BRGM

L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Mémento roches et minéraux industriels

Ponces et pouzzolanes

décembre 1992
R 36447

22 SEP 1997
BIBLIOTHÈQUE

Ministère de l'Industrie
et du Commerce extérieur

Étude réalisée dans le cadre
des actions de Service public
du BRGM

BRGM

L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Mémento roches et minéraux industriels

Ponces et pouzzolanes

Ph. Rocher

22 SEP. 1997
BIBLIOTHEQUE

décembre 1992
R 36447

Ministère de l'Industrie
et du Commerce extérieur

Étude réalisée dans le cadre
des actions de Service public
du BRGM

BRGM
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Département Géologie
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél : (33) 38 64 34 34

RÉSUMÉ

Les ponces et les pouzzolanes sont des matériaux pyroclastiques meubles et peu denses, à structure alvéolaire, essentiellement composés de verre volcanique, présent sous forme d'éléments de taille variable (cendres, lapilli, blocs). Les ponces, produites en grandes quantités lors d'éruptions volcaniques explosives (pliniennes notamment), présentent une teinte claire, un chimisme "acide" et une structure relativement homogène (nombreuses vacuoles de petite taille aux formes régulières). Leur densité apparente est inférieure à 1. Les pouzzolanes, générées par un volcanisme faiblement explosif, de type strombolien le plus souvent, sont caractérisées par une couleur noire ou rouge, un chimisme "basique" et une structure moins homogène (vésicules irrégulières).

Les ponces et les pouzzolanes sont des granulats légers utilisés, principalement à un niveau local, dans les secteurs du bâtiment et de la viabilité, également dans ceux de l'agriculture, de l'assainissement et des sols sportifs. Les ponces constituent des matériaux à plus forte valeur ajoutée employés spécifiquement par ailleurs en tant qu'abrasifs (pour le délavage des textiles notamment) et que charges. Elles sont dans ce cas destinées à un marché international.

Du point de vue de l'économie et du marché, la situation est très différente en France selon que l'on s'adresse à l'une ou l'autre de ces substances. Notre pays produit très peu de matériaux ponceux qui sont importés (environ 12 700 t en 1991), principalement de Turquie, également d'Italie, de Grèce et d'Allemagne. Par contre, la production française de pouzzolanes, bien qu'en très nette diminution par rapport à 1974, se maintient à un niveau significatif (481 000 t en 1991). La consommation française (métropolitaine) apparente de ponces et de pouzzolanes s'élevait respectivement à 12 600 t et 438 000 t en 1991.

TABLE DES MATIÈRES

1 - DÉFINITIONS 7

1.1 - Généralités 7
1.2 - Ponces 7
1.3 - Pouzzolanes 8

2 - GÉOLOGIE ET GISEMENTS 9

2.1 - Ponces 9
2.1.1 - Contexte géologique et genèse 9
2.1.2 - Types de gisements et guides de prospection 9
2.1.3 - Modes d'exploitation et de traitement des matériaux 10

2.2 - Pouzzolanes 10
2.2.1 - Contexte géologique et genèse 10
2.2.2 - Critères d'exploitabilité et guides de prospection des gisements 11
2.2.3 - Gisements français 11
2.2.4 - Modes d'exploitation et de traitement des matériaux 14

3 - PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES 16

3.1 - Pouzzolanicité 16

3.2 - Ponces 17
3.2.1 - Composition chimique 17
3.2.2 - Structure - Densité - Porosité 17
3.2.3 - Autres propriétés 19

3.3 - Pouzzolanes 19
3.3.1 - Composition chimique 19
3.3.2 - Structure - Densité - Porosité 20
3.3.3 - Capacité d'absorption d'eau 22
3.3.4 - Comportement thermique 22

4 - SECTEURS D'UTILISATION ET SPÉCIFICATIONS INDUSTRIELLES 24

4.1 - Ponces 24
4.1.1 - Généralités 24
4.1.2 - Bâtiment 24
4.1.3 - Abrasifs 24
4.1.4 - Charges minérales 25
4.1.5 - Agriculture 25
4.1.6 - Filtration et autres utilisations 26
4.1.7 - Spécifications industrielles 26

4.2 - Pouzzolanes 27
4.2.1 - Généralités 27
4.2.2 - Viabilité 29
4.2.3 - Bâtiment 29
4.2.4 - Agriculture 31
4.2.5 - Assainissement 31
4.2.6 - Sols sportifs 32
4.2.7 - Industrie 32
4.2.8 - Autres utilisations 32
4.2.9 - Spécifications industrielles 32

5 - ÉCONOMIE ET MARCHÉ 35

5.1 - Ponces et pouzzolanes : production mondiale 35

5.2 - Ponces 35
5.2.1 - Généralités 35
5.2.2 - Production mondiale 36
5.2.3 - Production française 37
5.2.4 - Importations et consommation apparente en France 37
5.2.5 - Prix 38

5.3 - Pouzzolanes 38
5.3.1 - Introduction 38
5.3.2 - Production française 39
5.3.3 - Importations - Exportations - Consommation française apparente 39
5.3.4 - Prix 41

6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION 42

7 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 44

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 - Coupe schématique d'un cône strombolien montrant la répartition spatiale des différents faciès des matériaux pouzzolaniques.

Fig. 2 - Carte de localisation des gisements français de ponces et de pouzzolanes.

Fig. 3 - Schéma d'installation type d'une usine de traitement de matériaux pouzzolaniques.

Fig. 4 - Répartition de la consommation française de pouzzolanes par secteurs d'utilisation en 1991.

Fig. 5 - Évolution de la production française métropolitaine de pouzzolanes et du chiffre d'affaires global de la profession entre 1980 et 1991.

LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 1 - Composition chimique de produits ponceux commercialisés dans le monde.

Tabl. 2 - Propriétés physiques et chimiques de quelques produits ponceux commercialisés.

Tabl. 3 - Composition chimique de quelques pouzzolanes françaises.

Tabl. 4 - Densité des matériaux pouzzolaniques français en fonction des granulométries et de l'humidité.

Tabl. 5 - Porosité des matériaux pouzzolaniques français en fonction des granulométries.

Tabl. 6 - Conductibilité thermique des matériaux pouzzolaniques français.

Tabl. 7 - Caractéristiques granulométriques des matériaux ponceux par types d'utilisation.

Tabl. 8 - Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de pouzzolane.

Tabl. 9 - Composition chimique de la pouzzolane de Saint-Thibéry (Hérault) en éléments mineurs.

Tabl. 10 - Caractéristiques granulométriques des matériaux pouzzolaniques par types d'utilisation.

Tabl. 11 - Spécifications granulométriques des matériaux pouzzolaniques entrant dans la composition des graves pouzzolane chaux.

Tabl. 12 - Production mondiale de ponces et de pouzzolanes entre 1985 et 1987.

Tabl. 13 - Productions annuelles nationales de matériaux ponceux pour la période 1988-1991.

Tabl. 14 - Importations françaises de matériaux ponceux en 1991.

Tabl. 15 - Prix de quelques matériaux ponceux commercialisés dans le monde en 1992.

Tabl. 16 - Prix des matériaux pouzzolaniques en France en 1992.

Tabl. 17 - Produits concurrents des ponces et des pouzzolanes par secteurs d'utilisation.

1 - DÉFINITIONS

1.1 - GÉNÉRALITÉS

Les ponces et les pouzzolanes sont des matériaux naturels pyroclastiques, meubles et peu denses, à structure alvéolaire, essentiellement composés de verre volcanique. Ils entrent dans la catégorie des granulats ou agglomérats légers et se différencient les uns des autres par leur composition chimique et leur texture notamment.

Au-delà de la nécessaire classification des produits pyroclastiques évoqués ici en deux grands ensembles, les ponces représentant le pôle "acide" et les pouzzolanes le pôle "basique", il est à noter qu'il existe des formations pyroclastiques aux caractéristiques intermédiaires à tous points de vue. Celles-ci, sous des appellations les plus variées, sont parfois valorisées industriellement dans certains pays.

1.2 - PONCES

Les ponces sont des roches pyroclastiques friables caractérisées par une teinte claire et une grande richesse en verre volcanique fortement vésiculé qui leur confère une grande porosité et une faible densité (elles peuvent flotter sur l'eau). Les éléments qui composent ces roches sont anguleux à l'origine et s'émoussent rapidement. Leur taille varie le plus souvent de 1 à 15 cm et les éléments les plus gros mesurent plusieurs décimètres de longueur. Si des quantités de gaz et de vapeur suffisantes sont disponibles lors de l'éruption, augmentant sa violence, l'émulsion ponceuse peut se fragmenter pour donner des éléments très fins, c'est-à-dire des cendres volcaniques vitreuses (granules, échardes...) possédant un diamètre inférieur à 3 mm.

Les ponces se forment à partir de fragments de magmas visqueux, très siliceux et riches en composants volatiles dissous (vapeur d'eau en particulier), de composition rhyolitique, dacitique ou andésitique le plus souvent. Projetés en l'air lors d'une éruption volcanique, ils subissent une brutale chute de pression, ce qui produit un dégazage et le formation de vésicules séparées par de minces parois de verre volcanique. La richesse initiale de ces types de magmas en gaz explique le nombre important de ces vésicules.

Nous retiendrons ici cette définition générale qui inclut des composants vitreux de différentes tailles : blocs, lapilli et cendres.

Les termes anglo-saxons utilisés pour définir ces matériaux sont "pumice" et "pumicite", cette dernière dénomination s'appliquant aux dépôts riches en cendres volcaniques (tufs cendro-ponceux).

Il est à relever que dans certains cas, les ponces ne sont définies que d'un point de vue physique (matériaux de densité inférieure à 1), alors que dans d'autres cas on ne considère que l'aspect génétique (verres volcaniques "acides" vésiculés).

1.3 - POUZZOLANES

Le terme de pouzzolane provient de Pouzzoles, nom d'un ville italienne de la région de Naples. Il y désigne un matériau volcanique cendreux de composition trachytique, de couleur claire et friable, utilisé pour la fabrication de mortier et de ciment. Cette application en tant que ciment naturel remonte aux constructions romaines de l'Antiquité.

Par extension, tout matériau naturel ou artificiel présentant des propriétés pouzzolaniques (la pouzzolanicité sera définie au chapitre 3) peut parfois être qualifié de pouzzolane.

Au sens français, et donc auvergnat, le terme de pouzzolane est beaucoup plus restrictif et se différencie nettement de son homonyme italien, d'où une certaine ambiguïté quand une comparaison est faite d'un pays à l'autre. Il s'agit de roches naturelles correspondant à des projections volcaniques scoriacées, essentiellement stromboliennes et basiques, c'est-à-dire de composition basaltique.

Nous retiendrons cette dernière définition dans le présent document. Le terme anglo-saxon équivalent est "scoria".

2 - GÉOLOGIE ET GISEMENTS

2.1 - PONCES

2.1.1 - Contexte géologique et genèse

Les éruptions volcaniques génératrices de matériaux ponceux sont explosives et généralement violentes. Lorsque le magma arrive près de la surface, la pression est brutalement libérée et l'expansion des composants volatiles initialement dissous génère des masses de lave présentant l'aspect d'émulsions. Leur refroidissement rapide dans l'atmosphère conduit à la formation de fragments de verre contenant de nombreuses cavités bulleuses, les ponces, qui peuvent s'accumuler sous forme de blocs ou de fragments brisés (échardes). Dans les roches pyroclastiques, ces derniers sont reconnaissables par le fait qu'ils sont souvent limités par des faces concaves qui présentent en section une forme trifide. En plus des éléments ponceux, ces roches contiennent souvent d'autres composants qui peuvent être de trois types :

- des minéraux magmatiques isolés (feldspaths, quartz, pyroxènes, oxydes de fer...) ;
- des blocs massifs de lave représentant le magma générateur de l'éruption (obsidienne par exemple) ;
- des enclaves lithiques prélevées aux roches préexistantes lors de l'éruption.

Les ponces, contrairement aux pouzzolanes, sont produites en grandes quantités. Couramment, les dépôts pyroclastiques ponceux ont plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur et ils couvrent de très grandes superficies. Les éléments les plus fins et les moins denses peuvent se déposer loin de la source. Ils sont souvent interstratifiés avec d'autres dépôts, volcaniques ou sédimentaires.

Les gisements de matériaux ponceux correspondent à deux types de dépôts pyroclastiques, les retombées aériennes et les écoulements pyroclastiques, qui se différencient par leur dynamisme de mise en place et certaines de leurs caractéristiques qui en découlent : stratification, granoclassement vertical et latéral, épaisseur, extension latérale.

D'une manière générale, les écoulements pyroclastiques sont hétérogènes, non ou peu granoclassés, alors que les retombées aériennes, plus homogènes, présentent un meilleur granoclassement et des épaisseurs plus régulières.

2.1.2 - Types de gisements et guides de prospection

Deux ensembles de formations ponceuses peuvent constituer des gisements. Le plus souvent, il s'agit de dépôts primaires, pyroclastiques, non modifiés depuis leur mise en place au moment de l'éruption, alors que dans d'autres cas (Waikato River en Nouvelle Zélande par exemple), il s'agit de dépôts secondaires ou épiclastiques, résultant du remaniement (processus d'érosion, de transport et de sédimentation) de dépôts primaires. Ce dernier ensemble peut présenter un intérêt dans la mesure où le remaniement a opéré une sélection des matériaux ponceux par un lavage naturel (les plus altérés et les moins résistants d'entre eux ont été désagrégés) et par un granoclassement.

Les dépôts pyroclastiques (retombées aériennes) issus d'éruptions de type plinien présentent un attrait particulier compte tenu de leurs caractéristiques suivantes (Walker, 1981) : forte teneur en éléments ponceux avec une fraction grossière bien représentée, grande dispersion latérale et homogénéité verticale.

La prospection des gisements de matériaux ponceux doit être orientée sur les zones volcaniques récentes, d'âge tertiaire et quaternaire (garantie sur l'état de fraîcheur des éléments vitreux), qui recèlent un volcanisme de type explosif. Les recherches devront se porter en priorité sur les formations les plus meubles (l'induration des dépôts peut être provoquée par une soudure à chaud des éléments au moment de la mise en place, ou par leur altération postérieure) et les plus riches en éléments ponceux.

2.1.3 - Modes d'exploitation et de traitement des matériaux

L'exploitation des matériaux ponceux se fait le plus souvent en carrière, très exceptionnellement par l'intermédiaire de galeries souterraines (Turquie par exemple).

Les matériaux sont extraits en carrière au moyen d'engins mécaniques.

Les traitements qui leur sont appliqués sont très variables d'une unité de production à l'autre. Ils dépendent des caractéristiques du dépôt et de la qualité (granulométrie, pureté) des produits finis à élaborer.

Afin de sélectionner les éléments ponceux désirés, différentes techniques sont utilisées : lavage à l'eau par flottation, cribles vibrants, traitement thermique, séparateur à air, tri manuel, criblage en phase humide ou sèche, séchage, broyage.

Dans les cas les plus favorables, quand les matériaux sont meubles, on procède à un simple criblage et à un broyage de la fraction la plus grossière.

Les produits de chacune des classes granulométriques sont ensuite stockés dans des silos séparés. Le mélange des différentes fractions intervient au moment où les produits sont transférés vers les systèmes de convoyeurs. Pour certaines utilisations spécifiques, un traitement chimique peut être finalement apporté aux produits.

2.2 - POUZZOLANES

2.2.1 - Contexte géologique et genèse

Les pouzzolanes sont des roches pyroclastiques formées de fragments de magma (pyroclastites) projetés dans l'atmosphère lors d'éruptions volcaniques et refroidis au cours de leur parcours aérien. La vitesse de refroidissement relativement importante, qui applique un effet de trempe au magma, explique que le verre volcanique (matière amorphe, non cristallisée) soit un des composants majeurs des matériaux pouzzolaniques. Les autres constituants sont les minéraux magmatiques (feldspaths, pyroxènes, olivine, amphibole, oxydes de fer...) et les xénolites, roches étrangères au milieu car arrachées aux formations géologiques antérieures au volcanisme.

Les éléments constitutifs présentent une texture scoriacée, vacuolaire. D'après leur taille, on distingue les cendres (< 2 mm) des lapilli (2 à 64 mm) et des blocs ou des bombes (> 64 mm). Leur couleur est généralement noire ou rouge (rouge brique à brun foncé) selon le degré d'oxydation du fer, présent respectivement sous forme de magnétite ou d'hématite.

Le magma générateur de ces produits est une masse en fusion qui contient en proportion notable des gaz dissous du fait de la pression. Le jeu des failles et des fissures permet dans un premier temps au magma de se vésiculer : il se produit une détente des gaz, qui se traduit par la formation de bulles. Dans un deuxième temps, ce jeu contribue à l'ascension vers la surface du magma, au sein duquel s'individualisent les gaz et la lave. La lave est expulsée en surface sous la forme de coulées ou de projections. Le dynamisme à l'origine de la formation des matériaux pouzzolaniques, faiblement explosif, est qualifié de "strombolien". Il permet l'édification, sur une aire réduite autour du point d'émission, d'un cône de projections scoriacées comprenant un cratère sommital. Ces édifices volcaniques quaternaires, peu érodés, présentent des morphologies typiques. En France, la Chaîne des Puys en est le meilleur exemple.

2.2.2 - Critères d'exploitabilité et guides de prospection des gisements

Le verre volcanique est un composant thermodynamiquement instable, et donc plus facilement sensible à l'altération supergène, qui conduit à la formation de minéraux argileux notamment. On recherchera de ce fait en priorité des gisements au sein de zones volcaniques d'âge récent, c'est-à-dire quaternaire, où les matériaux pouzzolaniques ont une forte probabilité d'avoir conservé leurs caractéristiques chimiques, structurales et mécaniques initiales.

D'une manière générale, les investigations devront être orientées préférentiellement vers les matériaux les plus vitreux et les plus scoriacés, en particulier en évitant les dépôts ou les faciès riches en phases cristallisées (minéraux magmatiques ou enclaves du socle) et en blocs plus ou moins massifs. La découverte devra être la plus faible possible.

Malgré le rôle joué par différents facteurs (phénomènes volcaniques, mouvements gravitaires...) précédant, accompagnant ou suivant une éruption volcanique de type strombolien, on peut observer une organisation spatiale des dépôts au sein d'un même édifice. C'est ainsi qu'on identifie, dans les cas typiques, les faciès "cœur de cône", "base de cône" et de "saupoudrage" par leurs caractéristiques macroscopiques (fig. 1). Compte tenu de leur granulométrie homogène, de leur faible consolidation et de leur puissance moyenne à forte, les faciès "cœur de cône extérieur" et "bas de cône" apparaissent les plus intéressants à valoriser.

2.2.3 - Gisements français

Les gisements français de pouzzolanes actuellement exploités s'inscrivent dans sept provinces volcaniques différentes d'âge récent, pliocène supérieur et le plus souvent quaternaire : la Chaîne des Puys, le Mont-Dore, le Cézallier, le Devès, le bassin du Puy-en-Velay, l'Ardèche et le Bas-Languedoc (fig. 2). Les édifices volcaniques dans lesquels sont ouvertes les dix-huit carrières en activité sont des cônes stromboliens, à une seule exception près, le Puy de la Nugère (Chaîne des Puys), qui représente un complexe "trachy-andésitique" à "tuff-ring" (anneau complet de projections).

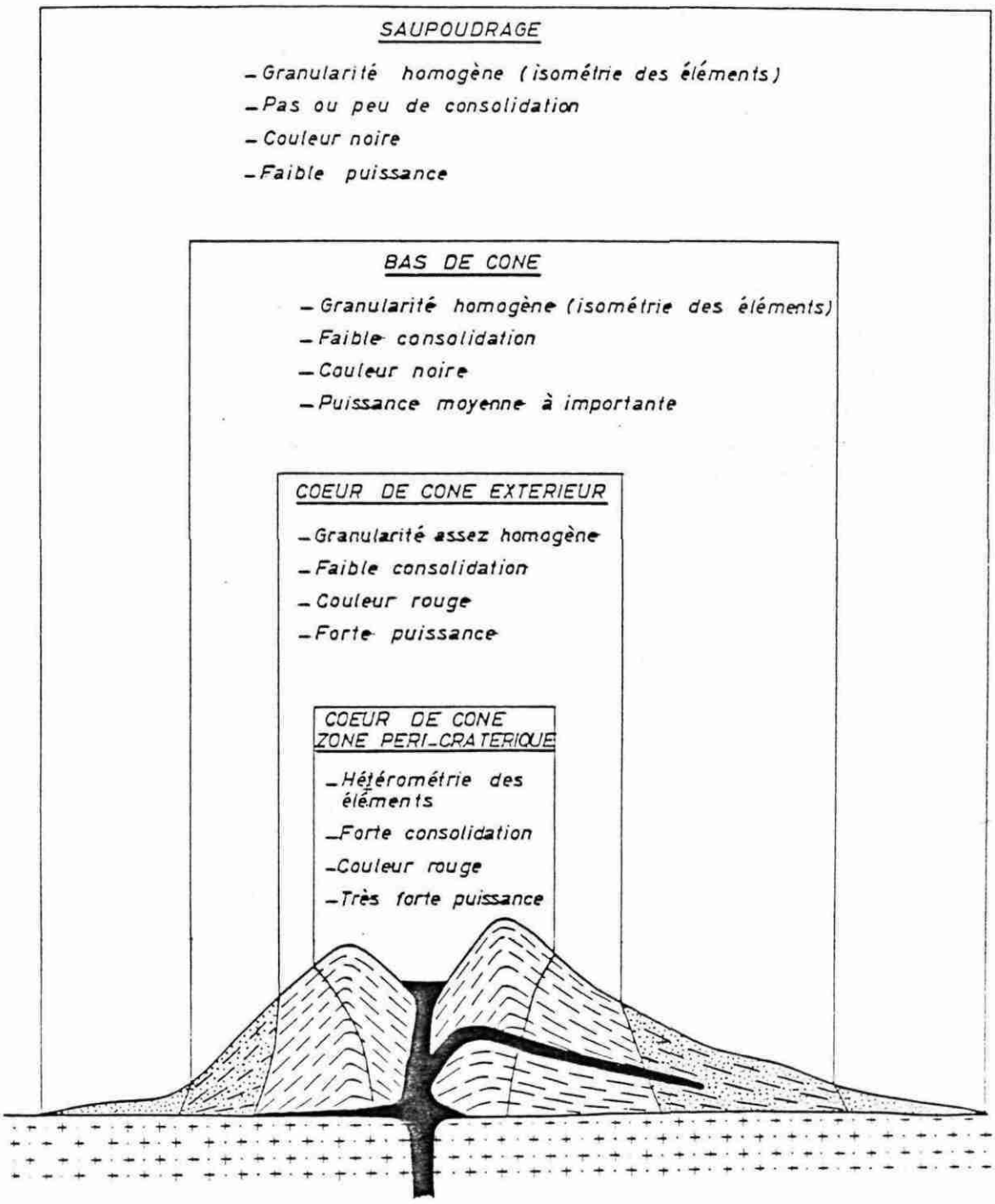

Fig. 1 - Coupe schématique d'un cône strombolien montrant la répartition spatiale des différents faciès des matériaux pouzzolaniques (d'après BRGM et CETE, 1980).

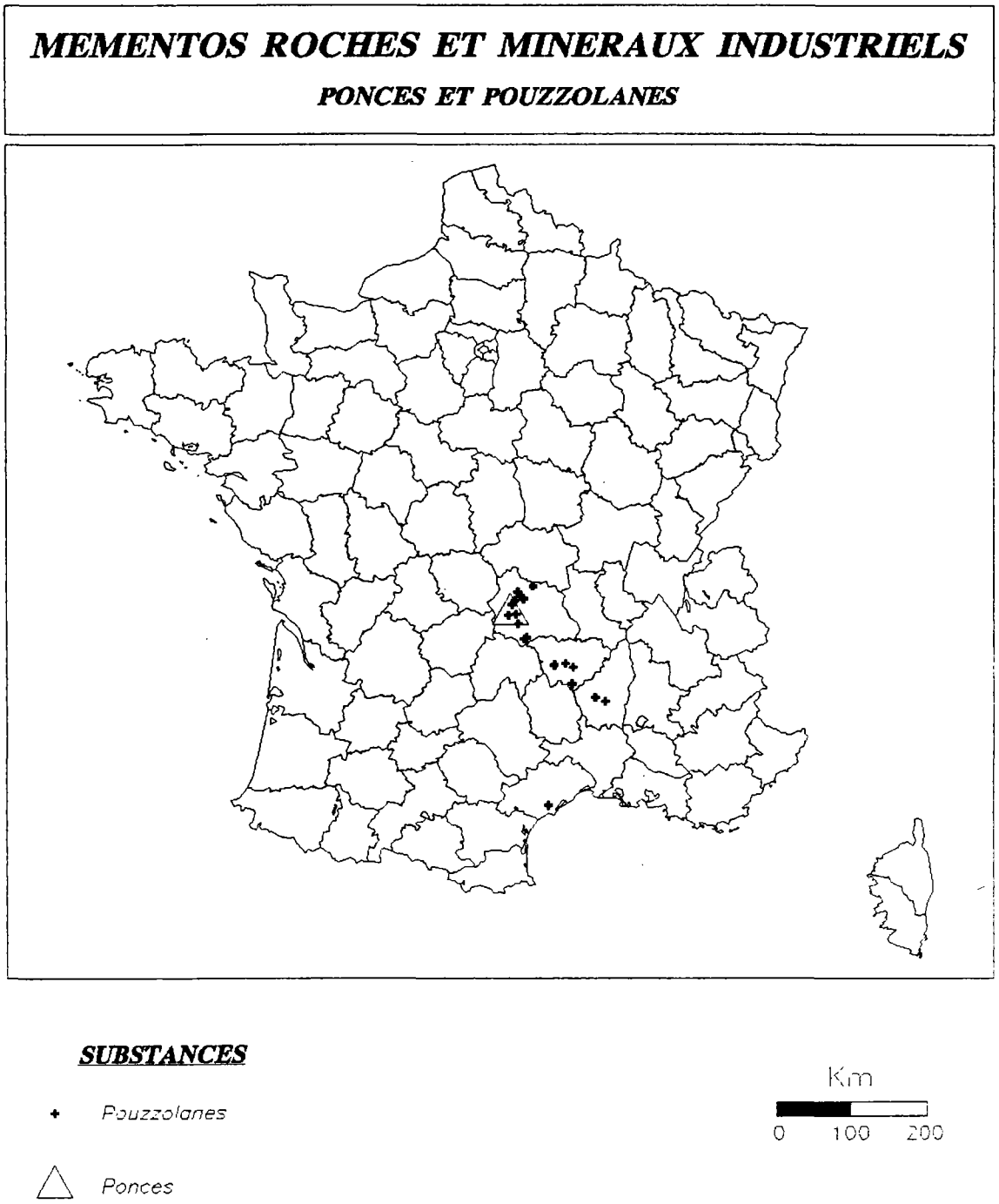

Fig. 2 - Carte de localisation des gisements français de ponces et de pouzzolanes.

Les réserves françaises en matériaux pouzzolaniques sont importantes. Elles ont été estimées à 700 Mt pour la seule Chaîne des Puys.

Les gisements du département du Puy-de-Dôme (Chaîne des Puys, Mont-Dore et Cézallier), tous situés à l'intérieur du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, seront à l'avenir, pour des questions de protection de l'environnement, très strictement contrôlés.

2.2.4 - Modes d'exploitation et de traitement des matériaux

L'extraction des pouzzolanes en carrière se fait au moyen de pelles mécaniques ou au bouteur. Le matériau brut est ensuite acheminé par camions à l'usine de traitement, où il subit une série d'opérations de criblage (dont le pré-criblage des gros blocs), concassage et broyage (fig. 3).

Pour des applications spécifiques, qui nécessitent une humidité très réduite des matériaux, les pouzzolanes sont soumises à un séchage à l'étuve.

L'élaboration des produits pouzzolaniques pose quelques problèmes spécifiques :

- leur teneur élevée en eau naturelle (10 à 15% dans les sables 0/3 mm broyés) occasionne un colmatage des toiles criblantes ;
- leur abrasivité conduit à une usure importante des appareils de réduction.

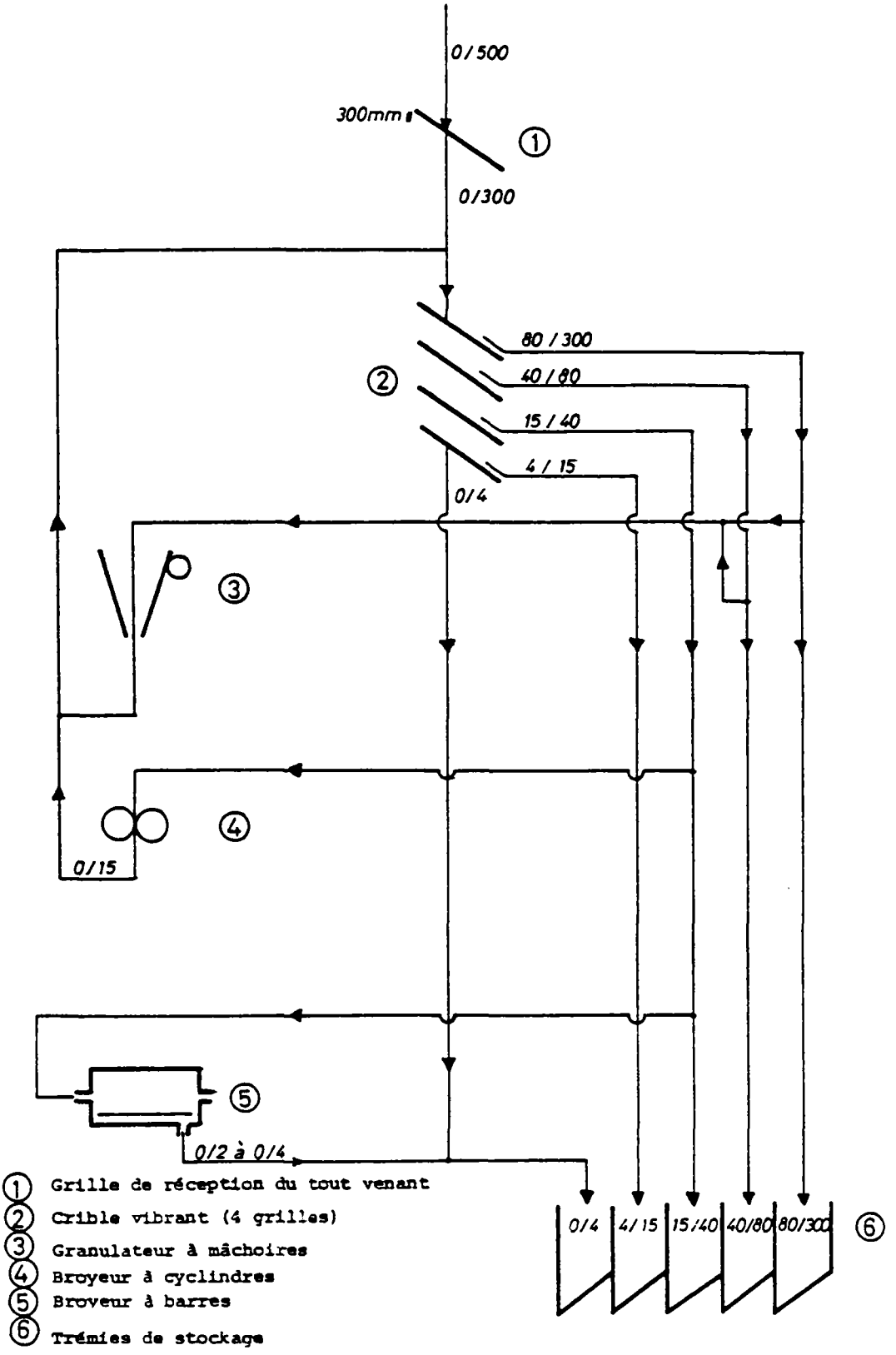

Fig. 3 - Schéma d'installation type d'une usine de traitement de matériaux pouzzolaniques (d'après BRGM et CETE, 1980).

3 - PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

3.1 - POUZZOLANICITÉ

La pouzzolanicité, ou effet pouzzolanique, se définit comme la capacité qu'ont les matériaux, à température ambiante et en présence d'eau, de fixer l'oxyde de calcium (chaux) pour donner des composés stables possédant les propriétés hydrauliques du ciment.

Ces matériaux peuvent être naturels, comme c'est le cas des ponces et des pouzzolanes, des diatomites également, ou artificiels (cendres volantes, laitiers, gaizes des Ardennes...).

Trois paramètres principaux conditionnent la réactivité des matériaux : leur composition chimique (silice, alumine, chaux), leur degré de vitrosité (les éléments vitreux sont immédiatement disponibles lors de la solubilisation) et leur finesse (améliorée par broyage). L'activité pouzzolanique dépend à court terme de la surface spécifique du matériau, et elle est à long terme en étroite corrélation avec sa teneur en silice et alumine "réactive", c'est-à-dire sa fraction vitreuse (Dron, 1975). Elle est quantifiée par des essais normalisés, notamment par l'essai Chapelle (Largent, 1978 ; Spencer, 1990).

Les matériaux présentant des propriétés pouzzolaniques entrent, en proportions variables (en tant que constituants principaux ou qu'additifs) dans la composition de différentes catégories de ciments :

- ciments Portland composés (CPJ), dont la teneur en clinker Portland est supérieure ou égale à 65% (ciments Portland composés proprement dits ou ciments Portland à la pouzzolane) ;
- ciments pouzzolaniques (ayant satisfait à l'essai de pouzzolanicité défini par la norme NF P 15-462), dans lesquels la teneur en matériaux à caractère pouzzolanique est comprise entre 30 et 40% ;
- ciments composés, comprenant notamment les ciments au laitier et à la pouzzolane (teneur en ces deux constituants supérieure à 35%).

Selon la nouvelle "pré-norme" européenne adoptée par le Comité Européen de Normalisation (CEN), répertoriée ENV 197-1, ces ciments correspondent respectivement aux classes suivantes : CEM II, CEM IV et CEM V. Cette norme définit également des classes de résistance et des spécifications. Elle indique qu'un matériau à caractère pouzzolanique doit contenir au moins 25% en masse de silice réactive. De ce fait, les matériaux naturels les mieux adaptés sont des verres volcaniques de composition trachytique ou rhyolitique, c'est-à-dire des substances de type ponces ou "pouzzolanes" au sens italien du terme. Cela explique que la classe des ciments pouzzolaniques recouvre essentiellement des ciments fabriqués en Italie.

Les pouzzolanes françaises ne sont pas utilisées pour la fabrication de ciments dans le secteur du bâtiment, leurs propriétés pouzzolaniques étant valorisées, à l'échelle industrielle, uniquement dans le secteur de la viabilité (liants pouzzolane chaux employés dans les techniques routières).

3.2 - PONCES

3.2.1 - Composition chimique

Les matériaux ponceux présentent le plus souvent des compositions chimiques caractéristiques de rhyolites, dacites et andésites dans le cas du volcanisme calco-alcalin, et de rhyolites, trachytes et phonolites en ce qui concerne le volcanisme alcalin. Le tableau 1 répertorie les compositions chimiques en éléments majeurs de quelques produits ponceux commercialisés dans le monde.

3.2.2 - Structure - Densité - Porosité

L'application des ponces nécessite le contrôle de deux paramètres physiques : la densité et la structure, c'est-à-dire le mode d'arrangement spatial des cavités.

Du point de vue de leur **structure**, les ponces sont caractérisées par l'extrême minceur des cloisons intervacuolaires et leur légèreté d'ensemble due à la multiplicité des vacuoles, généralement de très petite taille (les plus fines d'entre elles ont une diamètre de quelques microns) et aux formes régulières. Les ponces sont des matériaux plus régulièrement et plus finement structurés que les pouzzolanes. D'après leur structure, on reconnaît deux types de ponces : celles qui présentent des vésicules sphériques à sub-sphériques, et les ponces dites fibreuses, caractérisées par des vésicules tabulaires et subparallèles (vésiculation monodirectionnelle) qui leur confèrent une porosité ouverte. Dans ce dernier cas, le rapport longueur / diamètre des vésicules est supérieur à 20.

La densité apparente et la porosité sont des paramètres qui varient, pour un matériau donné, en fonction de la granulométrie.

La structure vésiculaire des ponces se traduit par une **densité** apparente inférieure à 1 g/cm^3, alors que cette dernière est de l'ordre de 2,3-2,5 g/cm^3 pour le verre volcanique massif non ponceux.. En ce qui concerne les produits ponceux commercialisés, la densité apparente se situe le plus souvent entre 0,6 et 0,8 g/cm^3. Elle peut atteindre des valeurs minimales de 0,4 ; 0,3 ; voire exceptionnellement 0,2 g/cm^3 à l'état sec (Whitham et Sparks, 1986). Comme pour les pouzzolanes, la densité varie en fonction de la granulométrie (elle augmente quand la taille des éléments diminue) et du degré hygrométrique ambiant.

Les matériaux ponceux ont une **porosité** importante, généralement de l'ordre de 60 à 70% du volume et qui peut atteindre 90%. Par contre, leur surface interne typique est très limitée comparativement à d'autres roches et minéraux industriels (de l'ordre de 0,5 m^2/g), ce qui traduit l'absence d'une importante microporosité (Whitham et Sparks, 1986). La perméabilité des ponces est très faible du fait de la présence de fines membranes vitreuses intervésiculaires.

Oxydes	FRANCE Mont-Dore	ALLEMAGNE Eifel	ITALIE Lipari ponce blanche	ITALIE Lipari ponce noire	ITALIE Partie centrale	ESPAGNE Ténérife	GRECE Yali	TURQUIE Soylu	TURQUIE Dost	ISLANDE Hekla	USA Idaho	NOUVELLE ZELANDE Puni
SiO_2	72,30	55	71,75	70,90	62,5	54	70,55	72,4	67,8	68,99	70,5	70,74
Al_2O_3	14,53	22	12,33	12,76	17,5	17,7	12,24	13,0	14,0	13,36	13,5	8,43
Fe_2O_3	1,20	} 3	1,98	1,75	2,6	} 4,2	0,89	1,42	3,0	0,42	1,1	} 9,57
FeO			0,02	0,64						3,29	0,1	
MgO	0,50	0,5	0,12	0,60	0,4	2,7	0,10	0,15	2,60	1,04	0,5	2,34
CaO	0,95	2	0,70	1,36	2,5	3,1	2,36	0,05	1,50	2,62	0,8	0,59
Na_2O	3,05	} 11	3,59	3,23	2,2	0,7	3,49	4,19	3,40	3,22	1,6	} 5,30
K_2O	4,15		4,47	3,83	9,5	5,5	4,21	4,72	3,10	2,15	1,8	
TiO_2	0,30		0,11	0,14	0,5			0,25		0,24	0,2	
P_2O_5	0,10		0,008	0,015						1,93		
MnO	0,05		0,07	0,09				0,04		0,15		
H_2O^+	3,80		3,71	3,88						2,59	3,4	3,03
perte au feu		6			2,3	6,7	5,51		4,30			
CO_2			0,10	0,04								
SO_3			0,18	0,21		0,2	0,03				0,1	
Cl						0,35						
autres						22,5	0,62					

(en pourcentages pondéraux)

Tabl. 1 - Composition chimique de produits ponceux commercialisés dans le monde.

3.2.3 - Autres propriétés

La capacité d'absorption d'eau d'un matériau ponceux dépend de sa taille, de sa densité initiale, de la répartition des vésicules selon leurs dimensions, et du mode de connexion qu'elles présentent entre elles (Whitham et Sparks, 1986). Les ponces peuvent absorber jusqu'à 100 à 110% de leur poids en eau (10 à 40% pour les pouzzolanes, 200% pour la perlite expansée) et jusqu'à 80% de leur poids en produits de type gazole ou benzine (Lucà, 1985).

Compte tenu de leur forte teneur en silice (60 à 70% le plus souvent), les ponces présentent une bonne inertie chimique qui les rend inattaquables par la plupart des acides.

Certaines autres données chiffrées concernant leurs propriétés physiques et chimiques (dureté, pH, conductivité thermique...) sont consignées dans le tableau 2.

Propriétés	ITALIE		ISLANDE	USA
	Lipari (ponce blanche type F)	Partie centrale	Hekla	Idaho
Dureté (échelle de Mohs)	6			5,5
pH	8	6,5-7		7,2
Conductivité thermique	0,09 kcal/hm°C	0,10-0,13 W/mK	0,16 W/m°C	
Température de fusion (°C)	1500	1150		900
Densité réelle (g/cm^3)	2,313		2,560	
Porosité (% volume)	70-73	40-60		

Tabl. 2 - Propriétés physiques et chimiques de quelques produits ponceux commercialisés.

3.3 - POUZZOLANES

3.3.1 - Composition chimique

Les pouzzolanes exploitées en France se subdivisent grossièrement en deux groupes compte tenu de leur composition chimique :

- la majorité d'entre elles correspond à des laves qualifiées globalement de basaltiques : basaltes *s.s.*, hawaiites ou basanites (les feldspathoïdes, notamment la néphéline, peuvent être minéralogiquement exprimés) et caractérisées par des teneurs en SiO_2 de 42 à 48% et par des teneurs en Al_2O_3 de 12 à 19% ;

- deux d'entre elles, provenant des puys de la Nugère et de Lemptégy (Chaîne des Puys), sont de nature "trachyandésitique", c'est-à-dire mugéaritique. Leurs teneurs en SiO_2 (52 à 54%) et en éléments alcalins (Na_2O + K_2O : 6 à 8%) sont en particulier plus élevées que pour le premier groupe.

Le tableau 3 (page 21) précise les compositions chimiques en éléments majeurs de quelques matériaux pouzzolaniques français.

Par ailleurs, il est à noter que la teneur des pouzzolanes en eau naturelle est élevée comparativement à d'autres roches, du fait de leur structure alvéolaire. Elle peut varier de 8 à 17% selon les saisons et le degré hygrométrique ambiant.

3.3.2 - Structure - Densité - Porosité

Les pouzzolanes les plus typiques correspondent à des scories, c'est-à-dire à des lambeaux de lave déchiquetée aux formes variables et aux contours hérissés.

Du point de vue de leur **structure**, elles se distinguent des ponces par l'irrégularité des formes et des tailles des vésicules qui sont séparées entre elles par des cloisons vitreuses plus épaisses, d'où une densité nettement supérieure à celle des ponces. Cette caractéristique est liée à la composition chimique du magma, plus fluide et plus pauvre en gaz que celui à l'origine de la formation des ponces.

Le **densité** des matériaux pouzzolaniques varie en fonction de leur granulométrie (les éléments les plus fins sont les plus denses) et de l'hygrométrie ambiante (tabl. 4). A l'état brut, ces matériaux présentent une densité supérieure à 1, exception faite des granulométries grossières (au-delà de 10/20 mm).

La masse volumique réelle des pouzzolanes se rapproche de celle des basaltes (2,8 à 3,1 t/m^3).

Granulométrie (mm) / Densité (g/cm^3)	0/3	0/5	0/7	5/10	10/20	20/50
Densité apparente à l'état sec et non tassé	1,00	0,95	0,92	0,90	0,75	0,65
Densité moyenne à l'état brut (départ carrière) et non tassé	1,15	1,10	1,05	1,05	0,90	0,80

Tabl. 4 - Densité des matériaux pouzzolaniques français en fonction des granulométries et de l'humidité (d'après SNPP et DRIRE, 1988).

Oxydes	CHAINE DES PUYS						DEVES	ARDECHE	BAS
	Puy de Paugnat		Puy de Lemptégy		Puy de	Puy de	Bizac	Thueyts	LANGUEDOC
	rouges	noires	rouges	noires	Ténusset	la Nugère			Saint-Thibéry
SiO_2	45,85	45,50	47,75	53,65	47,00	52,40	44,95	43,40	46,10
Al_2O_3	18,70	17,70	13,45	16,75	12,40	16,60	14,55	14,00	17,65
Fe_2O_3	9,20	4,25	13,00	5,00	13,00	7,40	13,22	12,05	12,75
FeO	2,15	6,65	0,70	4,35	–	2,10	–	–	–
MgO	7,00	7,10	6,90	2,60	8,30	4,00	7,20	9,47	2,77
CaO	9,20	9,60	9,00	6,25	10,52	7,10	9,88	10,80	11,45
Na_2O	2,95	3,00	3,60	4,30	3,12	6,10	3,30	3,36	3,76
K_2O	1,50	1,55	1,50	2,40	1,58	2,00	1,62	1,50	2,02
TiO_2	3,00	3,00	2,30	4,35	2,88	1,60	2,97	2,96	2,00
P_2O_5	0,80	0,90	0,90	0,20	–	–	–	–	–
MnO	–	0,20	0,20	0,80	–	0,20	–	–	traces
H_2O^+		0,00		0,20					
H_2O^-		0,20		2,05					
perte au feu	0,35		0,55		0,58	0,33	2,09	2,63	1,33
S						0,02			traces
TOTAL	100,70	99,65	99,85	102,90	99,38	99,85	99,78	100,17	99,83

(en pourcentages pondéraux)

Tabl. 3 - Composition chimique de quelques pouzzolanes françaises.

La **porosité** varie volumétriquement de 30 à 60% selon les granulométries (tabl. 5). Une valeur de 36% a été obtenue par l'essai CEBTP n° 532-62 232 réalisé sur une pouzzolane 7/15 mm (densité apparente sèche non tassée : 0,71 ; tassée à refus : 0,81). Il s'agit d'une porosité très grossière (vacuoles > 100 µm) et fermée, qui explique la faible capacité de rétention d'eau et la très importante perméabilité des matériaux pouzzolaniques.

Granulométrie	Matériaux non tassés		Matériaux après tassage à refus	
	Densité sèche	Proportion de vide en %	Densité sèche	Proportion de vide en %
Sables	0,9 à 1,00	40 à 45	1,15 à 1,3	30 à 35
Granulométries moyennes	0,75	43	0,85	36
Granulométries grossières	0,65	55	0,75	46

Tabl. 5 - Porosité des matériaux pouzzolaniques français en fonction des granulométries (d'après SNPP et DRIRE, 1988).

3.3.3 - Capacité d'absorption d'eau

La structure alvéolaire des pouzzolanes et leur porosité qui en découle confèrent à ces matériaux une capacité d'absorption d'eau qui peut varier de 20 à 30% de leur poids sec (27% d'absorption d'eau à 24 h sur une pouzzolane 7/15 mm d'après l'essai CEBTP n° 532-62 232). Au niveau des stocks extérieurs en tas, la teneur en eau ne dépasse pas les deux tiers de l'absorption à 24 h. Des sables 0/3 mm ainsi stockés ont une teneur en eau de 10 à 15% dans des conditions climatiques normales (SNPP et DRIRE, 1988).

3.3.4 - Comportement thermique

Les pouzzolanes ont une température moyenne de fusion de 1140 °C et présentent une mauvaise conductibilité thermique. Un élément de 0,15 m d'épaisseur, exposé sur une face durant huit heures à cette chaleur, a une température d'environ 100 °C seulement sur la face opposée, et la face exposée se vitrifie (SNPP et DRIRE, 1988). Les valeurs de la conductibilité thermique en fonction de la densité sont consignées dans le tableau 6.

La conductibilité thermique d'un béton plein est de 0,30.

Granulométrie	Densité apparente sèche, non tassée	Coefficient de conductibilité thermique (kcal/h m^2)		
		théorique λt	extérieur λe	intérieur λi
Sables	0,9 à 1,0	0,13	0,23	0,20
Granulométries moyennes	0,75 à 0,9	0,11	0,21	0,17
Granulométries grossières	0,65	0,10	0,19	0,15

Tabl. 6 - Conductibilité thermique des matériaux pouzzolaniques français (d'après SNPP et DRIRE, 1988).

4 - SECTEURS D'UTILISATION ET SPÉCIFICATIONS INDUSTRIELLES

4.1 - PONCES

4.1.1 - Généralités

Les ponces peuvent être utilisées, au même titre que les pouzzolanes, dans des domaines où sont recherchés des matériaux à structure alvéolaire et de faible densité (viabilité, bâtiment, agriculture, sols sportifs...). Le facteur qui détermine l'utilisation de l'une ou de l'autre de ces substances est le plus souvent la disponibilité de ressources locales. La situation est donc très variable d'un pays à l'autre. En France, par tradition, on utilise les pouzzolanes à une échelle industrielle pour ces types d'applications.

Jusque dans les années 1940, le secteur des abrasifs était dominant, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui. Les ponces sont utilisées dans de nombreux secteurs industriels, les principaux consommateurs étant ceux du bâtiment (environ 80% en 1989 ; Presley, 1990) et le délavage des textiles. Les autres secteurs utilisateurs concernent notamment les charges minérales, l'agriculture et la filtration des eaux.

4.1.2 - Bâtiment

Les ponces sont des granulats légers (Maubert, 1989) utilisés dans le secteur du bâtiment pour la fabrication de parpaings (blocs) et de bétons isolants, légers et résistants. Elles rentrent également dans la composition de certains ciments, de mortiers et d'enduits de façades. Les ponces sont valorisées dans ces applications du fait de leur caractère pouzzolanique, de leur faible densité et de leur fort pouvoir isolant (isolation thermique et phonique). Par ailleurs, les bétons légers à base de ponces présentent d'intéressantes qualités de résistance mécanique, au feu et à la condensation. Leur emploi permet la réduction du poids des éléments de construction (rendant leur mise en œuvre plus facile), de la masse des fondations et des structures portantes. Les blocs en béton de pierre ponce sont utilisés, notamment en Allemagne, dans des systèmes de construction pour montage à sec, ce qui présente des avantages économiques et ergonomiques tout en conservant l'aspect traditionnel du mur massif.

4.1.3 - Abrasifs

Les ponces sont des abrasifs qualifiés de "doux" (ils ne rayent pas le verre) qui occupent une place particulière sur l'échelle de Mohs : leur dureté varie de 5 à 6.

Les matériaux ponceux micronisés sont composés de particules qui présentent individuellement des arêtes tranchantes, même si le produit, considéré globalement, est relativement tendre. Ces arêtes aiguës sont continuellement générées par le matériau en cours d'application, ce qui maintient son pouvoir abrasif. Le traitement, qui se fait par projection (sablage), est destiné à modifier l'état de surface des matériaux. Selon les granulométries des ponces employées et

l'adjonction éventuelle d'autres composants, la gamme des traitements appliqués est étendue et va du décapage puissant au nettoyage très doux (doucissage) de haute précision. C'est ainsi que les poudres abrasives à base de ponces sont utilisées pour traiter des matières naturelles et synthétiques, dans des domaines d'application très variés : odontologie et prothèse dentaire (charges et outils à polir), verrerie (dont lunetterie) et cristallerie, couverts pour la table, cosmétologie (dentifrices et pommades), électronique (circuits imprimés), cuirs, bois, plastiques, métaux (dont l'argent), pierres ornementales, délavage des textiles.

Le secteur du **délavage des textiles** (jeans en particulier) a connu récemment un important développement. Les ponces calibrées sont utilisées pour adoucir la rugosité des vêtements au cours de différentes étapes qui conduisent à leur donner un aspect délavé. L'intérêt de l'emploi de la pierre ponce dans ce domaine réside dans le fait qu'elle s'use sans se briser ni s'effriter. Les ponces utilisées ont une dureté moyenne, les plus résistantes cassant les fibres textiles et les plus tendres s'usant trop rapidement (Mc Michael, 1990). Ce procédé de délavage est concurrencé, depuis 1987, par une technique qui met en jeu une poudre chargée d'un enzyme et qui présente comparativement quelques avantages (facilité de manutention et de mise en œuvre, transport moins cher, pas de nécessité d'épurer les effluents rejetés après lavage). Cependant, compte tenu du niveau élevé de la demande, l'avenir du marché des matériaux ponceux dans ce domaine paraît assuré.

La quasi-totalité du marché français (environ 95%) est approvisionné par des matériaux ponceux en provenance de Turquie. Leur mise en œuvre s'opère à présent principalement en dehors de nos frontières, au Maroc et en Tunisie notamment. En Europe, cette industrie du délavage des textiles est essentiellement concentrée en Grande-Bretagne, Belgique, Pays-Bas et Allemagne. Les USA et Hong-Kong sont les autres centres au niveau international (Mc Michael, 1990).

4.1.4 - Charges minérales

Les ponces sont utilisées comme charges minérales à faible densité apparente dans différents produits : plastiques, caoutchoucs (pneumatiques notamment), mastics, colles, peintures. Selon les cas, elles interviennent comme agents de fluage, d'adhérence ou antidérapants.

4.1.5 - Agriculture

En horticulture, arboriculture et maraîchage, les matériaux ponceux sont employés comme substrats de cultures et pour l'amendement des sols. Leur application se traduit par une rétention importante d'eau et de fertilisants en phase aqueuse, substances dont ils contribuent à assurer le contrôle et la gestion (drainage en cas d'excédent et stockage en cas de déficit). Ils permettent une végétalisation rapide et de ce fait ils sont également appliqués au niveau des surfaces gazonnées des terrains de sports et de loisirs.

Par ailleurs, notamment du fait de leur inertie chimique, les ponces sont utilisées comme supports de produits phytosanitaires (herbicides, pesticides).

4.1.6 - Filtration et autres utilisations

Les ponces sont utilisées comme agents de filtration en pétrochimie et surtout pour l'épuration des eaux, qu'il s'agisse d'eaux potables de consommation (notamment celles qui présentent un excès de fer) ou d'eaux résiduaires.

Dans certains pays (Etats-Unis par exemple), elles sont employées, à l'instar des pouzzolanes en France, dans le secteur de la viabilité, en particulier pour constituer les assises de chaussées routières.

De nombreuses autres applications des matériaux ponceux sont aujourd'hui effectives ou en cours de développement, dans des domaines très diversifiés. A titre d'exemples, on peut citer les absorbants industriels (huiles...), les litières animales, les barbecues (rétention thermique), les synthèses minérales (zéolites en particulier).

4.1.7 - Spécifications industrielles

Il n'existe pas de normes européennes concernant la calibration des matériaux ponceux en général. De ce fait, la gamme des granulométries produites est très étendue et adaptée à la demande des utilisateurs, depuis la poudre micronisée jusqu'aux morceaux de taille pluridécimétrique.

Toutefois, certaines qualités de ponces, destinées à l'industrie du délavage des textiles, sont normalisées au niveau international (standard ISO 9000).

Le tableau 7 présente quelques exemples des granulométries les plus employées par secteurs d'application.

De par leur couleur blanche, les ponces sont des matériaux commercialement attractifs pour de nombreux usages. Cette caractéristique est en particulier recherchée dans le secteur du bâtiment (enduits de façades, parpaings...) où l'aspect esthétique est important.

Les matériaux ponceux sont susceptibles de contenir de la silice libre cristallisée (quartz par exemple). Compte tenu des risques encourus au niveau de la santé humaine en cas d'inhalation de poussières (risque de silicose), une norme internationale a été établie (Lucà, 1985). Elle définit une valeur maximale tolérée de 0,5, résultat du produit de la concentration de poudre inférieure à 5 µm par la concentration en silice libre cristalline inférieure à 5 µm.

SECTEURS D'UTILISATION		GRANULOMÉTRIES DES PONCES COURAMMENT UTILISÉES
BATIMENT	• parpaings légers isolants	0/6 mm, 0/10 mm, 0/15 mm
ABRASIFS	• délavage des textiles	10/20 mm, 20/30 mm ; 30/50 mm et 50/70 mm surtout
	• autres domaines	0/40 µm, 0/80 µm, 0/140 µm 0/180 µm
CHARGES MINÉRALES		0/40 µm
FILTRATION	• eau potable	0/45 µm à 3 cm ; 2,5/8 mm surtout

Tabl. 7 - Caractéristiques granulométriques des matériaux ponceux par types d'utilisation.

4.2 - POUZZOLANES

4.2.1 - Généralités

Les pouzzolanes sont des granulats légers utilisés dans différents secteurs industriels du fait de leurs propriétés liées à leur composition essentiellement vitreuse et à leur faible densité et leur forte porosité que leur confère leur structure alvéolaire.

Les secteurs du bâtiment et de la viabilité sont nettement prédominants, représentant environ les deux tiers de la consommation totale. En 1991, cette dernière s'est répartie en France de la façon suivante (fig. 4) :

- viabilité : 42,1%
- bâtiment : 23,0%
- agriculture : 17,5%
- assainissement : 11,5%
- sols sportifs : 4,5%
- industrie : 1,2%
- autres utilisations : 0,2%

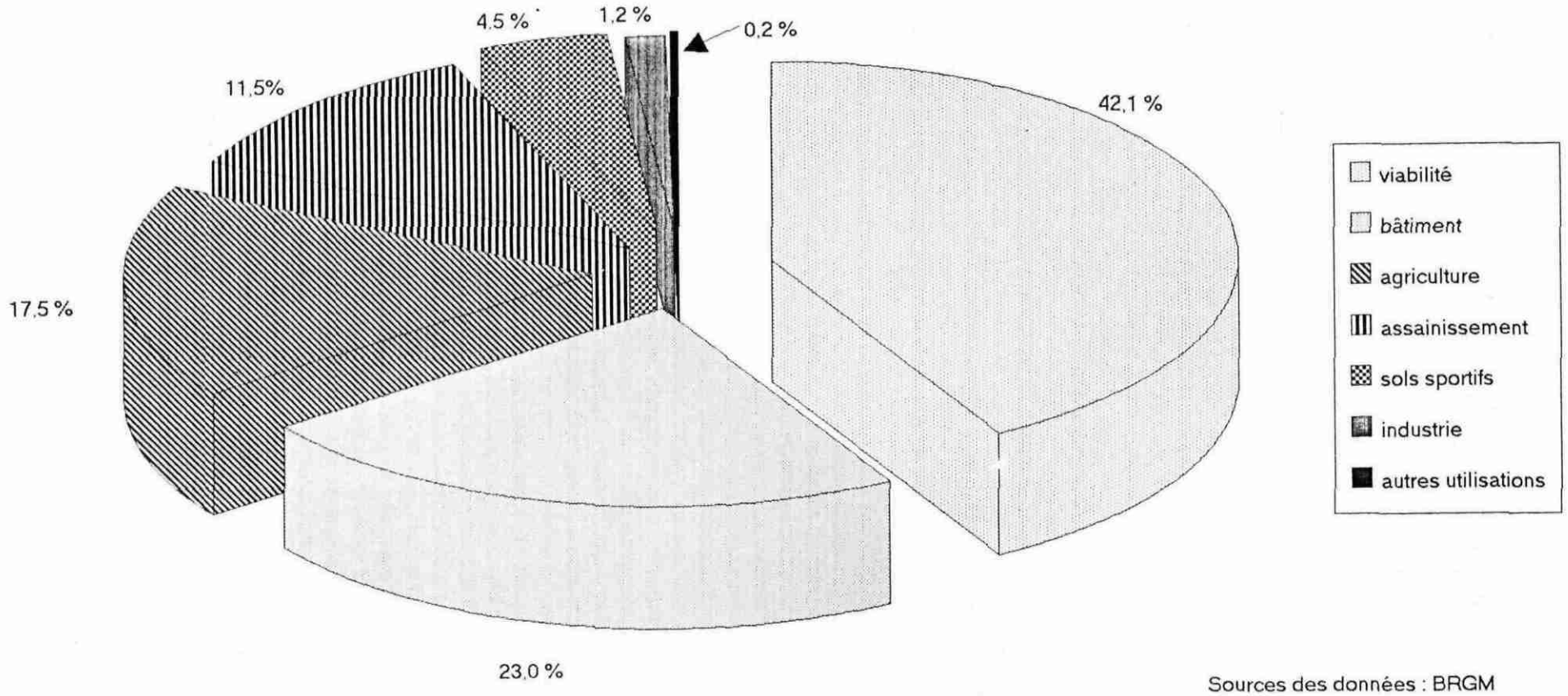

Fig. 4 - Répartition de la consommation française de pouzzolanes par secteurs d'utilisation en 1991.

4.2.2 - Viabilité

Dans les **techniques routières**, les matériaux pouzzolaniques sont utilisés pour la construction des assises et la structuration des chaussées. Dans le secteur de la viabilité, ils servent également à la constitution de drains et de remblais, au sablage hivernal des chaussées et au recouvrement de câblages et de canalisations souterrains.

De par leur pouzzolanicité, c'est-à-dire leur capacité à se lier à la chaux en présence d'eau, ces matériaux contribuent à la formation d'un liant, mélange à prise lente (liant pouzzolane chaux). De ce fait, ils sont naturellement les mieux adaptés à l'utilisation en construction routière, contrairement aux ciments classiques à forte teneur en clinker. Les résistances les plus élevées sont atteintes quand les pouzzolanes ont une granulométrie fine (% d'éléments inférieurs à 80 µm important) et pour un dosage bien défini : 80% de pouzzolane et 20 % de chaux (en poids sec), puis 8 à 11% d'eau (SNPP et DRIRE, 1988 ; SETRA et LCPC, 1979).

Ce liant s'adapte à tous types de granulats pour constituer les **graves pouzzolane chaux** (GPC), mais les matériaux basaltiques procurent les meilleures résistances (15 bars à 28 jours et 32 bars à 60 jours) pour une composition globale ainsi définie : 77% de graves basaltiques, 20% de pouzzolane 0/3 mm et 3% de chaux (SNPP et DRIRE, 1988).

Ces graves traitées aux liants hydrauliques ont des performances qui permettent leur emploi, après compactage, pour la réalisation des assises de chaussées neuves (base et fondation) ou des renforcements.

Les pouzzolanes participent également, seules, à la **structuration des chaussées** en assurant le drainage et la stabilisation des fonds de forme, le drainage et l'évacuation des eaux de ruissellement (ralentissement du colmatage des drains), la mise hors gel et, par un apport de fines, la correction des courbes granulométriques (SNPP et DRIRE, 1988).

Les pouzzolanes sont utilisées pour le sablage hivernal des chaussées, seules ou avec adjonction de fondants chimiques et d'autres substances pour constituer des produits dégelants et antidérapants respectueux de l'environnement, nouvellement arrivés sur le marché français.

4.2.3 - Bâtiment

Les pouzzolanes sont des granulats légers qui trouvent de multiples applications dans le secteur du bâtiment, où elles sont notamment appréciées pour leur légèreté, leur facilité de mise en œuvre, et pour leurs propriétés d'isolation thermique et phonique et de résistance mécanique et aux agents agressifs externes (gel, feu...).

Elles sont utilisées pour la fabrication de bétons légers, caverneux ou pleins, de parpaings (blocs légers), moellons, agglomérés, buses, éléments préfabriqués, murs et cloisons, planchers, toitures et terrasses, bordures de trottoirs et pavés autobloquants.

Elles servent également à la constitution de couches sous dalles et sous carrelages et au remplissage de planchers et plafonds.

Quelques-unes des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de pouzzolane sont précisées par des données chiffrées dans le tableau 8. Comparés aux bétons d'agrégats lourds, les bétons de pouzzolane présentent les caractéristiques suivantes (SNPP et DRIRE, 1988) :

- ils peuvent subir davantage de déformations sans se fissurer (cf. module d'élasticité) ;
- ils subissent un fluage et un retrait plus important ;
- leur coefficient de dilatation thermique est plus faible ;
- leur résistance au feu est supérieure (transmission de la chaleur plus faible, meilleure conservation de leur résistance à haute température) ;
- ils offrent une bonne résistance aux acides faibles.

Les bétons réfractaires à base de pouzzolanes servent à la fabrication de boisseaux (conduits) et avaloirs de cheminées. Ils sont exposés à des températures allant de 500 à 1000 °C. Par ailleurs, les pouzzolanes sont utilisées comme adjuvants dans les bétons de masse dont elles améliorent considérablement la qualité : meilleure ouvrabilité, augmentation de la résistance au gel, résistance à l'action des eaux agressives, diminution de la solubilité de la chaux (SNPP et DRIRE, 1988).

Densité moyenne (à l'état sec à l'air, à 28 jours)	1,1 à 1,5 t/m^3 (selon dosages)
Résistance à la compression et à la traction	bétons caverneux : Rc/Rt = 6 à 9 bétons pleins : Rc/Rt = 9 à 10 (8 à 15 pour les bétons normaux)
Modules d'élasticité	40 à 180 000 kg/cm^2 (selon résistance et dosage de sable)
Teneur en eau d'équilibre	bétons caverneux : 4% en volume bétons pleins : 6% en volume
Coefficient de capillarité	bétons caverneux : 4 (10/20 mm) 2,5 (20/50 mm) bétons pleins : 4 à 5
Capacité d'absorption d'eau	bétons caverneux : 12 à 18% en volume bétons pleins : 20 à 25% en volume
Résistance au gel	essais de gélivité de 25 cycles de +15°C à –15 °C : pratiquement sans influence sur la tenue du béton

Tabl. 8 - Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de pouzzolane (d'après SNPP et DRIRE, 1988).

4.2.4 - Agriculture

Dans le domaine de l'agriculture, les pouzzolanes sont utilisées pour le drainage, l'amendement des sols et comme substrats.

Les pouzzolanes sont appliquées dans les remblais des tranchées de drainage où elles freinent le colmatage des drains, dans les remblais de chemins d'exploitations, et au niveau des tranchées drainantes dans les mouillères.

L'utilisation des pouzzolanes pour l'amendement des sols a deux types de conséquences. Elle a un effet physique et structurant immédiat en permettant l'aération des sols lourds et en protégeant les sols limono-sableux à structure instable contre le phénomène de battance. A long terme, elle constitue un amendement chimique pour les sols pauvres sableux ou limoneux, acides et à faible pouvoir absorbant.

En effet, d'une façon générale, les pouzzolanes sont riches en silice, en alcalino-terreux, en phosphore et en oligo-éléments (tabl. 3 et 9).

Mn	Cu	Zn	Co	B
1537	75	166	153	0,12

(fraction broyée < 200 µm, valeurs en ppm)

Tabl. 9 - Composition chimique de la pouzzolane de Saint-Thibéry (Hérault) en éléments mineurs (d'après Moinereau et Herrmann, 1981).

En horticulture, maraîchage et arboriculture, les pouzzolanes, pures ou le plus souvent mélangées à des substrats organiques (tourbe, terreau, compost), sont utilisées pour les cultures en pots et en conteneurs, pour les cultures hors-sol avec solutions nutritives, pour l'amendement des sols de serres, pour les semis et bouturages. Elles servent également de charges pour des substances fertilisantes.

D'une manière générale, les pouzzolanes offrent les avantages suivants pour les cultures hors-sol : forte aération physique du milieu, grande stabilité et durabilité (inertie chimique), absence initiale de parasites, faible gélivité et bonne isolation thermique, faible coût (Zuang *et al.*, 1979).

Au chapitre des inconvénients, on notera la faible rétention d'eau et l'absence de pouvoir tampon, cette dernière pouvant avoir des conséquences graves lorsque la solution nutritive est mal contrôlée (Moinereau et Herrmann, 1981).

4.2.5 - Assainissement

Compte tenu de leur structure alvéolaire, qui leur confère une grande surface spécifique, les pouzzolanes sont utilisées dans des systèmes de filtres d'eau potable (filtres bi-couches, avec

sables quartziques) et surtout au niveau des plateaux absorbants et des lits bactériens des stations d'épuration, et des filtres de fosses septiques (granulométrie 20/50 mm - surface spécifique : 200 à 210 m^2/m^3).

Dans différentes granulométries, les pouzzolanes conviennent au traitement biologique des eaux usées, le film bactérien s'accrochant rapidement du fait de la rugosité des matériaux. Ces derniers constituent la couche inférieure (granulométrie 100/300 mm - surface spécifique : 30 à 35 m^2/m^3) et le remplissage (granulométrie 50/100 mm - surface spécifique : 90 à 100 m^2/m^3) des lits bactériens des stations d'épuration (SNPP et DRIRE, 1988).

4.2.6 - Sols sportifs

Les pouzzolanes sont appliquées au niveau de sols gazonnés ou stabilisés. Elles peuvent constituer la couche de fondation drainante, la couche intermédiaire, la couche de surface ou la chape (mélange argile - pouzzolane - plâtre), ainsi que le remplissage des fentes de drainage. Cela concerne les terrains de tennis, de football, de golf..., les pistes d'athlétisme, les hippodromes et autres plateaux d'évolution.

Elles confèrent à ces surfaces une souplesse spécifique.

4.2.7 - Industrie

Ce secteur est un très petit consommateur de pouzzolanes, qui sont utilisées comme dégraissants d'argiles pour la fabrication de produits de terre cuite (tuiles et briques).

Les bétons réfractaires à base de pouzzolanes servent à la fabrication de fours industriels (briqueteries, tuileries, verreries...).

4.2.8 - Autres utilisations

Quelques utilisations, très diverses et très marginales en terme de quantités de matériaux consommées, sont enfin à relever :

– matériaux pour barbecues ;

– litières pour chats ;

– pierres d'aquarium ;

– ornementation et décoration.

4.2.9 - Spécifications industrielles

Les spécifications industrielles des matériaux pouzzolaniques concernent en tout premier lieu la granulométrie. D'après la norme NF P 18-310, sept classes granulométriques sont officiellement définies (en mm) : 0/5, 0/10, 0/20, 5/10, 10/20, 20/31,5, 20/50. En réalité, les

producteurs fournissent des matériaux adaptés aux besoins spécifiques des utilisateurs, et, de ce fait, la gamme des pouzzolanes calibrées disponibles est très étendue, débutant par des fines à 0/2, 0/3 et 0/4 mm.

Le tableau 10 synthétise les données sur les granulométries utilisées en fonction des domaines d'application. Pour le cas particulier des graves pouzzolane chaux, servant à l'élaboration des assises de chaussées routières, les spécifications adoptées précisent que les courbes granulométriques de contrôle doivent, dans 95% des cas, satisfaire aux normes qui définissent trois classes de pouzzolanes (tabl. 11 ; Fournier et Geoffray, 1978).

CLASSE DE POUZZOLANES	I	II	III
Refus au tamis de 5 mm (%)	0	0	0
Refus au tamis de 4 mm (%)	<10	<10	<10
Taux d'éléments compris entre 0,08 et 0,20 mm (%)	>8	>8	>8
Teneur en fines (< 0,08 mm) (%)	6 à 10	10 à 14	14 à 18

Tabl. 11 - Spécifications granulométriques des matériaux pouzzolaniques entrant dans la composition des graves pouzzolane chaux (d'après Fournier et Geoffray, 1978).

Les pouzzolanes, en tant que granulats légers utilisés pour la fabrication de bétons dans les secteurs du bâtiment et de la viabilité, ne doivent pas avoir une action agressive et corrosive vis-à-vis des éléments métalliques avec lesquels elles sont en contact. Pour cette raison, une recommandation précise que leur composition chimique doit révéler moins de 0,5% de sulfures exprimés sous forme de soufre (S), et moins de 1% de sulfates exprimés sous forme d'anhydride sulfurique (SO_3).

Enfin, la couleur des pouzzolanes peut être un paramètre essentiel pour certaines utilisations, la couleur rouge étant particulièrement recherchée. Mais cette coloration est indépendante des propriétés physiques et mécaniques, et donc de la qualité, des matériaux.

SECTEURS D'UTILISATION		GRANULOMETRIES DES POUZZOLANES COURAMMENT UTILISEES (en mm)
VIABILITE	• assises de chaussées routières (graves pouzzolane chaux)	0/3, 0/5 avec teneur en filler (< 80 µm) supérieure à 12%
	• structure de chaussées (drainage)	20/50, 15/100, 50/100
	• sablage hivernal des chaussées	0/5, 3/7, 7/15
	• remblais légers	6/10, 10/18, 60/90
BATIMENT	• murs banchés caverneux de forte épaisseur	7/15, 15/40
	• éléments coulés de forte épaisseur	10/20, 15/40
	• agglomérés vibrés et éléments coulés (parois minces ou moyennes)	0/10, 4/15
	• boisseaux de cheminées	0/2, 0/7
	• bétons, parpaings	7/15, 15/30
	• bétons réfractaires	0/5, 5/10, 10/20
AGRICULTURE	• drainage	2/6, 20/50
	• amendement des sols	0/2, 0/4, 0/7, 5/10
	• substrats de cultures ou sols artificiels	2/6, 5/10, 7/15
ASSAINISSEMENT	• filtres pour eau potable	1,5/2,5 ; 2,5/3,5 ; 4/5 ; 5/10
	• filtres de fosses septiques	20/50
	• lits bactériens (stations d'épuration)	50/100, 100/300
SOLS SPORTIFS	• pistes d'athlétisme	0/2, 0/6
	• sous-couche drainante	6/10, 0/20

Tabl. 10 - Caractéristiques granulométriques des matériaux pouzzolaniques par types d'utilisation.

5 - ÉCONOMIE ET MARCHÉ

5.1 - PONCES ET POUZZOLANES : PRODUCTION MONDIALE

Il apparaît difficile d'estimer de manière fiable la production mondiale de ponces et de pouzzolanes, telles que nous avons défini ici ces substances, dans la mesure où des matériaux de nature très variable sont comptabilisés sous ces deux appellations. Néanmoins, une estimation globale en a été faite par l'US Bureau of Mines (tabl. 12). Elle montre que, de 1985 à 1987, environ la moitié de la production mondiale était assurée par un seul pays, l'Italie. Nous verrons plus loin que, pour les seuls matériaux ponceux, cette situation a beaucoup évolué depuis cette date.

	1985	1986	1987
Italie	5 544	5 193	5 670
Grèce	1 530	1 566	1 557
France	549	495	450
USA	457	499	353
Allemagne (Ouest)	594	315	171
TOTAL MONDE	10 890	10 350	10 575

Données en milliers de tonnes
Source : US Bureau of Mines

Tabl. 12 - Production mondiale de ponces et de pouzzolanes entre 1985 et 1987 (d'après Industrial Minerals, 1990).

5.2 - PONCES

5.2.1 - Généralités

Le marché international des matériaux ponceux a subi un grand bouleversement à partir de 1986. Les deux principaux secteurs consommateurs ont connu alors des fortunes diverses : le secteur du bâtiment a chuté, tandis que progressait celui des abrasifs.

Historiquement, l'Italie, la Grèce et l'Allemagne de l'Ouest ont été les principaux producteurs mondiaux, les USA, la Turquie, la Nouvelle Zélande, l'Islande et différents pays d'Amérique centrale et latine fournissant pour leur part les marchés de faible importance et généralement localisés. La situation a beaucoup évolué pour deux pays producteurs : l'Allemagne et la Turquie. L'Allemagne, producteur important, a maintenant concentré son activité sur le seul secteur du bâtiment, laissant de côté les autres secteurs industriels consommateurs de produits plus élaborés. Inversement, la Turquie s'est placée sur un marché relativement nouveau, celui

du délavage des textiles, répondant ainsi à une demande importante et rapide. Ce marché ne pouvant être assuré par ses plus proches concurrents, la Grèce et l'Italie, la Turquie a ainsi vu ses exportations passer de 15 t en 1983 à plus de 100 000 t en 1989 (Mc Michael, 1990). Entre 1986 et 1990, la production de la Turquie a atteint 600 000 t/an afin de satisfaire, en plus de la demande extérieure, des besoins locaux importants dans le secteur du bâtiment, pour la fabrication de parpaings légers (Ramsden, 1991).

D'une manière générale, les matériaux ponceux destinés au secteur du bâtiment sont employés localement et régionalement, alors que les produits plus spécifiques, notamment pour le secteur des abrasifs, peuvent parcourir de grandes distances. C'est ainsi par exemple que les USA exportent de tels produits en Europe et en Asie. La Turquie exporte vers l'Europe (Grande-Bretagne, Allemagne, Bénélux, Italie, France) et les USA principalement.

5.2.2 - Production mondiale

Il n'est pas possible de connaître avec suffisamment de précision et de fiabilité la production mondiale globale de matériaux ponceux. Les données bibliographiques sont parcellaires, ne recouvrent pas les mêmes périodes et, comme cela a été dit précédemment, prennent en compte parfois des matériaux pyroclastiques ne correspondant pas aux ponces telles que nous les avons définies ici. C'est le cas par exemple pour l'Allemagne où les matériaux pouzzolaniques sont de plus en plus exploités compte tenu de l'épuisement des ressources en ponces. Le tableau 13 récapitule les productions nationales de dix pays pour la période 1988-1991. Celles-ci représentent un total partiel légèrement supérieur à 5 Mt.

Les principaux pays producteurs sont l'Allemagne (région de l'Eifel), l'Italie (île de Lipari et partie centrale), la Turquie (Anatolie), la Grèce (île de Yali) et les USA (Californie, Nouveau Mexique, Oregon, Arizona, Idaho, Kansas, Hawaii). Les pays producteurs de moindre importance sont nombreux : Espagne (provinces de Ciudad Real et d'Almeria, île de Ténérife / Canaries), Portugal (île de Sao Miguel / Açores), Islande (région du Mont Hekla), Arménie, Hongrie, Iran, Inde, Chine, Indonésie, Japon, Nouvelle Zélande (région de Rotorua - Taupo), Mexique, Guatemala, Costa Rica, Équateur, Pérou, Uruguay et Chili.

Pays	Quantités (tonnes)	Année
Allemagne	2 400 000	1988
Italie	790 000	1988/90
Turquie	600 000	1990
Grèce	600 000	1990
USA	440 000	1991
Iran	185 000	1990
Islande	60 000	1989
Nouvelle Zélande	53 000	1989
Uruguay	10 700	1988
Espagne	5 000	1990

Sources : Mc Michael, 1990 ; Ramsden, 1991 ; Bassir et Parvaresh, 1991 ; Griffiths, 1991 ; Canellopoulos, 1991 ; Industrial Minerals, 1991 ; Ridgway, 1992 ; Morgan, 1992.

Tabl. 13 - Productions annuelles nationales de matériaux ponceux pour la période 1988-1991.

5.2.3 - Production française

La production française de ponces a été substantielle dans le passé du fait des besoins nationaux pour la fabrication de produits abrasifs (poudres à récurer notamment).

Un seul site, situé à Rochefort-Montagne (département du Puy-de-Dôme, fig. 2), subsiste aujourd'hui en France. Il exploite la formation pyroclastique dénommée "Grande nappe de ponces" qui présente une grande extension dans le massif volcanique du Mont-Dore. Il s'agit de ponces fibreuses à composition rhyolitique (tabl. 1). Sa production est aujourd'hui très limitée, ne représentant qu'un peu plus de 2% de la consommation française totale de ponces.

Des sites d'extraction de ponces sont en activité aux Antilles, où des retombées pliniennes et des coulées pyroclastiques sont exploitées, principalement pour le secteur du bâtiment, respectivement en Martinique et en Guadeloupe.

5.2.4 - Importations et consommation apparente en France

Les importations françaises de produits ponceux étaient de 12 713 t, toutes qualités confondues, en 1991, principalement (78%) en provenance de Turquie (tabl. 14). Elles étaient deux fois plus importantes (23 332 t) en 1989. Cette très nette diminution tient aux faits que l'industrie du délavage des textiles, grosse consommatrice de ces produits, s'est majoritairement déplacée à l'étranger, en Afrique du Nord notamment (Maroc, Tunisie), et que les traitements de substitution (enzymes) se sont développés.

Si on prend de plus en compte la production nationale métropolitaine et les exportations (environ 400 t en 1991), on aboutit à une consommation française apparente de 12 600 t en 1991.

Pays d'origine	Quantités (tonnes)	
	pierres ponces brutes, en morceaux et sous forme de graviers	autres pierres ponces
Belgique et Luxembourg	–	29
Allemagne	701	8
Italie	79	1088
Grèce	1	875
Espagne	44	–
Turquie	7943	1935
Autre pays	–	10
TOTAL	8768	3945
TOTAL général	12 713	

Source : statistiques du commerce extérieur de la France.

Tabl. 14 - Importations françaises de matériaux ponceux en 1991.

5.2.5 - Prix

Les prix sont dépendants de nombreux facteurs parmi lesquels la granulométrie, les quantités fournies, les coûts de transport et le mode de traitement subi par les matériaux. Ce dernier en particulier a une très forte incidence sur le prix des produits. Les valeurs fournies pour l'année 1992 (tabl. 15) sont donc purement indicatives.

Origine	Types de produits	Prix	Commentaires
FRANCE (Mont-Dore)	0/40 µm à 3/4 mm, séchés	4000 à 5000 F/t	départ usine
	tout-venant (brut)	700 F/t	sortie carrière
ITALIE (Lipari)	0/6 mm, 0/10 mm, 0/15 mm	15 £/t	CIF, par quantités de 3000 à 5000 t
	0/40 µm à 3/4 mm produits blancs	6000 à 8000 F/t	prix de vente en France, départ usine, par quantités de 50 kg
ITALIE (partie centrale)	lapilli	12 000 LIT/m^3	départ usine
	morceaux	20 000 LIT/m^3	
TURQUIE	non précisé	330 à 380 DM/t	CIF
USA (Nouveau Mexique)	produits lavés	30$/cubic yard	FOB
NOUVELLE ZÉLANDE	sables	10 à 19 $/m^3	FOB, hors GST

Tabl. 15 - Prix de quelques matériaux ponceux commercialisés dans le monde en 1992.

5.3 - POUZZOLANES

5.3.1 - Introduction

Compte tenu de leur très faible prix en sortie d'exploitation, les pouzzolanes sont des matériaux fortement handicapés par les coûts de transport. Ils sont de ce fait destinés prioritairement au marché local et national, et de façon très exceptionnelle et marginale à l'exportation. Pour cette raison, nous ne prendrons en compte que le marché français de ces substances, très peu de données étant d'ailleurs disponibles dans la bibliographie sur les productions, flux et utilisations de ces produits au niveau international.

5.3.2 - Production française

La production française de pouzzolanes est réalisée par dix huit sociétés, en partie rassemblées au sein du Syndicat National des Producteurs de Pouzzolane, qui regroupe huit d'entre elles et représente aux alentours de 65% de cette production. En 1991, la moitié de ces entreprises assurait chacune une production supérieure à 20 000 t.

Pour certaines de ces sociétés, le plus souvent familiales, l'exploitation de pouzzolanes constitue l'activité unique. Pour d'autres, de taille plus importante, elle ne représente qu'une partie de l'activité (sociétés de transport et du bâtiment et travaux publics notamment). Dans ce dernier cas, les matériaux pouzzolaniques peuvent être, pour tout ou partie, produits pour le propre compte de ces sociétés.

Compte tenu des contraintes géologiques, la production nationale est très sectorisée, ne concernant que quatre départements métropolitains : Ardèche, Haute-Loire, Hérault et Puy-de-Dôme (fig. 2). La majeure partie de cette production, soit 85% en 1991, est assurée par la région Auvergne.

La production nationale de pouzzolanes est directement dépendante de l'évolution économique des principaux secteurs d'activité consommateurs que sont la viabilité, le bâtiment et l'agriculture. Les fluctuations de cette production constatées ces dernières années sont liées à l'irrégularité des besoins du secteur de la viabilité (notamment des grands chantiers routiers et autoroutiers dans le Massif central et à sa périphérie), de même qu'à la crise des secteurs du bâtiment et de l'agriculture.

Globalement, la production française de pouzzolanes a baissé de manière importante depuis 1974, année où elle atteignait 810 000 t. Elle approchait 580 000 t en 1980. La production globale, toutes qualités de produits confondues, s'élevait à environ 481 000 t en 1991.

La figure 5 précise l'évolution de la production métropolitaine de pouzzolanes et du chiffre d'affaires global de la profession, depuis 1980. Ce dernier était de 17 600 000 F H.T. en 1990 (UNICEM, 1991) et de 21 965 000 F H.T. en 1991 (UNICEM, comm. orale).

Il est à noter qu'une importante exploitation de matériaux pouzzolaniques est en activité en Guadeloupe. Elle produisait 283 000 t de sables et graviers en 1989, utilisés dans les secteurs de la viabilité et du bâtiment. De petites exploitations de pouzzolanes sont également répertoriées dans l'île de la Réunion.

5.3.3 - Importations - Exportations - Consommation française apparente

La France n'importe pas de pouzzolanes.

En 1991, les exportations de ces matériaux restaient très limitées, ne représentant que 1,2% de la production nationale totale, soit un peu moins de 6000 t. Les exportations françaises se font presque exclusivement en direction des pays européens voisins, pour des raisons liées soit à l'absence de ressources (Angleterre, Pays-Bas, Belgique, Suisse), soit à l'éloignement des

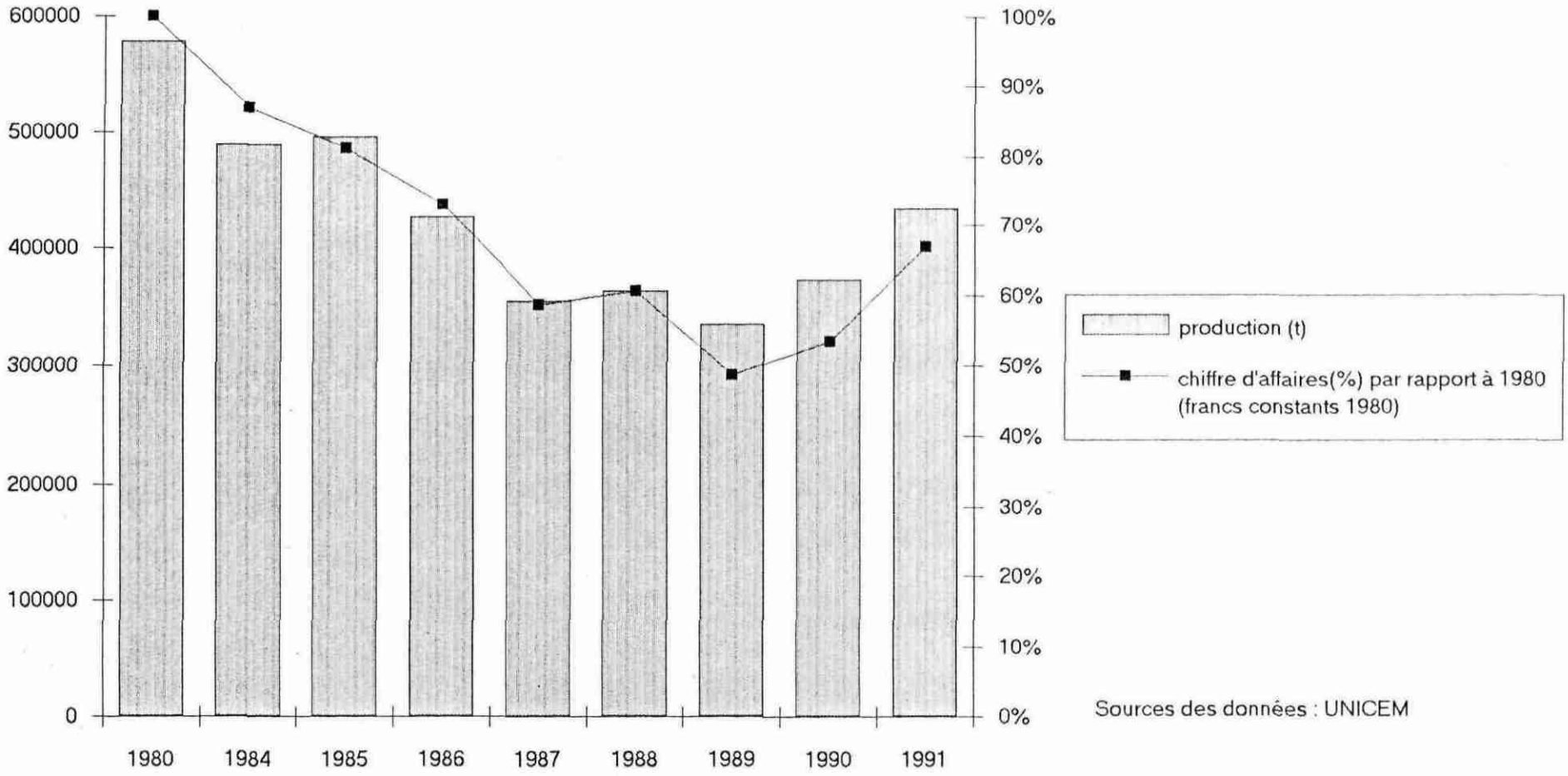

Fig. 5 - Évolution de la production française métropolitaine de pouzzolanes et du chiffre d'affaires global de la profession entre 1980 et 1991.

gisements nationaux (Italie), soit à la cessation de l'activité extractive pour des motifs environnementaux (Espagne). Les exportations françaises vers le Brésil sont quantitativement insignifiantes et tout à fait anecdotiques.

La consommation nationale apparente (livraisons en France) a été d'environ 438 000 t en 1991, soit un peu plus de 90% de la production française.

5.3.4 - Prix

Les prix des matériaux pouzzolaniques les plus utilisés, criblés et livrés en vrac, varient globalement de 24 à 60 F H.T./t selon les calibres, mais les prix les plus couramment pratiqués se situent dans la fourchette 35-45 F/t. Le tableau 16 récapitule les niveaux de prix actuels en fonction de la qualité et du conditionnement des matériaux.

Types de produits	Prix H.T. (départ carrière ou sortie usine)
criblés en vrac	24 à 60 F/t
criblés et séchés en vrac	50 à 100 F/t
criblés en sacs	15 à 25 F/50 kg (sacs)
tout-venant (brut)	16 à 25 F/t

Tabl. 16 - Prix des matériaux pouzzolaniques en France en 1992.

6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION

Des produits de substitution, naturels ou synthétiques, concurrencent les ponces et les pouzzolanes dans chacun de leurs domaines d'application (tabl. 17).

Cependant, le marché de ces substances existe et se maintient quand il y a adéquation entre le prix des matériaux, la disponibilité de la ressource et la qualité des produits finis recherchés. En France, par exemple, les pouzzolanes offrent le meilleur rapport qualité/prix de tous les substrats de cultures minéraux (Moinereau et Herrmann, 1981).

SECTEURS D'UTILISATION		PONCES / POUZZOLANES	PRODUITS CONCURRENTS
BATIMENT	• ciments, bétons, platres, parpaings	ponces et pouzzolanes	diatomite, perlite, argiles et schistes expansés, laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes de centrales thermiques, fumées de silice, bois, vermiculite, polystyrène
	• isolation	ponces et pouzzolanes	verre, polystyrène, perlite, diatomite, vermiculite, laines de verre et de roche, amiante
VIABILITE	• assises de chaussées routières	ponces et pouzzolanes	ciments, cendres volantes de centrales thermiques, laitiers de hauts fourneaux, poudres de basalte
AGRICULTURE	• substrats de cultures	ponces et pouzzolanes	argiles et schistes expansés, perlite, vermiculite, bentonite, zéolites, laine de roche
	• supports de produits phytosanitaires	ponces	bentonite, sépiolite, attapulgite, carbonates de calcium, gypse, zéolites
ASSAINISSEMENT	• filtration d'eau	ponces et pouzzolanes	sables siliceux, grenat, ilménite, argiles et schistes expansés, anthracite, diatomite, perlite, zéolites, filtres artificiels
	• supports bactériens	ponces et pouzzolanes	maerl, zéolites
ABRASIFS	• cosmétologie	ponces	carbonates de calcium
	• industrie	ponces	grenat, silice, diatomite, alumine calcinée, carbure de silicium
CHARGES MINERALES	• agents de texture, de fluage...	ponces	kaolin, sépiolite, talc, craie, zéolites, perlite
LITIERES ANIMALES	• absorbants	ponces et pouzzolanes	attapulgite, sépiolite, zéolites, bentonite, argiles à diatomées, gypse

Tabl. 17 - Produits concurrents des ponces et des pouzzolanes par secteurs d'utilisation.

7 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BASSIR S.H. et PARVARESH A. (1991) - Iran - Mining Annual Review, Mining Journal, June 1991, p. 136.

BRGM et CETE (1980) - Étude des réserves en matériaux pouzzolaniques à la périphérie nord-est de la Chaîne des Puys. Rap. BRGM 80 SGN 168 AUV et CETE PD 78/316, 103 p. + cartes h.t.

CANELLOPOULOS G.P. (1991) - Greece. Mining Annual Review, Mining Journal, June 1991, p. 173.

DRON R. (1975) - Les pouzzolanes et la pouzzolanicité. Revue des Matériaux de Construction, n° 692, janvier-février 1975, p. 27-30.

FOURNIER M. et GEOFFRAY J.M. (1978) - Le liant pouzzolanes - chaux. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n° 93, janvier-février 1978, p. 70-77.

GRIFFITHS J. (1991) - Spain's minerals. Mixed fortunes. Industrial Minerals, June 1991, p. 47.

INDUSTRIAL MINERALS (1990) - Pumice and scoria. Geology and World Deposits, p. 217-219.

INDUSTRIAL MINERALS (1991) - Directory. A world guide to producers and processors. Metal Bulletin Books, second edition, 557 p.

LARGENT R. (1978) - Estimation de l'activité pouzzolanique. Recherche d'un essai. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n° 93, janvier-février 1978, p. 61-65.

LUCA S.F. (1985) - La ponce de Lipari. Plaquette d'information, Société Pumex S.p.A., Italie, 12 p.

MAUBERT F. (1989) - Les granulats. Mémento Roches et Minéraux Industriels. Rap. BRGM R 30157, 77 p. + ann.

McMICHAEL B. (1990) - Pumice markets. Volcanic rise of stonewashing. Industrial Minerals, May 1990, p. 22-37.

MOINEREAU J. et HERRMANN P. (1981) - Substrats minéraux pour cultures hors sol : pouzzolane et tuf volcanique. Compte rendu de l'action thématique programmée "Culture hors sol" de l'INRA, ENSA de Montpellier, 29 p.

MORGAN J.D. (1992) - The United States. Mining Annual Review, Mining Journal, June 1992, p. 31-38.

PRESLEY G.C. (1990) - Pumice and pumicite. Mining Engineering. Industrial Minerals 1989, June 1990, p. 570-571.

RAMSDEN A. (1991) - Turkey. Mining Annual Review, Mining Journal, June 1991, p. 141.

RIDGWAY J.M. (1992) - Uruguay. Mining Annual Review, Mining Journal, June 1992, p. 67.

SETRA et LCPC (1979) - La technique française des assises de chaussées traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques. Dossier d'information, Ministère des Transports, 31 p.

SNPP et DRIRE (1988) - La pouzzolane : l'avenir en projection. Plaquette d'information, Syndicat National des Producteurs de Pouzzolane et DRIRE Auvergne, 9 p.

SPENCER C.H. (1990) - Matériaux pour ciment. Mémento Roches et Minéraux Industriels, édition BRGM, décembre 1990, 51 p. + ann. h.t.

UNICEM (1991) - Statistiques 1990. Matériaux de construction et produits de carrières, n° 653, novembre 1991, p. 17.

WALKER G.P.L. (1981) - Plinian eruptions and their products. Bull. Volcanol., vol. 44-3, p. 223-240.

WHITHAM A.G. et SPARKS R.S.J. (1986) - Pumice. Bull. Volcanol., vol. 48, p. 209-223.

ZUANG H. *et al.* (1979) - Les substrats en cultures sans sol : caractéristiques générales. Document INVUFLEC, n° 418/30, 28 p.