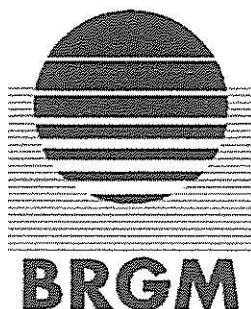


*Evaluation des ressources et potentiel de
valorisation des matériaux pouzzolaniques
de La Réunion*

Etude réalisée dans le cadre du projet de Service public du BRGM 2001-RES-409

P.M. Thibaut, M. Cruchet et J.-Ph. Rançon,
avec la collaboration de F. Rossi

mai 2001
BRGM/RP-50865-FR
2001 SGR/REU 11



Mots clés : Bétons légers, Brèches volcaniques, Cendres volcaniques, Epuration, Filtration, Granulats légers, Graves-Pouzzolanes-Chaux, Ile de La Réunion, Pouzzolanes, Pouzzolanité, Produits céramiques, Produits de terre cuite, Scories, Tufs.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Thibaut P.M., Cruchet M., Rançon J.Ph., coll. Rossi F., (2001) – Evaluation des ressources et potentiel de valorisation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion. Rapport BRGM/RP-50865-FR - 2001 SGR/REU 11, 36 p., 5 tab., 7 ann.

Synthèse

Dans le cadre de l'étude des potentialités des filières roches et minéraux industriels à La Réunion, des ressources très importantes en matériaux pouzzolaniques avaient déjà été identifiées par le BRGM, notamment en 1998.

Bien qu'une petite partie de ces ressources ait été activement exploitée jusqu'à un passé récent, beaucoup d'exploitations ont été arrêtées au fil des années, malgré des besoins clairement exprimés et sans cesse croissants.

Actuellement, l'exploitation des matériaux pouzzolaniques de l'île est limitée à quelques carrières, notamment pour la fabrication locale du ciment, en tant qu'ajout au clinker importé, et plus accessoirement pour des aménagements locaux de voiries communales, de terrains de sport et de parkings, pour la construction de fosses septiques, ou encore en horticulture.

Manifestement, la profusion de ces ressources en matériaux pouzzolaniques est nettement sous-exploitée, en regard de leurs potentialités d'utilisations locales et des réalisations effectuées avec succès dans d'autres régions volcaniques, notamment en Auvergne et aux Antilles françaises.

Afin d'analyser les perspectives d'utilisation industrielle ou artisanale de ces matériaux à La Réunion, la présente étude qui s'inscrit dans la programmation de Service Public du BRGM et bénéficie d'un financement à parts égales du BRGM et du Département de La Réunion, a été réalisée avec les objectifs suivants :

- établir la synthèse et le bilan de toutes les actions (expérimentations, tentatives d'utilisation...) conduites antérieurement à La Réunion ;
- à partir des données disponibles concernant leurs caractéristiques physico-chimiques et des résultats des expérimentations anciennes, procéder à des tests d'orientation complémentaires pour une meilleure caractérisation des matériaux ;
- sur la base du bilan des études antérieures, des résultats des tests complémentaires et des besoins de La Réunion, proposer les utilisations envisageables et leurs conditions d'emploi.

Après un examen des diverses ressources en matériaux pouzzolaniques identifiées dans l'île, un bilan de toutes les expérimentations d'utilisation réalisées jusqu'à présent à la Réunion a été établi, notamment :

- la mise à profit du pouvoir pouzzolanique dans la fabrication locale des mortiers et ciments ;
- les essais d'utilisation des pouzzolanes locales dans la technique routière Graves – Pouzzolanes – Chaux (GPC) ;
- les essais de fabrication de bétons légers et de parpaings en bétons de pouzzolane, et le projet de réalisation expérimentale « Habitat en matériau de pouzzolane » ;

- l'étude expérimentale d'utilisation des scories pour l'épuration et la filtration des eaux usées domestiques (assainissement autonome).

Dans le cadre de la présente étude, des travaux complémentaires ont été réalisés :

- un inventaire, un contrôle sur le terrain, et un échantillonnage des principaux gisements de matériaux pouzzolaniques de l'île ;
- des analyses chimiques et des tests complémentaires d'indice d'activité en laboratoire ;
- des essais de fabrication de produits céramiques.

Compte tenu, d'une part, des résultats positifs d'utilisation de ces matériaux constatés à l'issue des expérimentations antérieures et des nouveaux essais effectués au cours de cette étude, et, d'autre part, des besoins technico-économiques de La Réunion et des utilisations industrielles réalisées classiquement dans des régions à la géologie comparable, plusieurs axes de développement de la valorisation de ces matériaux locaux sont proposés :

- pérenniser l'utilisation des pouzzolanes dans la fabrication locale du ciment, véritable atout économique pour l'île, en réservant des ressources exploitables suffisantes pour les décennies à venir, face à l'extension de l'urbanisation sur une grande partie des gisements ;
- dans le secteur de la viabilité, favoriser l'utilisation des pouzzolanes pour la construction des chaussées (technique routière Graves – Pouzzolanes – Chaux), plutôt que d'utiliser systématiquement des granulats alluvionnaires concassés ;
- dans le secteur du bâtiment, relancer la fabrication de bétons légers et de parpaings à partir de pouzzolanes, la fabrication artisanale de céramiques, et envisager un nouveau projet de création d'une unité de fabrication industrielle de produits de terre cuite de bâtiment ;
- dans le secteur de l'agriculture, inciter, favoriser et intensifier l'utilisation des pouzzolanes comme amendement naturel des sols fortement argileux ou déficitaires en silice, en alcalis, en alcalino-terreux et en phosphore, notamment sur les sols pauvres constitués d'altérites lessivées et ferrallitisées, comme c'est le cas sur une grande partie de l'île, en particulier dans les plantations de canne à sucre, plutôt que de recourir à l'utilisation d'engrais chimiques, coûteux et néfastes pour l'environnement (pollution des nappes phréatiques).

Sommaire

1. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	7
2. BILAN DES ÉTUDES ANTÉRIEURES	9
2.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MATÉRIAUX PYROCLASTIQUES DE LA REUNION	9
2.1.1 Définitions	9
2.1.2 Tufs pyroclastiques différenciés	9
2.1.3 Scories basaltiques.....	10
2.2 MISE A PROFIT DU POUVOIR POUZZOLANIQUE DANS LA FABRICATION DES MORTIERS ET CEMENTS	11
2.3 UTILISATION DES POUZZOLANES DANS LA TECHNIQUE ROUTIÈRE GRAVES- POUZZOLANES-CHAUX (GPC) À LA RÉUNION	12
2.4 ESSAI DE FABRICATION DE BETONS LEGERS ET DE BLOCS EN BETONS DE POUZZOLANE PAR LE CEBTP EN 1985-1988.....	13
2.5 PROJET DE RÉALISATION EXPÉRIMENTALE (REX) « HABITAT EN MATÉRIAU DE POUZZOLANE » EN 1993	15
2.6 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D'UTILISATION DES SCORIES POUR L'ÉPURATION ET LA FILTRATION DES EAUX USÉES DOMESTIQUES (ASSAINISSEMENT AUTONOME) PAR M. MASSARI (ENSTIMA) EN 1987	16
3. ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES RÉALISÉES PAR LE BRGM EN 2000-2001	18
3.1 INVENTAIRE ET ÉCHANTILLONNAGE DES RESSOURCES EN MATÉRIAUX POUZZOLANQUES.....	18
3.2 ANALYSES ET TESTS COMPLÉMENTAIRES	22
3.2.1 Analyses chimiques des matériaux pouzzolaniques	22
3.2.2 Détermination de l'indice d'activité des matériaux pouzzolaniques	24
3.2.3 Essais de fabrication de produits céramiques.....	25
3.3 SECTEURS D'UTILISATION DES POUZZOLANES ET SPÉCIFICATIONS INDUSTRIELLES.....	27
3.3.1 Principaux secteurs d'utilisation	27
3.3.2 Autres secteurs d'utilisation.....	28
3.3.3 Spécifications industrielles	29
4. CONCLUSIONS	32
5. BIBLIOGRAPHIE	34

Liste des tableaux

Tableau 1 – Inventaire des gisements de pouzzolanes de La Réunion et échantillonnage.....	19
Tableau 2 - Composition chimique générale des pouzzolanes	22
Tableau 3 - Composition chimique de trois pouzzolanes de La Réunion	23
Tableau 4 - Caractéristiques granulométriques des matériaux pouzzolaniques par types d'utilisation.....	30
Tableau 5 – Spécifications granulométriques des matériaux pouzzolaniques entrant dans la composition des graves- pouzzolanes – chaux (d'après Fournier et Geoffray, 1978).....	31

Liste des annexes

Ann. 1 – Résultats synthétiques des tests réalisés sur les planches d'essai à partir des pouzzolanes de Saint-Pierre	
Ann. 2 – Principaux résultats synthétiques des essais de fabrication de bétons légers et de blocs en bétons de pouzzolane	
Ann. 3 – Principaux résultats de l'étude expérimentale d'utilisation des scories pour l'épuration et la filtration des eaux usées domestiques	
Ann. 4 (hors texte) – Cartes de situation des gisements de pouzzolanes de La Réunion et des échantillons prélevés	
Ann. 5 – Analyses chimiques de trois pouzzolanes et de deux matériaux argileux de La Réunion	
Ann. 6 – Indices d'activité de deux pouzzolanes de La Réunion	
Ann. 7 – Planches photographiques	

1. Objectifs de l'étude

Dans le cadre de l'étude des « potentialités des filières roches et minéraux industriels à La Réunion, réalisée par le BRGM depuis 1995, des ressources très importantes en matériaux pouzzolaniques, notamment en tufs et scories volcaniques, ont été identifiées dans l'île.

Certaines de ces ressources ont été exploitées jusqu'à un passé récent, comme en témoignent d'assez nombreux petits sites d'emprunt dans des cônes ou « pitons » de scories volcaniques, aujourd'hui abandonnés, ou d'anciennes carrières profondes, comme celle située au sud de Maison Rouge à Saint-Louis où l'on exploitait des tufs pyroclastiques cendro-ponceux.

Jusqu'à la fin des années 80, une exploitation de scories a eu lieu au voisinage de l'Anse des Cascades, commune de Sainte-Rose, par la société Protheré, pour la fabrication de plaques de protection thermique en aggloméré de scories + ciment. Dans les années 76-88, plusieurs études ont également été conduites par le CEBTP, Laboratoire de la Réunion, pour déterminer les possibilités d'utilisation des tufs pouzzolaniques de Saint-Pierre, tant en technique routière pour la confection des couches de chaussées en graves-pouzzolanes-chaux, que pour la fabrication de bétons légers. Tous les résultats se sont avérés positifs et plusieurs entreprises locales ont employé avec succès, à titre expérimental, les tufs de Saint-Pierre, dans les années 1979-1987. Malgré ces résultats, ils ne semblent plus être employés de nos jours à cet usage.

Actuellement, l'exploitation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion est réduite à quelques rares carrières, pour des utilisations somme toute assez limitées :

- tufs de Saint-Pierre exploités à La Saline, commune de Saint-Pierre, comme ajout au clinker importé pour la fabrication locale du ciment par la société « Les Ciments de Bourbon »,
- scories basaltiques, exploitées dans quelques pitons de la plaine des Palmistes et près de Bourg Murat ; concassées et criblées, elles sont essentiellement utilisées pour des aménagements de voiries communales ou de sites touristiques et paysagers, plus accessoirement dans certaines cultures horticoles ou pour la réalisation de terrains de sport compactés.

Mais la profusion des ressources en matériaux pouzzolaniques à La Réunion est très nettement sous-exploitée en regard de leurs potentialités d'utilisations locales. Bien que des besoins soient clairement exprimés (fabrication de bétons légers, de couches de chaussées, de produits céramiques tels que briques et carreaux pour le bâtiment, de matériaux de filtration...), aucune évaluation n'avait été faite jusqu'à présent sur le potentiel « ressources et valorisation » en matériaux pouzzolaniques à l'échelle de l'île.

Afin d'analyser les perspectives d'utilisation industrielle ou artisanale de ces matériaux, la présente étude cofinancée, à parts égales, par le BRGM dans le cadre de sa programmation de Service Public (fiche 2001-RES-409) et par le Département de La Réunion (convention n°17-00 en date du 30 mai 2000) a été réalisée avec les objectifs suivants :

- établir la synthèse et le bilan de toutes les actions (expérimentations, tentatives d'utilisation...) conduites antérieurement à La Réunion ;

- à partir des données disponibles concernant leurs caractéristiques physico-chimiques et les résultats des expérimentations anciennes, procéder à des tests d'orientation complémentaires pour une meilleure caractérisation de ces matériaux ;
- sur la base du bilan des études antérieures, des résultats des tests complémentaires et des besoins de La Réunion, proposer les utilisations envisageables pour ces matériaux et leurs conditions d'emploi.

2. Bilan des études antérieures

2.1 CONSIDERATIONS GENERALES SUR LES MATERIAUX PYROCLASTIQUES DE LA REUNION

2.1.1 Définitions

Les matériaux pyroclastiques résultent de la pulvérisation ou de la fragmentation dans l'air, du magma par un phénomène éruptif explosif. Du point de vue de leur granulométrie, ils regroupent, par ordre de diamètre croissant des particules : les poussières, les cendres (0-2 mm), les lapilli (2-64 mm), les blocs (> 64 mm)

Les produits pyroclastiques de La Réunion incluent deux principaux types de formations :

- les tufs et brèches pyroclastiques, de chimisme différencié (= riche en silice), correspondent à des dépôts d'écoulement (coulées et déferlantes) ;
- les scories, généralement basaltiques (dénommées « pouzzolaniques » en métropole), correspondent à des retombées de fragments de lave vésiculée, à partir d'une fissure éruptive ou d'un cône volcanique.

2.1.2 Tufs pyroclastiques différenciés

Les tufs pyroclastiques, quand ils ne sont pas trop remaniés, présentent un potentiel de valorisation dans la mesure où ils ont conservé leurs caractères originels (richesse en verre volcanique notamment) qui leur confèrent des propriétés particulières (réactivité chimique, faible densité, grande surface spécifique,...), recherchées pour diverses applications (additifs pour ciments, produits isolants, traitement d'effluents,...).

Quatre principaux ensembles de tufs volcaniques pyroclastiques différenciés qui présentent des caractères propres, sont reportés sur la carte géologique à 1/50 000 de La Réunion (Billard, 1974) : les tufs de Saint-Pierre, de Saint-Louis, de Saint-Gilles et de Sainte-Suzanne.

- Les tufs de Saint-Pierre, exploités au lieu-dit « La Saline », sont homogènes en grand (à l'échelle du gisement), consolidés, à matrice cendreuse et à éléments laviques variés du point de vue de leur texture (massive, scoriacée, ponceuse) et de leur nature (laves diverses, roches microgrenues), sans litage ni structure interne. Leur épaisseur à l'affleurement varie de 12 à 15 m et ils sont localement indurés en surface. Ils sont présents sous les alluvions anciennes dans le secteur de la Palissade à Saint-Louis où la coupe géologique-type, depuis la surface, est la suivante : alluvions (ép. 9 m), tufs volcaniques (ép. 6 m), laves massives sous-jacentes.
- Les tufs de Saint-Louis, au sud de Maison Rouge, se composent de 2 unités :
 - unité supérieure bien consolidée, de couleur marron clair, à éléments anguleux dominants ;
 - unité inférieure peu consolidée, de couleur grise, cendreuse, riche en éléments ponceux arrondis.

- Les tufs de Saint-Gilles sont très composites, constitués de brèches fortement consolidées et polygéniques, de formations scoriacées et de retombées trachytiques.
- Les tufs de Sainte-Suzanne sont bréchiques, hétérogènes et polygéniques, à matrice cendreuse. Leur épaisseur est de 30 m à l'ouest de Quartier Français, à Délices, et de l'ordre de 20 m au sud de Sainte-Suzanne. Ils sont, par endroits, intensément altérés en surface, sur quelques mètres d'épaisseur (altérites argilo-silteuses).

La ressource exploitable des tufs de Saint-Pierre et Saint-Louis, hors zone urbanisée a été estimée à plus de 10 millions de m³, valeur citée dans le Schéma Départemental des Carrières de La Réunion.

2.1.3 Scories basaltiques

Les scories sont de nature généralement basaltique et par leur accumulation concentrique autour d'un événement volcanique, elles participent à la construction de petits appareils volcaniques (cônes) et à leurs aires de saupoudrage adjacentes.

Les principales ressources se situent dans le sud de l'île, sur le pourtour du Piton de La Fournaise, de Montvert à Saint-Philippe, entre Sainte-Anne et Sainte-Rose, enfin dans les hautes plaines (plaine des Cafres et plaine des Palmistes). Jadis, les exploitations de cônes de scories y ont été très nombreuses et la qualité du matériau était souvent bonne.

Par ailleurs, sur les planèzes du massif du Piton des Neiges, des extractions de scories ont eu lieu dans la région de l'Etang Salé et jusque dans les hauts des Avirons.

Des ressources existent également dans les hauts de Saint-Paul, de Trois-Bassins et de Saint-Leu où elles font l'objet d'une exploitation occasionnelle ou permanente, comme à la carrière de Piton Saint-Leu.

Dans le nord et l'est de l'île, les ressources exploitables sont rares, car les cônes stromboliens présents sur les pentes du massif du Piton des Neiges sont, le plus souvent, plus anciens et altérés, parfois argilisés, ce qui peut constituer des ressources potentielles en matériaux argileux.

Autrefois intensément exploités, la plupart des cônes de scories pyroclastiques est maintenant protégée au titre de la protection des paysages.

Citée dans le Schéma Départemental des Carrières, la ressource exploitable en scories, à La Réunion, peut-être estimée globalement à plus de 5 millions de m³.

2.2 MISE A PROFIT DU POUVOIR POUZZOLANIQUE DANS LA FABRICATION DES MORTIERS ET CEMENTS

Le pouvoir pouzzolanique d'un matériau peut être défini comme l'aptitude à fixer de la chaux à température ordinaire et à former des composés ayant des propriétés mécaniques. Ce pouvoir est directement lié à la proportion de phase vitreuse contenue dans le matériau.

Classiquement, le pouvoir pouzzolanique d'un matériau se détermine en réalisant l'essai Chapelle modifié. Il suffit de mesurer, après 16 heures d'ébullition, la quantité de chaux consommée par la réaction d'un mélange constitué d'un gramme de pouzzolane, un gramme de chaux et 200 cm³ d'eau.

La réactivité des pouzzolanes¹ à la chaux s'apprécie en contrôlant la résistance à la compression simple d'un mélange de pouzzolane broyée à 0/3 mm et de chaux, dans les proportions suivantes :

- pouzzolane broyée 0/3 mm : 80 %
- chaux aérienne éteinte : 20 %
- eau : 9 %

La résistance à la compression (Rc) doit être supérieure à 10 MPa (environ 100 bars) à 180 jours.

Trois types de matériaux pouzzolaniques sont habituellement distingués :

- | | |
|-------------------|------------------|
| * très réactifs : | Rc > 15 MPa |
| * réactifs : | 10 < Rc < 15 MPa |
| * peu réactifs : | Rc < 10 MPa |

Remarque : Il est démontré que les performances obtenues croissent avec la finesse du broyage.

a) Essais de prise réalisés par le BRGM en 1964 sur différents mélanges ciment/pouzzolane

Ces essais ont été réalisés sur des pouzzolanes grises et rouges échantillonnées dans l'ancienne carrière de l'APECA à Piton Dugain, et prélevées à la Grande Montée (altitude 1450 m), commune de la Plaine des Palmistes, sur des horizons noirs. Elles ont été mélangées dans différentes proportions à du ciment Portland CPA 210-325 ou à un mortier de sable + ciment.

Dans tous les cas, les essais de prise ont permis d'indiquer que ces pouzzolanes ont un pouvoir pouzzolanique actif, et plus particulièrement celles qui ont une couleur grisâtre. Les caractéristiques obtenues avec les différents mélanges CPA/pouzzolanes sont toujours supérieures à celles imposées par les normes, notamment les résistances à la compression à 7 et 28 jours (respectivement 231 à 284 kg/cm² à 7 jours, pour un seuil fixé par la norme de l'époque à 210 kg/cm², et 341 à 431 kg/cm² à 28 jours, pour un seuil fixé à 325 kg/cm²).

¹ Au cours de la réaction pouzzolanique, il y a attaque alcaline des minéraux silico-alumineux acides par la solution saturée de chaux, puis combinaison des ions résultant de cette attaque avec la chaux en solution. La cristallisation d'aluminate tétracalcique hydraté et de silicate de calcium hydraté peut être mise en évidence

b) Ajout de pouzzolane dans la fabrication locale du ciment

Le gisement de pouzzolanes de Saint-Pierre, connu localement sous le nom de tufs de Saint-Pierre, a fait l'objet d'une étude détaillée par le BRGM en 1966. Le volume global des ressources géologiques y a été estimé à environ 30 Mm³. Mais, compte tenu de l'urbanisation de ces dernières années et de différentes contraintes environnementales, le volume exploitable se limite à 6 ou 8 Mm³, ce qui est malgré tout assez considérable.

Ce tuf, à haut pouvoir pouzzolanique et de composition chimique moyenne assez constante dans le gisement, est ajouté au clinker importé et à un faible pourcentage d'anhydrite (gypse anhydre) pour la fabrication locale des ciments, par la société des Ciments de Bourbon (groupe Macoré), depuis le début des années 70.

L'intérêt premier de l'utilisation de la pouzzolane dans la fabrication du ciment est économique, car utilisée en tant que charge inerte de faible coût de revient, son ajout dans d'assez fortes proportions pondérales permet de réduire très sensiblement les coûteuses importations de clinker. On notera en effet que dans la période 1990-1995, environ 52 000 à 72 000 t de tufs de Saint-Pierre ont été ajoutées annuellement (source : Odent, 1999, d'après CRIC, Macoré, Wong-Wing-Cheung).

En outre, cette activité « pouzzolane » est considérée par les Ciments de Bourbon comme un symbole, car elle contribue au maintien de l'emploi à La Réunion : « utiliser la pouzzolane, c'est une plus-value pour l'île ».

Le second intérêt est technique, car l'ajout de la pouzzolane permet d'augmenter la résistance à long terme du béton.

Les Ciments de Bourbon produisent deux qualités de ciments pouzzolaniques :

- le ciment CPJ (15 % de pouzzolane) utilisé pour les bétons de haute qualité ;
- le ciment CPZ (35 % de pouzzolane) utilisé pour les bétons maigres et les enduits (mortier).

2.3 UTILISATION DES POUZZOLANES DANS LA TECHNIQUE ROUTIERE GRAVES-POZZOLANES-CHAUX (GPC) A LA REUNION

La technique routière des graves-pouzzolanes-chaux a été expérimentée dès 1969 par le Laboratoire des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand et s'est ensuite progressivement étendue dans le département du Puy-de-Dôme pour la réalisation de chantiers de renforcements coordonnés et de chaussées neuves à fort trafic.

Les mélanges qui offrent des performances suffisantes pour être utilisées en couche de base des chaussées à fort trafic sont composés de 70 à 80 % de grave concassée reconstituée 0/20 et de 20 à 30 % d'un liant comportant 80 % de pouzzolanes broyées 0/3 et 20 % de chaux.

Le matériau peut être mis en place par temps de pluie et sous circulation sans inconvénient. Le comportement des chaussées dotées d'une assise en Gpc est satisfaisant. Les performances à long terme sont intéressantes malgré une évolution lente de la prise.

A La Réunion, des essais analogues ont été réalisés dans les années 1976-1980 (Chevin, CEBTP, 1984) sur différentes planches de chaussées, et plus récemment, cette technique a été utilisée avec succès, notamment pour la déviation de Sainte-Suzanne et pour la construction des remblais de l'échangeur du boulevard Banks à Saint-Pierre. On trouvera en annexe 1 les résultats synthétiques des essais réalisés sur les planches d'essai à partir des pouzzolanes de Saint-Pierre.

En conclusion à ces études à La Réunion, P. Chevin (op.cit.) souligne : « les résultats de tous les essais conduits jusqu'à présent sur les pouzzolanes de Saint-Pierre », [en particulier] les techniques « blanches » de chaussée (grave-pouzzolane-chaux), étant positifs, aucune raison technique ne s'oppose à une large utilisation d'un matériau d'extraction facile qui existe en grande quantité à La Réunion ». Il ajoute en outre : « Sans risque technique, dès à présent, la grave-pouzzolane-chaux peut être substituée à la grave bitume dans les corps de chaussée » [...].

2.4 ESSAI DE FABRICATION DE BETONS LEGERS ET DE BLOCS EN BETONS DE POZZOLANE PAR LE CEBTP EN 1985-1988

Dans le but de valoriser les gisements de pouzzolane de Saint-Pierre et de mettre à la disposition des maîtres d'ouvrage et des entrepreneurs des matériaux locaux présentant des qualités satisfaisantes de résistance mécanique et d'isolation thermique, une étude et des essais de fabrication de bétons légers de pouzzolane ont été réalisés par le Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP), Laboratoire de La Réunion, durant la période 1985-1988. On note la participation de l'Université de La Réunion pour la réalisation des essais thermiques sur éprouvettes, et de l'entreprise SCPR pour la préparation des granulats et la fabrication industrielle des blocs.

L'ensemble de ces travaux a été financé par le ministère de la Recherche (MRES), avec la participation du Conseil Régional de La Réunion, de l'AFME et de l'entreprise SCPR. Ils font l'objet du rapport de fin d'étude de P. Chevin, de mars 1988.

Après une étude détaillée des caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des pouzzolanes, des essais de fabrication de bétons pleins et de bétons caverneux de pouzzolane ont été réalisés suivant différentes formulations de composition (proportions des granulats de pouzzolane 0/5, 5/10 et 10/20 mm, l'ajout ou non de sable lourd basaltique, le type de ciment et son dosage, ...).

Dans une deuxième phase d'étude, des essais de fabrication de blocs creux de 17,5 x 20 x 40 cm en bétons de pouzzolanes ont été effectués suivant différentes compositions en granulats de pouzzolane (fractions 6/10, 4/6, 0/4 mm) et différentes teneurs en ciment CPJ35 et en eau.

Sans entrer dans le détail de tous ces travaux, on peut en retenir, à la suite de P. Chevin (op.cit), les conclusions suivantes :

- **En ce qui concerne les matériaux bruts du gisement de tuf de Saint-Pierre**, le tout-venant moyen est de la classe 0/50 mm. Le tamisat à 80 μ m et le refus à 20 mm représentent respectivement 9 % et 15 % du volume total. La courbe granulométrique du matériau brut contient, par ailleurs, 51 % d'éléments de 0,08/5 mm, 15 % de 5/10 mm et 10 % de 10/20 mm (annexe 2). L'extraction du matériau est facile et requiert des engins de terrassement courants.

Après concassage et criblage, quatre classes de granulats pourraient être élaborées : un sable 0/5 mm peu fillérisé et deux gravillons 5/10 mm et 10/20 mm destinés aux bétons légers, et par ailleurs un sable 0/1 mm ou 0/2 mm fillérisé, destiné à corriger la granularité des bétons de granulats lourds et à accroître la résistance de ces derniers par effet pouzzolanique. Si, dans un premier temps, il est difficile de calibrer parfaitement le sable, les essais réalisés montrent qu'il est possible d'obtenir des bétons légers satisfaisants avec un sable 0/5 mm brut de criblage.

La valorisation du gisement de tuf de Saint-Pierre passe nécessairement par la production (par concassage – criblage) de sables et de gravillons légers de pouzzolanes bien classés, qui permettront la reconstitution des granulométries précises qu'exigent les produits élaborés.

La fabrication de granulats légers de pouzzolane nécessite moins d'énergie (réduction granulométrique et dureté plus faibles) que celle des granulats de basalte. L'importance des réserves est une garantie de l'utilisation durable d'équipements spécifiques bien adaptés.

- **En ce qui concerne les bétons légers de pouzzolane confectionnés en laboratoire**, P. Chevin admet qu'ils « appartiennent, selon leur composition granulométrique, aux classes II, III ou IV du projet de classification de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics (élaboré initialement pour les granulats de schiste ou d'argile expansés). Les propriétés des granulats de pouzzolane de Saint-Pierre ne permettent donc pas d'obtenir les bétons des classes extrêmes : I (très léger et très isolant) ou V (très résistant) (annexe 2).

Une conductivité thermique inférieure à 0,6 W/m⁻¹·K⁻¹ et une résistance à la compression supérieure à 10 MPa, voire 20 MPa, peuvent être obtenues sans difficulté. Par contre, tant qu'un sable fortement fillérisé sera utilisé, le poids volumique sec des bétons pleins pourra difficilement descendre en-dessous de 15 kN/m³.

Le retrait à l'air est plus élevé que celui des bétons de granulats lourds : il est de l'ordre de 1 mm/m ; 80 % de cette valeur sont atteints durant les trois premiers mois. Il s'agit donc d'un retrait important dont il faudra tenir compte dans les applications.

Dès à présent, il est possible de produire des blocs préfabriqués dont la plus grande partie du retrait (surtout si les blocs sont étuvés) se fait durant la période de séchage précédant la mise en œuvre. Pour des pièces de grandes dimensions, il paraît prudent de passer par une phase expérimentale en vraie grandeur avant de lancer des ouvrages ou des programmes importants ».

En conclusion, les résultats de ces essais de fabrication des bétons légers étant globalement positifs, P. Chevin estime que « la fabrication de blocs de bétons légers de pouzzolane peut être lancée dès maintenant (ceux-ci entraînent une diminution de poids : $1,5 \text{ t/m}^3$ au lieu de $2,5 \text{ t/m}^3$ pour les bétons lourds et un meilleur confort par isolation thermique) ». A ce propos, il rappelle que plusieurs entreprises locales ont déjà employé avec succès les pouzzolanes de Saint-Pierre, à titre expérimental : notamment l'entreprise SCPR en 1986 pour la fabrication de blocs préfabriqués, et l'entreprise BCR en 1987 pour la réalisation d'une chape en béton léger. Néanmoins, il admet que « le risque de déboires dû au retrait conduit à déconseiller actuellement les bétons de pouzzolane de Saint-Pierre dans des éléments de grande dimension ; une telle utilisation serait prématurée avant la fin d'une phase expérimentale qui devrait permettre de préciser les conditions locales d'emploi et de mise en œuvre, et éventuellement leurs limites ».

Le programme de cette étude prévoyait la construction, en 1988, d'un pavillon expérimental en bétons de pouzzolane, par l'entreprise PREBAT. Mais celle-ci ne semble pas avoir eu lieu.

2.5 PROJET DE REALISATION EXPERIMENTALE (REX) « HABITAT EN MATERIAU DE POZZOLANE » EN 1993

Le 27 décembre 1993, une convention a été signée entre les établissements Gouvenet/Sobepre (entreprise/maître d'ouvrage et mandataire de l'équipe) et l'Etat (Secteur Pilote d'Innovation Outre-Mer) représenté par le Préfet de La Région et du Département de La Réunion, pour la réalisation expérimentale (REX) du projet « Habitat en matériau de pouzzolane ».

L'opération support de cette expérimentation comportait la réalisation de 10 Logements Evolutifs Sociaux (L.E.S.) en secteur diffus sur la commune de Sainte-Rose. Les principaux objectifs de l'expérimentation étaient « de promouvoir l'utilisation de la pouzzolane en produisant des éléments manufacturés tels que des parpaings pour la structure des bâtiments et de vulgariser auprès des acteurs de la filière B.T.P. les intérêts d'exploitation de ce matériau de base.

Dans ces perspectives, la réalisation expérimentale consistera en :

- la mise au point sur le plan technique de la production et de l'utilisation du (ou des) élément(s) envisagé(s), en étudiant les incidences probables à la baisse sur les coûts de matière première et plus globalement de construction ;
- l'analyse de la qualité de réponse apportée à l'occupant par le biais du produit proposé en mettant particulièrement en exergue les performances techniques des composants élaborés en comparaison à ceux utilisés à l'accoutumée. Suivant les économies réalisées, des prestations complémentaires seront proposées pour les logements autant que possible.

Au-delà d'une augmentation de la valeur ajoutée locale proprement dite et d'aspects technico-économiques présumés plus favorables, l'intérêt de l'expérience peut se traduire par une adaptation de l'habitat et ses concepts aux spécificités d'une île tropicale et surtout volcanique ».

L'opération devait s'articuler en plusieurs étapes successives :

- étape 1 : synthèse des enseignements connus sur la pouzzolane (intervenant : CEBTP) ;
- étape 2 : examen de la faisabilité technico-économique du projet (intervenant : DDE-Réunion et CEBTP) ;
- étape 3 : approfondissement des réflexions techniques et conception optimale des éléments (intervenant : CEBTP, SOCOTEC, Université de La Réunion, SOCETEM) ;
- étape 4 : lancement de la production et réalisation d'un prototype logement (intervenant : SOCOTEC et Etablissements Gouvernet) ;
- étape 5 : poursuite de l'exécution des logements (intervenant : SOCOTEC et Ets. Gouvernet).

Finalement, l'opération n'a pas été réalisée pour des raisons techniques.

2.6 ETUDE EXPERIMENTALE D'UTILISATION DES SCORIES POUR L'EPURATION ET LA FILTRATION DES EAUX USEES DOMESTIQUES (ASSAINISSEMENT AUTONOME) PAR M. MASSARI (ENSTIMA) EN 1987

En raison de l'aggravation des nuisances et des risques écologiques consécutifs à l'accroissement démographique et à l'urbanisation dans l'île, une étude expérimentale portant sur la détermination des capacités épuratoires des sols de La Réunion vis-à-vis des polluants chimiques et bactériologiques a été réalisée par l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines d'Alès (Massari, 1987), à la demande du Conseil Régional de La Réunion.

L'objectif de l'étude était d'apprécier la faisabilité de la filière utilisant les matériaux de substitution en assainissement autonome, de connaître le pouvoir d'auto-épuration de certains sols en place, mais également de déterminer les matériaux qui pourraient être utilisés dans une filière de substitution locale.

Six matériaux locaux sélectionnés en fonction de différents critères, ont été testés :

- scories de la carrière du Gros Piton Rond, commune de la Plaine des Palmistes ;
- scories de la carrière Payet du Piton Hyacinthe, commune du Tampon ;
- tufs pouzzolaniques de la carrière de La Saline à Saint-Pierre ;
- sables basaltiques dunaires de la carrière Vassor à Etang-Salé ;
- sables basaltiques alluvionnaires de la station de concassage de la SCPR au Port ;
- sables coralliens de la carrière de la Ravine de l'Hermitage, commune de Saint-Gilles.

Après une étude détaillée des caractéristiques physico-chimiques et minérales de ces 6 granulats (annexe 3), des essais de filtration sur colonnes ont été réalisés en laboratoire, à partir d'un effluent de décantation primaire de la station d'épuration par boues activées de la ville d'Alès (eaux usées urbaines). De très nombreux paramètres ont été mesurés, tant sur les filtrats que sur les massifs filtrants (annexe 3).

Il ressort de ces expérimentations que pour l'ensemble des matériaux, d'excellents rendements d'épuration ont été obtenus. Par rapport à un ensemble de critères d'appréciation globale de la qualité de l'eau (grille multi-usages en fonction de la qualité de l'eau, voir annexe 3), les effluents épurés (percolats) par ces matériaux se classent parmi les eaux pouvant satisfaire tous les usages, sauf pour les scories de Tampon, de classe granulométrique plus grossière où l'eau épurée est de « qualité passable suffisante pour l'irrigation, les usages industriels, la production d'eau potable après un traitement poussé ».

Par conséquent, selon M. Massari, pour les habitations implantées sur ces 6 matériaux en tant que sols en place, ces derniers peuvent constituer d'excellents massifs épurateurs, à part les scories grossières qui nécessiteraient une hauteur de filtration plus importante. Mais en raison de critères économiques (importance des ressources exploitables), des rendements d'épuration et surtout de la composante des écosystèmes épurateurs ayant un rôle important pour la viabilité du système à long terme, il préconise l'emploi en assainissement autonome², comme matériaux de substitution aux sols naturels lorsque ceux-ci s'avèrent inaptes à l'infiltration et à l'épuration des effluents, soit de scories de classe granulométrique adaptée, analogue à celle des scories de la carrière Gros Piton Rond³ de la Plaine des Palmistes (annexe 3), soit de sables d'origine volcanique.

Il souligne toutefois « qu'une expérience dans des conditions réelles de fonctionnement est nécessaire afin de confirmer ces résultats de laboratoire »

² Par exemple en épandage par tranchées filtrantes ou en massif filtrant rapporté.

³ Caractéristiques de la répartition granulométrique des scories de la carrière Gros Piton Rond (Plaine des Palmistes) : coefficient de courbure = $(d_{30})^2/d_{60}d_{10} = 2,00$; coefficient d'uniformité = $d_{85}/d_{15} = 11,2$; coefficient d'Hazen = $d_{60}/d_{20} = 3,2$; $d_{50} = 6,3$.

3. Etudes complémentaires réalisées par le BRGM en 2000-2001

3.1 INVENTAIRE ET ECHANTILLONNAGE DES RESSOURCES EN MATERIAUX POUZZOLANQUES

Dans le cadre de l'étude des filières « Roches et Minéraux Industriels » de La Réunion, réalisée par le BRGM en 1998, d'importantes ressources en matériaux pouzzolaniques ont été identifiées sur l'île (Rocher, 1998).

La description lithologique de ces formations pyroclastiques a été donnée en début de ce rapport, dans le paragraphe 2.1, tandis que leur localisation est reportée sur les cartes de l'annexe 4, hors texte.

Dans le cadre de la présente étude, la plupart de ces gisements ont été revisités, échantillonnés et photographiés (voir planches photographiques en annexe 7), sauf toutefois quelques gîtes présentant moins d'intérêt en raison de leur hétérogénéité lithologique (tufs de Saint-Gilles et de Sainte-Suzanne), de leur situation plus excentrique par rapport aux voies d'accès, facteur défavorable dans le cas d'un projet d'exploitation (Pitons Mare à Boue, Piton Rouge, Piton Maho..., commune de la Plaine des Palmistes), ou situés dans des zones protégées au titre de l'environnement (Piton Doret, Piton Dugain, Piton Hyacinthe, ...). D'autre part, la plupart de ces cônes de scories supportent en leur sommet, soit un réservoir d'eau, soit un pylône de transmission, soit encore un oratoire (Piton des Forges, Piton Dugain, ...), contrainte supplémentaire à un éventuel projet d'exploitation.

Par ailleurs, pour des raisons environnementales évidentes, on a volontairement négligé un grand nombre de gisements potentiels situés à proximité ou dans les parties internes, intracaldériques, du massif du Piton de La Fournaise (par exemple, Piton des Cabris, Piton Misère, Piton Rouge...), les gisements de scories de Piton de la Balman et Piton Moka, et ceux situés au voisinage de l'Anse des Cascades, commune de Sainte-Rose.

Dans le tableau 1, on trouvera l'inventaire des échantillons représentatifs prélevés dans les principaux gisements. Après leur regroupement, trois échantillons représentatifs de tous les gisements visités ont été sélectionnés pour analyses et tests.

Ressources et potentiel de valorisation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion

Commune	Lieu-dit	Lithologie	Numéro d'échantillon
Sainte-Anne	Piton Belle-Rive	Petit cône de scories basaltiques rouges peu cohérentes, très vésiculées (diamètre : qq. mm à qq. cm, avec quelques éléments de 20 à 40 cm) ancienne exploitation abandonnée.	S/SAn 1
Sainte-Anne	Piton Armand ou Piton de Sainte-Anne	Gros cône de scories basaltiques litées. Alternance de lits de scories fines (quelques mm à qq. cm) et plus grossières (jusqu'à 40 cm). Exploitation abandonnée. Réserves très importantes.	S/SAn 2
Sainte-Anne	Puy de l'Etang	Cône de scories rougeâtres non soudées, avec nombreux fragments de basalte.	S/SAn 3
La Plaine des Palmistes	L'Evêché Route de la Petite Plaine (D 55)	Gros cône de scories rouges. Exploitation périodique par société SBTPL	S/PP 1
La Plaine des Palmistes	Gros Piton Rond	Gros cône de scories rouges litées, avec alternance de lits d'éléments fins et de lits d'éléments grossiers, avec blocs de basalte (10 à 60 cm). Deux anciennes carrières abandonnées, dont une aménagée en point pique-nique.	S/PP 1
La Plaine des Palmistes	Piton Villers (pied nord)	Gros cône de scories rouges et grises litées avec une coulée basaltique intercalaire vers la base. Réserves très importantes. En cours d'exploitation par société SBTPL. Grosse installation de concassage / criblage. Granulométries fabriquées : 0-4 mm ; 0-6mm, 4-6 mm ; 6-10 mm ; 10-15 mm ; 20-40 mm ; 10-20 mm ; 0-15 mm (sâle) ; 0-30 mm (sâle) ; lave concassée : 0-30 mm et 0-80 mm.	S/PP 3 (A à H)

Tableau 1 – Inventaire des gisements de pouzzolanes de La Réunion et échantillonnage

Ressources et potentiel de valorisation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion

Commune	Lieu-dit	Lithologie	Numéro d'échantillon
Saint-Pierre	Piton de Mont Vert à Mont Vert les Bas	Gros cône de scories rouges dont le sommet et les flancs sont très argilisés. Pas de fragments de lave basaltique. Ancienne exploitation apparemment abandonnée.	S/ SPi 1
Plaine des Palmistes	La Grande Montée (environ 2,1 km au nord du col de Bellevue)	Ensemble de cônes et d'épandages de scories rouges ou noires, bien litées (diamètre qq. mm à qq. cm). Epaisseur apparemment importante.	S/PP 4
Saint-Louis	Maison Rouge	Ancienne carrière de pouzzolane abandonnée, transformée en circuit moto cross. Epaisseur totale visible : 5 à 6 m. - au sommet : pouzzolane sablo-caillouteuse brun-clair à nombreux fragments lithiques de qq. cm à 50 cm. Epaisseur 1,5 à 2 m. - en profondeur : pouzzolane sablo-graveleuse litée, grise à gris-noir, avec nombreux fragments de ponce (diamètre 0,5 à 4 cm). Nombreux lits de cendres indurées (épaisseur 8 à 12 cm).	P/SLo 1 (A et B)
Saint-Pierre	La Saline	Grande carrière active dans le tuf de Saint-Pierre Pouzzolane gris-beige, cendreuse et ponceuse, assez cohérente, avec nombreux fragments de ponce noirâtre (diamètre qq. cm à 25 cm). Epaisseur totale visible : 20 à 30 m Au sommet : coulée basaltique de 2 à 3 m d'épaisseur.	P/SPi 2 (A et B)
L'Etang-Salé	Le Gros Piton	Ancienne carrière de scories très ferrallitisées, très soudées en cuirasse latéritique très résistante. Peu d'intérêt.	S/ES 1

Tableau 1 (suite 1) – inventaire des gisements de pouzzolanes de La Réunion et échantillonnage

Commune	Lieu-dit	Lithologie	Numéro d'échantillon
L'Etang-Salé	Piton Rouge	Ancienne carrière ouverte dans un petit cône aplati. Scories très soudées en cuirasse latéritique très résistante. Peu d'intérêt.	S/ES 2
Le Tampon	Piton de la Ravine Blanche	Gros cône de scories rouges avec ancienne carrière sur son flanc nord.	S/LT 1
Saint-Joseph	Pitons de Manapany	Ensemble de plusieurs pitons imbriqués de scories basaltiques rougeâtres.	S/SJ 1
Saint-Joseph	Piton Babet	Piton de scories rougeâtres, anciennement exploité sur son flanc nord-est.	S/SJ 2

Tableau 1 (suite 2) - Inventaire des gisements de pouzzolanes de La Réunion et échantillonnage

3.2 ANALYSES ET TESTS COMPLEMENTAIRES

3.2.1 Analyses chimiques des matériaux pouzzolaniques

D'une façon générale, la composition chimique moyenne des pouzzolanes de différentes origines de par le monde, est la suivante (en %) :

SiO ₂	42	à	55
Al ₂ O ₃	12	à	24
Fe ₂ O ₃	8	à	20
CaO	4	à	11
MgO	1	à	10
Na ₂ O	2,5	à	6
K ₂ O	0,8	à	4
FeO	0,5	à	4
TiO ₂	0,5	à	2,5
MnO	0,1	à	0,2
S	0	à	0,06
SO ₃	0	à	0,12
P ₂ O ₅	0	à	0,8
Perte au feu	0,2	à	3
Traces de : baryum, chrome, cobalt, nickel, rubidium, strontium, vanadium, zinc.			

Tableau 2 - Composition chimique générale des pouzzolanes

Elles sont donc essentiellement constituées de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃), et d'oxyde ferrique (Fe₂O₃), mais renferment également des quantités non négligeables d'alcalis (oxyde de sodium : Na₂O et oxyde de potassium : K₂O) et d'alcalino-terreux (chaux : CaO et magnésie : MgO).

Il est apparu nécessaire de vérifier la composition chimique de plusieurs matériaux pouzzolaniques de La Réunion, celle-ci pouvant avoir une grande importance dans certaines utilisations, notamment dans la filière céramique.

Trois matériaux pouzzolaniques, représentatifs des différents gisements de La Réunion ont été sélectionnés pour subir ces analyses :

- scories basaltiques rouges de la carrière SBTPL au pied du Piton Villers, commune de la Plaine des Palmistes (échantillon S/PP3A correspondant au produit marchand de granulométrie 0-4 mm) ;

Ressources et potentiel de valorisation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion

- tufs pouzzolaniques de Saint-Pierre, dans la carrière de « La Saline », prélevés sur le front de taille à 10 m de profondeur par rapport à la surface naturelle (échantillon P/SPi2A et 2B) ;
- tufs pouzzolaniques de Saint-Louis, prélevés sur le front de taille de l'ancienne carrière située au sud du lieu-dit « Maison Rouge » (échantillon P/SLo2).

Les analyses chimiques de ces trois matériaux ont été effectuées par spectrométrie de fluorescence X, dans les laboratoires du BRGM à Orléans (annexe 5).

Les rapports d'analyses sont joints en annexe et les résultats sont synthétisés dans le tableau 3 (en %).

Echantillon Analyse	S/PP3A Scories Piton Villers	P/SPi2A Tufs de Saint-Pierre	P/SLo2 Tufs de Saint- Louis
SiO ₂	45,9	54,9	54,8
Al ₂ O ₃	13,9	16,2	16,1
Fe ₂ O ₃	13,5	10,3	10,4
cab	9,4	5,2	5,2
MgO	9	2,3	2,4
Na ₂ O	2,7	4,2	4,1
K ₂ O	0,86	2,34	2,29
TiO ₂	2,80	1,96	1,96
MnO	0,18	0,20	0,21
P ₂ O ₅	0,35	0,33	0,34
Perte au feu à 1000°C	0,4	1,8	2,2

Tableau 3 - Composition chimique de trois pouzzolanes de La Réunion

Les compositions chimiques de ces trois matériaux s'inscrivent assez bien dans la composition moyenne de référence obtenue sur des pouzzolanes de différentes origines (tableau 2), mais elles se caractérisent néanmoins, pour l'échantillon S/PP3A, par une très forte teneur en oxyde de titane, et pour deux des trois échantillons, par une perte au feu plus élevée.

Comparées entre elles, les caractéristiques lithologiques et les compositions chimiques de ces trois matériaux laissent apparaître deux catégories de produits :

- les tufs de Saint-Pierre et de Saint-Louis, de texture essentiellement ponceuse, et de composition chimique très voisine, essentiellement caractérisée par une forte teneur en silice ;
- les scories basaltiques très vésiculées, du Piton Villers à la plaine des Palmistes, nettement plus pauvres en silice, en alumine et en alcalis (Na₂O+K₂O), mais en revanche, sensiblement plus riches en oxyde de fer et de titane et en alcalino-terreux (CaO+MgO).

En fonction des utilisations envisagées, la différence de composition chimique entre ces deux types de matériaux peut justifier le choix de l'un plutôt que de l'autre (dégraissant siliceux pour mélange de matières premières dans l'industrie céramique ; apport d'alcalis (fondants) pour la préparation des pâtes céramiques ou pour l'amendement des sols, ...).

3.2.2 Détermination de l'indice d'activité des matériaux pouzzolaniques

L'indice d'activité des scories basaltiques du Piton Villers, à la plaine des Palmistes, et des tufs de Saint-Pierre, carrière de « La Saline », a été déterminé à partir de deux échantillons représentatifs, respectivement S/PP3A et P/SPi2B.

La réalisation de ces essais spécifiques a été confiée au laboratoire du Service Recherche Matériaux du CEBTP, à Saint-Rémy-les-Chevreuse.

Les essais ont été réalisés selon les prescriptions de la Norme EN 196-1, sur la fraction granulométrique 0,80µm de chacun des échantillons, après concassage de l'échantillon S/PP3A, initialement de granulométrie 0-4mm, et après tamisage de l'échantillon P/SPi2B (tuf de Saint-Pierre cendreux à gros éléments de ponce).

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes 4x4,16 cm, à base de ciment CEM I 42,5 de Saint-Pierre- La Cour, adapté pour les essais d'indice d'activité.

Les éprouvettes ont été préparées selon les prescriptions de la norme NF EN 196-1, à partir de 3 compositions de mortiers :

- mortier témoin composé de 450g de ciment CEM I 42,5 et de 225 g d'eau ;
- mortier à base de 25 % de tuf de Saint-Pierre (P/SPi2B), 75 % de CEM I 42,5 et de 225 g d'eau ;
- mortier à base de 25 % de scories (S/PP3A), 75 % de CEM I 42,5 et de 225 g d'eau.

Après cure de 28 jours à 20 °C et 100 % d'humidité relative, les résistances en compression de chacune des séries d'éprouvettes sont mesurées. L'indice d'activité de chacun des deux matériaux testés est déterminé par le rapport entre la résistance à la compression à 28 jours du mortier avec le tuf ou la scorie, et la résistance à la compression à 28 jours du mortier témoin composé uniquement de ciment.

Les résultats détaillés de ces essais sont joints en annexe 6.

L'indice d'activité de la scorie de la plaine des Palmistes (S/PP3A) est de 0,72 ; elle est similaire aux valeurs enregistrées communément pour les fillers calcaires et siliceux.

L'indice d'activité du tuf de Saint-Pierre (P/SPi2B) est de 0,80 ; cette valeur est similaire aux valeurs obtenues classiquement à partir de cendres volantes ou de laitiers de haut fourneau.

Ces résultats permettent de conclure que la scorie de la plaine des Palmistes n'a pas d'activité pouzzolanique, à l'inverse du tuf de Saint-Pierre. Ces résultats n'excluent pas leur utilisation en tant qu'ajout aux bétons hydrauliques, même pour la scorie de la plaine des Palmistes. En effet, comme le souligne le CEBTP, l'indice d'activité n'est qu'un paramètre parmi d'autres tout aussi importants pour la valorisation de ces

matériaux. Parmi les autres caractéristiques importantes des matériaux pulvérulents, on peut citer :

- le besoin en eau ;
- la morphologie des grains, la texture et la porosité ;
- la capacité de remplissage ;
- la granulométrie et la surface spécifique ;
- la composition chimique et minéralogique.

3.2.3 Essais de fabrication de produits céramiques

Parallèlement à cette étude de valorisation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion, une étude de valorisation des matériaux argileux de l'île a été menée, notamment dans la perspective de fabrication de produits céramiques, en particulier de produits de terre cuite et de grès. Cette étude a fait l'objet du rapport BRGM/RP-50866-FR - 2001 SGR/REU 10, auquel on se reportera pour le détail de ces essais.

Pour éviter les redondances avec cette étude, on se limitera donc ici à en résumer les grandes lignes, notamment en soulignant l'intérêt de l'ajout d'un pourcentage important de matériaux pouzzolaniques dans la composition du mélange des matières premières utilisées pour la préparation de la pâte.

La Réunion ne dispose pratiquement pas de ressources en argiles, sédimentaires ou alluviales, susceptibles d'être utilisées classiquement pour la fabrication de produits céramiques, en raison de la nature volcanique des formations géologiques qui composent son sous-sol.

Les seuls matériaux argileux disponibles, correspondent aux produits d'altération météorique ou hydrothermale des coulées de lave et de certains cônes de scories, souvent très altérés en surface, plus ou moins argilisés, mais toujours ferrallitisés. Ces altérites ont une composition minéralogique et chimique particulière, très différente de celle d'une argile utilisée classiquement dans l'industrie céramique ; elles ne permettent donc pas d'être utilisées à elles seules ou en de fortes proportions dans la composition du mélange de matières premières pour produits céramiques.

En effet, outre le fait qu'elles manquent de plasticité (faible proportion de minéraux argileux $< 2 \mu\text{m}$), ces altérites sont particulièrement caractérisées par :

- un fort déficit en silice (4 à 36 %, au lieu de 45-65 %) ;
- une assez forte teneur en alumine (19-39,5 %, au lieu de 12-20 %) ;
- une très forte teneur en fer (19-36 %, au lieu de 4-8 %) ;
- une très faible teneur en alcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 0,1 \text{ à } 0,6 \%$, au lieu de 2 à 5 %) ;
- une perte au feu importante (10 à 23 %, au lieu de 3 à 10 %) ;
- un fort retrait à la cuisson à 1030°C (6,9 à 8,8 %, au lieu de 1 à 5 %).

D'ailleurs, les premiers tests de fabrication de produits de terre cuite à partir de ces seules altérites, d'abord par le Centre Technique des Tuiles et Briques (CTTB) en 1969, puis par Girel et Hermans en 1999-2001 (*In* Glazrun, 1999), ont donné des résultats négatifs, le CTTB ayant conclu à l'inaptitude de ces matériaux utilisés tels quels, à la

fabrication de produits de terre cuite. Il s'avérerait donc indispensable de corriger le chimisme atypique et le mauvais comportement à la cuisson de ces altérites, par l'adjonction d'autres matières premières.

Classiquement, dans l'industrie céramique, on corrige le déficit éventuel en silice des matières premières argileuses de base par l'ajout de sable siliceux, ce dernier jouant également le rôle de dégraissant dans le cas de l'utilisation d'argiles très grasses. De même, l'ajout de minéraux fondants (feldspaths potassiques ou sodiques, voire syénite néphélinique) est souvent nécessaire, notamment pour la fabrication des produits gréseux, car ils apportent les éléments alcalins (potasse et soude) indispensables à la fusion du mélange de matières premières.

La Réunion ne disposant d'aucune ressource en sable siliceux, en feldspath ou en syénite néphélinique, il est apparu indispensable de rechercher d'autres matériaux locaux de substitution, ou à défaut, de recourir à leur importation de l'étranger.

Les pouzzolanes de La Réunion, en raison de leur composition chimique (voir paragraphe 3.2.1) caractérisée par une forte teneur en silice (45,9 à 54,9 %), une plus faible teneur en fer (10,3 à 13,5 %) que les altérites (19 à 36 %), une teneur non négligeable en alcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3,5$ à 6,5 % environ), et une nature lithologique essentiellement sableuse après concassage et /ou criblage semblaient susceptibles de corriger notablement le comportement céramique des altérites.

Les premiers essais ont été réalisés par Girel et Hermans en 2001 en incorporant au mélange de matières premières argileuses (composé de 20 à 33 % d'altérites du Piton Saint-Leu ou du Piton Rouge des Avirons, et de 10 à 33 % d'argile grésante de métropole), 60 à 80 % de scories de Piton Babet (Saint-Joseph) ou de fines de la carrière de tuf de Saint-Louis, ou d'un mélange de ces deux types de pouzzolanes.

Ils obtiennent d'assez bons résultats après cuisson à 1000 ou 1100 °C, mais avec des retraits de cuisson et des porosités du produit cuit assez élevés, les meilleurs résultats faisant quand même appel à 30-40 % d'argile plastique, inexistante à La Réunion.

Dans le même esprit, d'autres séries d'essais ont été réalisées par le BRGM en 2001 pour « corriger » les altérites des Hauts de Piton Saint-Leu, de Piton Rouge des Avirons, de Piton de Bassin Martin, commune de Saint-Pierre, et des Hauts de Bagatelle à Sainte-Suzanne, dans le cadre de son étude de valorisation des matériaux argileux de la Réunion (se reporter au rapport BRGM / RP – 50866 –FR – 2001 SGR/REU 10).

Lors de ces essais, l'apport d'argile plastifiante de métropole a été limité à 5 ou 10 % du mélange de matières premières, et les pouzzolanes utilisées pour correction des altérites sont, soit les scories provenant de la carrière SBTPL du pied du Piton Villers, commune de la Plaine des Palmistes (échantillon S/PP 3A), soit les tufs de Saint-Pierre de la carrière de « La Saline » (échantillon P/SPi2A), soit un mélange de ces deux variétés de pouzzolanes. Dans le mélange des matières premières, la proportion de pouzzolanes broyées à 500 µm a atteint 55 à 70 %, suivant les dosages testés.

Dans l'ensemble, les résultats de ces essais sont satisfaisants, et après 16 séries de tests de cuisson entre 950 et 1150 °C, avec des dosages différents des diverses matières

premières, les meilleurs résultats enregistrés correspondent à un mélange de matières premières composé de :

- 20 à 35 % d'altérites ;
- 5 à 10 % d'argile plastique ;
- 60 à 70 % d'un mélange des deux variétés de pouzzolanes, notamment en parties égales.

Les retraits de séchage sont satisfaisants (3,7 à 4,5 %), les retraits de cuisson à 1000 °C sont faibles (1,4 à 2,5 %), mais les produits cuits obtenus, après façonnage par pressage, sont assez poreux (17 à 20 % d'absorption d'eau), en raison de la forte proportion de matières premières non plastiques (pouzzolanes) introduite dans le mélange. Cette porosité des produits cuits pourrait être réduite en incorporant davantage d'argile grésante, par exemple environ 20 %, mais cela irait à l'encontre de la volonté d'utiliser au maximum des ressources locales.

Comparée aux premiers résultats d'essais de fabrication de produits céramiques à partir des seules altérites de La Réunion, il apparaît clairement que l'utilisation des pouzzolanes locales en de fortes proportions dans le mélange de matières premières permettrait de produire des produits de terre cuite tout à fait acceptables.

3.3 SECTEURS D'UTILISATION DES POUZZOLANES ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES

3.3.1 Principaux secteurs d'utilisation

Dans les paragraphes précédents, ont été examinés les principaux secteurs d'utilisation des pouzzolanes de La Réunion, à savoir :

- a) **en viabilité**, pour la construction des assises et la structuration des chaussées, notamment par la mise en œuvre de la technique Graves - Pouzzolanes - Chaux (GPC). Utilisées seules, elles assurent également le drainage et la stabilisation des fonds de forme, le drainage et l'évacuation des eaux de ruissellement (ralentissement du colmatage des drains) et, par un apport de fines, la correction des courbes granulométriques (SNPP et DRIRE, 1988) ;
- b) **dans le bâtiment**, 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. Les pouzzolanes servent également à la constitution de couches sous dalles et sous carrelage et au remplissage des planchers et plafonds (isolation thermique) ; dans les bétons réfractaires, elles servent à la fabrication de boisseaux et avaloirs de cheminées ; utilisées comme adjuvant dans les bétons de masse, elles en améliorent considérablement la qualité : meilleure ouvrabilité, résistance à l'action des eaux agressives, diminution de la solubilité de la chaux (SNPP et DRIRE, 1988). Dans les céramiques de bâtiment (produits de terre cuite, carreaux de revêtement de sols et de murs), les pouzzolanes sont également utilisées comme dégraissant d'argiles et comme matériau de substitution au feldspath (Petkova, Jonev, Marinov, 1990) ;

- c) **en assainissement**, compte tenu de leur structure alvéolaire qui leur confère une grande surface spécifique, les pouzzolanes sont très utilisées au niveau des plateaux absorbants et des lits bactériens des stations d'épuration et des filtres de fosses septiques (assainissement autonome, tranchées d'assainissement), avec une granulométrie 20/50 mm et une surface spécifique de 200 à 210 m²/m³. 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 m²/m³ et le remplissage (granulométrie 50/100 mm ; surface spécifique : 90 à 100 m²/m³ des lits bactériens des stations d'épuration (SNPP et DRIRE, 1988). A noter que les pouzzolanes sont également utilisées, associées avec des sables de quartz, dans des filtres bi-couches pour eau potable, les granulométries employées varient suivant l'utilisation : 1,5 / 2,5 – 2,5 / 3,5 – 4/5 – 5/10 ;
- d) **dans la fabrication du ciment**, la pouzzolane est un agent actif qui peut aller jusqu'à 25 % de la composition du ciment classe CPJ, selon son action pouzzolanique (meilleure plasticité du béton, prise plus lente, économie de clinker et d'énergie pour le fabriquer).

A titre indicatif, on notera qu'en France métropolitaine, les secteurs de la viabilité et du bâtiment sont nettement prédominants et représentent environ les deux tiers de la consommation totale de pouzzolanes (en 1991 : 42% en viabilité et 23 % dans le bâtiment, tandis que le secteur de l'assainissement ne représentait que 11,5 %, et l'industrie 1,2 %).

3.3.2 Autres secteurs d'utilisation

a) 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'exploitation, 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 (tableaux 2 et 3).

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 Hermann, 1981).

b) Equipements 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.

c) 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.

3.3.3 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 4 synthétise les données sur les granulométries utilisées en fonction des domaines d'application.

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

Tableau 4 - Caractéristiques granulométriques des matériaux pouzzolaniques par types d'utilisation

Pour le cas particulier des graves – pouzzolanes – 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.5, Fournier et Geoffray, 1978).

CLASSE DE POUZZOLANES	3.3.3.1 I	3.3.3.2 II	3.3.3.3 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

Tableau 5 – Spécifications granulométriques des matériaux pouzzolaniques entrant dans la composition des graves- pouzzolanés – chaux (d'après Fournier et Geoffroy, 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 (SO₃).

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

4. Conclusions

L'inventaire des ressources potentielles en matériaux pouzzolaniques de La Réunion a montré que celle-ci dispose de très importantes ressources en pouzzolanes de bonne qualité, que l'on peut estimer globalement à plus de 100 Mt, les tufs de Saint-Pierre et de Saint-Louis représentant à eux seuls plus de 20 Mt de matériaux exploitables hors zone urbanisée.

Bien qu'il y ait eu par le passé de nombreuses exploitations de tufs ponceux et de scories basaltiques, plus ou moins localisées et intermittentes, il ne subsiste actuellement que trois ou quatre carrières actives, dont celle de La Saline à Saint-Pierre qui fournit annuellement 50 000 à 70 000 t de pouzzolane pour la fabrication locale du ciment à partir du clinker importé, par la société des Ciments de Bourbon.

Cette utilisation est très importante pour l'économie de l'île, car elle permet de réduire très sensiblement les coûts de production du ciment, et par là même, son prix de vente. Elle devrait se poursuivre pendant de nombreuses années, à condition que des réserves suffisantes soient protégées pour cet usage et ne soient pas gelées par l'extension actuelle de l'urbanisation sur le gisement.

Hormis cette utilisation principale, les autres carrières fournissent de petites quantités de scories basaltiques, utilisées occasionnellement pour l'aménagement d'aires de jeux, de terrains de sport, de bas-côtés de routes, de parkings, pour la construction de fosses septiques ou encore en horticulture.

Pourtant les études et les réalisations effectuées tant en métropole qu'à La Réunion, ont démontré les autres utilisations possibles de ces matériaux, notamment en voirie pour la construction des assises et la structuration des chaussées, dans le bâtiment pour la fabrication de bétons légers et de parpaings, en assainissement pour l'épuration des eaux usées, et en agriculture pour l'amendement des sols.

Dans le secteur de la viabilité, les pouzzolanes de La Réunion pourraient davantage être utilisées pour la construction des nouvelles routes ou le renforcement des chaussées, notamment par la technique routière Graves – Pouzzolanes – Chaux, à l'instar de ce qui se fait classiquement en métropole depuis de nombreuses années, notamment en région Auvergne, plutôt que d'utiliser systématiquement des granulats alluvionnaires concassés, de fabrication coûteuse.

Dans le secteur du bâtiment, la fabrication de bétons légers et de parpaings à partir de pouzzolanes devrait être relancée, suite aux premières fabrications réalisées jusqu'à la fin des années 1980 par la société Prothéré dans son usine de Saint-Rose, aux essais positifs effectués en 1985 – 1988 par le CEBTP et l'entreprise SCPR, et au projet de réalisation expérimentale (REX) en 1993 qui a malencontreusement avorté.

Par ailleurs, les essais céramiques réalisés en 2001 par les consultants Girel et Hermans et par le BRGM (dans le cadre la présente étude) ont montré que la fabrication de produits céramiques, à partir, notamment, de pouzzolanes et de matériaux argileux locaux, était tout à fait réalisable, ce qui devrait permettre de relancer l'activité de cette

filière artisanale à La Réunion, puis d'envisager à nouveau la création d'une unité de fabrication industrielle de produits de terre cuite de bâtiment.

Dans le secteur de l'agriculture, l'utilisation des pouzzolanes concassées comme amendement naturel des sols fortement argileux ou déficitaires en silice, en alcalino-terreux, en alcalis et en phosphore devrait être intensifiée, notamment sur les sols pauvres constitués d'altérites lessivées et ferrallitisées (plantations de canne à sucre en particulier), plutôt que de recourir à l'utilisation d'engrais chimiques coûteux et néfastes pour l'environnement.

Ce sont dans ces secteurs, semble-t-il, où les énormes ressources en pouzzolanes de l'île pourraient davantage être valorisées.

5. Bibliographie

Billard G., coll. Vincent P.M. (1974) – Carte géologique du département de La Réunion à 1/50 000 en 4 feuilles et notice explicative. Edition BRGM.

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

BRGM (1964) – Etude sommaire de l'utilisation des pouzzolanes et de l'olivine. rapport TAN64-A/37, novembre 1964.

Chevin P. (1988) – Recherche des propriétés physiques et mécaniques de la pouzzolane en vue de la fabrication de bétons légers. Rapport CEBTP, Lab. de La Réunion, mars 1988.

Chevin P. (1984) – Utilisation des matériaux volcaniques de La Réunion en technique routière. Rapport CEBTP, 1984.

Chevin P. (1982) – V.R. Commune de Saint-Benoît, Chemins Sainte-Marguerite et Helvetia. DDE de La Réunion. Arrond. Terr., Lab. Départ., dossier n°82 RE 001 SR 261, décembre 1982.

Dron R. (1975) – Les pouzzolanes et la pouzzolanité. Revue des Matériaux de construction, n°692, janvier-février 1975, pp. 27-30.

Fournier M. et Geoffray J.M. (1978) – Le liant pouzzolanes – chaux. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n°93, janvier-février 1978, pp. 70-77.

ISTED (1988) – Les matériaux volcaniques : utilisation en technique routière. Synthèse.

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

LCPC (1977) – Les pouzzolanes et les basaltes. Bulletin du LCPC, n° spécial IV : Granulats.

Massari M. (1987) – Détermination des capacités épuratoires des sols de La Réunion vis-à-vis des polluants chimiques et bactériologiques. Ecole Nat. Sup. des Tech. Indus. Et des Mines d'Alès. Centre d'Anal. Chim. De Génie de l'Environ. Indus. Et d'Energ., décembre 1987.

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.

Odent B. (1999) – Approche technico-économique du potentiel de valorisation de plusieurs substances utiles à La Réunion : produits pyroclastiques, matériaux argileux et

Ressources et potentiel de valorisation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion

laves basaltiques pour laine de roche. Rapport BRGM R 40797-99 SGR/OI 36, décembre 1999.

Odent B. (1999) – Potentialités des filières Roches et minéraux industriels à La Réunion. Besoins actuels en granulats et perspectives à l'horizon 2015. Rapport BRGM R 40796 – 99 SGR/OI 35, octobre 1999.

Petkova A., Jonev L., Marinov M. (1990) - Substitution of feldspar as a component of wall and floor tiles by other alkali-containing raw materials. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr., Vol.29, No4, 07-08/1990, pp. 249-252.

Poul X. (1966) – Etude du gisement de tuf de Saint-Pierre, département de La Réunion. Rapport BRGM TAN 66-A/29, août 1966.

Poul X. (1964) – Département de La Réunion. Etude sommaire de l'utilisation des pouzzolanes et de l'olivine. Rapport BRGM TAN 64-A/37, novembre 1964.

Raheliarilalao B. (1986) – Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques de bétons de pouzzolane – Thèse Université Paris 7, décembre 1986.

Rocher P. (1998) – Potentialités des filières « Roches et minéraux industriels » à La Réunion – Description des ressources dans les « espaces carrières » - Rapport BRGM R 40128 – 98 REU 18, mai 1998.

Rocher P. (1998) – Potentialités des filières « roches et minéraux industriels » à La Réunion – Rapport d'avancement des travaux relatifs à l'identification des ressources – Rapport BRGM R 39981 – 98 REU 17, mars 1998.

Rocher P. (1992) – Mémento roches et minéraux industriels. Ponces et pouzzolanes. Rapport BRGM R 36447, décembre 1992.

Schéma Départemental des Carrières de La Réunion – 9 juillet 2001 – Arrêté Préfectoral n°01-1678/SG/DAI/3

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 Ch. (1990) – Matériaux pour ciment. Mémento Roches et Minéraux Industriels, édition BRGM, décembre 1990, 51 p. + ann. h.t.

Ressources et potentiel de valorisation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion

Stieltjes L. (1989) – Inventaire des utilisations des pouzzolanes dans l'économie. Rapport BRGM 89 REU 02, janvier 1989.

Stieltjes L. (1986) – Construire en pouzzolane à La Réunion. Utilisation d'un matériau local adapté aux contraintes de l'habitat, du climat et de l'économie réunionnais. Rapport BRGM 86 REU 17, avril 1986.

Stieltjes L. (1983) – Domaines d'utilisation et conditions de mise en œuvre des matériaux du sol et sous-sol de l'île de La Réunion (période 1984-1988). Rapport BRGM 83 REU 10, juillet 1983.

Syndicat national des extracteurs de pouzzolane (UNICEM) (1981) – « La pouzzolane ». Plaquette de présentation.

Thibaut P.M., Cruchet M., Rançon J.Ph., coll. Rossi F., (2001) – Evaluation des ressources et potentiel de valorisation des matériaux argileux de La Réunion. Rapport BRGM/RP 50865 FR – 2001 SGR/REU 11, mai 2001.

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

ANNEXE 1

**Résultats synthétiques des tests
réalisés sur les planches d'essai
à partir des pouzzolanes de Saint-Pierre
(d'après Chevin, 1984)**

ESSAIS SUR POZZOLANES DE LA REUNION
Fiche signalétique des pouzzolanes de La Réunion

ANALYSE CHIMIQUE MOYENNE

Constituants	%
SiO ₂	53,50 à 53,60
Al ₂ O ₃	16,05 à 16,20
Fe ₂ O ₃	10,55 à 11,10
MnO	0,15 à 0,20
TiO ₂	1,90 à 2,20
Ca O	5,65 à 6,00
Mg O	2,40 à 2,75
pertes au feu	1,40 à 1,45
Na ₂ O	4,95 à 5,50
K ₂ O	2,15 à 2,25

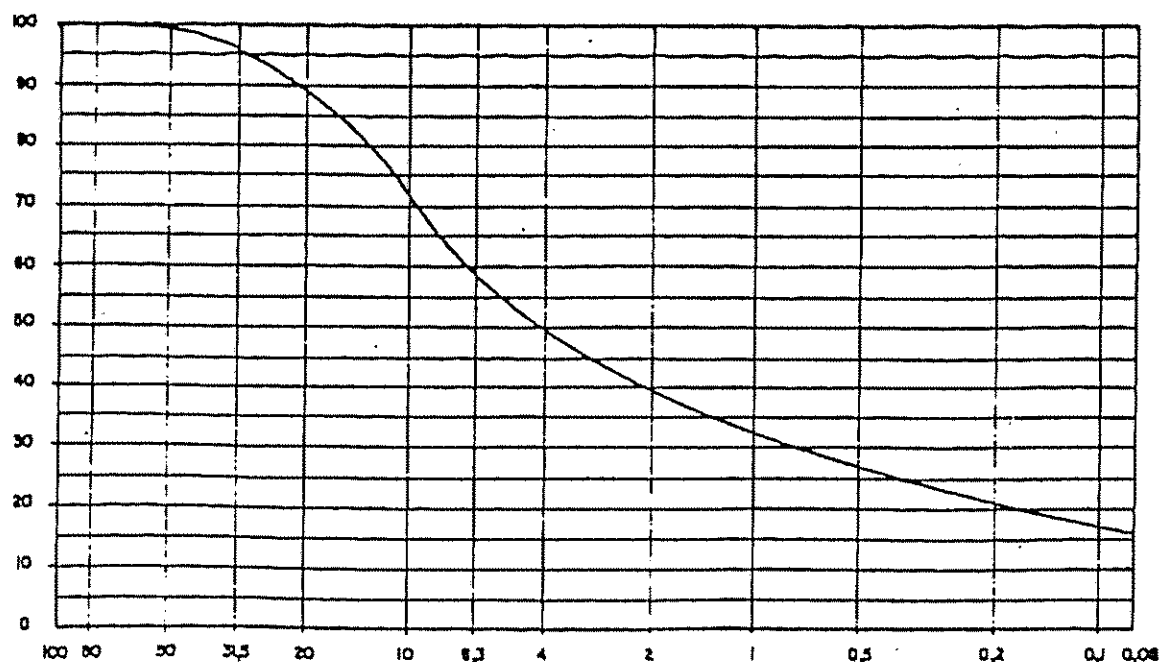
NATURE Trachy - andesite à olivine
(Kohalaite)

COULEUR Brune et rouge

PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

Friabilité	39 %
Masse volumique	2,63g/cm ³
Densité apparente	1,18
Surface spécifique	4700cm ² /g

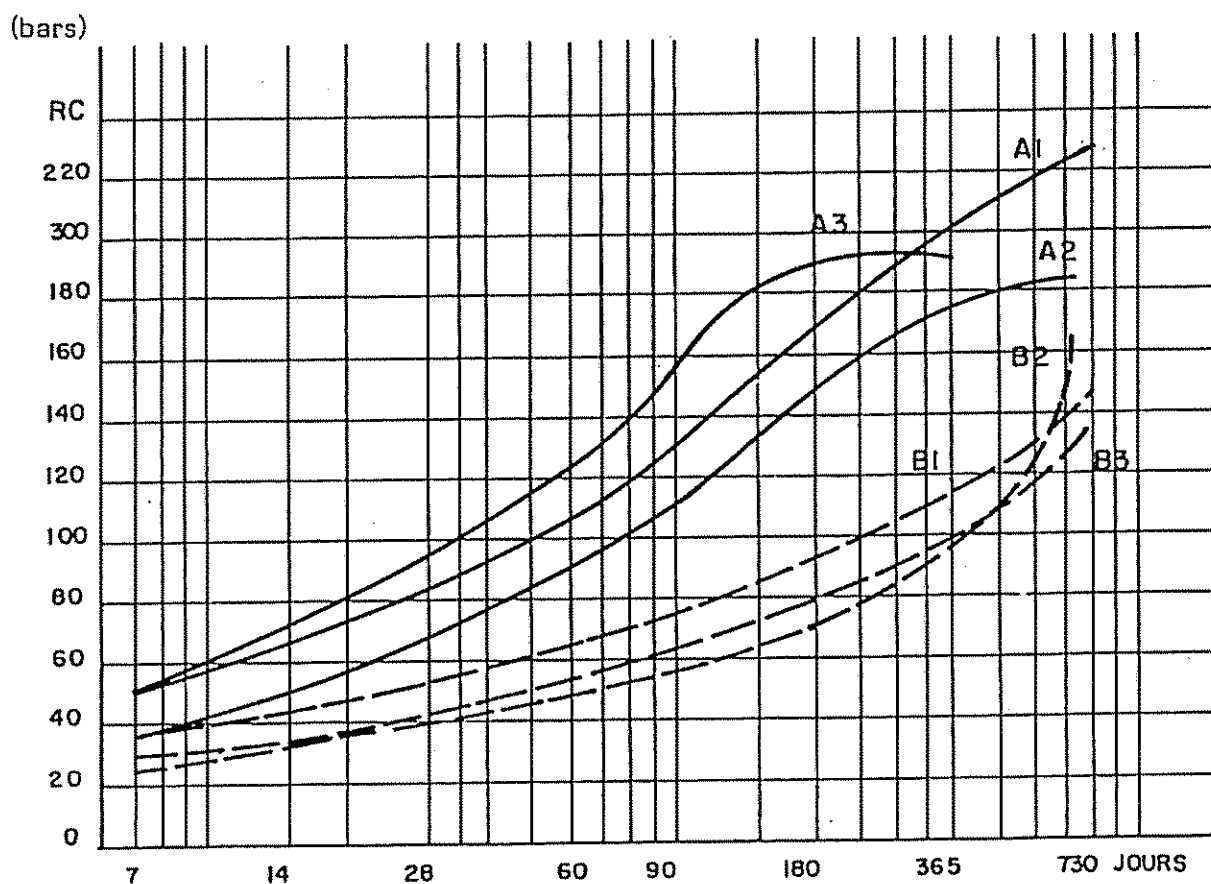
GRANULOMETRIE POZZOLANE NATURELLE



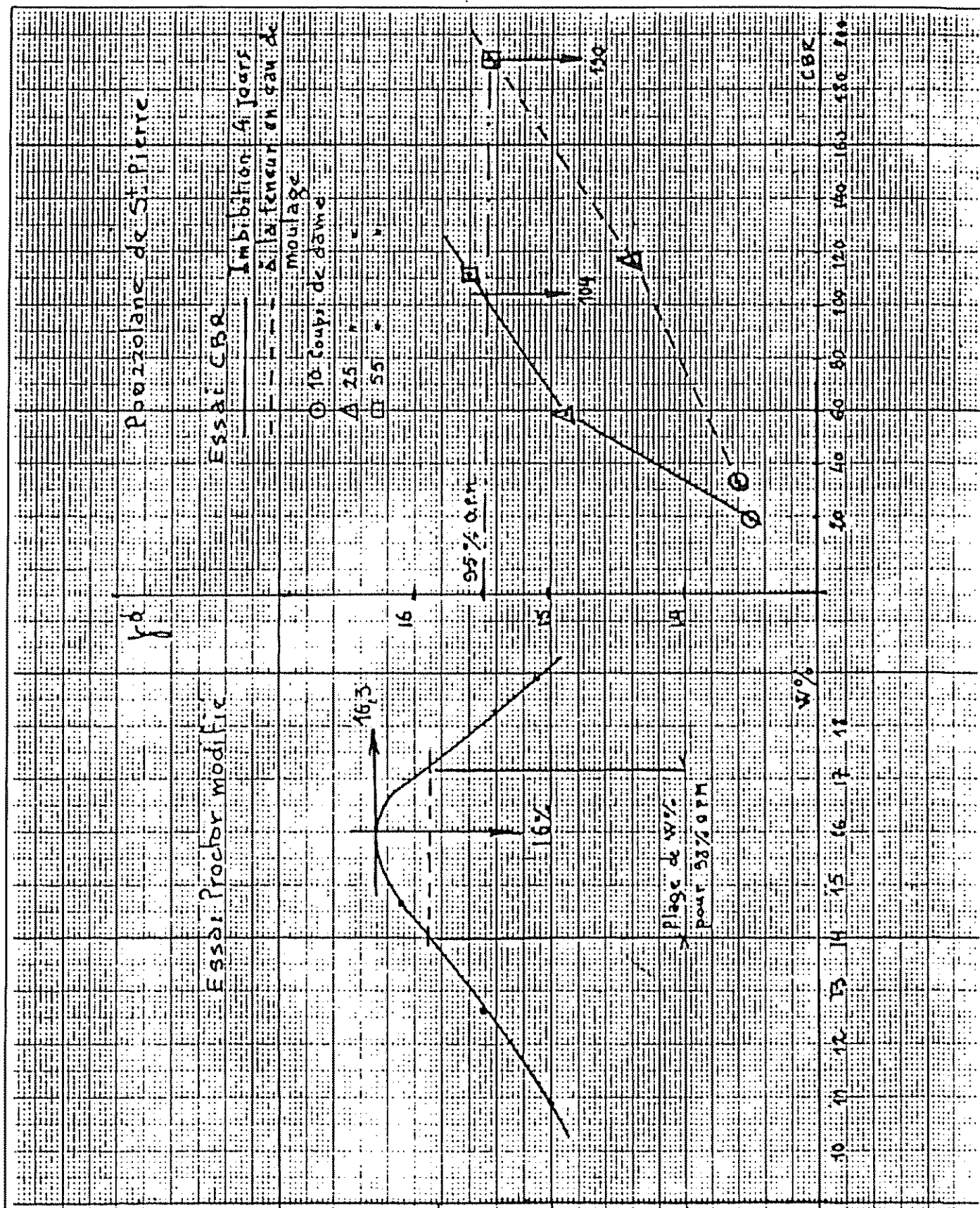
CONSTITUANTS	FORMULES	
	A %	B %
POUZZOLANE Q/3	80	
BASALTE 0/3		80
CHAUX (A)	20	20
EAU	11	9

(A) 3 SORTES DE CHAUX : 2 CHAUX
IMPORTEES (1 ET 2) ET LA CHAUX
DEST LEU (3)

AGE JOURS	RESISTANCE A LA COMPRESSION DES FORMULES (bars)					
	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃
7	50	38	50	37	30	22
14	65	47	70	47	35	30
28	85	68	89	57	40	39
60	102	90	122	48	48	57
90	128	104	142	55	57	63
180	170	144	189	90	73	
365	195	173	191		93	99
730	226	183		142	162	132



CARACTERISTIQUES PROCTOR-CBR DU " TUF DE ST-PIERRE " - LA REUNION



ANNEXE 2

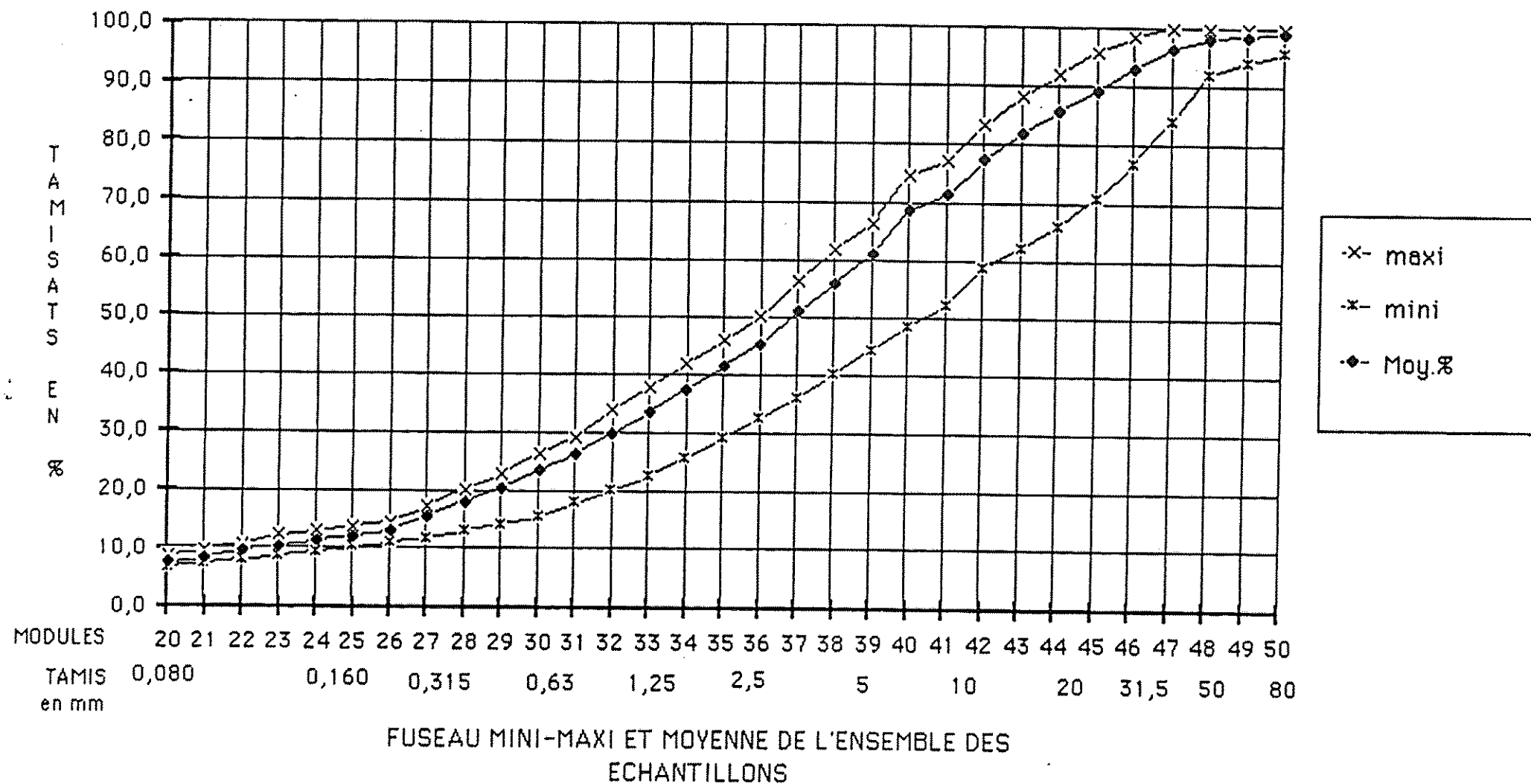
**Principaux résultats synthétiques
des essais de fabrication de bétons légers
et de blocs en bétons de pouzzolane
(d'après P. Chevin, 1988)**

C.E.B.T.P.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE VOLUMETRIQUE

TUF ST. PIERRE

N° Dossier : 85 RE 1287 BT 437



BETONS PLEINS DE POZZOLANE

Références des gâchées	Composition	Caractéristiques des bétons								
		Bétons frais	Bétons durcis							
				7 J	28 J	90 J	1 an	2 ans	3 ans *	après séchage
1 111	10/20 : 590 l	Ƴ = 17,6 kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	15,1
	5/10 : 294 l	ST = 1 cm	Rc (MPa)	11,5	14,0	15,2	17,2	14,5	-	
	0/5 : 246 l	W = 32,2 %	Rt (MPa)	-	1,7	1,4	1,8	-	-	
	CPJ 35 : 260 kg		Δl/l (μm/m)	-	-	-	-	-	-	
1 111 bis	10/20 : 574 l	Ƴ = 17,1 kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	15,3
	5/10 : 186 l	ST = 6 cm	Rc (MPa)	7,2	15,7	18,7	16,2	17,2	-	
	0/5 : 387 l	W = 29,4 %	Rt (MPa)	-	1,1	1,5	1,2	-	-	
	CPJ 35 : 260 kg		Δl/l (μm/m)	63	333	603	757	730	-	
1 121	10/20 : 574 l	Ƴ = 17, kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	15,0
	5/10 : 186 l	ST = 6 cm	Rc (MPa)	12,2	17,5	22,2	18,3	20,2	-	
	0/5 : 387 l	W = 30,1 %	Rt (MPa)	-	1,3	1,9	1,4	-	-	
	CPJ 35 : 260 kg BY 40 : 1,3 kg AER : 0,13kg		Δl/l (μm/m)	57	397	680	840	860	-	
1 112	10/20 : 574 l	Ƴ = 17,5 kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	16,0
	5/10 : 186 l	ST = 7 cm	Rc (MPa)	15,0	22,5	26,0	21,7	22,7	-	
	0/5 : 317 l	W = 28,4 %	Rt (MPa)	-	1,2	1,9	1,2	-	-	
	CPJ 35 : 350 kg		Δl/l (μm/m)	143	517	807	993	960	-	
1 221	10/20 : 574 l	Ƴ = 18,3 kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	15,9
	5/10 : 186 l	ST = 6 cm	Rc (MPa)	11,5	18,7	22,0	20,5	20,5	-	
	0/5 : 372 l	W = 28,9 %	Rt (MPa)	-	1,1	1,7	1,5	-	-	
	CPJ 35 : 260 kg Sable lourd 25 l BY 40 : 1,3 kg AER : 0,13kg		Δl/l (μm/m)	10	417	640	823	830	-	
1 211	10/20 : 574 l	Ƴ = 17,4 kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	15,8
	5/10 : 186 l	ST = 6 cm	Rc (MPa)	10,2	15,7	21,2	19,8	19,2	-	
	0/5 : 372 l	W = 28,3 %	Rt (MPa)	-	1,0	1,7	1,4	-	-	
	CPJ 35 : 260 kg Sable lourd 25 l		Δl/l (μm/m)	27	487	627	833	847	-	

* âge non atteint

TABLEAU N° 12
BETONS PLEINS DE POZZOLANE

Références des gâchées	Composition	Caractéristiques des bétons								
		Bétons frais		Bétons durcis						
				7 J	28 J	90 J	1 an	2 ans	3 ans *	après séchage
12 221	10/20 : 574 l	Ƴ = 18,4 kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	16,7	16,0	15,8	-	-		16,4
	5/10 : 186 l	ST = 7 cm	Rc (MPa)	14,5	20,5	19,5	21,8	22,7		
	0/5 : 387 l	W = 28,1 %	Rt (MPa)	-	1,4	1,6	1,6	-		
	Sable lourd 25 l		Δl/l (μm/m)	87,0	477,0	533,0	830,0	873,0		
	CPJ 35 : 350 kg									
	BY 40 : 1,75 kg									
12 222	AER : 0,175kg									15,2
	10/20 : 574 l	Ƴ = 17,3 kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	15,9	15,4	15,0	-	-		
	5/10 : 186 l	ST = 7 cm	Rc (MPa)	13,5	21,7	19,2	21,5	21,5		
	0/5 : 387 l	W = 29,3 %	Rt (MPa)	-	1,5	1,6	1,2	-		
	Sable lourd 25 l		Δl/l (μm/m)		340,0	820,0	1006	1020		
	CPA : 260 kg									
12 223	BY 40 : 1,75 kg									15,6
	AER : 0,175kg									
	10/20 : 574 l	Ƴ = 17, kN/m ³	Ƴ (kN/m ³)	16,5	16,0	15,7	-	-		
	5/10 : 186 l	ST = 3 cm	Rc (MPa)	13,5	19,7	20,5	22,7	19,7		
	0/5 : 387 l	W = 28,4 %	Rt (MPa)	-	1,4	1,5	1,4	-		
	Sable lourd 25 l		Δl/l (μm/m)	177,0	827,0	987,0	1130	1213		
	CPA : 300 kg									
	BY 40 : 1,5 kg									
	AER : 0,15 kg									
	Cheux : 50 kg									

* âge non atteint

BETONS CAVERNEUX DE POUZZOLANE

Références des gâchées	Composition	Caractéristiques des bétons								
		Bétons frais	Bétons durcis							
				7 J	28 J	90 J	1 an	2 ans	3 ans *	après séchage
4.1	10/20 : 1 000 l CPJ 35 : 250 kg	Ƴ = 14,9 kN/m ³ ST = étalé W = 33, %	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	13,0
			Rc (MPa)	5,5	8,5	9,0	-	8,0	-	
			Rt (MPa)	-	1,3	1,5	0,8	-	-	
			Δl/l (μm/m)	143	497	570	687	680	-	
4.1 bis	10/20 : 1 000 l CPJ 35 : 250 kg	Ƴ = 15,9 kN/m ³ ST = étalé W = 30,4 %	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	13,7
			Rc (MPa)	11,5	10,7	13,5	12,7	7,7	-	
			Rt (MPa)	-	1,1	1,5	1,4	-	-	
			Δl/l (μm/m)	113	520	753	820	810	-	
3.1	10/20 : 1 000 l CPJ 35 : 250 kg	Ƴ = 16,4 kN/m ³ ST = étalé W = 29,3 %	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	14,3
			Rc (MPa)	5,0	6,2	6,5	8,8	15,2	-	
			Rt (MPa)	-	1,4	0,9	1,2	-	-	
			Δl/l (μm/m)	120	457	527	727	-	-	
4.2	10/20 : 1 000 l CPJ 35 : 150 kg	Ƴ = 14,7 kN/m ³ ST = étalé W = 27,7 %	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	11,5
			Rc (MPa)	3,0	3,2	5,0	2,0	2,5	-	
			Rt (MPa)	-	0,5	0,9	0,5	-	-	
			Δl/l (μm/m)	250	690	1163	1250	1290	-	
3.2	10/20 : 1 000 l 0/5 : 100 l CPJ 35 : 150 kg	Ƴ = 15,5 kN/m ³ ST = étalé W = 38,6 %	Ƴ (kN/m ³)	-	-	-	-	-	-	12,4
			Rc (MPa)	3,0	4,5	7,0	2,5	3,7	-	
			Rt (MPa)	-	0,3	0,6	0,2	-	-	
			Δl/l (μm/m)	290	870	1163	1437	1443	-	

* âge non atteint

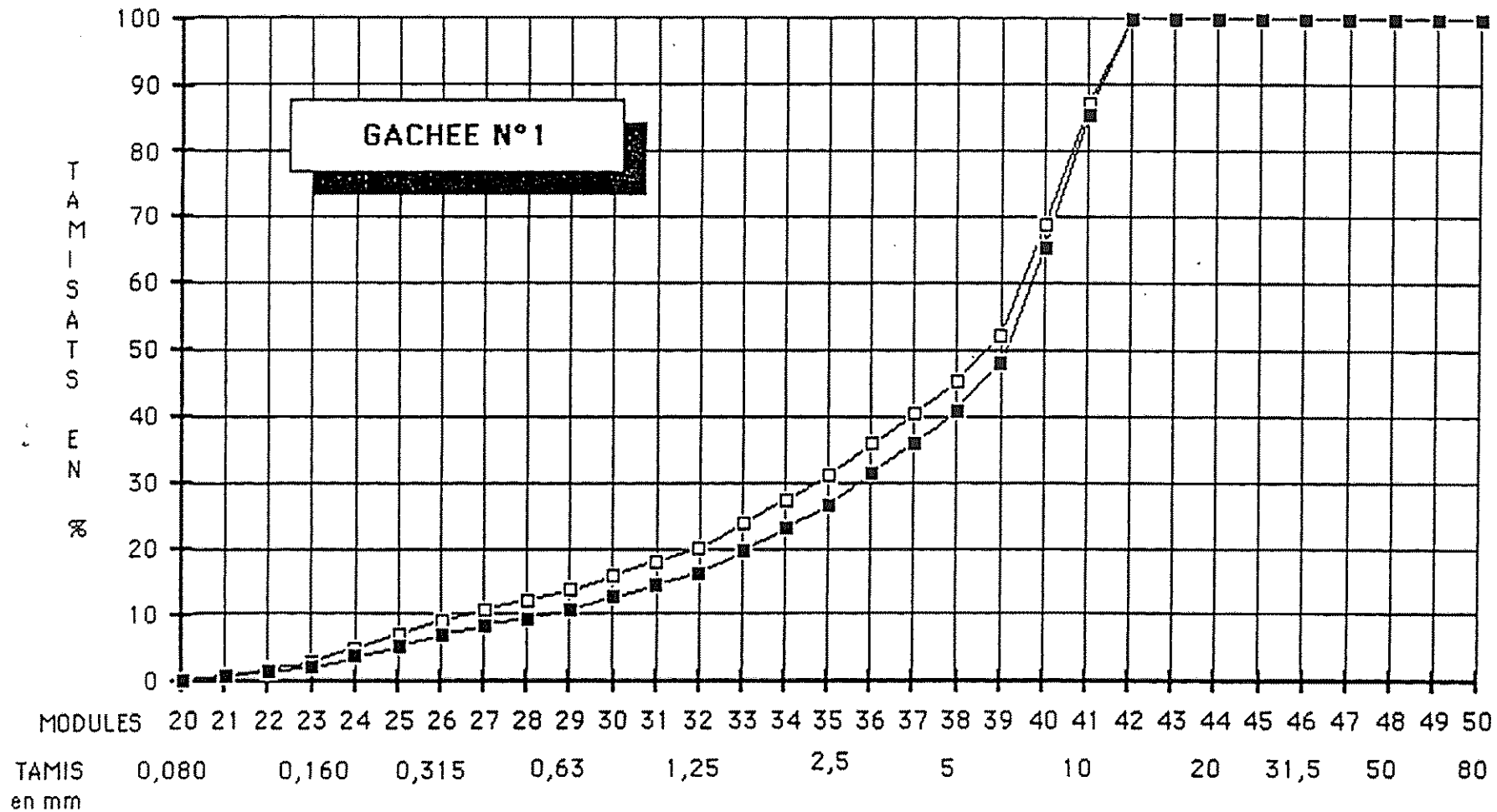
C.E.B.T.P.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

N° Dossiers: 85 RE 1287 BT 437

86 RE 1517 BT 50

TUF ST. PIERRE



BETON FRAIS GACHEE N°1

STATION DE CONCASSAGE-CRIBLAGE S.C.P.R.

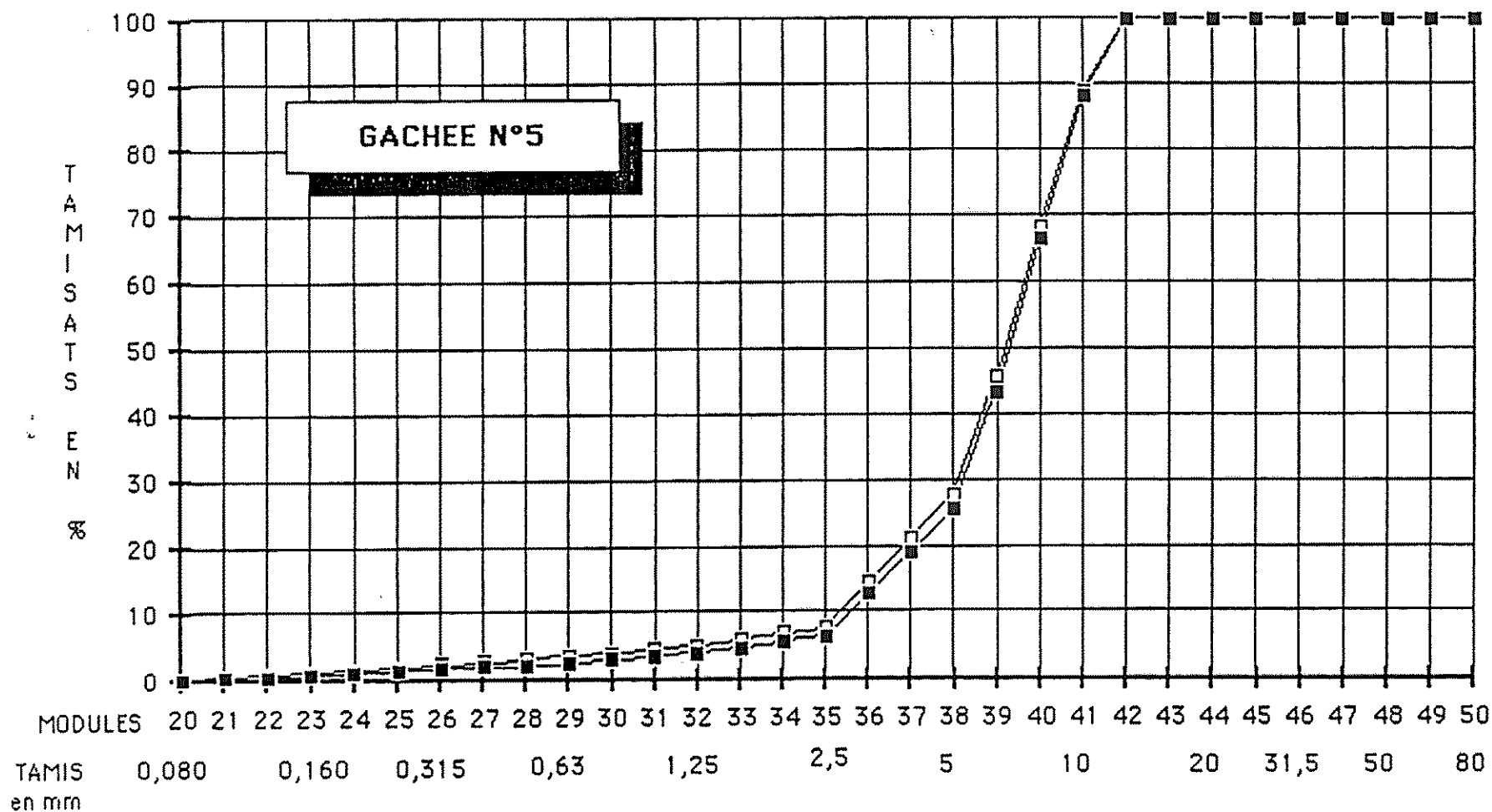
C.E.B.T.P.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

N° Dossiers: 85 RE 1287 BT 437

86 RE 1517 BT 50

TUF ST. PIERRE



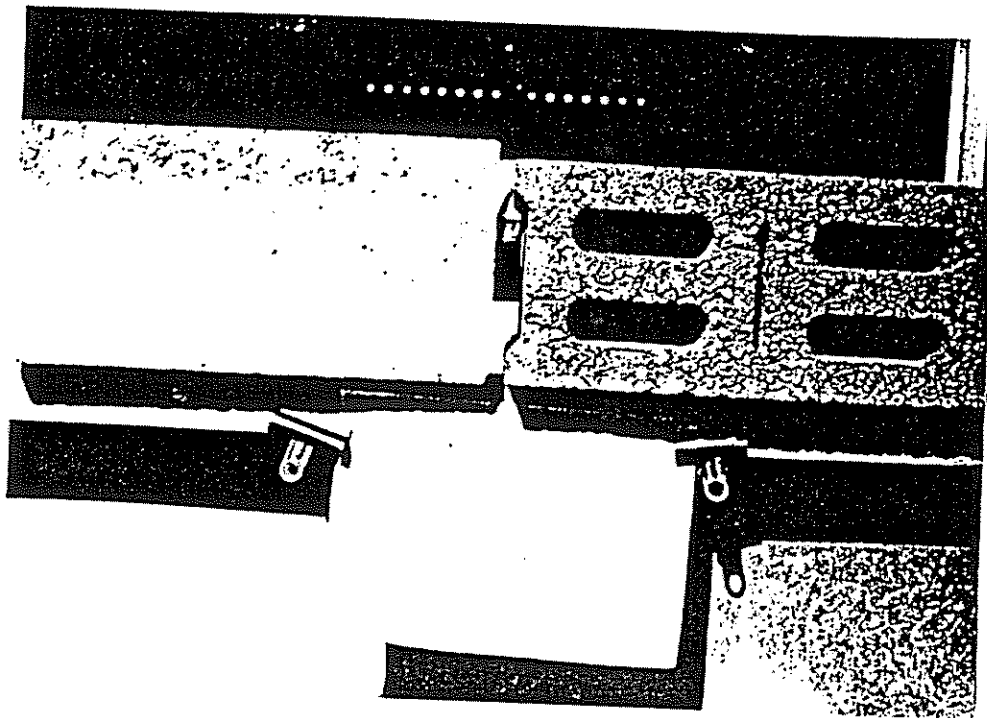
BETON FRAIS GACHEE N°5

STATION DE CONCASSAGE-CRIBLAGE S.C.P.R.

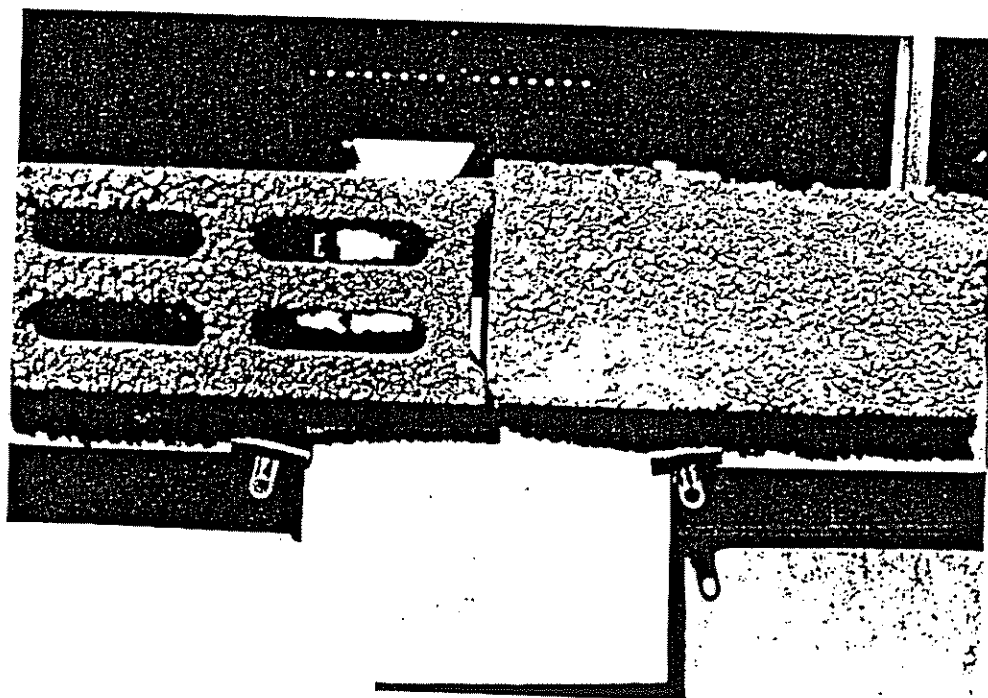
Gâchée	Composition et dosage en ciment CPJ 35	D A (kN/m ³)	Résistance moyenne de blocs creux (MPa)					Classe de résistance
			28 J	90 J	1 AN	2 ANS*	3 ANS*	
Préliminaire 1	continue 368 kg/m ³	18,6	14,7	13,5	10,6			
Préliminaire 2	continue 209 kg/m ³	17,6	4,8	4,3	6,4			
3	semi grenue 325 kg/m ³	17,2	9,6	11,1	9,3			L 70
4	grenue 292 kg/m ³	17,4	8,1	12,6	11,0			L 70
5	grenue 171 kg/m ³	15,6	4,9	4,9	3,5			L 40

* âge non atteint

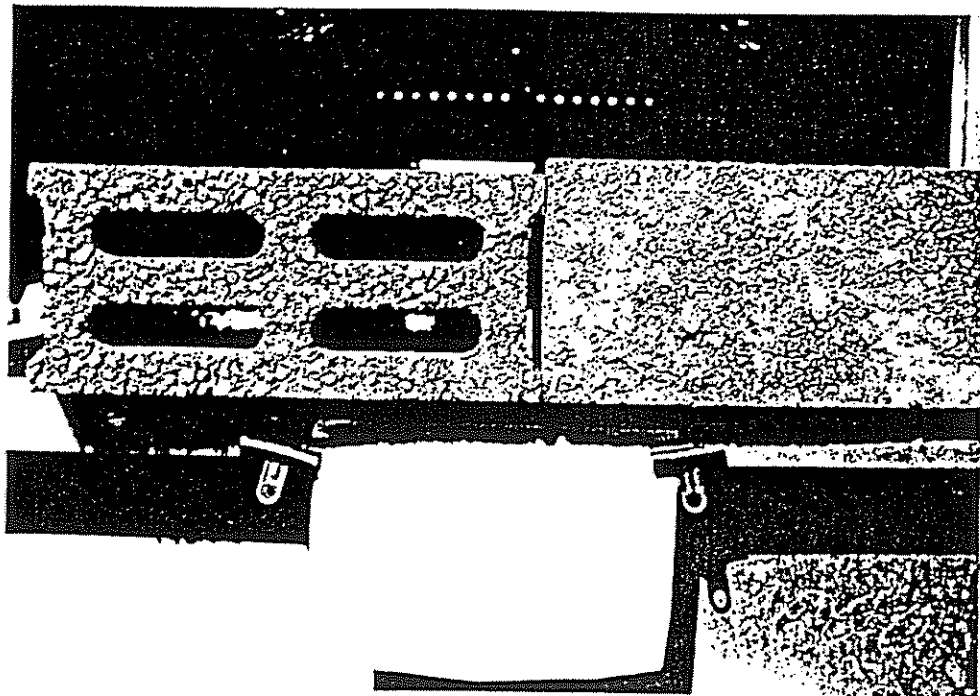
Poids volumique et résistance moyenne à la compression de blocs creux 17,5x20x40 de bétons de pouzzolane de Saint-Pierre.



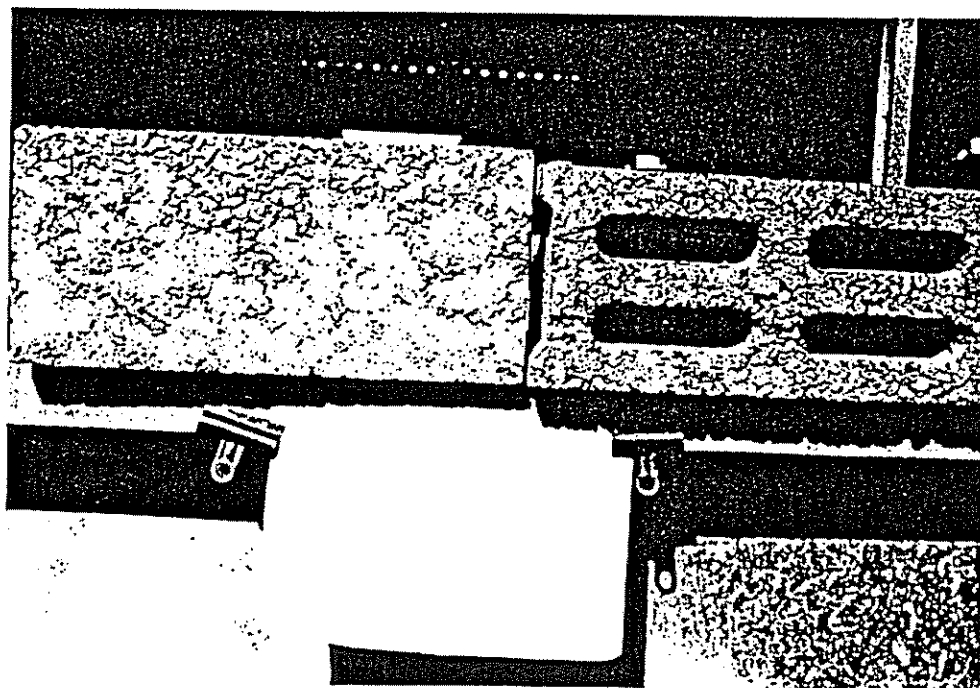
GACHEE N° 1



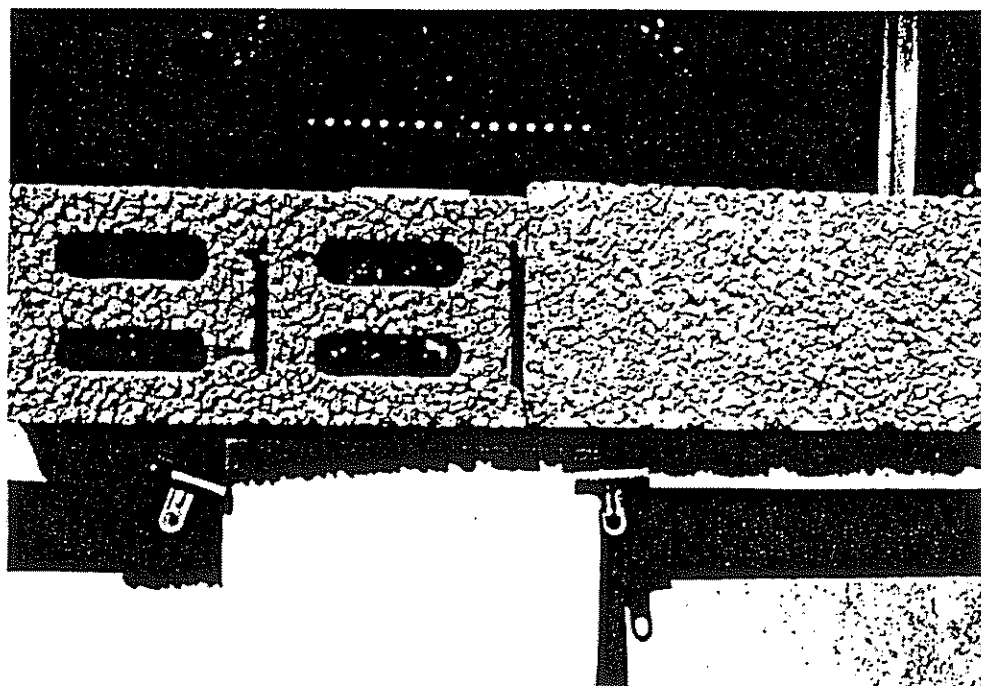
GACHEE N° 2



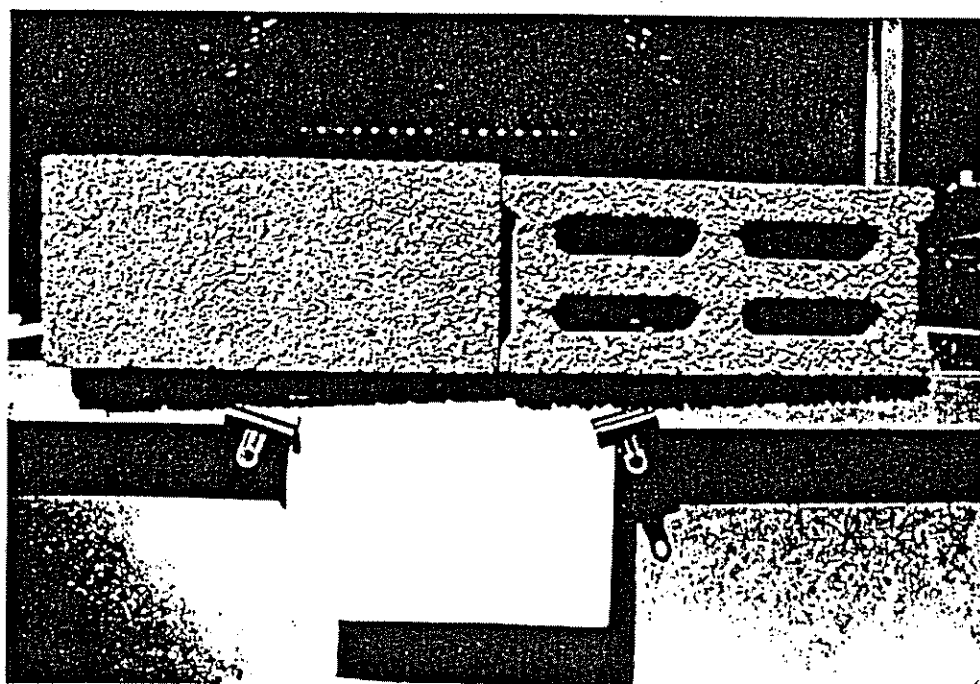
GACHEE N° 3



GACHEE N° 4



GACHEE N° 5



BLOC DE SERIE EN BETON DE GRANULATS LOURDS

ANNEXE 3

**Principaux résultats de l'étude expérimentale
d'utilisation des scories pour l'épuration
et la filtration des eaux usées domestiques
(d'après M. Massari, 1987)**

Paramètres		Composition cristalline	Composition chimique	KS	Granulométrie			Masse volum. en vrac T/m ³	C.E.C. meq/kg	Masse volumelle d'un grain g/cm ³	Porosité d'un grain	Porosité inter-granulaire
Echantillons					Coef. d'uniformité	d 50	%					
Scories Plaine des Palmistes	C 1	Feldspath Ca Na Olivine Verre	SiO ₂ : 47,8 % Al ₂ O ₃ : 13,7 % Fe ₂ O ₃ : 12,9 % MgO : 8,8 % CaO : 8,9 % PF : 0,3 %	2 10 ⁻²	11,2	6,3	SF : 5 % SG : 18 % G : 70 % C : 7 %	0,718	21	2,10	53 %	66 %
Scories du Tampon	C 2	Feldspath Na Pyroxène Verre	SiO ₂ : 44,5 % Al ₂ O ₃ : 15,5 % Fe ₂ O ₃ : 13,4 % MgO : 9,3 % CaO : 9,1 % PF : 1,4 %	2 10 ⁻²	3,1	15	SF : 5 % SG : 5 % G : 80 % C : 15 %	0,716	47	1,85	38 %	61 %
Pouzzolane ponce	C 3	Feldspath Na Verre	SiO ₂ : 56,2 Al ₂ O ₃ : 16,7 Fe ₂ O ₃ : 9,3 MgO : 1,8 CaO : 4,9 PF : 1,4	de l'ordre de 10 ⁻⁶	125,0	2	SF : 22 % SG : 28 % G : 45 % C : 5 %	1,156	63	2,75	49 %	58 %
Sable corallien	C 4	Aragonite Calcite magnésienne	SiO ₂ : 2,0 Al ₂ O ₃ : 0,6 Fe ₂ O ₃ : 0,8 MgO : 4,0 CaO : 48,9 PF : 43,0	10 ⁻⁵	31,5	1	SF : 20 % SG : 50 % G : 27 % C : 3 %	1,374	2	2,6	≤ 5 %	47 %
Sable dunaire	C 5	Feldspath Na Pyroxène Olivine	SiO ₂ : 44,4 Al ₂ O ₃ : 10,0 Fe ₂ O ₃ : 14,3 MgO : 17,9 CaO : 7,5 PF : 0,4	10 ⁻⁴	2,5	0,3	SF : 16 % SG : 84 % G : 0 % C : 0 %	1,669	36	2,6	≤ 5 %	38 %
Sable de rivière	C 6	Feldspath Na Pyroxène Olivine	SiO ₂ : 46,4 Al ₂ O ₃ : 13,3 Fe ₂ O ₃ : 12,4 MgO : 10,1 CaO : 8,9 PF : 1,1	10 ⁻⁵	7,0	0,5	SF : 14 % SG : 76 % G : 10 % C : 0 %	1,684	47	2,7	≤ 5 %	38 %

Caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des 6 matériaux.

Granulométrie :
 SF : sables fins
 SG : sables grossiers
 G : graviers
 C : cailloux

Paramètres	Effluent brut	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
pH	7,3	7,3	7,3	7,9	8,2	8,0	8,2
DCO mgO ₂ /l R.E.	554	17	17	< 5 99 %	< 5 99 %	< 5 99 %	< 5 99 %
MES mg/l R.E.	291	< 2 99 %	< 2 99 %	< 2 99 %	< 2 99 %	< 2 99 %	< 2 99 %
NTK mg N/l R.E.	61	0,33 99 %	< 0,05 99 %	< 0,05 99 %	< 0,05 99 %	< 0,05 99 %	< 0,05 99 %
NO ₂ ⁻ mg N/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
NO ₃ ⁻ mg N/l	< 0,01	55,9	56,5	55,5	47,6	50,2	57,7
P Total mg P/l	16	12,7	7,2	12,8	7,1	8,2	11,8
germes totaux nombre germes/ 100 ml	4.10 ⁸	10 ²	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	< 10 ²	< 10 ²
coliformes fécaux nombre germes/ 100 ml	2.10 ⁷	< 10 ²	10 ⁴	< 10 ²	< 10 ²	< 10 ²	< 10 ²
streptocoques fécaux nombre germes/ 100 ml	1.10 ⁷	< 10 ²	10 ⁴	< 10 ²	< 10 ²	< 10 ²	< 10 ²

Caractéristiques des effluents en sortie des 6 colonnes,
en fin d'expérience.

PARAMETRE	CLASSE DE QUALITE			
	1 A	1 B	2	3
pH	6,5 à 8,5	6,5 à 8,5	6 à 9	5,5 à 9,5
MES (mg/l)	≤ 25	≤ 25	25 à 70	70 à 150
DCO (mg O_2 /l)	≤ 20	20 à 25	25 à 40	40 à 80
NO_3 (mg N/l)	≤ 11	≤ 11	≤ 11	11 à 22
NTK (mg N/l)	≤ 1	1 à 2	2 à 3	> 3
Coliformes (Num 100 ml)	≤ 50	50 à $5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$ à $5 \cdot 10^4$	
Streptocoques fécaux (Num 100 ml)	< 20	20 à 10^3	10^3 à 10^4	

Critères d'appréciation globale de la qualité de l'eau.

- Classe de qualité 1 A :** eaux considérées comme exemptes de pollution.
- Classe de qualité 1 B :** eaux de qualité légèrement moindre, satisfont néanmoins tous les usages.
- Classe de qualité 2 :** qualité "passable" suffisante pour l'irrigation, les usages industriels, la production d'eau potable après un traitement poussé.
- Classe de qualité 3 :** qualité "médiocre" juste apte à l'irrigation, au refroidissement et à la navigation.
- Hors classe :** eaux dépassant la valeur maximale tolérée en classe 3 pour un ou plusieurs paramètres. Eaux inaptes à la plupart des usages.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
DES TECHNIQUES INDUSTRIELLES
ET DES MINES D'ALES

ANALYSE

Laboratoire d'études des matériaux

GRANULOMETRIQUE

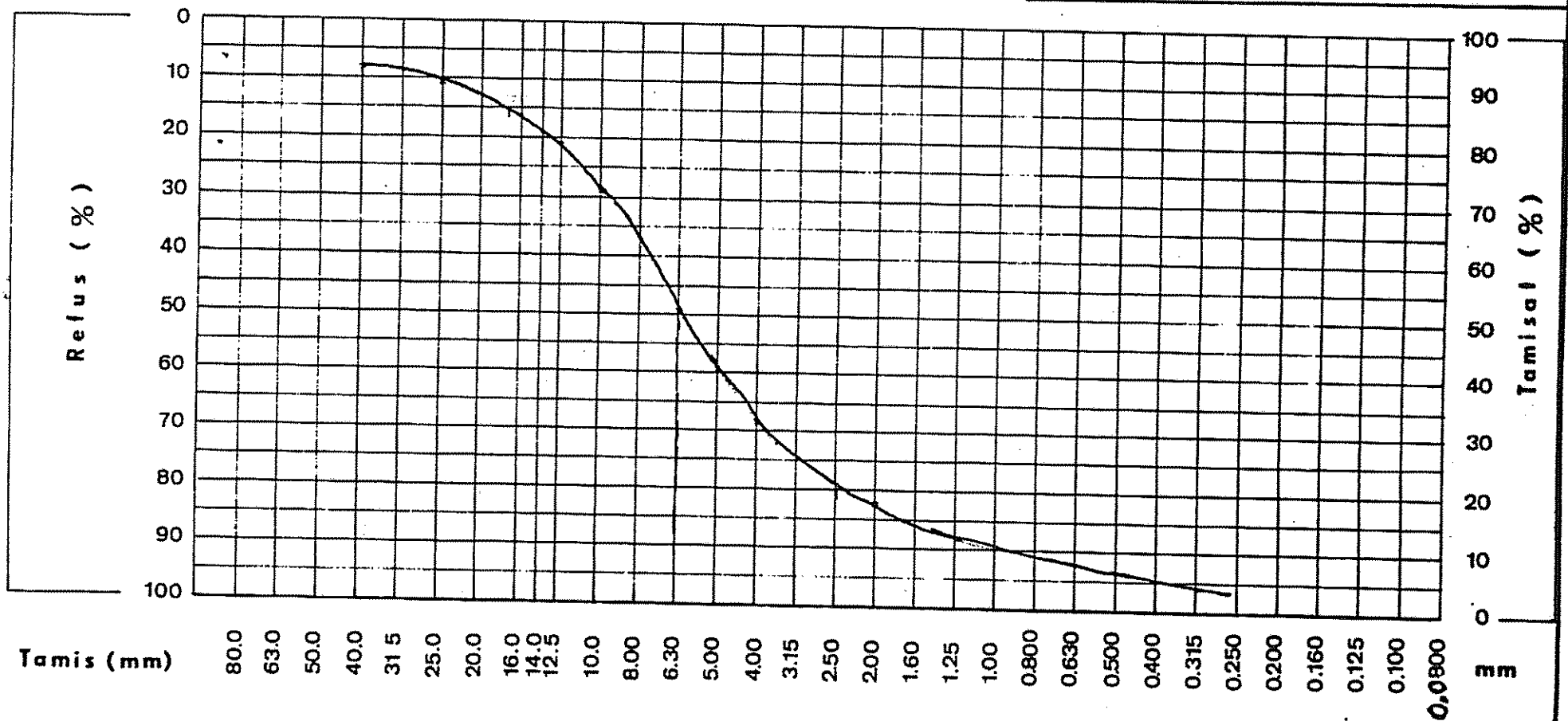
Dossier n°: _____

Demandeur: _____

Nature: *Scories Pâme des Gros Pigeons Rond*

Provenance: *C1*

Date: _____



ANNEXE 4 (hors texte)

Cartes de situation des gisements de pouzzolanes de La Réunion et des échantillons prélevés

ANNEXE 5

Analyses chimiques de trois pouzzolanes et de deux matériaux argileux de La Réunion

Chef du service : **AM. FOUILLAC**
 Correspondant Qualité : **F. AUGUSTIN**
 Coordination des analyses : **A. GADALIA**

Responsables des unités :
 -Chimie Minérale : **D. MARTINEAU**
 -Environnement : **R. JEANNOT**
 -Chimie Isotopique : **J.P. GIRARD**

RAPPORT D'ANALYSES

Demandeur	THIBAUT
	REM
Provenance des échantillons	LA REUNION
Nature des prélèvements	ROCHE
N° ANA	H6012A/3
N° de demande	1500504
N° d'affaire	
N° de compte	WE238

Laboratoire **Analyse chimique par fluorescence X**

Responsable **B. BORSIER**

Téléphone : (33) 02 38 64 30 17

Télécopie : (33) 02 38 64 39 25

Résultats certifiés par le(s) responsable(s) de laboratoire le : **05-JUL-2001**

Visa **A. Gadalia**



·>·> ATTENTION AUX INFORMATIONS PORTEES PAGE(S) SUIVANTE(S).

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.
 La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Nb Pages ...

BRGM - Analyse

3, avenue Claude Guillemin - B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France
 Téléphone : (33) 02 38 64 30 17 - Télécopieur : (33) 02 38 64 39 25 - Télex : BRGM 780258 F

Etude H6012A

Demande 1500504

Les analyses suivantes ont été réalisées dans le laboratoire : Analyse chimique par fluorescence X

Le mode opératoire
est utilisé pour doser :

MO005

Analyses par Spectrométrie de Fluorescence X

Alumine

Oxyde de Calcium

Fer total exprimé en Fe_2O_3

Oxyde de Potassium

Oxyde de Magnésium

Oxyde de Manganèse

Oxyde de Sodium

Phosphates en P_2O_5

Silice

Oxyde de Titane

Le mode opératoire
est utilisé pour doser :

MO011

Mesure de la perte au feu à 1000°C Perte au feu à 1000°C

Commentaire du laboratoire : Ce rapport annule et remplace le rapport d'analyse n° H 6012A du 23/03/01. Les résultats sont exprimés sur produit séché à 105°C .

RESULTATS : Sauf remarque particulière, les résultats sont exprimés en valeurs pondérales sur produit brut. Fe_2O_3 seul est la teneur en fer total dans l'échantillon, exprimé sous forme d'oxyde. Fe_2O_3 exprime la teneur en fer ferrique de l'échantillon lorsque le fer ferreux est dosé (exprimé sous la forme FeO). La précision moyenne pour les éléments majeurs est de 2% relative en milieu de gamme. La précision moyenne pour les éléments trace est de 10% relative en milieu de gamme.

Identification

Labo Client	1 S/PP 3A <i>pouzzolane</i>	2 P/SPI 2A <i>pouzzolane</i>	3 A/SPI 3A <i>altérite</i>
----------------	-----------------------------------	------------------------------------	----------------------------------

Unité

Alumine	%	LDI	0.2	13.9	16.2	21.3
Fer total exprimé en Fe2O3	%	LDI	0.05	13.5	10.3	36.2
Oxyde de Calcium	%	LDI	0.1	9.4	5.2	0.1
Oxyde de Magnésium	%	LDI	0.2	9.0	2.3	0.5
Oxyde de Manganèse	%	LDI	0.02	0.18	0.20	0.17
Oxyde de Potassium	%	LDI	0.05	0.86	2.34	< 0.05
Oxyde de Sodium	%	LDI	0.2	2.7	4.2	< 0.2
Oxyde de Titane	%	LDI	0.05	2.80	1.96	3.83
Perte au feu à 1000°C	%	LDI	0.1	0.4	1.8	12.8
Phosphates en P2O5	%	LDI	0.05	0.35	0.33	0.09
Silice	%	LDI	0.2	45.9	54.9	24.8

LDI : Limite Inférieure de dosabilité

Chef du service : **AM. FOUILLAC**
 Correspondant Qualité : **F. AUGUSTIN**
 Coordination des analyses : **A. GADALIA**

Responsables des unités :
 - Chimie Minérale : **D. MARTINEAU**
 - Environnement : **R. JEANNOT**
 - Chimie Isotopique : **J.P. GIRARD**

RAPPORT D'ANALYSES

Demandeur	THIBAUT
	REM
Provenance des échantillons	REUNION
Nature des prélèvements	
N° ANA	H6012B/3
N° de demande	1500566
N° d'affaire	
N° de compte	WE238

Laboratoire **Analyse chimique par fluorescence X**

Responsable **B. BORSIER**

Téléphone : (33) 02 38 64 30 17

Télécopie : (33) 02 38 64 39 25

Résultats certifiés par le(s) responsable(s) de laboratoire le : **05-JUL-2001**

Visa **A. Gadalia**



->-> ATTENTION AUX INFORMATIONS PORTEES PAGE(S) SUIVANTE(S).

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.
 La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Nb Pages ...

BRGM - Analyse

3, avenue Claude Guillemin - B.P. 6009 - 45060 Orléans cedex 2, France
 Téléphone : (33) 02 38 64 30 17 - Télécopieur : (33) 02 38 64 39 25 - Tél : BRGM 780258 F

Etude H6012B

Demande 1500566

Les analyses suivantes ont été réalisées dans le laboratoire : **Analyse chimique par fluorescence X**

Le mode opératoire MO005 Analyses par Spectrométrie de Fluorescence X
est utilisé pour doser :

Alumine

Oxyde de Calcium

Fer total exprimé en Fe2O3

Oxyde de Potassium

Oxyde de Magnésium

Oxyde de Manganèse

Oxyde de Sodium

Phosphates en P2O5

Silice

Oxyde de Titane

Le mode opératoire MO011 Mesure de la perte au feu à 1000°C
est utilisé pour doser :

Perte au feu à 1000°C

Commentaire du laboratoire : Ce rapport annule et remplace le rapport d'analyse n° H6012B du 23/03/01. Les résultats sont exprimés sur produit séché à 105°C.

RESULTATS : Sauf remarque particulière, les résultats sont exprimés en valeurs pondérales sur produit brut. FE2O3 seul est la teneur en fer total dans l'échantillon, exprimé sous forme d'oxyde. Fe2O3 exprime la teneur en fer ferrique de l'échantillon lorsque le fer ferreux est dosé (exprimé sous la forme FeO). La précision moyenne pour les éléments majeurs est de 2% relative en milieu de gamme. La précision moyenne pour les éléments trace est de 10% relative en milieu de gamme.

	Unité	Identification		
		Labo Client	1 A/SS 2 <i>aptérite</i>	2 P/SLO 2 <i>pouzzolane</i>
Alumine	% LDI	0.2	39.5	16.1
er total exprimé en Fe2O3	% LDI	0.05	26.4	10.4
xyde de Calcium	% LDI	0.1	< 0.1	5.2
xyde de Magnésium	% LDI	0.2	0.4	2.4
xyde de Manganèse	% LDI	0.02	0.33	0.21
Oxyde de Potassium	% LDI	0.05	0.19	2.29
Oxyde de Sodium	% LDI	0.2	0.3	4.1
xyde de Titane	% LDI	0.05	5.40	1.96
te au feu à 1000°C	% LDI	0.1	23.0	2.2
sphates en P2O5	% LDI	0.05	0.49	0.34
Silice	% LDI	0.2	4.4	54.8

LDI : Limite Inférieure de dosabilité

ANNEXE 6

Indice d'activité de deux pouzzolanes de La Réunion



CENTRE DE SAINT-REMY
Domaine de Saint-Paul
B.P. 37
78470 SAINT-REMY-LES-CHEVREUSE

BRGM

INDICE D'ACTIVITE DE POUDRES

Dossier n° R172-6-193

Mai 2001

**SERVICE RECHERCHE MATERIAUX
L. HASNI**

CENTRE EXPERIMENTAL DE RECHERCHES ET D'ETUDES DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS
S.A. au Capital de F 10 750 000 - SIEGE SOCIAL : DOMAINE DE SAINT-PAUL - B.P. 37 - 78470 SAINT-REMY-LES-CHEVREUSE - Tél. 01 30 85 24 00
Email : info@cebtpr.fr

RCS Versailles B 582 101 176 - SIREN 582 101 176 - Code APE 742 C - N° TVA : FR 27 582 101 176

Création CEBTP en 1965 - 21 05 0123 - Copie conforme déposée auprès du Ministère chargé de l'équipement

I - OBJET DE L'ETUDE

A la demande du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), il s'agit de déterminer l'indice d'activité de deux poudres selon les prescriptions de la norme EN 196-1.

II - PARTIE EXPERIMENTALE

II-1. Matériaux étudiés

Les deux produits à examiner sont les suivants :

- Scorie volcanique rouge 0/4 mm Référéncée par le BRGM S/PP3A
- Tuf pouzzolanique référencé par le BRGM P/SPi2B

Pour la scorie nous avons procédé à un concassage pour récupérer la fraction 0/80 µm alors que pour tuf pouzzolanique nous avons tamisé à 80 µm.

II-2. Essais d'indice d'activité

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes 4 x 4 16 cm à base ciment CEM I 42.5 de saint Pierre La Cour adapté pour les essais d'indice d'activité.

Les éprouvettes ont été préparées selon les prescriptions de la norme NF EN 196-1.

Les compositions des mortiers sont regroupées dans le tableau 1 suivant.

Tableau 1 : composition des mortiers à base des poudres BRGM

	TEMOIN	TUF POUZZOLANIQUE	SCORIE
CEM I 42.5	450 g	337,5 g	337,5 g
S/PP 3A	0	112,5	-
P/SPi 2B	0	-	112,5 g
Eau	225 g	225 g	225 g

Les indices d'activité à 28 jours seront déterminés à partir des résistances en compression des trois mortiers ci dessus.

$$I_{\text{tuf}} = \frac{f_{c28j}(TUF)}{f_{c28j}(Témoin)} \text{ et } I_{\text{scorie}} = \frac{f_{c28j}(SCORIE)}{f_{c28j}(Témoin)}$$

Avec

$f_{c28j}(Témoin)$: résistance en compression à 28 jours du témoin

$f_{c28j}(TUF)$: résistance en compression à 28 jours du mortier à base de TUF (25%) et CEMI 42.5 (75 %)

$f_{c28j}(SCORIE)$: résistance en compression à 28 jours du mortier à base de SCORIE (25 %) et CEMI 42.5 (75%)

III - RESULTATS

Les résultats des essais de compression après cure de 28 jours à 20°C et 100 % d'humidité relative sont regroupés dans le tableau 2 suivant.

Tableau 2 : résistances en compression des mortiers et indices d'activité

Age (j)	N°	Masse (g)	Résistance à la flexion		Résistance à la compression		
			(kN)	(MPa)	(kN)	(kN)	(MPa)

CPA CEM I 42,5

28	1	586,1	3,295	8,24	75,60	75,54	47,2
	2	590,0	3,620	9,05	73,87	75,65	46,7
	3	592,8	3,412	8,53	74,53	77,68	47,6
	moyenne	589,6	3,442	8,61	74,67	76,29	47,2

CPA CEM I + P/SPI 2B (Tuf pouzzolanique)

28	1	577,1	2,873	7,18	61,91	60,07	38,1
	2	578,2	2,869	7,17	61,21	62,79	38,8
	3	580,7	2,855	7,14	59,72	58,55	37,0
	moyenne	578,7	2,866	7,16	60,95	60,47	37,9

INDICE D'ACTIVITE

0,80

CPA CEM I 42,5 S/PP 3A (Scorie volcanique)

28	1	582,6	2,382	5,96	53,69	54,80	33,9
	2	579,8	2,754	6,89	53,40	55,61	34,1
	3	578,2	2,431	6,08	54,74	53,20	33,7
	moyenne	580,2	2,522	6,31	53,94	54,54	33,9

INDICE D'ACTIVITE

0,72

Les indices d'activité de la scorie volcanique et du Tuf pouzzolanique sont respectivement de 0,72 et 0,80.

Pour la scorie volcanique cette valeur de 0,72 est similaire aux valeurs relatives aux fillers calcaire et siliceux. En revanche, la valeur d'indice d'activité de 0,80 est similaire aux valeurs relatives aux cendres volantes ou aux laitiers de haut fourneau.



IV - CONCLUSION

Les indices d'activité des deux poudres, scorie volcanique et tuf pouzzolanique, montre que les scories n'ont pas d'activité pouzzolanique à l'inverse du tuf pouzzolanique. Ces résultats n'excluent pas leur utilisation en temps qu'ajout aux bétons hydrauliques, même pour la scorie volcanique. En effet, l'indice d'activité n'est qu'un paramètre parmi d'autres tout aussi importants pour la valorisation de ces produits. Parmi les autres caractéristiques importantes des poudres on peut citer :

- Le besoin en eau
- La morphologie des grains, la texture et la porosité
- La capacité de remplissage
- La granulométrie et la surface spécifique
- La composition chimique et minéralogique

Par ailleurs il faudrait vérifier la régularité et l'homogénéité de la production de ces produits, exigence indispensable pour les additions pour béton.

SERVICE RECHERCHE MATERIAUX

Le Chef de Service,

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'L. HASNI', is written over a horizontal line. Below the signature, the name 'L. HASNI' is printed in a bold, sans-serif font.

L. HASNI

ANNEXE 7

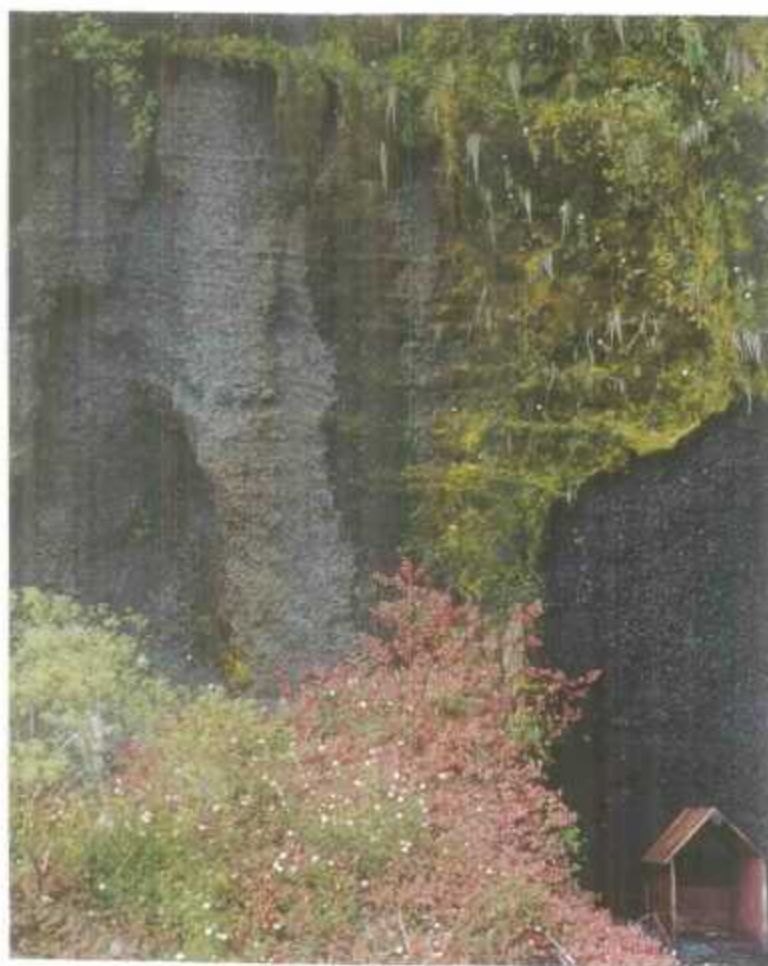
Planches photographiques



**Photo 1 - Piton de Mont Vert, Mont Vert les Bas, commune de Saint-Pierre. Ancienne exploitation de scories basaltiques.
Echantillon S / SPi 1**



**Photos 2 et 3 : Le Gros Piton Rond. Ancienne carrière de scories basaltiques litées.
Noter la présence de blocs de basalte dans les niveaux grossiers**



Photos 4 et 5 : Lieu-dit « la Grande Montée », # 2,1 km au nord du col de Bellevue (commune de La Plaine des Palmistes) : scories basaltiques noires litées (échantillon S / PP4).



Photos 6 et 7 : Anciennes exploitations de scories basaltiques au voisinage de la carrière SBTPL (plaine des Palmistes)



Photo 8 : Ancienne carrière de tuf de Saint-Louis, flanc nord-ouest, lieu-dit Maison Rouge (échantillons P / SLo1 et 2)



Photo 9 : Ancienne carrière de tuf de Saint-Louis, flanc sud-est, lieu-dit Maison Rouge (échantillons P / SLo 1A et 1B)



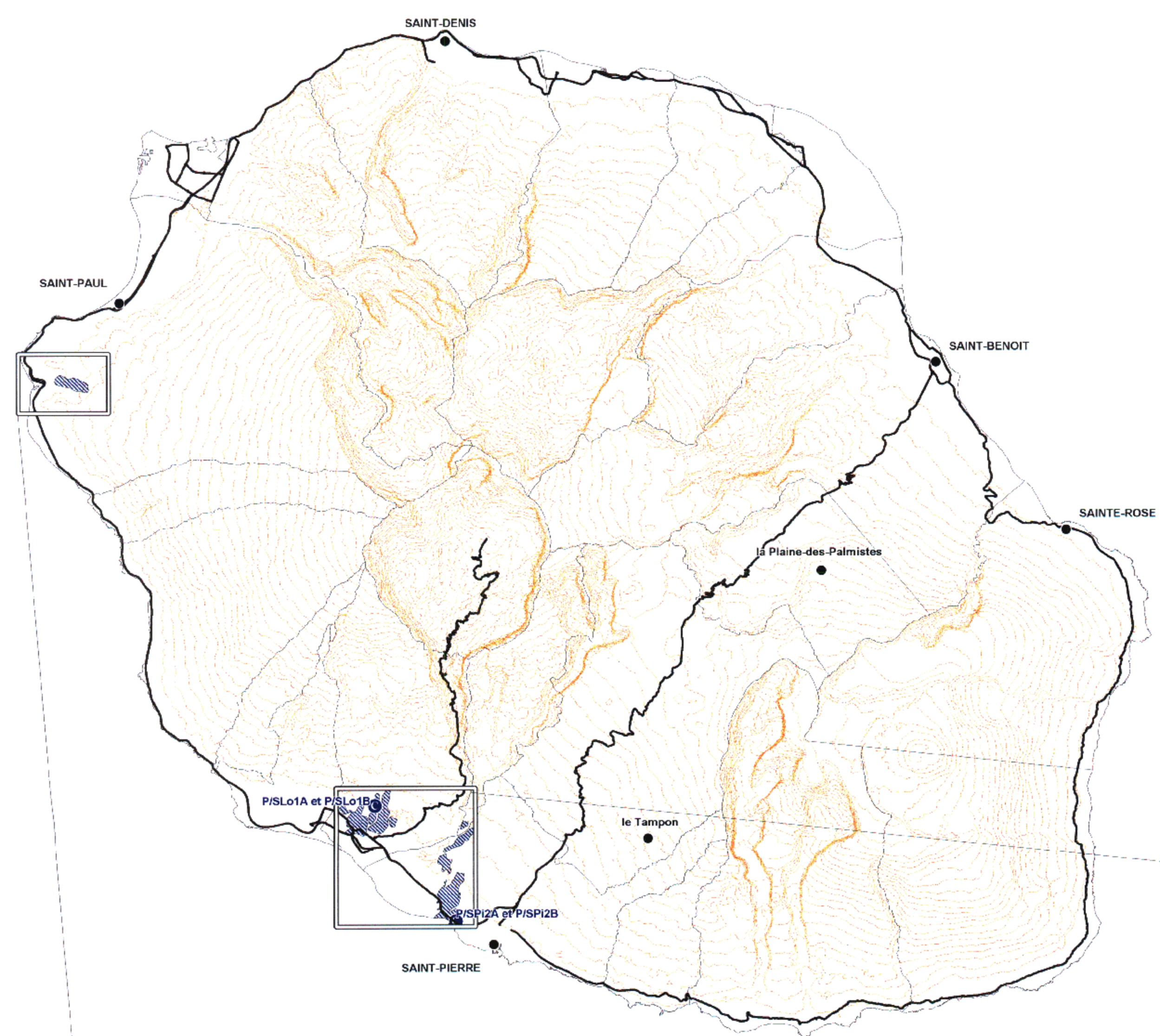
Photo 10 : Ancienne carrière de scories basaltiques de Piton Armand (commune de Sainte-Anne)



Photos 11 à 13 : Carrière de tuf de Saint-Pierre à « La Saline ».



Photos 14 et 15 : Anciennes exploitations de scories basaltiques, Route Forestière du Volcan, depuis Bourg - Murat



Carrières ou zones d'emprunt échantillonnées

P/SL01A: Référence d'échantillonnage

Pouzzolanes



Evaluation des ressources et potentiel de valorisation des matériaux pouzzolaniques de La Réunion

Annexe 4: Carte de situation des gisements
de pouzzolanes et d'échantillons prélevés

Etude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM 2001-RES-409

BRGM/RP-50865-FR
2001 SGR/REU 11



mai 2001

