bennett) à Hudson Hope. Il s'agissait de pouzzolanes naturelles comme la terre à diatomies et des schistes, mais elles furent remplacées par des cendres volantes tout d'abord au " Site Un ", puis au barrage de Seven Mile et plus récemment au plus grand barrage de Revelstoke.

La première utilisation importante de cendres volantes dans les structures massives en béton réalisée par l'Hydro Ontario a été la centrale des rapides Otter en 1960 où 20 % des matériaux de cimentation du béton ont été remplacés dans ce cas par des cendres volantes. Onze ans plus tard, l'inspection du béton a montré qu'il se trouvait dans une condition comparable à celle d'un barrage semblable construit au même moment sans cendres volantes. La structure comprenant des cendres volantes présentait moins de fissures. Par la suite, tous les travaux comprenant des masses de béton et la plupart des structures hydrauliques en Ontario, ainsi que certaines parties de leurs installations nucléaires, ont vu l'incorporation d'une certaine quantité de cendres volantes.

La capacité des cendres volantes de contrôler la vitesse d'augmentation de la température dans le béton en masse, a été exploitée dans les structures autres que les barrages. Un exemple important en est l'utilisation du béton à cendres volantes dans plusieurs coulées de béton dans la région de Vancouver, en particulier celles qui étaient destinées aux fondations des élévateurs à grain de l'Alberta Wheat Pool en bord de mer à Vancouver. Ces travaux étaient en cours en 1977 et ils ont nécessité près de 4 600 m³ de béton comportant jusqu'à 38 % de cendres volantes comme composant à capacité d'accrochage.

4.3 Le béton marin

La détérioration du béton due à l'action des eaux souterraines ou de l'eau de mer contenant des sulfates est un facteur très important de détermination de la durabilité de nombreuses structures. Le développement des activités au large des côtes et dans les milieux marins a entraîné l'utilisation à grande échelle de béton dans des structures comme les plates-formes de forage, les jetées, les ports et les réservoirs en béton. Les cendres volantes forment un additif utile au béton marin et elles permettent de réduire de façon notable la perméabilité du béton et d'augmenter sa résistance aux sulfates ou aux autres formes d'attaque chimique.

Les exemples de telles applications sont nombreux, et l'on peut en particulier citer le cas intéressant de la construction récente de caissons en béton pour la formation d'une île artificielle dans l'Arctique qui servira à l'exploration du pétrole et du gaz par Dome Petroleum limitée. On a procédé à la construction de quatre caissons de 11,5 m de haut, 15 m de large et 69 m de long chacun. Pour cela, on a utilisé un total de 880 m³ de béton semi-léger, à forte résistance (40 MPa) pour lequel les cendres volantes ont constitué 16 % environ des matériaux d'accrochage. Une description détaillée de la construction de ces caissons a été publiée dans Concrete International, mars 1982 (volume 4, n° 3, pages 57 à 59).

4.4 Le béton pour les travaux de construction

L'utilisation de cendres volantes dans le béton pour les travaux de construction est maintenant bien établie dans certaines régions du Canada. En Ontario, en Saskatchewan, en Alberta et en Colombie-Britannique, une grande proportion du béton pré-mélangé fourni sur les marchés de la construction renferme de 5 à 15 % de cendres volantes. Le béton de ce type sert à des applications générales comme les sous-sols coulés des maisons, les murs et les colonnes.

Les cendres volantes sont de plus en plus utilisées dans la fabrication du béton à résistance élevée. Il est généralement admis que l'utilisation de cendres volantes de bonne qualité est essentielle à la fabrication de béton à résistance élevée, parce qu'il n'existe pas d'autres moyens d'obtenir une amélioration de la résistance à long terme de façon économique. Un exemple remarquable de ces applications a été l'utilisation de cendres volantes fournies par l'Hydro Ontario pour la fabrication de béton à résistance élevée ayant servi à la construction des colonnes de soutènement de l'édifice de la Banque Royale à Toronto (figure 5). La résistance à la compression a atteint 75 MPa. S'il était essentiel d'obtenir une résistance élevée pour le béton utilisé dans ces travaux, les cendres volantes ont aussi servi à contrôler l'élévation de température.

4.5 Les matériaux de remplissage à densité contrôlée

Les matériaux de remplissage contrôlés à base de ciment, aussi appelés matériaux de remplissage à densité contrôlée, comprennent du ciment Portland, un mélange de ciments, des cendres volantes et des agrégats fins; ils servent de matériaux de remplissage mis en place par pompage autour des tuyaux, des fondations, des étayages, des piliers et des tunnels. Le produit fini a une résistance de 0,5 à 10 MPa selon l'application et le mélange choisi. La propriété principale du matériau est sa capacité de s'écouler sans séparation dans des emplacements difficiles d'accès pour d'autres matériaux classiques. La

figure 6 présente un exemple type de la mise en place comme matériau de remplissage autour de structures de fondations en béton.

4.6 L'utilisation des cendres volantes dans les coulis accrochants

Le procédé qui consiste à injecter un coulis de matériaux hydrauliquement actifs pour remplir les vides est appelé injection. Ce procédé sert à remplir les joints de retrait dans les barrages, à réparer les fissures dans le béton, à assurer l'étanchéité des structures, à stabiliser les couches rocheuses dans la construction des tunnels et des barrages, à remplir les chantiers des anciennes mines et à renforcer les structures anciennes en brique et en maçonnerie.

Généralement les coulis sont formés de pâte de ciment avec ou sans agent de fluidisation. Quelquefois on y ajoute du sable fin, des scories ou des cendres volantes.

La propriété la plus importante d'un coulis est sa caractéristique d'écoulement. Lorsque l'on choisit un coulis pour une application particulière, la dimension des particules formant son élément solide détermine celle des plus petits vides dans lesquels il peut être injecté. La dimension et la forme des particules de cendres volantes les rendent particulièrement appropriées à leur utilisation dans de nombreux coulis.

L'activité pouzzolanique est un facteur important de l'utilisation des cendres volantes dans les coulis, de même que dans les autres applications à capacité d'accrochage. La masse volumique relative peut aussi être un facteur important dans le cas des coulis où le poids est un élément dont il faut tenir compte.

L'utilisation des cendres volantes dans les coulis est une application très généralisée mais dont on parle peu. Un exemple intéressant de cet emploi a été l'utilisation en 1980 d'un coulis de cendres volantes et

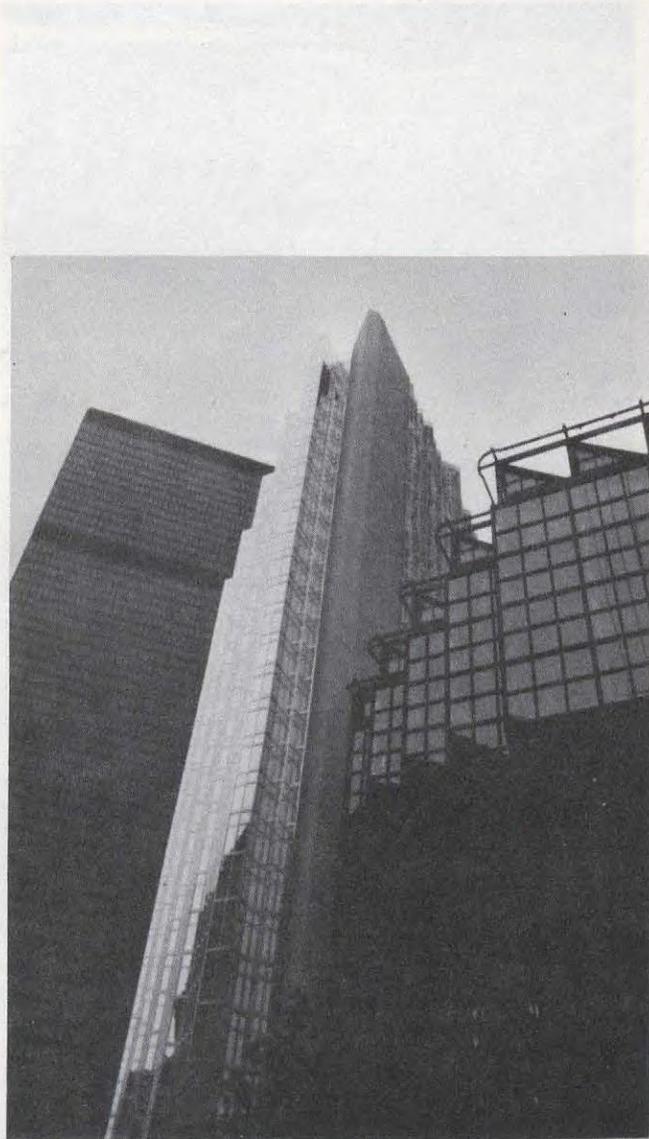


Figure 5 : Le Royal Bank Plaza, Toronto - Exemple d'utilisation de cendres volantes pour la construction de structures en béton à résistance élevée.



Figure 6 : Remblayage à masse spécifique contrôlée pendant la construction de fondations.

(Photographie de l'Hydro Ontario)

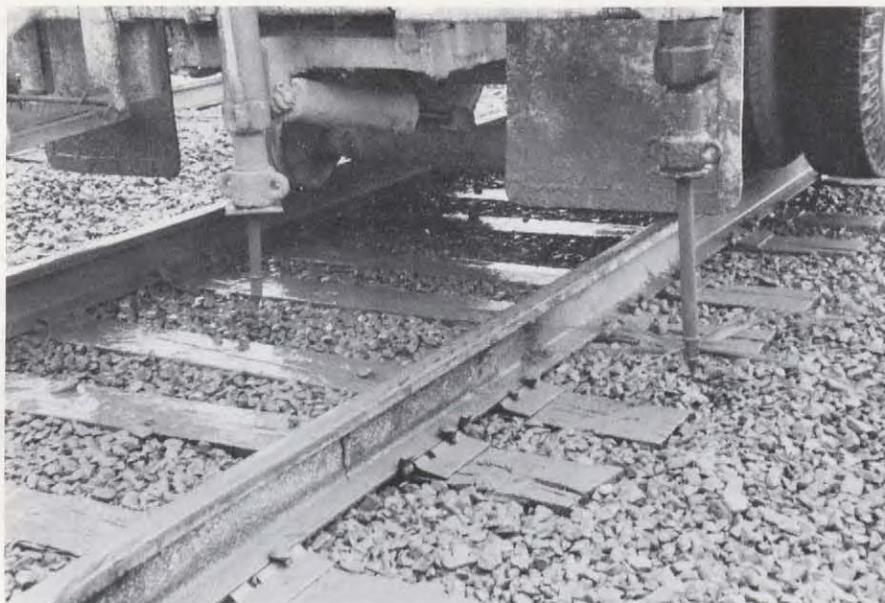


Figure 7 : Équipement servant à l'injection d'un coulis de cendres volantes dans l'assise d'une voie ferrée.
(Photographie de l'Hydro Ontario)

de chaux pour consolider une assise de voie ferrée à St. Catharines, en Ontario. La figure 7 présente l'équipement ayant servi à injecter le coulis dans la base de l'assise.

4.7 Les produits en béton moulé

Les produits en béton moulé de divers types sont faits de béton ayant subi une maturation dans des moules à des températures variant de la température ambiante à celle d'un autoclave. Ils comprennent des produits moulés comme les dalles de patio, les briques, les parpaings, les fosses septiques et les tuyaux.

Tous ces produits représentent des marchés possibles pour les cendres volantes. Les besoins en cendres sont essentiellement les mêmes que pour le béton coulé.

Un certain nombre de fabricants canadiens de produits en béton ont utilisé des cendres volantes à un moment ou à un autre, comme substitut d'une partie du ciment Portland ou, dans le cas des produits traités en autoclave ou à la vapeur, comme substitut de la silice (voir la figure 8).

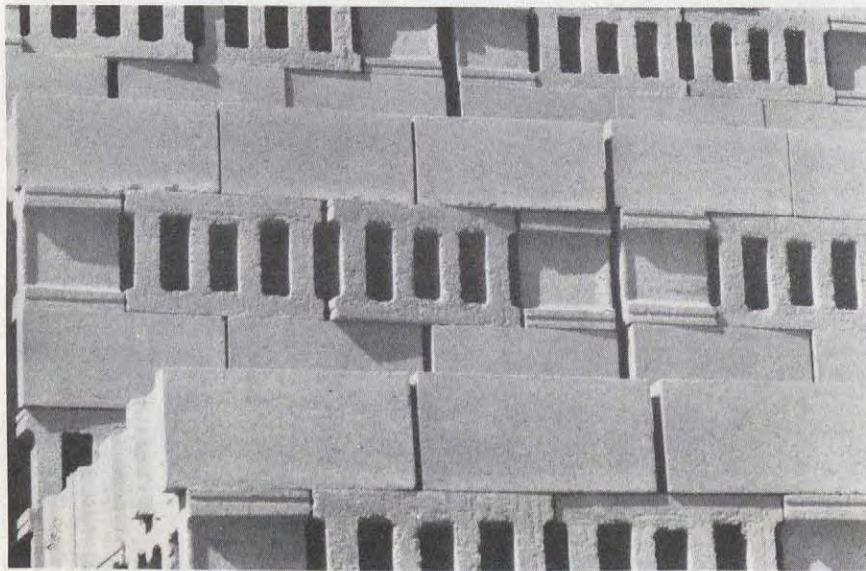


Figure 8 : Parpaings en béton dans lesquels la silice a été remplacée par des cendres volantes.

4.8 L'utilisation des cendres volantes pour la cimentation des puits de pétrole

Les puits de pétrole sont cimentés par pompage d'un coulis de ciment-eau le long du tubage jusqu'aux points critiques dans l'anneau autour de ce tubage, dans le trou de forage ou une formation fracturée. Ce procédé a été présenté pour la première fois à l'industrie dans les années 1920 comme moyen de protection des zones pétrolifères contre les infiltrations d'eau salée, ainsi que de protection des tubages contre la corrosion, de réduction des dangers de contamination de l'eau douce par le pétrole, le gaz ou les écoulements d'eau salée, et de protection contre les éruptions et les effondrements se produisant sous l'effet de la pression.

Dans toutes ces opérations dans les trous de forage, le matériau de cimentation est un coulis de fines particules; il ne comporte aucun agrégat grossier ou sable. Les ciments pour puits de pétrole doivent résister à des températures descendant bien au-dessous du point de congélation à la surface jusqu'à des températures voisines de 370° C dans les couches géothermiques. Les pressions enregistrées dans les puits profonds et à température élevée peuvent dépasser 138 MPa.

Les ciments Portland ont été utilisés dans les puits de pétrole, mais ils ne se prêtent pas parfaitement bien à cette opération. Les coulis de ciment Portland et d'eau ont une gamme étroite de propriétés, comme la masse volumique, qu'il n'est pas possible de modifier pour répondre à des besoins variables. Il faut donc ajouter des agents qui leur donnent plus de flexibilité. Les cendres volantes se prêtent à cette action et on les utilise largement depuis 1949.

Une résistance à la compression de 3,5 MPa est considérée comme plus que suffisante pour le soutien des tubes, et c'est la base d'un grand nombre de réglementations relatives à la cimentation des puits. Comme dans le cas du béton, la résistance initiale des mélanges de cendres volantes et de ciment Portland est inférieure à celle du ciment

Portland; cependant, l'évolution de la résistance dans les puits est fonction du temps, de la pression et de la température. Alors que la pouzzolane réagit avec la chaux libérée au cours de la prise du ciment sous l'effet de la pression et de la température, la résistance augmente et finit par devenir voisine de celle du ciment Portland.

Les ciments qui sont utilisés dans les puits doivent avoir une résistance à long terme à la corrosion. La réaction des cendres volantes avec les composés solubles formés au cours de l'hydratation du ciment rend les produits de cendres volantes/ciment Portland moins sensibles à l'action de lixiviation des eaux souterraines corrosives et maintient une faible perméabilité pendant une longue période. La perméabilité du mélange de cendres volantes/ciment Portland ayant subi sa maturation dans les conditions qui prévalent dans le trou de sonde est souvent inférieure à celle de la formation dans laquelle le ciment est placé.

On a préparé des coulis à masse volumique très faible (1 000 à 1 300 kg/m³) se prêtant à la cimentation des puits de pétrole et de gaz, en utilisant des microsphères à résistance élevée comme les cénosphères dont les masses volumiques relatives varient de 630 à 1 000 kg/m³.

Les produits de cendres volantes et de cénosphères dérivés des cendres volantes sont largement utilisés dans l'industrie canadienne du pétrole et du gaz. Près du tiers de toutes les cendres volantes provenant de l'Alberta et 20 % des cendres provenant des centrales de la Saskatchewan servent à la cimentation des puits de pétrole et de gaz. Les cénosphères sont importés des États-Unis et d'Angleterre et servent à certaines applications particulières.

L'emploi de cendres volantes par l'industrie pétrolière est particulièrement avantageux du fait que les approvisionnements ont lieu pendant les mois d'hiver alors que les autres demandes relatives à la construction sont minimales.

5. PRODUITS DE CÉRAMIQUE

5.1 Les briques d'argile

Les cendres volantes ont été utilisées en Europe, particulièrement dans les régions de l'Est, dans la composition des briques de construction pendant un certain temps. Cette méthode remonterait en fait au XVIIe siècle.

Les principales propriétés des cendres volantes qui les rendent aptes à la fabrication des briques d'argile sont :

- . leur valeur combustible en raison de la présence du carbone résiduel si c'est le cas;
- . leur nature inerte (c.-à-d., calcinée) qui réduit les retraits;
- . leur faible masse dont les produits bénéficient;
- . leur compatibilité chimique avec les argiles naturelles.

La valeur combustible du carbone que renferment certaines cendres volantes est particulièrement intéressante du fait que c'est cette propriété qui rend souvent les cendres inutilisables pour d'autres applications importantes comme dans les produits en ciment et en béton. L'exploitation de la teneur en carbone pourrait présenter un intérêt pour toutes les cendres volantes qui, pour une raison quelconque, ne peuvent servir de source de carbone.

On utilise de l'argile cuite pour la fabrication de certaines briques afin d'éviter le retrait au séchage et à la cuisson. Étant donné que les cendres volantes ont une composition chimique semblable à celle de l'argile, et que c'est un produit précuit, elles se prêtent de toute évidence au remplacement de l'argile cuite.

Des programmes intenses d'essais en laboratoire et d'essais pilotes ont été réalisés en Europe et aux États-Unis dans les années 1950 et 1960 afin d'établir la rentabilité technique et économique de l'utilisation des cendres volantes comme composant essentiel de la production des briques; à l'exception de l'Europe de l'Est, ces recherches ont

récemment débouché sur une production à grande échelle. Des recherches effectuées en Grande-Bretagne montrent que l'on peut obtenir d'importantes améliorations de qualité et de prix si l'on procède à un choix et à un contrôle attentifs des cendres.

Au début des années 1970, l'International Brick and Tile Company d'Edmonton, en Alberta, a construit une usine de production de briques, de parpaings et de dalles à partir de cendres volantes et de cendres de fond et en appliquant la technologie américaine. Les résultats n'ont pas connu de succès commercial et cette opération a été abandonnée. Les principaux problèmes que peut créer l'utilisation des cendres dans l'industrie des briques se rattachent aux questions de libération de poussière pendant la manipulation, de manque de plasticité naturelle des cendres, ainsi que de la présence de sels solubles. Des publications récentes indiquent que la société Brampton Brick Company a procédé à des recherches sur l'incorporation des cendres dans les briques.

5.2. Les agrégats légers

Depuis de nombreuses années, en Europe, et particulièrement en Grande-Bretagne, on utilise des cendres volantes pour la fabrication d'agrégats légers. Les États-Unis semblent s'intéresser de plus en plus à cette technique. La Société Lytag de Grande-Bretagne est l'un des spécialistes de la fabrication des agrégats à base de cendres volantes, et elle exploite à l'heure actuelle deux usines en Angleterre.

La fabrication des agrégats à base de cendres volantes implique l'agglomération des matériaux à une température de 1 000 à 1 200 °C. Il est nécessaire dans l'application d'une telle méthode de boulettiser les cendres avant la cuisson.

Après cette opération, elles sont mises sous forme d'agrégats légers par cuisson selon l'une des méthodes suivantes : four vertical; machine à agglomérer; et four rotatif. Le procédé le plus employé, la méthode Lytag, emploie une machine à agglomérer à grille mobile.

L'introduction de cendres volantes peut apporter à la fabrication des agrégats légers les propriétés suivantes :

- . une teneur en carbone qui peut contribuer à la demande en combustible de l'étape d'agglomération;
- . une composition chimique semblable à celle des argiles qui sont aussi utilisées;
- . la présence de phases vitreuses pouvant réduire les demandes d'énergie pour l'agglomération;
- . une réactivité avec l'eau qui peut contribuer à la formation et à la qualité des boulettes " vertes ".

Les principaux problèmes que peut poser l'utilisation des cendres dans l'industrie des agrégats légers tiennent à l'uniformité de composition des cendres et à la présence des sels solubles.

Au début des années 1970, l'Enercon Limited de Toronto, en Ontario, a mis au point et construit une usine d'enrichissement des cendres à la centrale électrique de Lakeview. Elle sert à la coproduction d'agrégats légers et de pouzzolanes tout en permettant la séparation des autres fractions intéressantes d'avec les cendres. Une importante installation pilote a été construite à Mississauga, mais aucune production commerciale marquante n'a eu lieu et l'usine a été démontée. Bien qu'elle n'ait pu atteindre ses objectifs commerciaux l'usine peut être considérée comme la concrétisation d'un effort pionnier au Canada en vue d'une opération qui présente de plus en plus d'intérêt : la récupération totale des ressources que renferment les cendres.

6. MARCHÉS NOUVEAUX ET EXPÉRIMENTAUX POUR LES CENDRES VOLANTES

6.1. La laine minérale et les matériaux d'isolation thermique

Les cendres volantes, les cendres de fond, les scories de chaudière et les cendres de charbon modifiées sont toutes considérées comme des matières premières intéressantes pour la fabrication de la laine minérale. L'emploi des cendres de charbon montre que, dans la plupart des cas, on obtient un produit acceptable; cependant, personne ne sait si un fabricant utilise aujourd'hui des cendres de charbon à cette fin.

En ce qui concerne la fabrication de laine minérale, il est essentiel de pouvoir atteindre une viscosité appropriée du mélange en fusion à la température la plus basse possible. Ce résultat est obtenu par l'emploi de fondants. Dans les débuts de l'utilisation des cendres de charbon, des fondants comme le calcaire et la dolomie ont été utilisés pour ajuster la composition chimique. Le besoin en fondants a probablement contribué au manque de rentabilité de la méthode et à la non-commercialisation des procédés faisant appel aux cendres. Des travaux récents effectués par le Coal Research Bureau de l'Université de West Virginia ont permis de constater que l'on pouvait obtenir une laine minérale de bonne qualité en n'utilisant que des cendres brutes, ce qui indique que les critères chimiques habituels appliqués aux produits de fusion pour la fabrication de laine minérale auraient peut-être besoin d'être revus, et qu'il conviendrait de procéder à des recherches supplémentaires dans ce domaine avant d'éliminer les cendres comme matière première.

Les qualités thermiques des cendres volantes leur donnent des propriétés réfractaires et une bonne stabilité thermique. Ces caractéristiques ont été exploitées dans la production d'une gamme de matériaux et de produits servant à des applications dans le domaine de l'isolation thermique, comme par exemple les revêtements, la céramique, les aides au moulage, ainsi que les éléments réfractaires des édifices. Dans ces matériaux, les cendres peuvent jouer le rôle d'une matière première fondamentale, d'un produit de remplissage ou d'une pouzzolane. Les propriétés d'isolation thermique naturelle des cénosphères les rendent idéales à l'incorporation aux produits réfractaires.

6.2 Le traitement des eaux usées

De nombreux rapports font état de l'utilisation des cendres volantes dans le traitement des eaux usées et des boues. Elles peuvent être utilisées :

- . comme flocculant ou aide à la floculation;
- . comme milieu de filtrage, aide au filtrage ou précouche de filtration, leur nature particulière les rendant aptes au filtrage physique des contaminants;

- . comme adsorbant, leur surface spécifique importante et leur chimie de surface facilitant l'adsorption des déchets; le surcroît de capacité d'adsorption peut aussi provenir de la présence de carbone non brûlé;
- . comme pouzzolane, leurs propriétés pouzzolaniques en présence d'une source de chaux pouvant servir à stabiliser ou à solidifier les déchets boueux; et
- . comme agent de neutralisation, leur alcalinité pouvant servir à neutraliser les déchets acides.

Ce domaine non développé de l'utilisation des cendres au Canada exige beaucoup de recherche et de développement pour établir leur utilité.

6.3. La récupération de ressources que renferment les cendres volantes

Dans le passé, nombreuses ont été les tentatives pour extraire des cendres volantes de nombreuses matières premières destinées à d'autres industries de traitement. Un schéma de fonctionnement type de récupération des ressources indiquerait la récupération de fractions riches en fer et en aluminium, de carbone, de cénosphères et de pouzzolane enrichie. Bien souvent de tels systèmes n'ont pu atteindre le stade de production par manque de soutien technique approprié ou pour des raisons économiques. Cependant, depuis le milieu des années 1970, un regain d'intérêt, renforcé par l'escalade des coûts de l'énergie et l'inquiétude concernant l'appauvrissement des ressources énergétiques, a abouti au développement de diverses approches prometteuses.

La récupération des ressources dans le cadre de la gestion des cendres en est encore au stade de l'élaboration. Du point de vue du marché canadien, il est probable que trois dérivés des cendres pourraient être produits de façon rentable dans un avenir rapproché, à savoir :

- . les concentrés de fer magnétique;
- . les cénosphères;
- . les charges à particules fines.

D'autres produits comme le carbone, les concentrés d'aluminium, le ferrosilicium et les métaux à l'état de traces pourraient être extraits des cendres si les conditions économiques favorisaient l'établissement d'une technologie de traitement appropriée.

Deux avantages expliquent que les concentrés magnétiques, les cénosphères et les charges pourraient se trouver sur le marché dans un avenir rapproché. Tout d'abord, les méthodes de séparation de ces éléments sont relativement simples et bien établies, et elles ne nécessitent qu'un traitement mineur au-delà de la phase d'extraction physique. Ensuite, les marchés des produits concurrents ou des matériaux dérivés des cendres actuellement importés sont bien établis.

Voici des marchés possibles pour les concentrés de fer extraits des cendres de charbon :

- . la magnétite " synthétique " pour le lavage du charbon;
- . un supplément des minerais de fer;
- . les sels de fer pour la coagulation des eaux usées.

Parmi ces trois options, c'est l'utilisation des concentrés de fer magnétique comme substitut de la magnétite pour l'enrichissement du charbon par application de la technique de séparation en milieu lourd qui a retenu la plus grande attention.

En plus de l'utilisation par l'industrie du pétrole et du gaz (voir la section 4.8), les cénosphères des cendres ont une grande variété de marchés possibles. On en distingue deux catégories principales :

. Les charges minérales

La résistance élevée, le faible poids, l'inertie chimique, ainsi que la granulométrie des cénosphères leur permet d'être utilisées comme substitut bon marché des microsphères en verre fabriquées et autres charges à faible masse volumique. Il existe un grand nombre d'applications dans le cas de l'utilisation de liants comme les résines organiques ou le ciment Portland. Dans ces applications, les cénosphères jouent le rôle de blanc de charge et de matériau apportant aux produits finis les propriétés techniques recherchées.

. Les matériaux réfractaires légers

Les cénosphères peuvent servir d'agrégats réfractaires que l'on peut ajouter aux ciments réfractaires ou être agglomérées sans liant.

Dans ces applications, les cénosphères peuvent remplacer les sphères en verre creuses artificielles.

Les cendres volantes possèdent un certain nombre de caractéristiques particulières qui en font des blancs de charge intéressants :

- . elles peuvent être mises sur le marché sans l'inconvénient des coûts élevés dus à la consommation d'énergie comme dans le cas de l'exploitation minière, du traitement et de la réduction des dimensions des charges conventionnelles;
- . les particules de cendres volantes sont essentiellement sphériques, ce qui contribue à la facilité d'emballage et à la rhéologie des composés, ainsi qu'à une utilisation limitée de moyens de transport; et
- . les particules de cendres volantes ont une résistance élevée à la compression et une bonne stabilité thermique, ce qui les rend aptes à des traitements à haute température ou à la fabrication de produits devant posséder une résistance aux températures élevées.

Avec l'escalade des pressions économiques sur les approvisionnements en pétrole, on peut prévoir un accroissement important de l'utilisation des charges minérales (y compris les cendres volantes) comme façon de minimiser les coûts de fabrication.

