



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

Distr. RESTREINTE

07412

DP/ID/SER.B/82
24 mai 1978
Français

ETUDE DE LA FABRICATION DE LA CHAUX

SM/BDI/78/011

BURUNDI,

RAPPORT FINAL

Etabli pour le Gouvernement burundais par
l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel,
organisation chargée de l'exécution pour le compte du
Programme des Nations Unies pour le développement



Organisation des Nations Unies pour le développement industriel

Programme des Nations Unies pour le développement

ETUDE DE LA FABRICATION DE LA CHAUX

SM/BDI/73/011

BURUNDI

Rapport final

Établi pour le Gouvernement burundais par
l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel,
organisation chargée de l'exécution pour le compte du
Programme des Nations Unies pour le développement

D'après l'étude de M. P. Olof Grane, ingénieur des méthodes

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel
Vienne, 1976

Notes explicatives

Sauf indication contraire, le terme "dollar" (\$) s'entend du dollar des Etats-Unis d'Amérique.

L'unité monétaire du Burundi est le franc burundais (F Bu). Durant la période sur laquelle porte le présent rapport, la valeur du dollar des Etats-Unis d'Amérique en F Bu était en moyenne :

$$1 \$ = 78,75 \text{ F Bu}$$

Sauf indication contraire, le terme "tonne" désigne une tonne métrique.

Le tiret (-) indique, que le montant est nul ou négligeable.

Le sigle ASTM désigne la American Society for Testing and Materials.

En plus des sigles, abréviations, signes et termes habituels, on trouvera aussi dans le présent rapport :

kgf/cm² kilogramme-force par cm²
mole molécule-gramme

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les frontières indiquées sur les cartes n'emportent ni approbation ni acceptation officielles de la part de l'ONU.

La mention dans le texte de la raison sociale ou des produits d'une société n'implique aucune prise de position en leur faveur de la part de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel.

RESUME

Ce rapport est le rapport final du projet relatif à l'étude de la fabrication de la chaux au Burundi (SM/BDI/73/011). L'objectif à long terme de ce projet était d'aider le Gouvernement burundais à promouvoir sa politique de l'amélioration de l'habitat. Les objectifs immédiats étaient de réduire les importations de ciment, de créer des emplois et de mettre à la disposition des constructeurs des matériaux plus économiques.

Les activités de la seconde phase de ce projet, dont il s'agit ici, ont porté sur l'étude des différents gisements de calcaire, les pouzzolanes, l'expérimentation de diverses méthodes d'extinction de la chaux et une série de tests pour déterminer l'activité pouzzolanique de différents matériaux.

Le démarrage du four à chaux n'a pu se faire comme il était prévu à l'origine, les réparations nécessaires n'ayant pas été faites à temps.

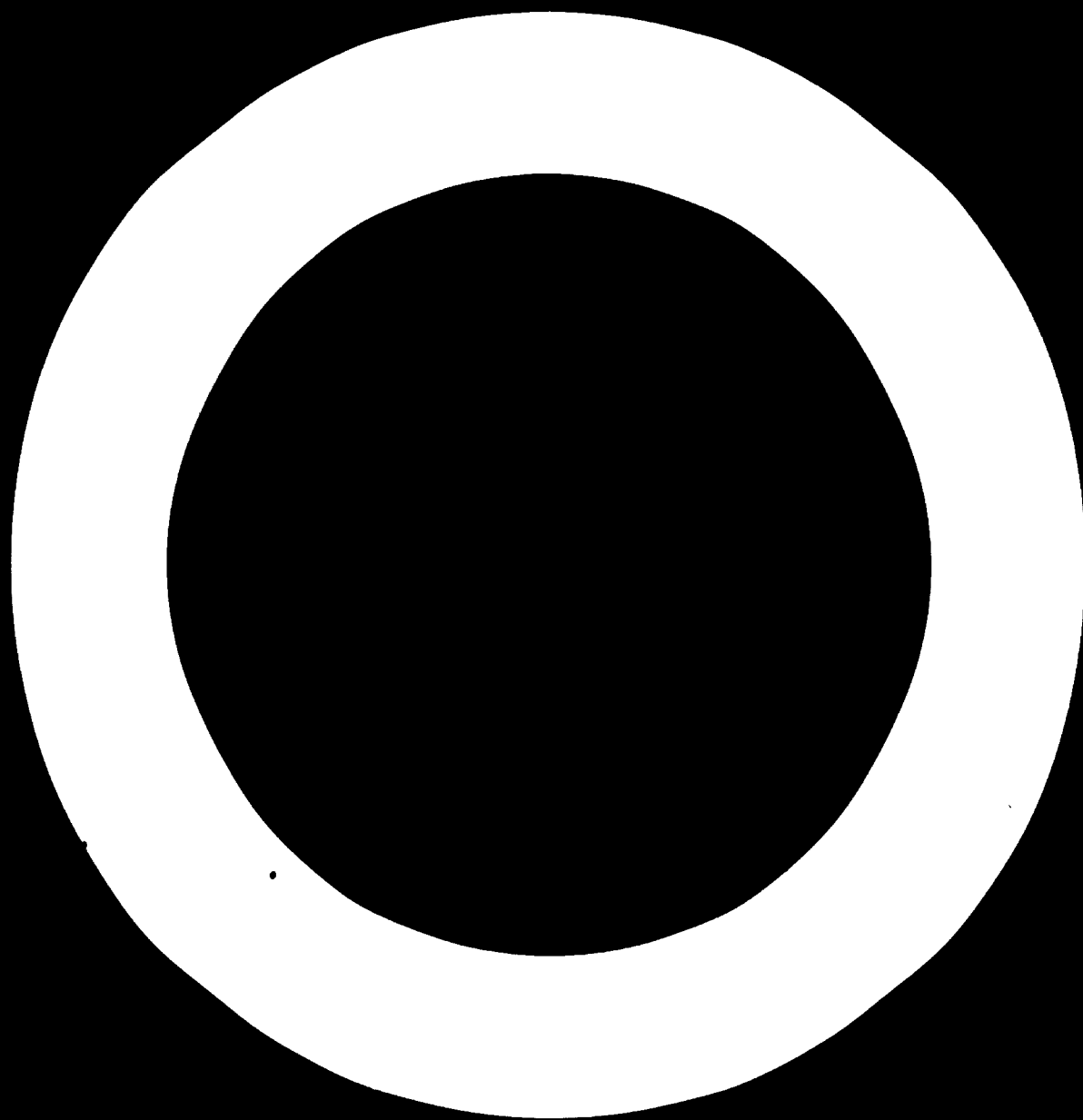


TABLE DES MATIERES

<u>Chapitres</u>	<u>Pages</u>
INTRODUCTION	7
I. ACTIVITES RELATIVES AU PROJET	9
A. Les gisements de calcaire au Burundi	9
B. Les fours à chaux	13
C. Les pouzzolanes	18
D. La production de chaux éteinte	27
E. Mortier et béton à base de chaux, ciment et pouzzolane	34
II. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	43

Annexes

I. Etude du gisement de travertin de Gihungwe	45
II. Programme de travail pour le démarrage du four à chaux	48
III. Description des échantillons	49
IV. Détermination de l'activité pouzzolanique	52
V. Liste des personnalités rencontrées	56

Liste des tableaux

1. Analyse comparative des coûts	14
2. Mortiers de chaux et de ciment, d'après Hogberg	36

Liste des figures

I. Coupe géologique, Gihungwe	57
II. Gisement de Bubanza	59
III. Four à chaux de la région de Mosso	60
IV. Four à chaux semi-industriel	61
V. Fondation pour le ventilateur. Tuyauterie de raccordement et cheminée d'évacuation	62
VI. Cheminée à éjecteur	63

	<u>Pages</u>
VII. Granulométrie du sable	64
VIII. Diagramme de la cuisson du travertin G 16 de Gihungwe à 900°C	55
IX. Détermination de l'activité de la chaux G 27	66
X. Résultats de la résistance à la compression	67
XI. Extincteurs de chaux, type Wallace-Tiernam et Dorr-Oliver	68
XII. Schéma d'une installation d'extinction de chaux à trois étages, type KLD	69
XIII. Extincteur à trois étages, type KLD	70
XIV. Installation d'extinction de chaux, type Peach-Rover	71
XV. Modèle d'une installation simple d'hydratation	72
XVI. Besoins en eau des mortiers	73
XVII. Résistance des mortiers mixtes	74
XVIII. Carte de Bujumbura NW4	75
XIX. Carte de Gitega	76
XX. Cartes de Cibitoke (A et B)	77
XXI. Carte de Bujumbura NW2	79
XXII. Carte de Ngozi	80
XXIII. Carte de Mwishanga	81
XXIV. Gisement de travertin de Gihungwe	82
XXV. Détermination de l'activité pouzzolanique	83
XXVI. Détermination de l'activité pouzzolanique	84
XXVII. Détermination de l'activité pouzzolanique	85

INTRODUCTION

Une demande d'assistance pour l'étude de la fabrication de la chaux au Burundi, présentée par le Ministère de l'économie le 27 juin 1973 dans une lettre au représentant résident du PNUD à Bujumbura, sous couvert du Ministère des affaires étrangères, de la coopération et du plan au titre des services industriels spéciaux, a été approuvée par le PNUD le 27 octobre 1973 et par l'ONUDI le 6 novembre 1973. La contribution du PNUD à ce projet était de 39 500 dollars. Le projet porte le numéro SM/BDI/73/011, ayant été inscrit dans le cadre des mesures spéciales pour les pays en voie de développement les moins avancés.

L'envoi d'un expert a été décidé. La mission devait se dérouler en plusieurs phases.

Dans un rapport préliminaire, en juillet 1973, l'expert a fait un résumé de ce que l'on savait des gisements de calcaire du Burundi : travertin de Gihungwe et calcaire dolomitique de Bubanza et de la région de Mosso. Jusqu'à cette date, aucune estimation des réserves de Gihungwe n'avait été faite. Les réserves de Bubanza et de Mosso ont été estimées à plus de 100 millions de tonnes chacune.

La description de poste de l'expert prévoyait la construction d'un four pilote pour la production de chaux vive. L'expert ayant découvert, dans le quartier industriel de Bujumbura, un four abandonné, à fonctionnement semi-continu, à six chambres, en bonne condition, il a été décidé, en accord avec le gouvernement, d'utiliser ce four pour la production de la chaux, après qu'un expert de l'ONUDI, spécialiste des fours à chaux, l'ait déclaré apte à cet usage. L'expert avait recommandé l'octroi d'une bourse pour une durée de six mois, destinée à la formation à l'étranger d'un Burundais dans le domaine de la production de la chaux dans les fours à chambre, à partir de la dolomie - ce qui était d'autant plus important que, à cette date, l'expert associé en production de matériaux de construction n'était toujours pas recruté. L'expert avait aussi recommandé que le projet soit amplifié et complété par une étude des possibilités de production de ciment pouzzolanique.

Le 3 juillet 1975, le Ministère de l'économie et des finances a demandé la révision du plan d'exécution du projet initial, le four industriel de

l'usine Cimental de Bujumbura, dont l'entreprise IMPEX s'était rendue acquéreur, devant être remis en marche. Le mandat de l'expert prévoyait son arrivée un mois avant le démarrage du four à chaux. Or, à son arrivée, le 23 décembre 1975, l'expert a pu constater, comme il l'a fait savoir au directeur général du Ministère de l'économie, que le four se trouvait dans le même état qu'au moment de son départ, 17 mois auparavant. Il a préparé un programme de travail spécifiant tous les travaux à entreprendre pour mettre le four en état de fonctionnement. Ce programme de travail était daté du 6 janvier 1976. Comme les préparatifs ont demandé beaucoup de temps, l'expert a fait de nouveau un programme de travail détaillé en collaboration avec le directeur de l'IMPEX, dont une copie indiquant les points du programme qui, pour diverses raisons, ne sont pas encore terminés, se trouve à l'annexe II. Etant donné ces circonstances, l'expert ne pouvait faire démarrer le four dans les quatre mois impartis à sa mission. M. Kacjan, chef du projet de l'ONUDI, serait, toutefois, en mesure de faire démarrer le four, si un homologue qualifié, qui prendrait ensuite la responsabilité de la production, était mis à sa disposition par IMPEX.

I. ACTIVITES RELATIVES AU PROJET

A. Les gisements de calcaire au Burundi

Le Gouvernement du Burundi intéressé par la production de chaux a chargé le Département des mines et de la géologie d'étudier les gisements de calcaire du pays. Un rapport préliminaire, en mars 1975, traite des gisements de calcaire de Gihungwe. Le rapport final, terminé en novembre 1975 donne des informations sur l'ensemble des gisements.

1. Gisement de Gihungwe

Il avait été prévu d'utiliser le travertin de Gihungwe comme matière première pour le démarrage des opérations à cause de la proximité de Bujumbura et de la très faible teneur en magnésium de ce matériau, le calcaire dolomitique de Bubanza devant être exploité par la suite.

Après avoir pris connaissance des deux rapports, l'expert s'est rendu sur les lieux à plusieurs reprises et a procédé à ses propres études et évaluations. Il a également obtenu qu'un entrepreneur creuse une tranchée sur l'emplacement de la future carrière. Des échantillons ont été prélevés pour faire des analyses.

Après s'être fait une opinion sur le gisement, l'expert a conclu que des études ultérieures devraient être faites par un ingénieur des mines. Les réserves indiquées dans les rapports semblaient exagérées et, en outre, la localisation n'était pas très claire. Le directeur du Département des mines et de la géologie a fait mettre à la disposition de l'expert un ingénieur des mines et un prospecteur et une étude plus détaillée a été élaborée, établissant la localisation exacte du gisement et ses dimensions, dont une copie figure à l'annexe I.

Conformément aux prévisions de l'expert, il s'est avéré que les réserves de cuirasse de travertin n'étaient pas de 180 000 t, mais de 17 000 t seulement, différence qui donne lieu de reconsidérer l'exploitation de ce gisement. Après en avoir discuté avec différentes personnes du Département des mines et de la géologie, du Département de l'industrie et de l'artisanat, ou attachées au projet, ainsi qu'avec les représentants des propriétaires du four à chaux, on a conclu que, de toute façon, le gisement de Gihungwe devait être exploité, pour les raisons suivantes : la couche stérile est seulement

de 10 cm; la couche de cuirasse est facile à exploiter puisque son épaisseur est faible et on peut l'exploiter d'une façon artisanale en utilisant de simples outils et une petite machine à percussion avec un moteur à essence; le gisement de Gihungwe est le seul dont l'exploitation peut commencer immédiatement; ses réserves suffisent pour une année ou deux et, entre-temps, une étude complémentaire concernant le gisement de Bubanza peut être faite. Ce dernier est d'un accès plus difficile que celui de Gihungwe; apparemment beaucoup plus grand, il nécessitera une étude encore plus longue, qui devrait être entreprise le plus tôt possible et, de préférence, confiée à l'ingénieur des mines qui a assisté l'expert à Gihungwe.

La figure 1 représente une coupe faite à travers le gisement. On distingue une couche supérieure de cuirasse de travertin, matériau dur et dense, d'une épaisseur variant de 10 à 70 cm et dont la composition chimique varie. La valeur moyenne de cette composition n'a pas été établie. Les analyses publiées dans le premier rapport du Département des mines et de la géologie font état de variations de la teneur en CaO entre 27 et 47 %, en MgO entre 5 et 17 %/ et 17 %. La concentration d'insoluble varie entre 15 et 30 %, ce qui veut dire qu'à l'hydratation il peut y avoir une très grande quantité de déchets. Le rapport n'indiquant ni où ni comment les échantillons ont été prélevés, une étude chimique complémentaire est nécessaire pour savoir dans quelles conditions les variations apparaissent. Ces informations permettraient de procéder à une exploitation sélective et d'obtenir des matières premières de meilleure qualité. Il est absolument indispensable de faire cette étude immédiatement. En effet, on va bientôt procéder au démarrage du four à chaux et l'exploitation du calcaire doit précéder ce démarrage.

La couche supérieure de cuirasse est suivie d'une autre couche appelée par les géologues "travertin non induré". Elle est composée de travertin nodule, mélangé avec de la terre (voir figure I). Les tests de tamisage de cette partie, prélevée dans un puits-test, indiquent que plus de la moitié est constituée de nodules entre 5 et 40 mm et environ un tiers de nodules entre 1 et 5 mm; le reste est de la terre. La plus grande de ces fractions a une composition similaire à celle de la cuirasse. Si sa teneur en insolubles n'était pas si élevée, on pourrait l'utiliser pour la production de la chaux. Toutefois, sa dimension la rend inapte à être utilisée dans le four à chambres ou dans le

four vertical. Le seul type de four pour lequel elle serait appropriée est le four rotatif.

2. Gisement de Busiga

Dans le nord du pays, à Busiga, il y a un gisement de travertin qui, de l'avis des géologues, est si petit qu'il ne peut avoir d'intérêt que pour une utilisation locale. Ce gisement a été exploité par des missionnaires de Busiga, qui ont produit de la chaux pour leurs propres besoins. Au moment où l'on a commencé à rechercher les calcaires à chaux en 1975, le gouvernement a mis obstacle à son exploitation, afin d'établir le volume des réserves. Ce gisement est le seul connu au Burundi, dont le calcaire, qui a une très faible teneur en magnésium, est susceptible d'être utilisé pour la production du ciment portland. Comme ces réserves, actuellement connues, sont trop petites pour être exploitées industriellement, la mesure prise par le gouvernement devrait être levée, pour que les missionnaires puissent reprendre la production de la chaux pour leurs besoins.

3. Gisement de Bubanza

Lorsque l'exploitation de la carrière de travertin aura démarré à Gihungwe, il faudra faire une étude appropriée du gisement de dolomite de Bubanza, puisque c'est le second gisement de calcaire le plus proche de Bujumbura. L'expert a visité la région avec le prospecteur et avec l'ingénieur du Département des mines et de la géologie. Voir figure II, (hors-texte), une carte montrant la place du gisement, son extension et différentes tranchées. Les tranchées ayant été remplies de terre, obstruées par la brousse, il était impossible d'avoir une vue nette de ce gisement, malgré des visites répétées d'une grande partie du terrain. Bien que plusieurs échantillons aient été prélevés à l'époque, l'expert a constaté avec surprise que la carrière de Bubanza était aussi constituée de cuirasse de travertin, ce qui n'avait été mentionné dans aucun des rapports. Cette constatation a été confirmée par le technicien qui a spécifié que c'est le cuirasse qui donne le meilleur résultat. Sous la cuirasse, on a trouvé un minerai cristallin et jaunâtre qui est une dolomite. De l'avis du technicien, ce matériel est blanchâtre en plus grande profondeur. On a aussi prélevé un échantillon de ce genre, blanchâtre et mi-cristallin, presque amorphe, qui s'est trouvé être du quartzite. D'après le rapport final sur les gisements de calcaire du Département des mines et de la géologie,

les gisements dans cette région forment deux branches composées de divers calcaires qui bifurquent ou forment des lentilles isolées et traversées par des filons de pegmatites acides. On constate souvent une silicification importante. Une exploitation soignée est nécessaire, car il n'est pas facile de distinguer la dolomite de dolomite incrustée de silice ou du quartzite et les filons s'entre-pénètrent les uns les autres. Ceci, ajouté au fait que toutes les tranchées n'ont pas été tracées sur la carte et qu'une tranchée représentée sur la carte comme ayant 300 m, mesure seulement 100 m sur le terrain, rend nécessaire de nouvelles prospections. Les analyses du rapport du Département des mines et de la géologie montrent que la tranchée No 4 a une faible concentration d'insolubles, variant de 1 à 4 %. L'expert propose de recommencer cette tranchée, d'y creuser de nouveaux puits au milieu et à chaque extrémité, puis de creuser trois puits à 50 m au nord et au sud de la tranchée, de façon à pouvoir disposer de calcaire pour couvrir les besoins de 50 années. Cette prospection devra être faite le plus tôt possible, de préférence par le même ingénieur des mines assisté d'un géologue compétent. Cela permettra d'avoir une meilleure connaissance du gisement de calcaire de Bubanza, dont l'exploitation peut commencer tout de suite.

4. Gisement de la région de Mosso

Un autre gisement de calcaire du Burundi se trouve dans la région de Mosso. C'est du calcaire dolomitique et les analyses figurant dans le rapport de géologie ont montré de grandes variations; à un certain endroit, cependant, les teneurs sont plus ou moins constantes. C'est le cas du calcaire de Murama, qui a une teneur de CaO de 30 % environ et une teneur de MgO de 20 % environ. Rien n'a été signalé en ce qui concerne les insolubles. La région de Mosso est le seul endroit au Burundi où, actuellement, la chaux est produite en petite quantité d'une façon artisanale. L'expert a visité Murama en 1974 et la figure III montre un four typique de cette région; à cette époque, l'expert a fait des propositions pour améliorer les fours, qui consommaient beaucoup de bois, et suggéré que l'expert associé, qui devait être recruté par l'ONUDI, passe quelque temps à cet endroit pour aider et donner des conseils pour améliorer la production. Comme, à cette date, l'expert associé n'était pas encore recruté, l'expert a dessiné un four approprié pour la région de Mosso.

Il se peut que le calcaire de la région de Mosso soit, au Burundi, le mieux adapté à la production de la chaux, mais cela ne peut être vérifié qu'après la fin des nouvelles prospections dans la région de Bubanza. Comme la plus grande utilisation de chaux se fera dans la région du Bujumbura et comme le coût du transport est, actuellement, environ de 2 000 F Bu par tonne de Mosso à Bujumbura, il n'est pas vraisemblable que ce gisement soit utilisé pour la cuisson et la consommation à Bujumbura.

En relation avec les travaux de recherche de l'expert sur les pouzzolanes (voir sect. C), il était intéressant de comparer la réactivité pouzzolanique par substitution de la chaux pure utilisée à l'essai avec la chaux éteinte venant de Mosso. Une analyse a montré que la chaux avait une humidité de 18,5 % - ce qui signifie qu'elle a été éteinte avec trop d'eau. La teneur en CaO était de 36 % et en MgO de 22,4 % alors que les insolubles représentaient seulement 2,39 %. L'hydrate est très grossier, une modification dans la production et dans la technique d'extinction peut certainement améliorer cette chaux et augmenter son utilisation.

B. Les fours à chaux

Après la première visite de l'expert au Burundi en 1974, il a été question d'utiliser pour la production industrielle de la chaux un four à fonctionnement semi-continu à 6 chambres qu'il avait découvert dans le quartier industriel de Bujumbura. Une entreprise burundaise a acheté plus tard ce four avec une installation pour la mouture de clinker, dans l'intention de l'utiliser le plus tôt possible.

L'expert avait demandé à l'ONUDI l'envoi d'un expert en fours à chaux, pour évaluer si le four convenait. En mai 1975, cet expert est arrivé et a fait une étude sur place. Il a trouvé le four apte à la production de chaux et recommandé que le four existant soit réparé et mis en état de fonctionner le plus tôt possible. A ce moment, on a retrouvé l'entreprise qui, jadis, avait construit le four. Bien que sceptique au début sur l'aptitude de ce four à produire plus tard de la chaux, cette entreprise a fait une proposition pour mettre le four en état de marche. Un ventilateur de fumée et des brûleurs à mazout ont été achetés dans cette entreprise par le nouveau propriétaire.

Lorsque l'expert est arrivé au Burundi en décembre 1975, il a été informé de ce qui s'était passé. Conformément à la description de poste, le four devait démarrer un mois après l'arrivée de l'expert. Pourtant, quand il a

visité le four, il l'a trouvé exactement dans les mêmes conditions que lorsqu'il avait quitté le Burundi, 17 mois auparavant.

Il a donc immédiatement préparé une liste des travaux à réaliser et a soumis cette liste à IMPEX, la firme propriétaire du four. Craignant que le matériel réfractaire ne puisse résister à une température de cuisson aussi élevée, l'expert a cherché à savoir qui était le fournisseur des briques réfractaires. Il s'est avéré que c'était Cullinan Refractories Limited of Olifantsfontein (Afrique du Sud), qui, sur demande, a adressé une brochure technique sur ces briques réfractaires, où une température maximum de 1450°C est indiquée. Malgré la décision d'utiliser ce four à chambres pour la cuisson du calcaire, l'expert a pensé devoir faire une analyse des coûts de la production dans ce four comparés aux coûts dans un four vertical moderne installé tout près de la carrière, dont la consommation de combustible est beaucoup plus faible et qui épargnerait aussi les coûts de transport.

Tableau 1. Analyse comparative des coûts

	Unité	Four à chambres à Bujumbura	Four vertical à Bubanza
Calcaire	t	16 700	16 700
Distance	km	40	2
Coût du transport de calcaire (à 10 F Bu/t)	F Bu	6 680 000	10 334 000
Consommation de fuel	Kcal/kg	2 200	110
Coût du fuel (à 12,5 F Bu/l)	F Bu	2 200	1 100
Coût du transport du fuel (à 15 F Bu/m ³)	F Bu	27 500 000	13 750 000
Coût du transport de la chaux			660 000
			4 000 000
		<u>34 180 000</u>	<u>18 744 000</u>

Pour faire une comparaison valable, il faudrait cependant ajouter le coût des amortissements. Le four à chambres a été obtenu pour ainsi dire gratuitement quand on a acheté l'installation de mouture de clinker; seuls certains travaux de réparation et quelques équipements nouveaux sont nécessaires pour le mettre en état de marche. Ces travaux peuvent être évalués à un total de 3 millions de F Bu.

Le four vertical coûterait approximativement 360 000 dollars y compris le transport et l'installation, ce qui équivaut à peu près à 28 800 000 F Bu. Si on calcule un amortissement et des intérêts de 20 %, les coûts additionnels seront :

<u>à Bujumbura</u>	<u>en F Bu</u>	
Four à chambres	34 180 000	
Amortissement et intérêts	600 000	
Total	34 780 000	ou 3,5 F Bu/kg de chaux
 <u>à Bubanza</u>		
Four vertical	18 744 000	
Amortissement et intérêts	5 760 000	
Total	24 504 000	ou 2,45 F Bu/kg de chaux

D'après ces calculs, on voit que la chaux produite à Bubanza coûterait approximativement 1 F Bu moins cher.

Il y a cependant d'autres facteurs, comme la main-d'oeuvre, dont il faut tenir compte. Evidemment, le four à chambres utilisera plus de main-d'oeuvre que le four vertical; mais comme la main-d'oeuvre n'est pas chère, cela n'aura pas une grande influence sur les coûts. Ce qui, par contre, en aura, c'est qu'à Bubanza il n'y a absolument aucune infrastructure : ni route, ni électricité, ni eau, ni habitations, ni service de réparations. Il n'y a absolument rien. Si on incluait dans le coût d'investissement le coût de l'infrastructure, le total serait d'environ 40 millions de F Bu à Bubanza, comparé à celui de 3 millions de F Bu à Bujumbura. Il faudrait aussi probablement deux ans pour s'y installer, alors qu'on aurait besoin de trois mois à Bujumbura. Il serait ainsi, sans aucun doute, plus cher de produire de la chaux à Bubanza qu'à Bujumbura. Il a donc été décidé de commencer la production de la chaux dans le four à chambres, en accord avec l'expert. Lorsque le moulin de mouture du clinker sera en marche et qu'on produira du ciment, il faudra reconsidérer cette décision; il se peut qu'à ce moment on estime nécessaire de construire un four vertical moderne pour la production de la chaux, mais probablement pas à Bubanza sinon à Bujumbura.

La question de la future production de la pouzzolane va aussi se poser et il y a plusieurs alternatives; on peut produire, d'une part, de la chaux et, d'autre part, de la pouzzolane dans le four à chambres; par exemple une semaine l'un et une semaine l'autre. On pourrait aussi démonter une ou deux chambres du four

à chambres et utiliser les briques réfractaires pour la construction d'un four vertical et utiliser les chambres restantes ou installer un petit four rotatif pour la production de la pouzzolane. L'expérience dira quelles sont les méthodes les plus appropriées.

2. Four à chaux semi-industriel

Pendant que l'expert attendait la remise en état du four à chambres, il a réfléchi à la question des fours à chaux artisanaux à Mosso. En visitant la région, en 1974, il avait noté que les fours étaient mal conçus, que leur rendement était très faible et le fuel mal utilisé. A cette date l'expert avait fait quelques suggestions pour améliorer les fours, mais on l'a informé, lors de son retour, que rien n'avait été fait. L'expert a donc dessiné un four approprié pour l'intérieur du pays où il n'y a pas d'électricité et où on peut utiliser le bois ou le coke de tourbe comme combustible. Ce four (voir figure IV) a la même capacité que 10 des fours qu'on utilise actuellement à Mosso et utilisera à peu près la moitié du combustible; son coût d'installation est bas et on peut utiliser les matériaux locaux pour sa construction. Il s'agit d'un four vertical, à cuisson continue, à charge mixte, disposant d'un chauffage supplémentaire. Il sera construit en matériaux réfractaires locaux qu'on mettra entre deux parois ou moules; la paroi intérieure est en tube de fer et l'extérieur fait de briques en mortier de ciment. A plus ou moins brève échéance, le tube de fer sera consumé par le feu, mais à ce moment-là les matériaux réfractaires seront déjà vitrifiés et se seront stabilisés.

Description de la construction

Sur une fondation en béton armé de 5 m x 5 m x 0,5 m, on placera un tube en fer de 10,5 m x 1,20 m x 4 mm, qu'on a trouvé d'occasion (ancien tube de cheminée). On peut aussi utiliser les buses métalliques qu'utilisent les Travaux publics comme conduites au-dessous des routes. On peut en trouver sur place et en acheter d'occasion. Autour de ce tube, on construira un mur en matériaux réfractaires, en utilisant comme matière principale la diorite qu'on trouve en grande quantité dans les carrières des Travaux publics à l'intérieur du pays. S'il n'y a pas de diorite, on peut utiliser d'autres roches comme le granite, le grès, le quartz, etc. On mettra les blocs de diorite dans un mortier réfractaire fait avec une partie de la poudre de diorite, mélangée avec une partie égale de kaolin ou d'une argile assez pure - le kaolin est exploité actuellement à Kayanza et transporté à Bujumbura où il est utilisé dans la fabrication d'insecticides. Autour de ce mur réfractaire, on construira

un mur en briques bien cuites en utilisant un mortier riche en ciment. Il faudra aussi monter des bandes de consolidation de 100 x 3 mm tous les 0,5 m car lorsque le four atteint une température de 1000°C, son expansion est de l'ordre de 4 cm. Le four sera chargé avec des couches de calcaire et du bois, comme on procède dans les fours artisanaux, mais, pour accélérer la cuisson, on construira deux foyers pour un chauffage supplémentaire, à 2,5 m du sol. Dans ces foyers on pourra utiliser de la tourbe comme combustible.

Contrairement à la pratique courante dans le cas d'un four artisanal, ce four travaillera de manière continue, ce qui assurera de très grands avantages, car il n'y aura ni refroidissement ni réchauffement de ses parois. Ainsi, étant donné la hauteur du four, le calcaire qui entrera au sommet du four sera préchauffé par la fumée sortant du four et l'air qui entrera en bas sera préchauffé par le calcaire se trouvant dans la zone de refroidissement, d'où une grande économie calorifique : on économisera environ 50 % de combustible, si on compare avec les fours artisanaux. Le four est conçu pour être construit à l'intérieur du pays, où il n'y a pas d'électricité. Comme les terrains de l'intérieur du pays sont ondulés, le four doit être installé à un endroit où on peut profiter de la dénivellation due à une colline pour construire un pont de chargement au lieu de construire un escalier, qui coûterait cher. Comme on a trouvé à Bujumbura un tube qui appartenait à une cheminée ancienne et comme il y a aussi de la diorite et du kaolin on pourrait installer ce four sur le terrain d'IMPEX qui dispose de facilités et où on peut le surveiller et le faire fonctionner pour la démonstration.

Coûts d'investissements

	<u>En F Bu</u>
Fondation de béton : 5 x 5 x 0,5 m 12,5 m ³ à 3 800 F Bu/m ³	47 500
Tube intérieur de fer : 10,5 x ø 1,20 x 4 mm (d'occasion)	50 000
50 m ³ de diorite à 1 500 F Bu/m ³	75 000
40 % x 50 m ³ de mortier réfractaire = 20 m ³ = 40 t de mélange (kaolin + poudre diorite 1 : 1)	
10 m ³ de poudre de diorite à 1 500 F Bu/m ³	15 000
20 t de kaolin à 1 500 F Bu/t	30 000
à reporter	<u>217 500</u>

	<u>en F Bu</u>
Report	217 500
Mur de briques : 36 m ³	
Briques : 0,8 m ³ /m ³ mur = 28,8 m ³ = 28 800 briques à 1 F Bu la pièce	28 800
Mortier : 0,2 m ³ /m ³ mur = 7,2 m ³ , 1 : 3	
1,8 m ³ de ciment = 2,34 t à 12 240 F Bu/t	28 640
5,4 m ³ de sable à 300 F Bu/m ³	1 620
Bandes de consolidation	
21 pièces de 10 m de 100 x 3 mm à 3 600 F Bu	75 600
Briques réfractaires et grilles pour les foyers	20 000
Plate-forme, rampe et cheminée basculable	65 000
Esoalier en spirale	210 000
Installation et montage	225 000
Imprévus et équipements auxiliaires : 15 %	130 000
	<hr/>
Total	1 002 000

soit 12 500 dollars

On pourra construire ultérieurement ce même type de four à Mosso ou à un autre endroit approprié.

Calcul des coûts des investissements

La réparation du four à chambres ayant avancé très lentement, l'expert a finalement élaboré un programme de travail en collaboration avec le directeur de l'IMPEX (voir annexe II). L'expert a aussi demandé aux fournisseurs de ventilateur de fumée des informations sur les dimensions de ce dernier, afin de pouvoir déjà installer les fondations en béton. L'expert a donc fait un dessin montrant le raccordement entre le four et le ventilateur (figure V), et un dessin montrant la cheminée (figure VI).

C. Les pouzzolanes

Comme l'expert l'a déjà mentionné dans son rapport précédent, l'entreprise Cimenkat aurait produit au Burundi du ciment portland pouzzolanique dans les années 50, à Bujumbura. Cette installation a, par la suite, été reprise par Cimental, puis finalement fermée et abandonnée dans les années 60. Il ne reste aucune trace des activités réalisées ni des résultats obtenus. En mai 1975, on a retrouvé quelques vieux documents montrant qu'on a travaillé avec un minerai qu'on appelait "trass". Ce minerai était connu et on en faisait des briques que l'on cuisait dans des fours; on les broyait ensuite avec le clinker et on en faisait du ciment portland pouzzolanique.

Il n'existe pas de description des fours provisoires qu'on utilisait, mais il semble que c'était des fours simples du type "four à un seul compartiment, à tirage ascendant" probablement avec chauffage extérieur. Les combustibles qu'on utilisait étaient du bois et aussi du charbon qu'on importait de Kalima au Zaïre. Bien que ces fours provisoires travaillent apparemment de façon satisfaisante, on a décidé de construire un grand four à cuisson semi-continue, pour obtenir un produit plus uniforme avec un fuel de meilleur rendement.

Par la suite, l'expert a trouvé la carrière où le "trass" était exploité; elle est située à environ 7 km à l'est de Bujumbura dans un endroit appelé Mutanga. L'expert avait déjà, antérieurement, prélevé des échantillons de ce trass et suggéré qu'on fasse des essais pour déterminer l'activité pouzzolanique. Comme cela n'a pas été fait, l'expert a élaboré un programme d'essais pour déterminer l'activité pouzzolanique de cette matière et d'autres matières susceptibles de l'acquérir par cuisson.

1. Pouzzolanes artificielles

Il existe deux principaux types de pouzzolane : naturelle et artificielle. Alors que la pouzzolane naturelle est active d'elle-même, l'artificielle acquiert cette propriété par cuisson jusqu'à une certaine température. La définition de la pouzzolane, selon l'ASTM (American Society for Testing and Materials) est la suivante : "La pouzzolane est une matière siliceuse ou alumino-siliceuse qui n'a pas ou guère de valeur cimentaire propre, mais qui, une fois finement divisée et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à la température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés cimentaires". Lorsque la pouzzolane est mélangée avec de la chaux, de l'eau et du sable pour former un mortier, ce mortier durcit à cause de la réaction chimique entre la chaux et la pouzzolane. La même chose se produit lorsqu'on mélange la pouzzolane avec du ciment, de l'eau et du sable. Quand le ciment lui-même endure, sa substance chimique complexe émet de la chaux libre et cette chaux est prise par la pouzzolane. De cette façon et malgré le fait que le clinker a été "dilué", la résistance finale est similaire ou plus élevée à cause de la réaction cimentaire de la chaux libre et de la pouzzolane. Comme les pouzzolanes sont moins chères que le clinker, il est d'une pratique courante de produire le ciment portland pouzzolanique pour des raisons économiques.

Dans quelques pays, où s'est produite une activité volcanique récente, on trouve des pouzzolanes naturelles, comme le tuf, le trass, le rhyolite, le pumicite, la diatomite, etc., mais, d'après les géologues, il n'y a pas de

pouzzolanes naturelles au Burundi. Dans des pays où il n'y a pas de pouzzolanes naturelles, on produit des pouzzolanes artificielles parce qu'elles sont moins chères que le clinker et que, souvent, elles améliorent le ciment portland. La pouzzolane artificielle la plus commune est la cendre volante, qu'on obtient en brûlant le charbon pulvérisé dans des installations produisant de l'énergie électrique. Aux Etats-Unis et en Angleterre par exemple, la cendre volante était antérieurement considérée comme un sous-produit non désirable et, parce que son coût de transport était élevé, on la jetait. Actuellement, on la vend comme pouzzolane à ajouter au ciment portland. En Inde, on produit une pouzzolane artificielle qui s'appelle "surkhi", obtenue simplement par concassage et broyage de briques en terre cuite. Comme la composition des différentes argiles varient d'un endroit à l'autre et comme les briques sont souvent cuites dans des fours primitifs, le surkhi obtenu de cette manière a une activité très variable. Pour obtenir une production régulière de surkhi, il faut chercher la matière première la plus appropriée et la cuire à une température bien contrôlée dans un four rotatif. C'est pourquoi, l'expert s'est mis à chercher au Burundi des minerais qui peuvent servir comme matières premières pour la production d'une pouzzolane artificielle et après avoir prélevé une quinzaine d'échantillons, il a élaboré une méthode pour déterminer l'activité pouzzolanique.

a) Détermination de l'activité pouzzolanique

Il y a plusieurs méthodes pour déterminer l'activité pouzzolanique, comme la méthode de l'ASTM, les méthodes yougoslave et indienne. Selon la première et la dernière l'activité pouzzolanique doit correspondre à une résistance à la compression de 42 kgf/cm² au minimum. Elle peut être ainsi caractérisée :

Résistance à la compression

En kgf/cm²

14	Très inactive
14-28	Inactive
28-42	Peu active
42-56	Moyennement active
56-70	Active
> 70	Très active

La méthode adoptée par l'expert était déterminée par le fait qu'il ne disposait pas de certains équipements; elle est, de toute façon, étroitement liée aux méthodes généralement utilisées. La procédure a été la suivante :

Dans un bassin, on mélange 50 g de chaux pure, hydratée, avec 100 g de pouzzolane, passée à travers un tamis ASTM 200. Après avoir mélangé les deux poudres fines à la main, on ajoute 400 g de sable standard - le sable existant n'étant pas un vrai sable standard, on a utilisé le sable du lac Tanganyika et,

à chaque essai, le même sable. La granulométrie de ce sable est indiquée dans le diagramme qui se trouve sur la figure VII. On mélange la chaux, la pouzzolane et le sable et après les avoir mis dans un mélangeur planétaire, on ajoute de l'eau en quantité suffisante pour produire un mélange un peu plastique. Après avoir mélangé la masse pendant cinq minutes, on la transvase dans des moules de 5 x 5 x 5 cm. On remplit les moules peu à peu tout en poussant avec un piston. Puis, on égalise la surface. On met ensuite le moule avec les éprouvettes dans un sac en plastique qu'on ferme. On laisse reposer pendant 24 heures. Le lendemain, on retire le moule du sac en plastique et on le met dans une boîte en tôle. Cette boîte est introduite dans une étuve à une température constante de 55°C. La boîte en tôle a un front détachable et elle est garnie de caoutchouc pour éviter l'évaporation. L'expert a dessiné la boîte et les deux types de moules et les a fait fabriquer sur place. Après 7 jours, on enlève les éprouvettes de la boîte et on les met sur des filets métalliques; on les laisse refroidir et sécher pendant 6 heures. Enfin on les pèse et on détermine la résistance à la compression.

Le premier échantillon que l'expert a mis à l'essai était le vieux trass qui restait encore dans le four. Comme il y avait des opinions contradictoires sur le fait de savoir si le trass était actif ou si c'était seulement un ajout inerte, on a attendu le premier résultat avec grand intérêt. On a obtenu une résistance à la compression de 59 kgf/cm². Le trass produit jadis était donc vraiment actif.

b) Autres matières premières utilisables pour la production de pouzzolane

Disposant de l'équipement monté pour déterminer l'activité pouzzolanique, l'expert a décidé de chercher au Burundi d'autres roches et sédiments qui peuvent produire de la pouzzolane avec la même activité que le trass ou une activité peut-être encore plus élevée. Dans ce but, il a collectionné une quinzaine d'échantillons un peu partout au Burundi. Ces échantillons ont été catalogués et une description en a été faite; les endroits exacts où les échantillons ont été prélevés sont indiqués sur des cartes; les analyses chimiques ont été faites dans le laboratoire du Département des mines et de la géologie (voir annexe III).

Les roches et les matières premières ci-dessus mentionnées, qui nécessitent une calcination pour développer une activité pouzzolanique, ont été cuites dans un four électrique dans le laboratoire cité plus haut. Etant donné que la partie active de ces matières premières est la fraction d'argile, c'est-à-dire les particules dont le diamètre est inférieur à 0,002 mm, que les argiles peuvent être kaolinitiques, illitiques ou montmorillonitiques et que ces différents types d'argiles ont différentes températures de calcination

maxima, on a fait la cuisson à quatre températures différentes (550, 650, 750 et 850°C). Il y a, pense-t-on en général, une relation entre l'activité pouzzolanique maxima et la température à laquelle la structure du treillis de l'argile collapse. L'expert a pu constater pendant son travail de recherche qu'à une température plus élevée, l'activité se réduisait. Après la calcination de tous les échantillons aux quatre températures citées, ils ont été broyés en poudre fine, puis tamisés à travers le tamis ASTM 200 (0,075 mm). On a ensuite déterminé l'activité pouzzolanique d'après la méthode déjà mentionnée. Ces essais ont été réalisés par l'expert lui-même dans le laboratoire du Ministère des travaux publics. Les résultats sont très intéressants et très encourageants (voir annexe IV). On a acquis une connaissance générale très concrète des possibilités de produire une pouzzolane artificielle à partir des matières premières burundaises et on sait aussi à quelles températures maxima doit se faire la calcination (environ 750°C). Quelquefois, des résultats inexplicables ont été relevés mais les sources d'erreur sont nombreuses, depuis le marquage des échantillons et la manipulation par plusieurs personnes jusqu'aux moules, qui ne sont pas très exacts. Le poids par rapport au volume et la porosité, et en conséquence la capacité d'absorption de l'eau, des différentes poudres pouzzolaniques varient énormément. Les variations des résultats peuvent aussi dépendre du fait qu'il n'y avait pas de consistomètre pour contrôler la consistance des mortiers.

De tous les minerais testés, sept ont une résistance à la compression supérieure à 100 kgf/cm² et, de ces sept échantillons, deux ont dépassé 150 kgf/cm²; le maximum obtenu a été de 240 kgf/cm² - ce qui représente une activité pouzzolanique vraiment très élevée. Ces deux derniers échantillons proviennent, l'un, du décapage du kaolin de Muvumu et l'autre d'une argile kaolinitique de Ngozi. Les réserves estimées par les géologues pour le kaolin sont de plus de 2 millions de tonnes et le gisement de Ngozi a une extension de 15 km² - ce qui représente 30 millions de tonnes par mètre d'épaisseur.

Le gneiss décomposé qu'on utilisait jadis comme matière première se trouve à Mutanga. En cuisant cette roche à différentes températures, l'expert a obtenu des résultats allant de 100 à 140 kgf/cm². Ce gisement est beaucoup plus près de Bujumbura que ceux de Muvumu et Ngozi, mais les réserves ne sont pas connues et une prospection est à recommander.

L'argile de Kamenge qui sera utilisée par la future briqueterie a donné également une résistance à la compression dépassant 100 kgf/cm² et les déchets de cette usine pourront sans doute être utilisés comme pouzzolane dans certains cas.

On peut dire, pour conclure, que le Burundi possède des matières premières pouvant être utilisées pour la production d'une pouzzolane très active.

2. La pouzzolane naturelle

Bien qu'on n'ait pas trouvé de pouzzolane naturelle au Burundi, l'expert a essayé de chercher des matières susceptibles d'avoir au moins un peu d'activité pouzzolanique. Au cours d'une excursion aux alentours de Cibitoke, l'expert a trouvé un gisement de lave décomposée.

Un échantillon marqué G 14 a été analysé; il avait la composition suivante (en pourcentages) :

Perte au feu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	CaO	MgO
5,26	56,33	20,50	12,25	5,50	2,70

L'activité pouzzolanique a été testée en accord avec la méthode usuelle avec les résultats suivants :

<u>No de laboratoire</u>	<u>No d'échantillon</u>	<u>Résistance à la compression</u> En kgf/cm ²
122	F 14	54
122	G 14	58

Il est intéressant de constater que cette lave décomposée a une activité pouzzolanique semblable à celle de l'ancien trass et cela sans cuisson. Comme l'échantillon était petit, l'expert est retourné à Cibitoke pour prélever un échantillon plus grand au même endroit, juste avant le pont de Nyamagana, à l'ouest de la route. Cet échantillon a été marqué G 28.

L'expert a ensuite dépassé Cibitoke et a pris un autre échantillon à Rugombo, marqué G 29. Les deux tests d'activité de ces deux échantillons ont donné les résultats suivants :

<u>No de laboratoire</u>	<u>No d'échantillon</u>	<u>Résistance à la compression</u> En kgf/cm ²
195	G 28	32
195	G 28	36
198	G 29	52
198	G 29	52

Cette lave décomposée semble vraiment avoir une certaine activité pouzzolanique, qui n'a pas, cependant, la même ampleur que les pouzzolanes artificielles; mais, comme il a été dit auparavant, c'est un produit naturel qui se laisse

facilement broyer entre les doigts en donnant une poudre fine, et la cuisson n'est pas nécessaire. Il se peut, néanmoins, que la cuisson de ce minerai augmente son activité pouzzolanique. Il faudrait en faire l'expérience.

Sur la proposition de M. Waleffe, directeur du projet minier du PNUD, l'expert a visité la région de Musongati, où on supposait qu'il pouvait se trouver un tuf, qui pourrait être une pouzzolane naturelle. On a trouvé un minerai tuffogène, à 800 m de la mission de Musongati, dans un gisement assez grand. On peut l'exploiter très facilement. C'est un minerai blanchâtre, gris, mou et un peu humide. On peut le broyer facilement entre les doigts, produisant une poudre très fine. L'activité pouzzolanique a été testée, mais malheureusement, le matériau est complètement inerte et inactif. La résistance à la compression est seulement de 6 kgf/cm².

Dans la même région, il y avait d'autres roches dont M. Waleffe pensait qu'elles pouvaient être des pouzzolanes naturelles. Les échantillons (G 21 à G 25) sont décrits dans l'annexe III et leurs activités pouzzolaniques figurent dans l'annexe IV. De ses six échantillons, seul le G 26 a une activité pouzzolanique.

En résumé, les résultats obtenus avec les échantillons de la région de Musongati sont les suivants :

<u>No de laboratoire</u>	<u>No d'échantillon</u>	<u>Résistance à la compression</u> <u>En kgf/cm 2</u>
175	G 20	6
192	G 21	4
187	G 22	6
188	G 23	6
189	G 24	7
190	G 25	7
191	G 26	66

On a donc trouvé deux pouzzolanes naturelles : la lave décomposée de la région de Cibitoke et la roche correspondant à l'échantillon G 26 de la région de Musongati. Des recherches ultérieures pourront révéler d'autres minerais peut-être plus actifs, provenant d'autres régions du Burundi.

3. Les latérites

La vraie latérite s'endurcit en séchant et cette propriété est utilisée dans plusieurs pays où l'on produit des briques de latérites. La réaction d'endurcissement est irréversible et ce type de brique peut résister aux intempéries. La latérite est une roche tropicale métamorphique ou ignée, altérée,

partiellement ou totalement décomposée, avec une concentration de sesquioxyde de fer et d'aluminium, aux dépens de la silice. Les sols ne contenant pas de vraies latérites peuvent toutefois durcir si on les mélange avec une petite quantité d'un liant, c'est-à-dire du ciment ou de la chaux. On peut, de cette façon, obtenir des briques à partir de sols stabilisés. On donne le nom de sols latéritiques à des sols rouges-jaunâtres dans les tropiques. L'expert a pris quelques échantillons de sol latéritique (G 6, G 12, G 13) figurant dans l'annexe III. Ces échantillons, qui étaient considérés comme d'éventuelles pouzzolanes artificielles à cause de leurs contenus d'argile ont été calcinés et on a fait des essais pour connaître leur activité pouzzolanique. Un de ces échantillons (G 12) a été testé du point de vue de son activité latéritique, c'est-à-dire de sa capacité d'endurcissement avec une petite quantité de liant et à température normale. Cet échantillon a été passé au tamis ASTM no 4 parce qu'il contenait un grand pourcentage de matériaux grossiers. On a mélangé 1 kg de ces matériaux tamisés et séchés avec 15 % de chaux et 60 ml d'eau. La masse a été, ensuite, mise dans des moules, puis laissée sécher à l'air libre. On a obtenu les résultats suivants :

<u>No de laboratoire</u>	<u>Jours</u>	<u>Résistance à la compression</u> <u>En kgf/cm²</u>
123	7	16
123	28	18
123	60	-

D'autre part, deux semaines avant la fin de sa mission l'expert a été informé de l'existence d'un grand gisement de latérite dans la région de Musongati. M. Pério, du Département des mines et de la géologie, a fourni deux échantillons de sondages (G 30 et G 31), pour tester leurs propriétés. C'était de l'argile rouge-jaunâtre, dont la structure terreuse non durcie, perméable et poreuse, provenait de l'altération latéritique de roches ultrabasiques.

Analyse chimique de l'échantillon G 30

											<u>En %</u>
Ni	Cu	Co	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	MnO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	
0,21	0,05	0,03	63,16	0,71	0,80	20,19	0,25	0,99	1,15	0,40	

Généralement, les teneurs varient entre 55 et 60 % de Fe₂O₃ et 30 et 35 % de Al₂O₃. La teneur en SiO₂ n'est pas déterminée.

Bien que l'expert ne disposât que de peu de temps pour faire des essais, il a voulu voir quelle influence ont des matériaux de ce type, riches en fer et en aluminium, lorsqu'ils sont ajoutés à des pouzzolanes artificielles.

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>		<u>Résistance à la compression</u>	
	<u>en g</u>	<u>en ml</u>	<u>en kgf/cm²</u>	<u>en moyenne</u>
217	Chaux	50		
	G 15-750	100	204	192
	Sable	400	180	
	Eau			105
218	Chaux	50		
	G 15-750	87,5	176	172
	G 30	12,5	168	
	Sable	400		
	Eau			106
219	Chaux	50		
	G 15-750	87,5	160	164
	G 31	12,5	168	
	Sable	400		
	Eau			104

On observe que l'addition de latérite n'a aucune influence. Il est probable que si on avait ajouté la latérite à la pouzzolane avant la cuisson, le résultat aurait été différent.

Quelques essais ont été également effectués avec les latérites seules, mélangées avec du ciment et de la chaux.

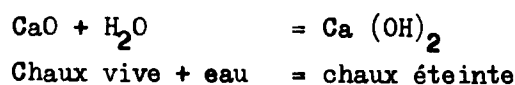
<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>		<u>Résistance à la compression</u>	
	<u>en g</u>	<u>en ml</u>	<u>Jours</u>	<u>en kgf/cm²</u>
220	G 31	133		
	Ciment	15	7	24
	Eau			78
221	G 31	135	7	10
	Chaux	15		
	Eau			81
223	G 30	135		
	Chaux	15	7	8
	Eau			75

Finalement, un essai a été fait selon la formule utilisée pour les tests pouzzolaniques mais en remplaçant la pouzzolane par la latérite. Le résultat de cet essai a donné une résistance à la compression de 24 kgf/cm² après 7 jours à 55°C et 8 kgf/cm² après 7 jours à température normale. Il est clair que les quelques tests que l'expert a réalisés en un temps si court avec les latérites ne peuvent pas donner des résultats concluants. Il est recommandé

qu'un programme plus vaste soit mis sur pied parce que les vraies matières ferriques sont, sinon uniques, du moins peu communes et peuvent être intéressantes pour une industrie de matériaux de construction. Une autre raison pour faire davantage de tests est que ce gisement n'est pas seulement extrêmement grand, mais qu'il constitue la couverture d'un grand gisement de nickel. Il faudra bien, un jour, enlever cette couverture; le coût d'exploitation sera donc nul et il faut en prévoir l'utilisation.

D. La production de chaux éteinte

La chaux produite dans le four à chambres sera de la chaux vive. Lorsque cette chaux est mise dans l'eau, une réaction chimique se produit. Cette réaction est une hydratation et une extinction :



Cette réaction produit une quantité de chaleur très considérable.

Il y a plusieurs méthodes d'extinction qui donnent des produits différents. En traitant la chaux vive avec une quantité d'eau théorique et en y ajoutant encore un peu d'eau pour remplacer l'eau qui sort de l'appareil d'extinction sous forme de vapeur, on obtient une chaux hydratée, sous forme de poudre fine et sèche. Cette chaux éteinte peut ensuite être mise dans des sacs de papier, dont l'intérieur est de préférence plastifié, car la chaux absorbe facilement l'humidité et l'acide carbonique de l'air. On peut aussi mettre la chaux vive dans une machine d'extinction avec une plus grande quantité d'eau. Cela produit un lait de chaux qu'on laisse ensuite couler dans un bassin de sédimentation. La chaux hydratée sédimente sous forme de pâte épaisse sur le fond du bassin, où on peut la laisser pendant plusieurs semaines. Ce dépôt est recouvert d'une couche d'eau dans le bassin. Cette méthode est utilisée dans les pays où il n'y a pas de production de poudre sèche hydratée; l'extinction se fait, généralement, dans les chantiers de construction. Elle peut être exécutée de différentes façons; selon la manière dont le travail est surveillé, les résultats peuvent être plus ou moins satisfaisants. C'est pourquoi l'on préfère procéder à une extinction centralisée dans l'usine, où peut s'exercer un contrôle adéquat.

Le calcaire burundais, comme il a déjà été dit, est magnésien; outre le carbonate de calcium, il contient du carbonate de magnésium. Comme ce dernier décharge son acide carbonique à une température plus basse, il se passe que, lorsque le CaCO_3 est dissocié, le MgCO_3 a été traité à une température plus

élevée qu'il n'était nécessaire et le résultat est une magnésie trop cuite, très difficile à éteindre. Il est donc extrêmement important que la cuisson du calcaire ait lieu à une température ne dépassant pas 1000°C et que les dimensions de la charge soient aussi uniformes que possible. Pour le four à chambres, une dimension de la charge de calcaire de 100 à 160 mm est recommandée. De cette façon, il serait possible de produire une chaux qui s'éteint bien.

1. Essais d'extinction de la chaux

Les possibilités de cuisson du calcaire étaient très réduites, car trois des quatre fours électriques du laboratoire du Département des mines et de la géologie étaient en panne; le quatrième, qui ne pouvait atteindre qu'une température de 900°C, était utilisé pour d'autres travaux dans le laboratoire. Seule la cuisson de 1,5 kg de calcaire a pu être effectuée. Ce calcaire était le travertin de Gihungwe (G 16). La figure VIII montre le diagramme de la cuisson. Au cours de cette cuisson, le calcaire s'est partiellement désagrégé en pièces de moindres dimensions. La perte au feu était de 31,77 %. La réactivité de la chaux vive obtenue, est indiquée sur la figure IX.

a) Essais effectués par l'expert

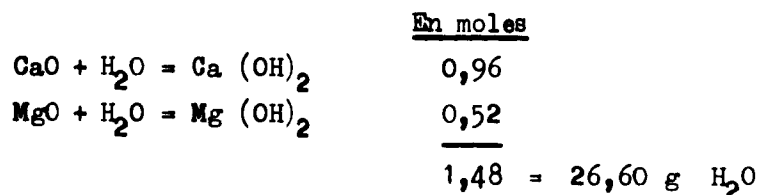
Une fois la chaux obtenue, l'expert a procédé à l'extinction selon les deux méthodes différentes : à voie sèche et à voie humide. Avant l'extinction, la chaux a été concassée et tamisée par un tamis de 3 mm. Si on l'avait faite plus fine, il aurait été plus difficile de la séparer des déchets, c'est-à-dire de la partie non cuite et du sable.

- i) Extinction par voie sèche : comme appareil pour l'extinction selon la méthode à voie sèche, l'expert a utilisé un mélangeur planétaire couvert de plastique. Ensuite par deux trous, il a introduit un entonnoir pour l'addition de l'eau chaude et un condenseur pour le refroidissement des vapeurs produites qui doivent retourner dans le mélangeur. La quantité d'eau à utiliser a été calculée d'après l'analyse chimique.

	<u>En %</u>	
Calcaire	CaO 37	MgO 14,3
Perte au feu		31
Chaux vive :	CaO 53,62	MgO 20,72

Cent grammes de cette chaux vive contiennent : 53,62 g CaO = 0,96 mole
20,72 g MgO = 0,52 mole

Les besoins d'eau pour l'hydratation ont été calculés d'après la formule :



Les besoins d'eau pour l'hydratation sont donc de 26,60 g pour 100 g de chaux vive. L'expert a augmenté cette quantité de 7 % pour couvrir les pertes. Ainsi, il a pris 285 ml d'eau pour l'extinction de 1 kg de chaux vive. L'eau était chauffée à 50°C. Il l'a ajoutée à la chaux vive qui était dans un mélangeur déjà en marche. Toute l'eau a été ajoutée dans un délai de 35 mn et pendant cette période on a observé que la chaux se désagrègeait de plus en plus en formant une poudre fine. L'eau s'est mise à chauffer et on a pu observer comme elle retombait du condenseur. Après avoir ajouté toute l'eau, on a laissé le mélangeur en marche pendant encore une demi-heure.

La chaux vive, concassée avant l'hydratation, a été passée au travers d'un tamis de 3 mm, puis on a tamisé la chaux hydratée pour voir comme le calcaire avait été désagrégé.

<u>No du tamis</u>		<u>Refus</u>		<u>Passé</u>	
<u>ASTM</u>	<u>En mm</u>	<u>En g</u>	<u>Cumulé</u>	<u>En g</u>	<u>En %</u>
30		62,1	62,1	137,9	68,95
60	0,25	26,7	88,8	111,2	35,60
80		75,3	164,1	35,9	17,95
200	0,075	19,9	184,0	16,0	8,00
200	0,075	16,0	200,0	-	-

Ces résultats montrent que la chaux n'était pas très fine. Dans l'industrie, on fait toujours passer la poudre par un séparateur à air et le refus est traité dans un broyeur et passe ensuite par un séparateur. La chaux hydratée passant par le tamis No 60 a été numérotée G 27 et utilisée pour produire des mortiers. Voir sect. E.

ii) Extinction par voie humide :

L'appareil utilisé pour l'extinction par la voie humide était le même mélangeur planétaire. Dans ce mélangeur, on a mis 1 l d'eau à une température de 85°C et 250 g de chaux vive introduite peu à peu en quelques minutes. Pendant cette addition, le mélangeur était en marche. La température a augmenté et, à la fin, la suspension d'eau et de chaux a bouilli. On a laissé ensuite le mélangeur en marche pendant 30 mn. La suspension a, par la suite, été passée par le tamis ASTM No 40 (0,42 mm). Après sa sédimentation dans un cylindre gradué, il restait en tout 750 ml et la hauteur dans le cylindre était de 268 mm. Après 24 h. la hauteur du sédiment était de 183 mm celle d'eau claire surnageant de 85 mm. Après 72 heures, la hauteur du sédiment était encore de 183 mm et par la suite elle est restée constante.

b) Essais réalisés par AMSAR

Antérieurement, un essai de cuisson avait été réalisé par AMSAR, l'entreprise de voirie qui pensait utiliser la chaux pour la stabilisation des routes et aussi comme liant de mortier dans la construction. L'essai de cuisson a été réalisé avec la cuirasse de travertin dans un des anciens fours de Gihungwe. Ce four est de même type que celui de Mosso, mais son volume est plus grand. M. Vuerich explique dans son rapport^{1/} que le volume du four était de 50 m³ et qu'on a utilisé 30 m³ de bois (résineux, du type du sapin de Kayanza), pour la cuisson de 20 m³ de calcaire. La chaux vive obtenue a été éteinte, en partie par voie sèche et en partie par voie humide. La chaux hydratée en poudre a été utilisée pour faire des essais de résistance à la compression et la pâte obtenue par voie humide a été utilisée pour faire des essais de crépissage.

Les deux essais ont été faits dans les proportions suivantes : une part de liant pour trois de sable; dans le premier mélange, le liant était composé à part égale de chaux hydratée et de ciment; dans le deuxième mélange de deux tiers de chaux hydratée et d'un tiers de ciment. Les résultats de la résistance à la compression sont indiqués dans le diagramme (voir figure X). Comme on peut le constater, on a obtenu des résistances à la compression de 65 kgf/cm² et de 40 kgf/cm² après 30 jours.

On a aussi fait des essais de crépissage avec des mélanges différents. Celui qui a donné le meilleur résultat était le mélange constitué de trois parts de chaux éteinte, deux parts de ciment et 16 parts de sable en volume. Le résultat était, selon le rapport de M. Vuerich : "pas de fissuration, la prise est rapide et, après un jour, la résistance est satisfaisante".

c) Essais réalisés par le Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics, à Paris (France)

Ces essais ont été réalisés en 1972 avec le calcaire dolomitique de Bubanza; on a pu faire les observations suivantes :

- i) D'après les examens qui ont été faits lors des analyses, ce matériau peut donner une chaux grasse;
- ii) Pour éviter la formation de magnésie suruite (toujours très difficile à éteindre), la cuisson a eu lieu à la température de 1000° C ;
- iii) La granulométrie a une influence sur le temps de cuisson. Un matériau ayant une granulométrie de 31,5 mm nécessite une heure de cuisson; si la granulométrie est de 50 à 80 mm il faut 4 heures et si elle est de 80 à 100 mm il faut 6 heures;

1/ V. Vuerich. Rapport sur un essai de fabrication et d'utilisation de la chaux, 1975.

- iv) L'analyse chimique du produit cuit permet de classer le produit obtenu dans la catégorie des chaux magnésiennes selon les normes ASTM qui prévoient les teneurs suivantes :

	<u>En pourcentage</u>
MgO	20
MgO + CaO	95
SiO ₂ + Al ₂ O ₃	5
CO ₂ à la fabrication	3

- v) Le temps d'extinction permet de considérer cette chaux magnésienne comme très réactive;
- vi) Les essais sur la chaux hydratée montrent que ce produit est conforme aux prescriptions d'ASTM C 207-68 concernant les chaux hydratées pour maçonnerie;
- vii) L'essai dit de "poping et pitting" montre que le produit est stable, c'est-à-dire qu'aucune dégradation (cratère ou fissuration) n'a été relevée. Enfin, le gonflement retrouvé, selon la norme anglaise BSS 890, est négligeable.

Ces deux séries d'essais montrent qu'on peut produire une chaux hydratée de bonne qualité avec les pierres calcaires du Burundi. La dolomite de Bubanza est, sans aucun doute, plus pure que le travertin de Gihungwe qui a une grande teneur en insolubles. C'est pourquoi il est à recommander de passer de l'exploitation de Gihungwe à celle de Bubanza le plus tôt possible.

2. Equipement pour l'extinction de la chaux

a) Extinction par voie humide

Pour la chaux qui n'est pas très réactive et qui a une teneur élevée en magnésie et en insolubles, la méthode la plus appropriée est la méthode d'extinction par voie humide. Le problème qui se pose est celui de l'emballage et de la distribution, car cette chaux hydratée ne peut être emballée dans du papier; elle doit être emballée dans des fûts ou dans des sacs en plastique. Il existe deux types d'extincteurs par voie humide : l'extincteur à suspension et l'extincteur à pâte.

1) Extincteur à suspension

Cet appareil travaille avec une quantité de chaux allant de 0,14 à 0,28 kg par kilo de suspension, correspondant à une quantité d'eau allant de 2,5 à 6 l par kilo de chaux; la proportion dépend de la qualité de la chaux. L'extincteur à suspension de type Dorr-Oliver (voir figure XI) se compose d'un cylindre vertical et d'un agitateur, qui agite la chaux concassée et l'eau chaude, et d'un transporteur qui enlève le sable et les parties non-cuites. L'extincteur à suspension de type Wallace-Tierman (voir figure XI) se compose d'une cuve horizontale ou des palettes fixées sur un axe mélangeant l'eau et la chaux. Les déchets sont éliminés et l'eau de nettoyage, recyclée, est utilisée pour le processus d'extinction. La durée est d'environ une demi-heure, malgré l'utilisation d'eau chaude. Cet extincteur est recommandé quand il s'agit de chaux magnésienne et impure.

ii) Extincteur à pâte

Cet appareil travaille avec environ 0,3 kg de chaux par kilo de pâte, correspondant à environ 2 l d'eau par kilo de chaux. La durée est de 5 à 10 minutes.

b) Extinction par voie sèche

L'extincteur par voie sèche est généralement construit sous forme de cylindre horizontal fermé avec un axe muni de palettes. La chaux doit d'abord être pulvérisée dans un concasseur à marteau de 2 à 6 mm, puis introduite par l'extrémité de l'extincteur et circuler lentement à travers celui-ci, tandis qu'on y ajoute de l'eau qui passe d'abord par un appareil de mesure.

L'extinction commence; il se produit de la chaleur et le volume de la chaux augmente en passant de l'autre côté de l'extincteur où est monté un dépoussiéreur, qui, en même temps, sert à préchauffer l'eau. En particulier lorsqu'on procède à l'extinction de chaux magnésienne, il est nécessaire d'utiliser de l'eau préchauffée, même sur le point de bouillir, car cela améliore le processus d'extinction. La chaux hydratée et sèche sort de l'extrémité de l'extincteur sous forme de poudre fine et volumineuse, alors que les déchets, c'est-à-dire les parties non cuites, le sable, etc., plus lourds, sortent par le fond de l'extincteur. On fait passer ensuite la chaux en poudre par un sélecteur d'air et finalement on la stocke dans un silo où elle est dirigée vers l'ensachage.

- i) Pour l'extinction par voie sèche on peut utiliser l'extincteur KLD. Cette machine fonctionne au moyen de trois chambres d'extinction superposées dont le volume et la capacité s'adaptent d'une chambre à l'autre et en proportion de l'augmentation du volume de l'hydrate pendant l'opération d'extinction. La chambre supérieure est alimentée par les deux composants (chaux vive et eau d'extinction) dont elle assure le mélange intime au début de l'extinction. Le travail d'extinction proprement dit s'effectue après le passage de la chambre supérieure à la chambre principale centrale des matériaux en partie hydratés. Le produit, au sortir de la chambre d'extinction principale, est introduit dans la troisième chambre d'extinction complémentaire, qui est sensiblement plus large, où il est largement aéré à l'aide des palettes d'agitation. Au-dessus de l'extincteur est monté un dépoussiéreur à voie humide. Cet appareil remplit trois fonctions importantes : le dépoussiérage des vapeurs qui proviennent du processus de l'extinction, le préchauffage de l'eau d'extinction, et le maintien du dispositif d'hydratation en légère dépression (voir figure XII et XIII). Une installation de ce type, sans le concasseur et sans l'installation d'un moulin pour le broyage des déchets, coûterait environ 142 000 dollars f.o.b. port européen. Sa capacité serait de 5 t/h de chaux hydratée.

ii) Comme la capacité de l'extincteur KLD est beaucoup trop grande pour les besoins du Burundi, l'expert propose un autre extincteur, plus simple et d'un prix plus modéré, de type Peach-Rover, fabriqué par Rodriguez y Vergara, Pasajes de San Pedro, Guipuzcoa en Espagne (voir figure XIV). Une installation complète avec concasseurs, élévateurs et séparateurs se trouve sur la figure XV). Le fonctionnement est le même que pour le type KLD, sauf que le Peach-Rover utilise un seul cylindre mais plus long. Dans une première phase l'eau chaude provenant du condensateur-dépoussiéreur se mélange intimement avec la chaux vive préalablement concassée. Dans une seconde phase, la vapeur se forme immédiatement et circule au centre même du corps de l'extincteur où les particules de chaux non encore éteintes, donc plus lourdes, sont relevées et tombent dans un courant de vapeur d'eau. Il en résulte les avantages suivants : l'encombrement des appareils est faible; il n'y a pas de poussière; la chaux entraînée par la vapeur d'eau est recyclée en sa totalité avec l'eau d'extinction. Ainsi tout déversement de lait de chaux à l'extérieur est évité, ainsi que la pollution des eaux qui s'ensuivrait dans d'autres conditions; l'hydrate produit est sec; la consommation d'énergie est faible (2,5 à 3 kWh/t). Un seul homme, non spécialisé suffit à la conduite et au contrôle de l'extincteur; enfin, l'ensemble de l'extincteur (silo à chaux vive broyée, extincteur, condensateur-dépoussiéreur, armoire électrique, moteurs et câbles, appareils de mesure et de contrôle, conduites d'eau) est monté sur un cadre unique. Une telle installation coûte environ 45 000 dollars f.o.b. port européen, pour une capacité de 2 à 2,5 t/h. Comme il est prévu que le four à chambres produira environ 15 t/j, que cette capacité pourra augmenté jusqu'à 30 t/j - auquel cas l'extincteur devraient travailler en deux équipes - sa capacité est correctement choisie.

Comme il y a déjà chez IMPEX un concasseur à marteaux (il faudra acheter des nouveaux marteaux et installer un moteur de 10 CV), et comme on pourrait fabriquer des élévateurs et des silos sur place, il ne manquerait que le séparateur à air. Il est possible que le fournisseur consente à fournir les dessins de tous les éléments nécessaires à l'installation de l'extincteur lorsqu'il fournira ce dernier. L'expert pourrait, en Espagne, se charger de négocier avec le fournisseur pour que toutes les informations nécessaires soient mises à la disposition d'IMPEX. Sans l'aide de ce fournisseur, on ne peut pas non plus calculer le coût total d'une installation complète. Comme le temps de livraison de l'extincteur est de deux mois, il n'y aura pas le temps de procéder à l'installation avant le démarrage du four à chaux. Si la production de la chaux commence avant, on pourra vendre la chaux comme chaux vive ou on procédera, provisoirement, à l'extinction par voie humide.

E. Mortier et béton à base de chaux, ciment et pouzzolane

1. Différents types de mortier

Le mortier utilisé pour la maçonnerie et le crépissage est un mélange de liant, de sable et d'eau. Le liant qu'on ajoute dépend de l'emploi qu'on va faire du mortier : maçonnerie ou crépissage. Un mortier frais doit couler facilement et contenir une certaine quantité d'eau en excès. Afin que le mortier acquière la résistance calculée, l'excès d'eau doit disparaître aussitôt que le mortier a été coulé : ce qui se produit par évaporation, surtout s'il s'agit d'un crépissage. C'est le premier pas dans le processus d'endurcissement du mortier. Le second dépend du type de liant qu'il contient. Si c'est un mortier à base de ciment pur, il commence à s'endurcir après quelques heures et acquiert lentement sa résistance finale. Si c'est un mortier à base de chaux, l'endurcissement se fait progressivement en partie par un processus de cristallisation de la chaux hydratée, en partie par carbonisation. Dans des circonstances défavorables, cela peut durer très longtemps parce que la présence d'humidité et de l'acide carbonique sont nécessaires. Il existe un autre type de mortier dont le liant est du ciment mélangé avec de la chaux, qu'on appelle mortier bâtard. Il a plusieurs avantages : il est plus facile à manipuler qu'un mortier de ciment pur, parce qu'il est plus plastique; il a une résistance plus grande qu'un mortier à base de chaux pure; il enduret dans des circonstances favorables parce que la chaux dans le mortier bâtard expulse l'eau dont le ciment a besoin pour son endurcissement; un mortier de ciment pur, utilisé pour le crépissage dans les climats tropicaux, produit généralement des fissures, en partie parce qu'il sèche trop tôt et en partie parce qu'il est trop dur et affecté par le changement de température; comme la chaux est généralement moins chère que le ciment, le mortier bâtard est moins cher que le mortier en ciment pur. Enfin, un quatrième type de mortier est aussi un mortier mixte, obtenu en mélangeant de la chaux avec de la pouzzolane à la place du ciment. Ce mortier a aussi une résistance plus élevée que le mortier à base de chaux pure et il enduret plus vite. Sa résistance finale dépend du type et de la quantité de pouzzolane utilisée. Un facteur important dans la production d'un bon mortier est la qualité du sable. Le sable ne doit pas contenir d'humus. On peut s'en rendre compte en agitant une partie de sable dans un tube avec une solution de 3 % d'hydroxyde de sodium (NaOH). S'il y a une solution claire au-dessus du sable après un repos de 24 heures, incolore ou légèrement jaunâtre, le sable n'a pas, ou pratiquement pas, d'humus. Plus la couleur est sombre plus il y a d'humus.

La granulométrie du sable a aussi une grande influence sur la consistance et la manipulation du mortier et aussi sur la résistance finale. La courbe granulométrique du sable qu'on doit utiliser doit être soigneusement observée. Le diagramme sur la figure VII indique où se trouve le meilleur sable pour mortier et crépissage.

Quand il y a de la chaux et du ciment dans un pays, on n'utilise pratiquement jamais un mortier de ciment pur. Les trois types de mortier qu'on utilise le plus souvent sont les suivants :

<u>Types de mortier</u>	<u>Chaux hydratée</u> en parts de volume	<u>Ciment</u>
I	2	1
II	1	1
III	1	4

Ces liants sont mélangés avec du sable, généralement dans les proportions d'une part de liant pour quatre parts de sable. Pour les trois types de liants dont il est question ci-dessus, la résistance finale du mortier augmente avec l'augmentation de la quantité de ciment, c'est-à-dire que le type II a une résistance plus grande que le type I mais moins grande que le type III. L'usage final d'un mortier décidera du type à utiliser.

Sur le tableau 2 et les figures XVI et XVII, les propriétés du mortier à base de chaux et de ciment sont indiquées pour servir de guide à la production. Il faut observer, toutefois, que ces chiffres ne sont valables que lorsqu'on utilise de la chaux pure. Une chaux dolomitique et impure comme la chaux burundaise donnerait des valeurs différentes. Quelques valeurs de la chaux burundaise sont données plus loin.

2. Tests avec des pouzzolanes, de la chaux locale et du ciment

Tous les tests d'activité pouzzolanique étaient réalisés avec de la chaux pure pour déterminer la réactivité maximum. Par la suite, l'expert a utilisé de la chaux locale, ouite et éteinte à partir du travertin de Gihungwe G 27. Il a, également, fait des essais avec la chaux hydratée de Mosso.

<u>No de laboratoire</u>	<u>Pouzzolane</u>	<u>Chaux</u>	<u>Résistance à la compression</u> <u>kgf/cm²</u>
200	G 9-750	Pure	212
200	G 9-750	Pure	240
201	G 9-750	G-27	92
201	G 9-750	G-27	96
181	G 9-750	Mosso	72
181	G 9-750	Mosso	80

Comme on peut l'observer, il y a une chute de la résistance à la compression lorsqu'on utilise la chaux locale, bien que celle-ci conviendrait pour un mortier si on pouvait le réaliser à la température normale. Pour cette raison l'expert a fait un essai pour comparer la résistance qu'on obtient à la température de 55°C qui est la température du test d'activité pouzzolanique comparée à une réaction à une température normale de 23°C. On a obtenu les résultats suivants :

Tableau 2. Mortiers de chaux et de ciment, d'après Hogberg

Liants		Mortiers fraîchement préparés ^{a/} (1 : 4 en parts de volume)				Qualité de la manipulation d'après le maçon
Chaux ^{b/} en % du poids	Ciment ^{c/} du poids	Poids sec ^{d/} en kg	Volume en l.	Poids d'un litre	Contenu d'eau e/	
100	0	13,50	8,2	1,99	21,5	Excellente
90	10	13,58	7,8	2,06	18,9	
80	20	13,67	7,4	2,12	15,1	
70	30	13,76	7,4	2,13	14,6	Très bonne
60	40	13,87	7,6	2,10	15,4	
50	50	14,00	7,5	2,12	14,1	
40	60	14,14	7,5	2,15	14,2	Bonne
30	70	14,31	7,6	2,14	13,1	
20	80	14,50	7,5	2,18	13,0	
10	90	14,72	7,5	2,21	12,7	Mauvaise
0	100	15,00	7,6	2,22	12,2	

Source : E. Hogberg : Puts-och Murbrukslaboratoriet, 1958.

a/ Les poids respectifs d'un litre sont de 0,65 kg pour la chaux, 1,30 kg pour le ciment, 1,35 kg pour le sable.

b/ Chaux pure, hydratée, pulvérisée.

c/ Ciment portland normal.

d/ Contenu de sable : 12 kg.

e/ Calculé sur le poids sec du mortier.

<u>No de laboratoire</u>	<u>Jours</u>	<u>Résistance à la compression</u> <u>kgf/cm²</u>
200	3	52
200	6	100
200	14	136 ^{2/}
200	21	300 ^{2/}

2/ Le chiffre obtenu de 300 kg est une moyenne de deux essais; l'un a donné 320 kgf/cm² l'autre 280 kgf/cm². On constate que toutes les éprouvettes de 5x5x5 cm qui ont été utilisées pour déterminer l'activité pouzzolanique, ont été concassées dans une machine qui va jusqu'à 6 tonnes. Cette machine est en bon état et elle est précise. Lorsqu'on a utilisé des éprouvettes plus grandes ou que la résistance était plus élevée que 6 tonnes, on a utilisé une autre machine qui n'était pas en bon état; son manomètre commençait à 4 tonnes, elle perdait de l'huile, son piston tremblait - ce qui fait que les chiffres obtenus ne sont pas très sûrs.

Il a été intéressant de constater comme ces pouzzolanes très actives donnent rapidement une résistance à la compression très élevée à température normale. Le même test, réalisé avec de la chaux locale G 27 a donné les résultats suivants :

<u>No de laboratoire</u>	<u>Jours</u>	<u>Résistance à la compression</u> <u>En kgf/cm²</u>
212	7	4
	21	68

Quelques tests comparatifs ont été faits avec des mortiers et du béton. Un test a été réalisé avec le trass G 1 comparé au G 9-550. Le mélange était fait avec chaux pure, pouzzolane, sable, gravier, avec une partie de chaux pure, une partie de pouzzolane et une partie de sable pour six parties de gravier.

<u>No de laboratoire</u>	<u>No d'échantillon</u>	<u>Temps de prise</u>	<u>Résistance à la compression</u> <u>kgf/cm²</u>
124	G 9-550	7	35
124	G 9-550	28	160
125	G 1	7	70
125	G 1	28	94

Bien qu'on n'ait pas utilisé une pouzzolane plus réactive que G 9-550 (à cause du manque de matières premières), on a obtenu une résistance finale considérablement plus élevée avec cette pouzzolane qu'avec le trass.

Un autre test avec un béton obtenu par addition croissante de la pouzzolane a été réalisé. Les proportions étaient d'une partie de liant pour 3,5 de sable.

<u>No de laboraoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compr ssion</u>	
		<u>Jours</u>	<u>kgf/cm²</u>
160	G 9-750 (30 %)	3	120
	Ciment (70 %)	7	260
	Sable	28	400
	Eau		285
161	G 9-750 (40 %)	3	40
	Ciment (60 %)	7	160
	Sable	28	240
	Eau		300
162	G-750 (50 %)	3	8
	Ciment (50 %)	7	26
	Sable	28	320
	Eau		317

Les résultats sont très intéressants mais les valeurs après 28 jours pour les No 161 et 162 sont surprenantes. Comme seulement une éprouvette de chaque âge et de chaque composition a été testée, on doit considérer les résultats avec une certaine réserve. Si on tient compte uniquement de l'addition de 30 % de pouzzolane, la résistance du béton à la compression est excellente.

On a répété ce test en utilisant en proportion une partie de liant pour 3 de sable.

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>			
		<u>en g</u>	<u>en ml</u>	<u>kgf/cm²</u>	
204	G 9-750 (33 %)	50		7	136
	Ciment (67 %)	100		21	320
	Sable	450			
	Eau		83		
205	G 9-750 (40 %)	60		7	120
	Ciment (60 %)	90			280
	Sable	450			
	Eau		81		
206	G 9-750 (50 %)	75		7	92
	Ciment (50 %)	75		21	132
	Sable	450			
	Eau		83		

Il est donc clair qu'on peut remplacer sans qu'il y ait de répercussion un tiers du clinker dans l'usine en construction pour la mouture de clinker par de la pouzzolane produite localement.

L'expert a également fait un test de ciment - chaux - pouzzolane en utilisant de la chaux pure.

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>				
		<u>en mg</u>	<u>en ml</u>	<u>jours</u>	<u>kgf/cm²</u>	
174	Chaux	183		4	47	-
	G 9-750	183		28	280	220
	Gravier	1 100				
	Eau		210			

Pour voir s'il était possible que le ciment agisse comme catalyseur, on a fait un test en ajoutant un peu de ciment.

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>				
		<u>en mg</u>	<u>en ml</u>	<u>jours</u> <u>kgf/cm²</u>		
173	G 9-750 (55 %)	200				
	Chaux (30 %)	110				
	Ciment (15 %)	56				
	Sable	183	4	60		
	Gravier	1 100	28	220		
	Eau				200	
						194

Il n'y a pas de grande différence entre les deux tests mais cela montre que le mélange No 174 qui a été produit sans addition de ciment atteint une résistance plus grande quand il est déposé au-dessus de l'eau. Tandis que c'est le contraire pour le No 173 qui contient 3,3 % du ciment.

Un autre mélange a été fait avec un liant identique au No 173 mais avec une proportion d'une partie de liant pour deux parties de sable. La résistance à la compression obtenue était de 65 kgf/cm² après 7 jours et 320 kgf/cm² après 28 jours.

Une répétition du test No 173 a également été faite mais en substituant à la chaux pure la chaux G 27 de Gihungwe.

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>		
		<u>en g</u>	<u>Jours</u> <u>kgf/cm²</u>	
209	G 9-750 (55 %)	200		
	Chaux G 27 (30 %)	110	7	
	Ciment (15 %)	56	21	
	Sable	184		
	Gravier	1 100		
				14

Comme on pouvait s'y attendre, les chiffres relatifs à la résistance à la compression ont beaucoup baissé. Faute de temps on n'a pu réaliser des expériences sur 28 et 45 jours, qui auraient peut-être donné de bons résultats.

Enfin, deux tests ont été encore élaborés; l'un devait servir à déterminer la résistance à la flexion de la pouzzolane et l'autre était un test similaire au test dit de "popping et pitting".

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la flexion</u>	
207	Chaux		
	G 9-750	25	
	Sable		
	<u>en g</u>		
			100
			200
			800

On a utilisé, pour le second test, les éprouvettes des Nos 193 et 194 produites avec la chaux locale G 27. L'objet du test était de voir si la chaux était complètement éteinte. L'éprouvette No 193 était faite de chaux 27; dans la proportion d'une partie de chaux, une partie de ciment et 6 de sable et le No 194 dans la proportion de deux parties de chaux pour une de ciment et 9 de sable.

Ces deux éprouvettes après 22 jours ont été déposées sur un filet métallique au-dessus de l'eau bouillante pendant 5 heures pour voir si des fissures se formaient dans l'éprouvette à cause de la chaux hydratée non éteinte. Aucune fissure n'a été observée.

Des éprouvettes de béton faites avec de la chaux de Mosso ont eu pour résultats :

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>		
		<u>Proportions</u>	<u>Jours</u>	<u>kgf/cm²</u>
182	Chaux de Mosso	1		
	Ciment	1	8	180
	Sable	6	28	220
183	Chaux Mosso	1		180
	Ciment	2		
	Sable	9	28	260

Une éprouvette faite avec de la pouzzolane naturelle, la lave décomposée G 28 a donné les résultats suivants :

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>			
		<u>en g</u>	<u>en ml</u>	<u>Jours</u>	<u>kgf/cm²</u>
192	G 28	200			
	Ciment	400		7	140
	Sable	1 500			
	Eau		300	26	220

Comparé avec un matériel inerte comme le tuf, G 20, les chiffres sont les suivants :

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>			
		<u>en g</u>	<u>en ml</u>	<u>Jours</u>	<u>kgf/cm²</u>
170	G 26	200		7	180
	Ciment	400			
	Sable	1 800		28	240
	Eau		27		

Aucune différence importante n'a été constatée avec ces deux matières.

L'autre pouzzolane naturelle G 26 donne des chiffres de la même grandeur :

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>	
		<u>Jours</u>	<u>kgf/cm²</u>
170	G 26	4	120
	Ciment	12	160
	Sable		1 800

3. Les tests avec l'hydroxyde de magnésium

Comme les tests l'ont montré, on obtient une résistance à la compression plus petite lorsqu'on utilise la chaux magnésienne locale. L'expert a estimé qu'il serait intéressant de procéder à un test d'activité pouzzolanique dans lequel on substitue l'hydroxyde de calcium par de l'hydroxyde de magnésium. Comme il n'existait pas d'hydroxyde de magnésium à Bujumbura, on a réalisé une précipitation avec une solution de chlorure de magnésium. Puis, le test a été fait d'après la méthode usuelle de 7 jours à une température de 55°C.

<u>No de laboratoire</u>	<u>Composition</u>	<u>Résistance à la compression</u>	
		<u>en g</u>	<u>en kgf/cm²</u>
214	Mg (OF)	50	8
	G 9-750	100	10
	Sable	400	

Les résultats étaient très surprenants; de l'avis général, l'hydroxyde de magnésium est une base plus faible que l'hydroxyde de calcium; en tout cas aucune réaction n'a eu lieu. C'est ce qui explique pourquoi les chaux magnésiennes donnent des résultats plus bas que la chaux pure.

Il est donc possible - les essais le confirment - de tirer profit de la chaux burundaise et de l'utiliser dans des mortiers pour la construction.

Les tests réalisés avec différents mélanges de chaux et de la pouzzolane montrent d'une manière concluante qu'on peut obtenir de bons résultats en remplaçant une partie du ciment avec de la pouzzolane produite localement et l'on peut faire un bon mortier avec des mélanges de chaux et de pouzzolanes. Il faut noter, cependant, lorsqu'on utilise de la chaux produite localement, on doit en utiliser une plus grande quantité, son contenu d'hydroxyde de calcium étant plus élevé.

Il faut fixer et réaliser un programme de test complet, car il y a encore plusieurs facteurs dont l'influence n'est pas clairement définie, par exemple : le temps de cuisson de la pouzzolane; le refroidissement lent ou rapide; le

contenu de fer; la quantité d'hydroxyde de calcium produite par le ciment durcissant qui peut être captée par la pouzzolane; le fait de savoir si on doit utiliser différents types de pouzzolanes en produisant un ciment "chaux pouzzolane" et un ciment "portland-pouzzolane"; la résistance à la flexion comparée avec la résistance à la compression; l'absorption d'eau; le retrait, etc.

II. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

1. Dans ce rapport, le gisement de calcaire de Gihungwe est défini quant à sa situation et à son importance. Bientôt, ce gisement sera exploité pour la production de la chaux vive. Ce gisement étant très petit, il est proposé de procéder à une prospection plus complète du gisement de Bubanza et il est à recommander que cette prospection soit entamée le plus tôt possible. Le gisement de calcaire de Bubanza étant plus grand que celui de Gihungwe, on aura besoin de plus le temps pour découvrir les endroits où se trouve la dolomite la plus pure. L'expert, dans ce rapport, donne des indications sur les lieux de prospection et la manière de procéder.
2. Le four à chambre qui existe déjà à Bujumbura est en réparation. Sa mise en état de marche a connu un certain retard. Ce four sera utilisé pour une production de chaux à une échelle industrielle. L'expert a dessiné un four vertical pour la production de la chaux à l'intérieur du pays, où il n'y a pas d'électricité. Ce four aura un rendement beaucoup plus grand que les fours utilisés jusqu'à présent.
3. L'expert expose aussi les différentes méthodes d'extinction de la chaux et recommande un extincteur approprié. Dès son retour en Europe, il se chargera d'envoyer une offre bien détaillée de cette installation. Entre-temps, si la production de la chaux commence avant l'installation de l'extincteur, on pourra vendre la chaux vive ou procéder à une extinction d'une manière semi-industrielle par voie humide comme il est indiqué dans ce rapport.
4. L'usine de mouture du clinker est en réparation et on attend le commencement de la production du ciment, basée sur l'importation du clinker, pour la fin de l'année.
5. Le travail de recherche réalisé par l'expert a montré qu'on peut produire, une pouzzolane très active avec des matières premières locales. Alors que la résistance à la compression de l'ancien trass qu'on produisait dans les années 50 était de 59 kgf/cm^2 , celle de la pouzzolane artificielle que l'expert a produite, atteint jusqu'à 240 kgf/cm^2 , ce qui représente une très grande activité pouzzolanique.
6. L'expert a aussi montré qu'on peut produire du ciment portland pouzzolanique à base de pouzzolane artificielle. En substituant un tiers ou plus de pouzzolane, au portland, on obtient un ciment qui a parfois des propriétés supérieures à celles

du portland pur. Il est à recommander que cette usine de mouture, qui va bientôt reprendre ses activités, produise du ciment portland pouzzolanique, comme l'expert l'a fait à une petite échelle.

7. L'expert a également montré qu'il est possible de produire un ciment à base de chaux et de pouzzolane qui donne une résistance à la compression de 30 % plus élevée que la résistance de la chaux locale et cela après 21 jours seulement. Il est à recommander que, lorsqu'on produira de la chaux hydratée en poudre, on produise également du ciment à base de chaux et de pouzzolane. Celui-ci pourra servir à beaucoup de travaux de la construction qui ne requièrent pas autant de spécificité.

8. L'expert a élaboré, en collaboration avec le chef du projet d'assistance à la promotion et au développement industriels, M. Kacjan, une étude de pré-investissement pour le projet relatif à la production de ciment. L'étude se base sur la mouture de clinker mais l'installation peut mouler n'importe quel autre type de ciment tel que ceux déjà mentionnés ci-dessus. Il est à recommander que soit donnée à l'expert la possibilité de terminer lui-même les essais qu'il a commencés. On aurait ainsi des informations valables sur les meilleures matières premières, les meilleurs mélanges et les meilleures méthodes pour la production du ciment en faisant appel aux ressources locales.

9. Une assistance de la part de l'ONUDI sera nécessaire pendant plusieurs années pour développer la production de la chaux et des ciments. L'expert recommande de créer un projet d'une durée d'environ trois ans, en plusieurs phases, de façon à résoudre, chaque fois que cela sera nécessaire, les problèmes qui se poseront. Le gouvernement a déjà présenté une requête à l'ONUDI pour une assistance à la production du ciment, prévoyant l'envoi au Burundi, en deux phases, de deux experts, un ingénieur en mécanique et un ingénieur chimiste. Comme une partie des travaux de l'ingénieur chimiste est déjà terminée et comme est prévu un poste d'ingénieur mécanicien dans le projet d'assistance à la promotion et au développement industriels, il est souhaitable que la requête soit actualisée. Elle devrait aussi prévoir des bourses de stages pour des techniciens burundais.

Annexe I

ETUDE DU GISEMENT DE TRAVERTIN DE GIHUNGWE^{a/}

Le gisement de travertin de Gihungwe (voir annexe XIV) est situé à quelque 30 km au nord de Bujumbura, à l'est de la route Bujumbura-Cibitoke; il est accessible par une bretelle de cette route. En 1974, 49 puits de 3 à 4 m de profondeur disposés sur 7 lignes parallèles à la direction nord-ouest - sud-est ont été forés. A la suite de ces travaux une documentation géologique sommaire a été élaborée, établissant les réserves suivantes :

	<u>En tonnes</u>
Cuirasse de travertin	180 000
Travertin	280 000
Rognons	460 000
Total	<u>920 000</u>

De plus, des observations superficielles ont montré qu'une superficie de quelque 7 875 000 m² est couverte d'une couche de travertin de plus d'un mètre d'épaisseur, ce qui laisse prévoir une réserve supplémentaire de quelque 21 millions de tonnes.

Etant donné la documentation sommaire dont on dispose au sujet de ces travertins et les imprécisions concernant le volume des réserves et la localisation des blocs le contenant, il a été jugé nécessaire d'effectuer la vérification des travaux exécutés et le calcul des réserves de travertin de la région de Gihungwe. En se basant sur des anciennes cartes géologiques, une esquisse du gisement, à l'échelle de 1 : 1000, a été faite; on a vérifié les épaisseurs du travertin dans les anciens puits et creusé six nouveaux puits complémentaires pour pouvoir préciser l'extension des blocs à travertin (No 2,4 et 8) et l'épaisseur du travertin. Tous ces travaux ont été faits à la boussole et consignés sur les plans annexés.

A. Situation des réserves

L'expert de l'ONUDI pense que seule la cuirasse de travertin est susceptible d'être utilisée pour produire de la chaux étant donné sa composition et la technologie de production envisagée; les réserves de travertin ont donc été calculées seulement en ce qui concerne le travertin qui constitue la cuirasse bordant les anciennes exploitations

a/ Etude réalisée par M.P. Ene, ingénieur des mines, en mars 1976.

L'estimation des réserves a été faite séparément pour chacun des blocs délimités, en géométrisant leur forme :

Bloc	Superficie en m ²	Epaisseur moyenne en m	Poids volumique	Volume en m ³	Travertin en t.
1	3 646	0,30	2,3	1 094	2 516
2	2 300	0,40	2,3	920	2 116
3	2 857	0,80	2,3	2 286	5 258
4	1 850	0,30	2,3	555	1 276
5	5 886	0,20	2,3	1 177	2 707
6	5 252	0,20	2,3	1 050	2 415
7	741	0,20	2,3	149	340
8	446	0,20	2,3	89	205
Total	-	-	2,3	7 312	16 833

Ainsi, les réserves exploitables de travertin s'élèvent à quelque 17 000 t dans les blocs délimités, auxquels on peut ajouter certaines zones de cuirasse situées dans l'enceinte des anciennes exploitations et susceptibles d'être exploitées manuellement.

Il faut remarquer la différence notable entre les réserves exploitables établies ci-dessus et l'ancienne estimation concernant la cuirasse (180 000 t), différence née de l'estimation trop optimiste de l'épaisseur de la cuirasse et de l'exclusion des réserves exploitables des zones de cuirasse de moins de 10 cm d'épaisseur, couvertes par une couche stérile dépassant 30 cm d'épaisseur. En ce qui concerne l'existence de la cuirasse de travertin couvrant plus de 7 millions de m² dans la région de Gihungwe et d'une épaisseur dépassant 1 m, notre avis est beaucoup plus réservé.

On peut observer, d'après les anciennes exploitations, que l'épaisseur de cette cuirasse ne dépasse pas souvent 40-50 cm, même dans la zone de développement maximum.

B. Possibilités d'exploitation

Pour produire la quantité de chaux envisagée, le besoin annuel de travertin s'élève à quelque 10 000 t. Ainsi des réserves d'environ 17 000 t suffisent pour 20 mois d'exploitation, délai à utiliser pour la recherche de matière première dans d'autres régions.

L'exploitation de la cuirasse de travertin dans les blocs délimités sur la carte (figure XXIV) est facile à faire en carrière après décapage. Le décapage est facile à réaliser avec un bulldozer de faible capacité, vu le peu d'épaisseur (10 cm en moyenne) de la couche stérile qui ne dépasse pas 40 cm dans les zones les plus défavorables (au nord des blocs 2 et 4, à l'ouest du bloc 1 et au nord-est du bloc 8).

Les travaux d'exploitation en carrière peuvent être menés avec des moyens mécaniques dans les blocs délimités sur les plans (figure XXIV) et manuellement dans la zone des anciennes exploitations (réserves additionnelles). Si des explosifs sont utilisés pour la dislocation du travertin, il faudra soigneusement placer les charges et choisir leur dimension pour éviter l'écrasement excessif du matériel. On sait que le travertin dont les dimensions des nodules sont inférieures à 10 x 10 cm ne peut pas être utilisé dans les fours existants.

Annexe II

PROGRAMME DE TRAVAIL POUR LE DEMARRAGE DU FOUR A CHAUX

	28/2	6/3	13/3	20/3	27/3	3/4	10/4
1. Nettoyer le four							
2. Evacuer l'eau							
3. Réparer le toit							
4. Acheter du bois							
5. Sécher le four							
6. Monter une passerelle derrière le four							
7. Réparer et contrôler les clapets							
8. Préparer le mortier réfractaire							
9. Contrôler les chambres et carneaux, remplir les fissures							
10. Fermer les trous dans les carneaux							
11. Déplacer les plaques réfractaires du No 6 au No 1-3							
12. Remplir les anciens foyers avec sable et couche réfract.							
13. Installer tuyauterie raccordement entre four et ventilateur							
14. Installer clapet de réglage de capacité du ventilateur							
15. Installer la cheminée							
16. Préparer la fondation du ventilateur							
17. Installer tank pour mazout et tuyauterie pour brûleurs							
18. Changer les plaques de fer devant les foyers							
19. Faire l'installation électrique							
20. Réparer le bureau, le laboratoire et le magasin							
21. Installer l'équipement dans le laboratoire							
22. Recruter chimistes et laborantins pour contrôle de la fabrication							
23. Recruter le chef d'usine							
24. Installer ventilateur et brûleurs							
25. Installer pyromètres et manomètres							
26. Faire démarrer l'usine							

Annexe III

DESCRIPTION DES ECHANTILLONS

- G 1 L'ancien trass trouvé dans le four abandonné de Bujumbura.
- G 2 Gneiss fortement altéré (kaolinitisé), tacheté ocre et blanc; structure de la roche visible; altération in situ; Mutanga.
- G 3 Gneiss fortement altéré (plus kaolinitisé que G 2), blanchâtre; structure de la roche visible; altération in situ; Mutanga.
- G 4 Idem G 2, avec de fortes imprégnations limonitiques; Mutanga.
- G 5 Argile sableuse, grossière, grisâtre, avec de nombreuses taches, grandes, distinctes ocre et rouge brun et avec quelques graviers très fins de quartz; dépôts fluvio-lacustres; 800 m au sud de Mutanga.
- G 6 Argile sableuse fine, brun rouge; sol faiblement latéritique; 1 km au nord-ouest de Mutanga.
- G 7 Argile sableuse, tachetée brun et gris, collante et plastique; dépôts fluvio-lacustres; briqueterie de Ntakangwa.
- G 8 Argile sableuse, tachetée brun et gris, très collante et très plastique; dépôts fluvio-lacustres; Kamenge.
- G 9 Argile kaolinique très pure, blanche et gris blanc, très compacte, quelques taches très fines brunâtres; altération hydrothermale de roches granitoïdes; Mwumwu.
- G 10 Argile sableuse fine, gris ocre, quelques taches fines brunâtres; dépôts fluvio-lacustres; Kabulantwa.
- G 11 Argile limoneuse, gris ocre, quelques taches fines brunâtres; dépôts fluvio-lacustres; Kagunuzi.
- G 12 Argile brun rouge avec beaucoup de pisolithes fines, ferrugineuses; altération latéritique; carrière AMSAR, au nord de Banga.
- G 13 Argile très sableuse, grossière, rouge brun, quelques graviers fins de quartz; dépôts fluvio-lacustres avec une latérisation incipiente; carrière au sud de Bubanza.
- G 14 Lave moyennement altérée, gris clair, beaucoup de vésicules, parfois partiellement remplies d'un matériel blanchâtre; altération in situ; pont sur la Nyamagana.
- G 15 Argile kaolinique pure, gris blanc, avec quelques taches brunes et brun rouge, structure très angulaire, localement un peu endurcie; dépôts lacustres; Ngozi.

- G 16 Cuirasse de travertin, compacte, grisâtre, en surface rouge brun, dépôts hydrothermaux; Gihungwe.
- G 17 Chaux hydratée de Mosso.
- G 18 Travertin, non induré, 4,76 mm; Gihungwe
- G 19 Travertin non induré 4,76 mm 0,86 mm; Gihungwe
- G 20 Matériel tuffogène, blanchâtre, avec des tâches ocres, un peu mou; Musongati.
- G 21 Matériel tuffogène, blanc gris, endurci; Kisikara
- G 22 Idem.
- G 23 Schiste graphiteux à andalousite, noirâtre; est de Nyaruramba.
- G 24 Schiste graphiteux, noirâtre; Mugege.
- G 25 Roche pyroxénique altérée, ocre rougeâtre; ouest de Kirambi.
(2e couche W).
- G 26 Idem G 25 mais fortement altéré (kaolinitisé) et plutôt blanc rougeâtre
(1re couche E).
- G 27 Chaux de Gihungwe, cuite et hydratée.
- G 28 Idem G 14.
- G 29 Idem G 28, Rugombo.
- G 30 Argile rouge ferrique; structure terreuse, non endurcie; teneur de 55 à 60 % de Fe_2O_3 et 30 à 35 % de Al_2O_3 . Perméable, poreuse; résultat de l'altération latéritique des roches ultrabasique; Musongati.
(sondage 31 à 15 m de profondeur).
- G 31 Idem, sondage 35 à 15 m de profondeur.

Analyses chimiques des échantillons

No	Perte au feu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	(en pourcentages)						Total	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃
					CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂			
G 2	6,77	59,95	19,25	6,65	1,00	0,60	0,77	1,85			96,84	85,85
G 3	10,35	59,08	24,85	1,07	0,42	0,39	1,52	0,92	1,10		99,70	85,00
G 4	5,25	64,95	7,95	24,35	1,50	0,95					104,95	97,25
G 5	1,00	67,08	15,75	5,85	2,55	2,33	0,84	1,60			97,00	88,68
G 6	10,99	57,02	19,56	11,72	0,49	0,54	1,41	0,83	1,75		104,31	88,30
G 7	13,90	49,00	15,49	9,44	0,84	1,62	1,97	2,25	1,17		96,38	73,93
G 8	14,14	49,07	17,29	0,79	0,98	1,25	1,71	1,87	1,25		89,05	67,15
G 9 :1	8,98	37,86	47,00	4,15	0,1	0,05	0,22	1,04				89,01
G 9 :2	3,95	41,41	48,00	4,90	0,1	0,05	0,30	0,99			98,29	94,31
G 10	0,53	63,02	22,80	5,60	1,90	1,89	0,75	1,80			97,32	91,42
G 11	5,49	46,92	30,00	7,80	1,70	2,22	0,69	2,50			106,93	84,72
G 12	10,60	34,70	21,10	37,50	1,50	0,85	0,48	0,20			99,96	93,30
G 13	1,80	80,28	9,30	2,85	3,50	1,17	0,38	0,68				
G 14	5,26	56,33	20,50	12,25	5,50	2,70					102,54	89,08
G 15	12,61	46,46	39,45	7,65	0,50	0,60	0,54	0,50			108,31	93,56
G 16	33,33 ^{a/}	15,95	0,83		37,00	14,30	0,62	0,43				
G 17	20,95 ^{a/}	2,39			36,00	22,40						
G 18	28,81	29,48			31,00	13,00						
G 19	20,42	50,28			25,00	6,90						
G 20	5,19	55,28	36,10	4,50	0,1	0,16	0,66	1,00			95,88	95,88
G 21	4,00	51,68	36,00	2,50	0,1	0,10	0,92	2,46			90,18	90,18
G 22	7,00	66,32	21,53	2,40	0,1	0,05	0,13	0,18			90,25	90,25
G 23	4,33	58,39	34,00	1,50	0,1	0,05	0,70	0,92			93,89	93,89
G 24	4,29	59,57	24,00	2,40	0,1	0,14	8,92	3,48			85,97	85,97
G 25	16,76	25,83	24,50	19,00	4,50	7,00	0,13	0,10			69,33	69,33
G 26	12,98 ^{b/}	38,65	30,00	12,75	0,1	0,05	0,22	0,25			81,40	81,40
G 27	18,55 ^{b/}											

a/ Analyse sur échantillon sec. Humidité : 18,5 %.

b/ Analyse sur échantillon sec. Humidité : 8,4 %.

Annexe IV

DETERMINATION DE L'ACTIVITE POUZZOLANIQUE^{a/}

No. de labora- toire	Pouzzolane		Chaux	Pouzzolane	Sable	Eau ml	Poids/ vol. g/ml	Eprouvette	
	No.	Poids/ vol. g/ml						Resistance à la compression kg/cm ² En moyenne	
101	G1 A	0,70	50	100	400	88	2,09	58	
"	B	"	"	"	"	"	2,10	56	57
138	G2-550	0,73	"	"	"	"	2,16	40	
"	"	"	"	"	"	"	2,16	38	39
139	650	1,05	"	"	"	79	2,24	72	
"	"	"	"	"	"	"	2,24	68	70
155	" 750	0,96	"	"	"	80	2,22	144	
"	"	"	"	"	"	"	2,22	136	140
149	" 850	0,82	"	"	"	82	2,12	88	
"	"	"	"	"	"	"	2,10	88	88
156	G3-550	0,75	"	"	"	87	2,04	40	
"	"	"	"	"	"	"	2,13	32	36
157	" 650	0,79	"	"	"	85	2,28	108	
"	"	"	"	"	"	"	2,28	108	108
165	" 750	0,75	"	"	"	86	2,20	140	
"	"	"	"	"	"	"	2,19	120	130
148	" 850	0,73	"	"	"	88	2,20	112	
"	"	"	"	"	"	"	2,20	120	116
	G4-550								
161	G4-650	1,00	"	"	"	90	2,16	42	
"	"	"	"	"	"	"	2,16	40	41
151	G4-750	0,94	"	"	"	88	2,18	72	
"	"	"	"	"	"	"	2,08	72	72
152	G4-850	0,89	"	"	"	87	2,18	70	
"	"	"	"	"	"	"	2,14	72	71
104	G5-550	0,88	"	"	"	76	1,97	56	
"	"	"	"	"	"	"	2,01	64	60

^{a/} Voir figures XXV, XXVI, XXVII.

No. de labora- toire	Pouzzolane		Chaux	Pouzzolane g	Sable	Eau ml	Eprouvette		
	No.	Poids/ vol. g/ml					Poids/ vol. g/ml	Resistance à la compression kg/cm ²	
								En moyenne	
108	G5-650	0,82	50	100	400	77	2,08	44	44
"	"	"	"	"	"	"	2,08	44	
110	" 750	0,85	"	"	"	76	2,16	40	40
"	"	"	"	"	"	"	2,16	40	
113	" 850	0,84	"	"	"	76	2,00	48	46
"	"	"	"	"	"	"	2,12	44	
170	G7-550	0,87	"	"	"	84	2,04	32	32
"	"	"	"	"	"	"	2,08	32	
169	" 650	0,85	"	"	"	84	2,16	52	54
"	"	"	"	"	"	"	2,16	56	
171	" 750	0,78	"	"	"	84	2,04	34	32
"	"	"	"	"	"	"	2,16	30	
172	" 850	0,88	"	"	"	84	2,08	38	40
"	"	"	"	"	"	"	2,08	42	
158	G8-550	0,81	"	"	"	87	2,04	44	45
"	"	"	"	"	"	"	1,96	46	
168	" 650	0,83	"	"	"	84	2,12	72	72
"	"	"	"	"	"	"	2,08	72	
166	" 750	0,76	"	"	"	84	2,24	100	108
"	"	"	"	"	"	"	2,28	116	
150	" 850	0,78	"	"	"	85	2,18	72	69
"	"	"	"	"	"	"	2,08	66	
103	G9-550	-	"	"	"	87	2,00	116	122
"	"	"	"	"	"	"	1,96	128	
167	" 650	0,60	"	"	"	88	2,08	152	156
"	"	"	"	"	"	"	2,08	160	
200	" 750	0,55	200	400	1600	96	2,29	212	226
"	"	"	"	"	"	"	2,24	240	
131	"	"	50	100	400	100	2,12	220	
"	"	"	"	"	"	"	2,08	231	
111	" 850	0,60	"	"	"	96	2,16	104	
"	"	"	"	"	"	"	2,12	92	

No. de labora- toire	Pouzzolane		Chaux	Pouzzolane g	Sable	Eau ml	Eprouvette		
	No.	Poids/ vol. g/ml					Poids/ vol. g/ml	Resistance à la compression kg/cm ²	
								En moyenne	
112	G9-850	0,60	50	100	400	92	2,00	88	102
"	"	"	"	"	"	"	2,12	124	
114	G10-550	0,78	"	"	"	81	2,09	28	
"	"	"	"	"	"	"	2,06	32	
116	" 650	0,81	"	"	"	85	2,00	56	60
"	"	"	"	"	"	"	2,00	64	
118	" 750	0,73	"	"	"	82	2,10	76	72
"	"	"	"	"	"	"	2,10	68	
120	" 850	0,92	"	"	"	80	2,02	70	69
"	"	"	"	"	"	"	2,12	68	
115	G11-550	0,57	"	"	"	87	2,08	40	40
"	"	"	"	"	"	"	2,09	40	
117	" 650	0,59	"	"	"	90	1,98	70	69
"	"	"	"	"	"	"	1,98	68	
119	" 750	0,51	"	"	"	88	2,14	112	116
"	"	"	"	"	"	"	2,16	120	
121	" 850	0,62	"	"	"	88	2,19	104	100
"	"	"	"	"	"	"	2,18	96	
140	G12-550	0,62	"	"	"	80	2,20	44	44
"	"	"	"	"	"	"	2,26	44	
141	" 650	0,93	"	"	"	83	2,12	92	90
"	"	"	"	"	"	"	2,12	88	
146	" 750	0,98	"	"	"	81	2,22	84	87
"	"	"	"	"	"	"	2,24	90	
142	" 850	0,93	"	"	"	80	2,16	124	128
"	"	"	"	"	"	"	2,16	132	
146	" 750	0,98	"	"	"	81	2,22	84	87
"	"	"	"	"	"	"	2,24	90	
142	" 850	0,93	"	"	"	80	2,16	124	128
"	"	"	"	"	"	"	2,16	132	
121	G13-550	0,88	"	"	"	78	2,12	70	71
"	"	"	"	"	"	"	2,12	72	

No. de labora- toire	Pouzzolane		Chaux	Pouzzolane	Sable	Eau ml	Eprouvette		
	No.	Poids/ vol. g/ml					Poids/ vol. g/ml	Resistance à la compression	
								kg/cm ² En moyenne	
128	G13-650	0,73	50	100	400	85	2,18	72	
129	" 750	0,85	"	"	"	85	2,12	52	52
"	" "	"	"	"	"	"	2,18	52	
130	" 850	0,86	"	"	"	75	2,11	76	78
"	" "	"	"	"	"	"	2,11	80	
122	G14	0,90	"	"	"	81	2,10	54	56
"	" "	"	"	"	"	"	2,08	58	
143	G15-550	0,90	"	"	"	93	2,00	56	58
"	" "	"	"	"	"	"	1,96	60	
153	" 650	0,54	"	"	"	100	2,05	92	88
"	" "	"	"	"	"	"	2,06	84	
199	" 750	0,48	"	"	"	100	2,21	180	174
"	" "	"	"	"	"	"	2,24	168	
154	" 850	0,53	"	"	"	100	2,08	164	156
"	" "	"	"	"	"	"	2,06	148	
175	G20	0,53	"	"	"	84	1,96	6	6
"	" "	"	"	"	"	"	1,96	6	
192	G21	0,83	"	"	"	82	2,28	4	4
"	" "	"	"	"	"	"	2,24	4	
187	G22	0,55	"	"	"	109	2,20	6	6
"	" "	"	"	"	"	"	2,20	6	
188	G23	0,88	"	"	"	76	2,28	6	6
"	" "	"	"	"	"	"	2,28	6	
189	G24	0,81	"	"	"	78	2,28	6	7
"	" "	"	"	"	"	"	2,12	8	
190	G25	0,64	"	"	"	92	2,12	6,6	6,7
"	" "	"	"	"	"	"	2,12	6,8	
191	G26	0,68	"	"	"	96	2,16	64	66
"	" "	"	"	"	"	"	2,20	68	
195	G28	1,01	"	"	"	94	2,00	36	36
"	" "	"	"	"	"	"	2,08	36	
198	G29	1,01	"	"	"	85	2,14	52	52
"	" "	"	"	"	"	"	2,22	52	

Annexe V

LISTE DES PERSONNALITES RENCONTREES

Les fonctionnaires du PNUD : MM. J.B. Yonké, représentant résident;
A. Zichy, représentant résident adjoint; F. Diounou, administrateur de
programmes; N. Habib, administrateur.

MM. M. Kacjan, directeur du projet d'assistance à la promotion et au
développement industriels, expert de l'ONUDI; P. Heilman, expert en
géomorphologie; P. Rademaker, chimiste; V. Marekani, ingénieur chimiste;
D. Shiramanga, directeur général au Ministère de l'économie; P. Ene,
ingénieur des mines; Z. Kambirigi, directeur du Département de la géologie
et des mines.

Les fonctionnaires du Département de l'industrie et de l'artisanat :

MM. E. Ncabugufi, directeur; L. Nkundwa; G. Kayibigi.

M.G. Munyankaka, du Ministère des travaux publics.

MM. A. Ntukamazina, directeur; V. Buyoya, directeur associé de l'entreprise
IMPEX.

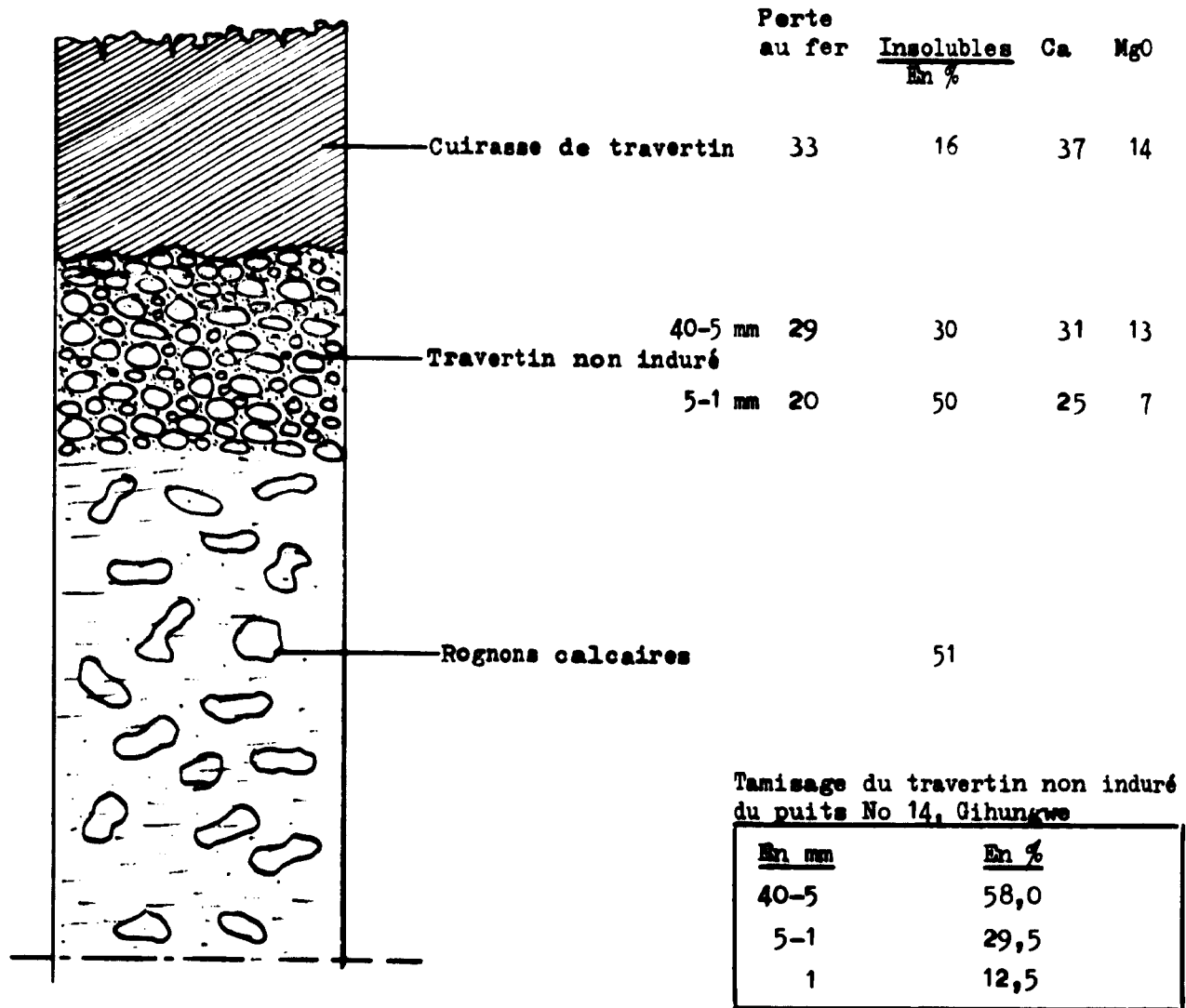
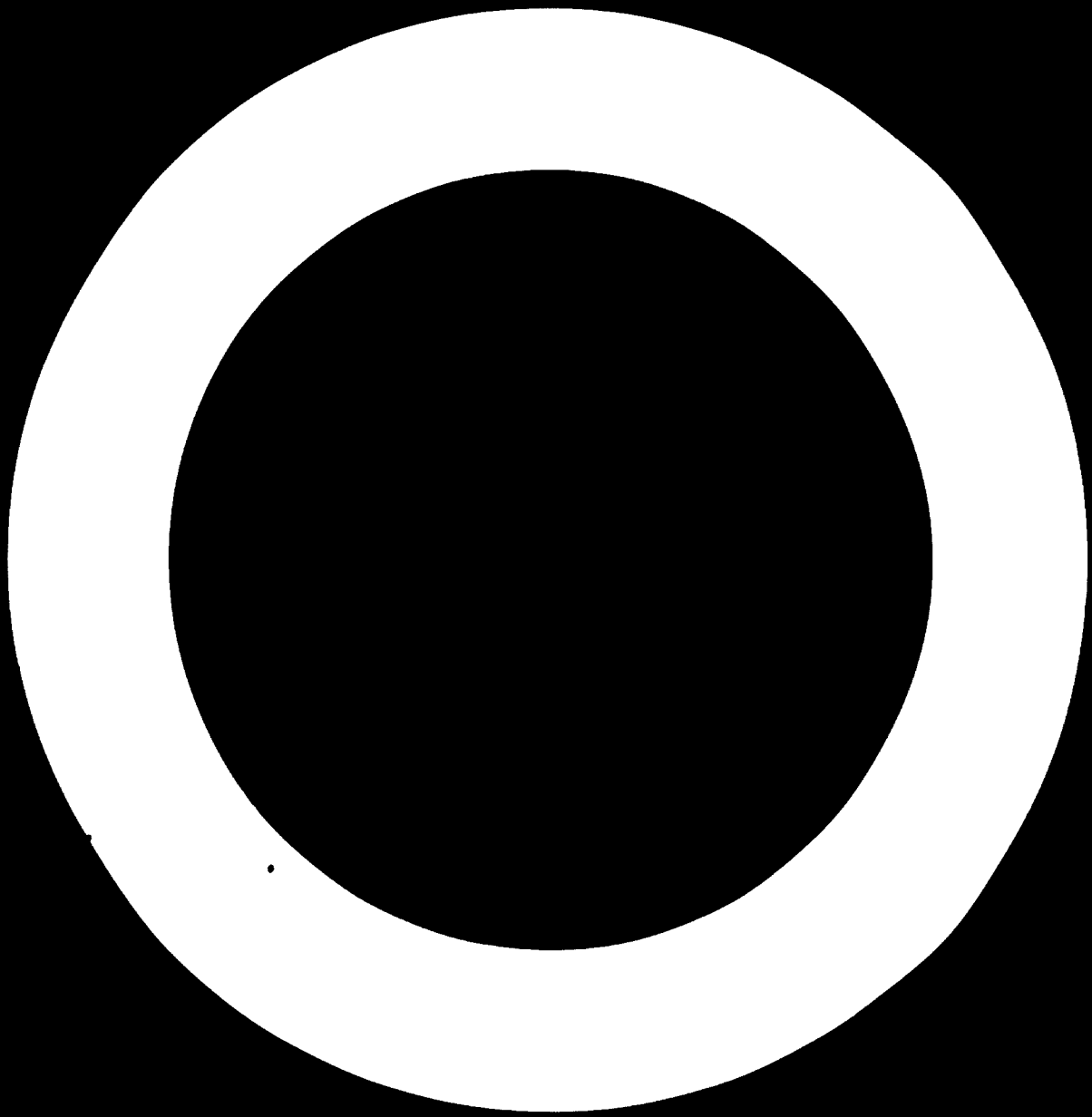


Figure I. Coupe géologique, Gihungwe



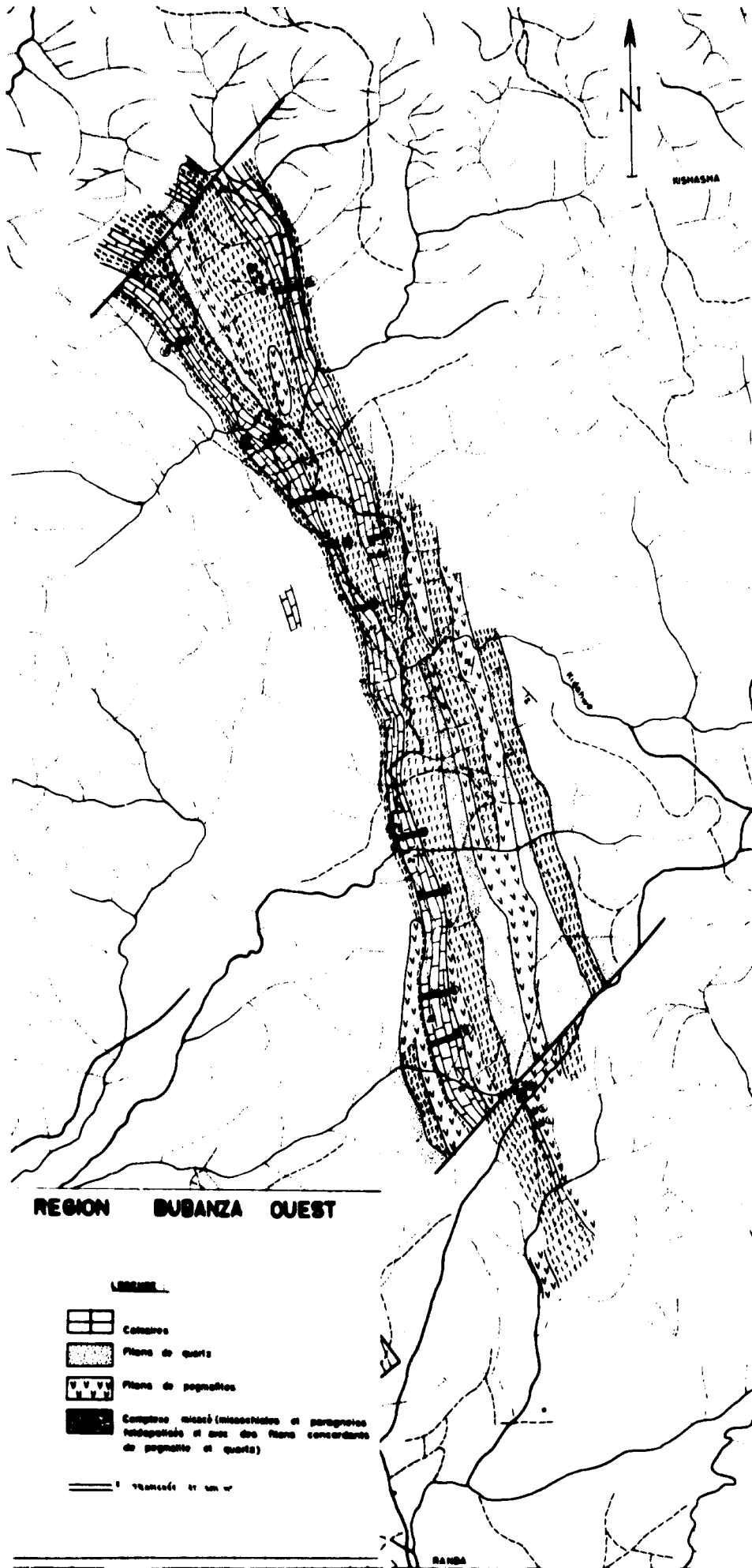
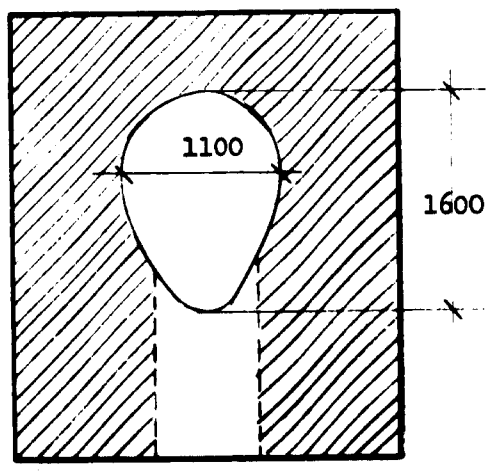
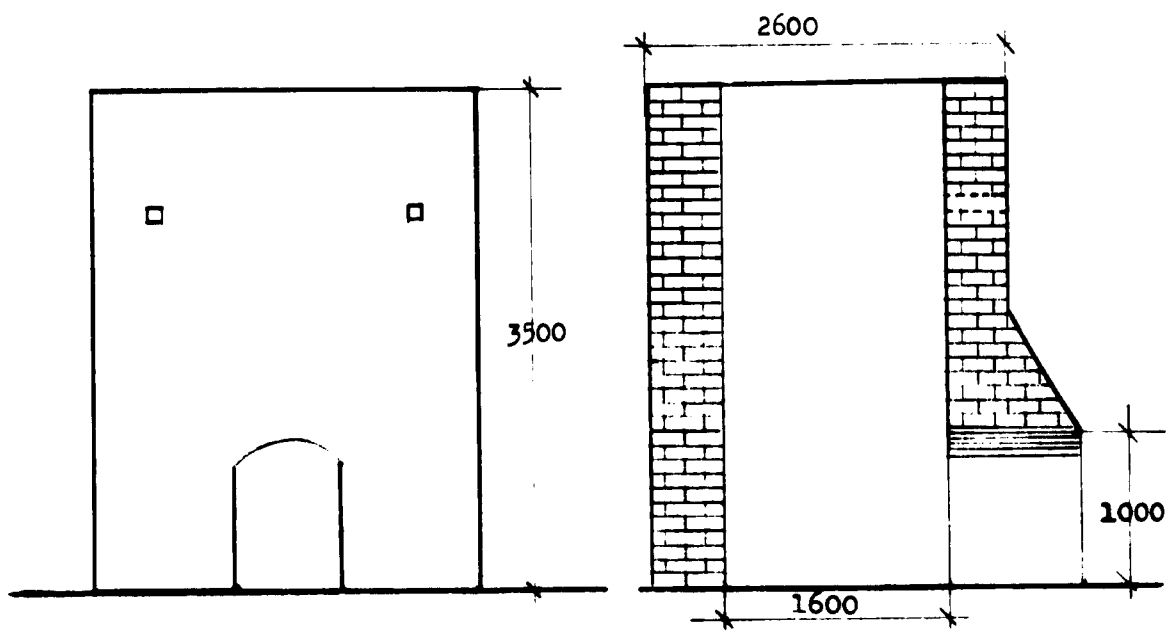


Figure II. Gisement de Bubanza



Programme de cuisson

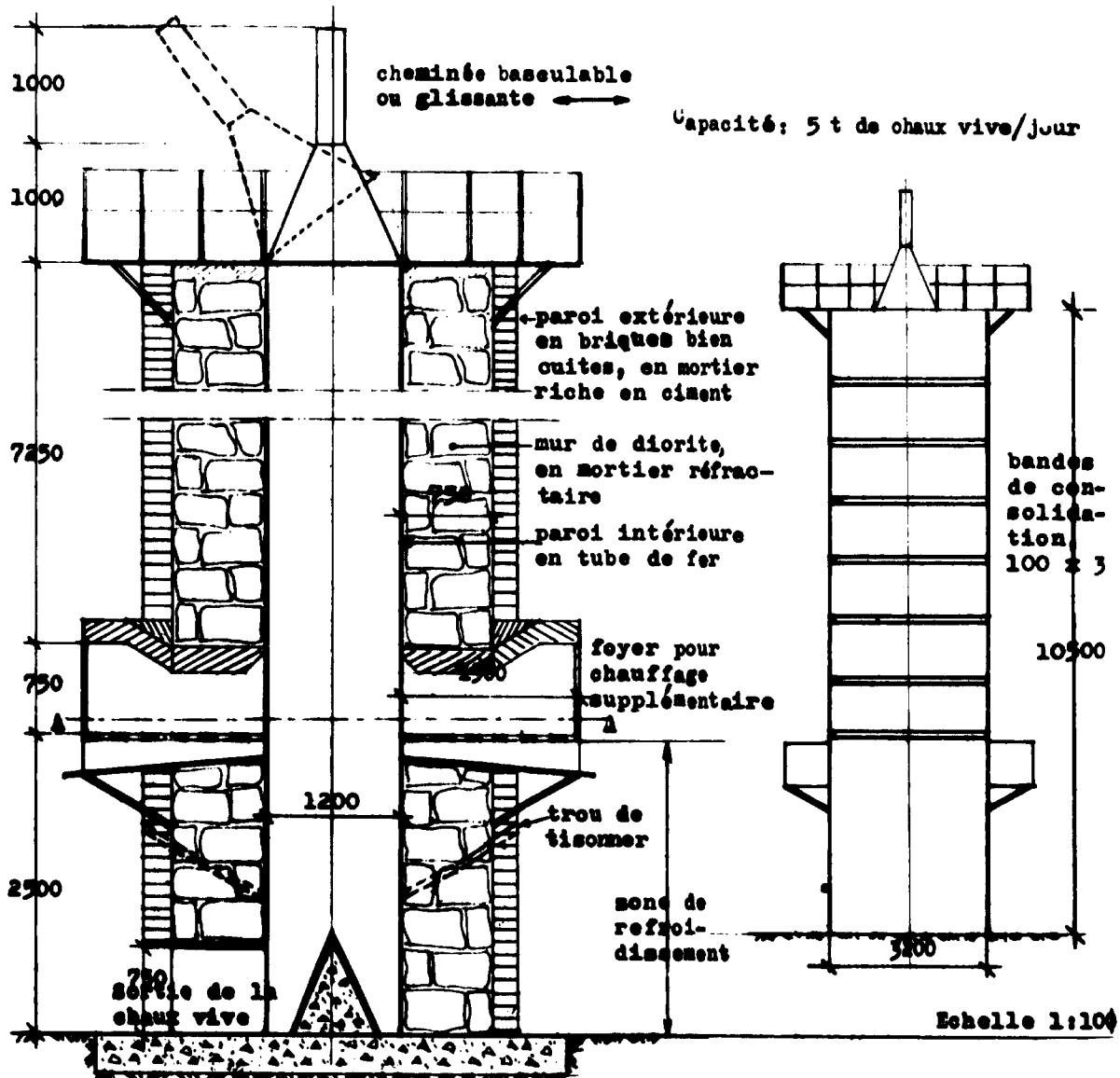
- 1 jour : charger
- 2 jours : cuisson
- 2 jours : décharger

Production

3,5 t/semaine = 15 t/mois
Consommation de bois : 2,6-3,8 kg/kg
= 6 500-9300 koal/kg de chaux vive
(on utilise du bois vert qui, avec une humidité de 40 %, a un pouvoir calorifique de 2 540 koal/kg)

Echelle 1 : 50
Dimensions en mm

Figure III. Four à chaux de la région de Mosso



Echelle 1:50

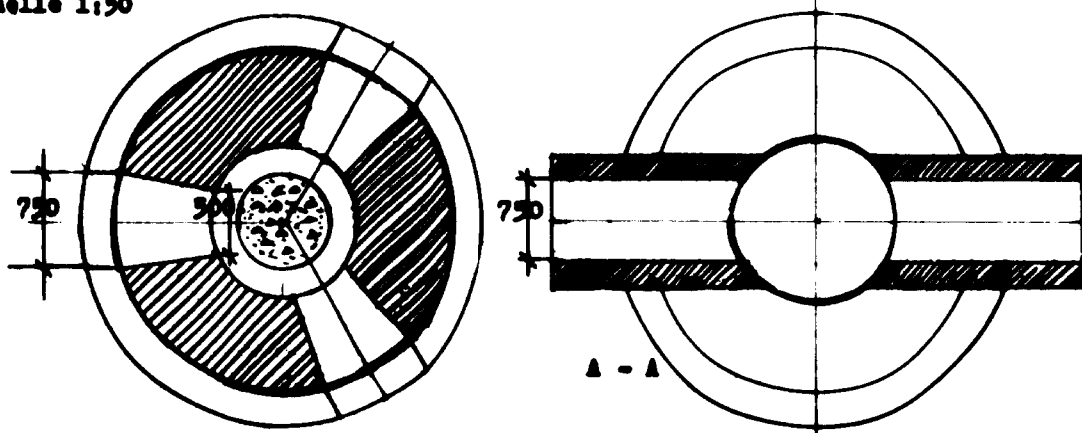


Figure IV. Four à chaux semi-industriel

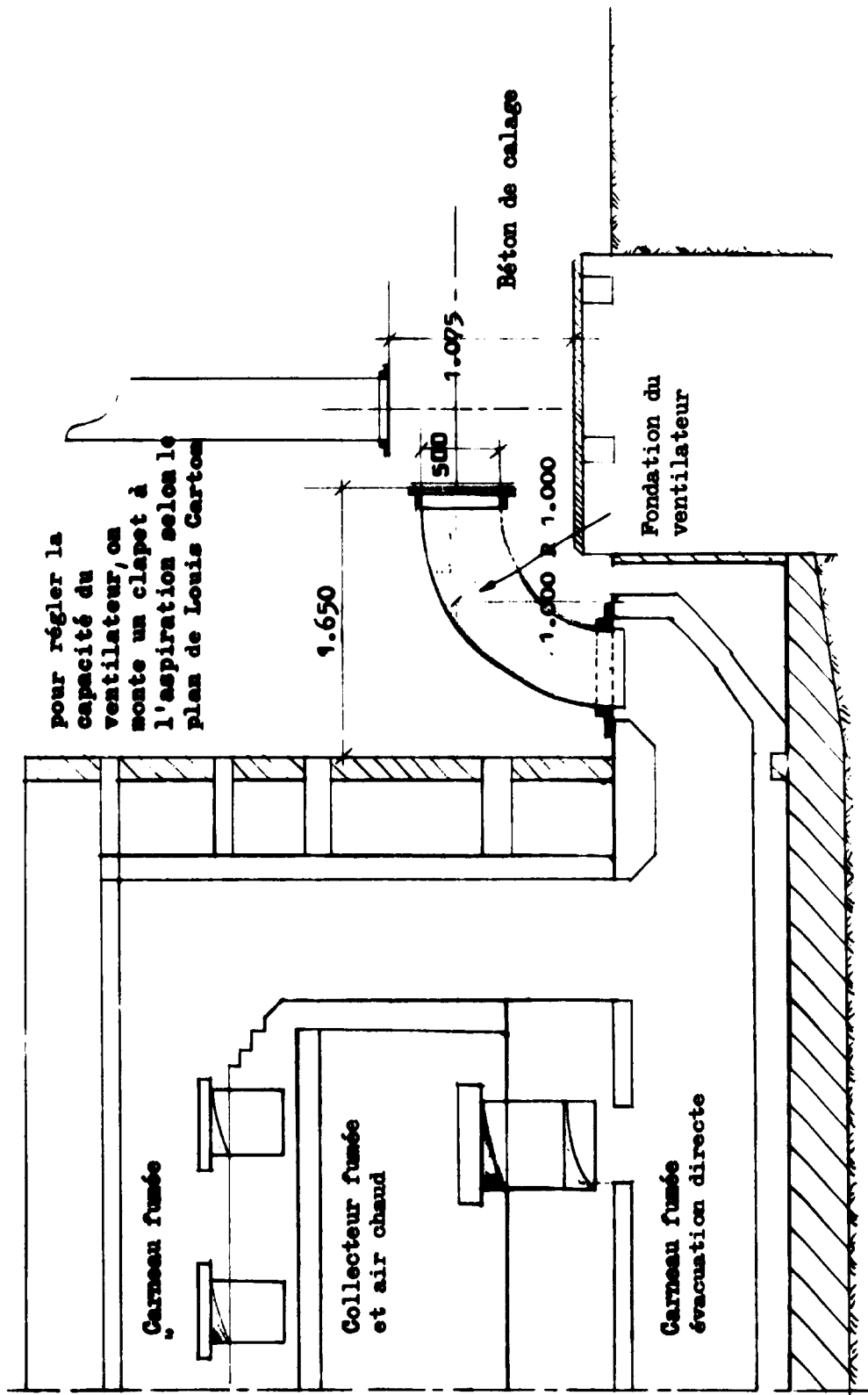
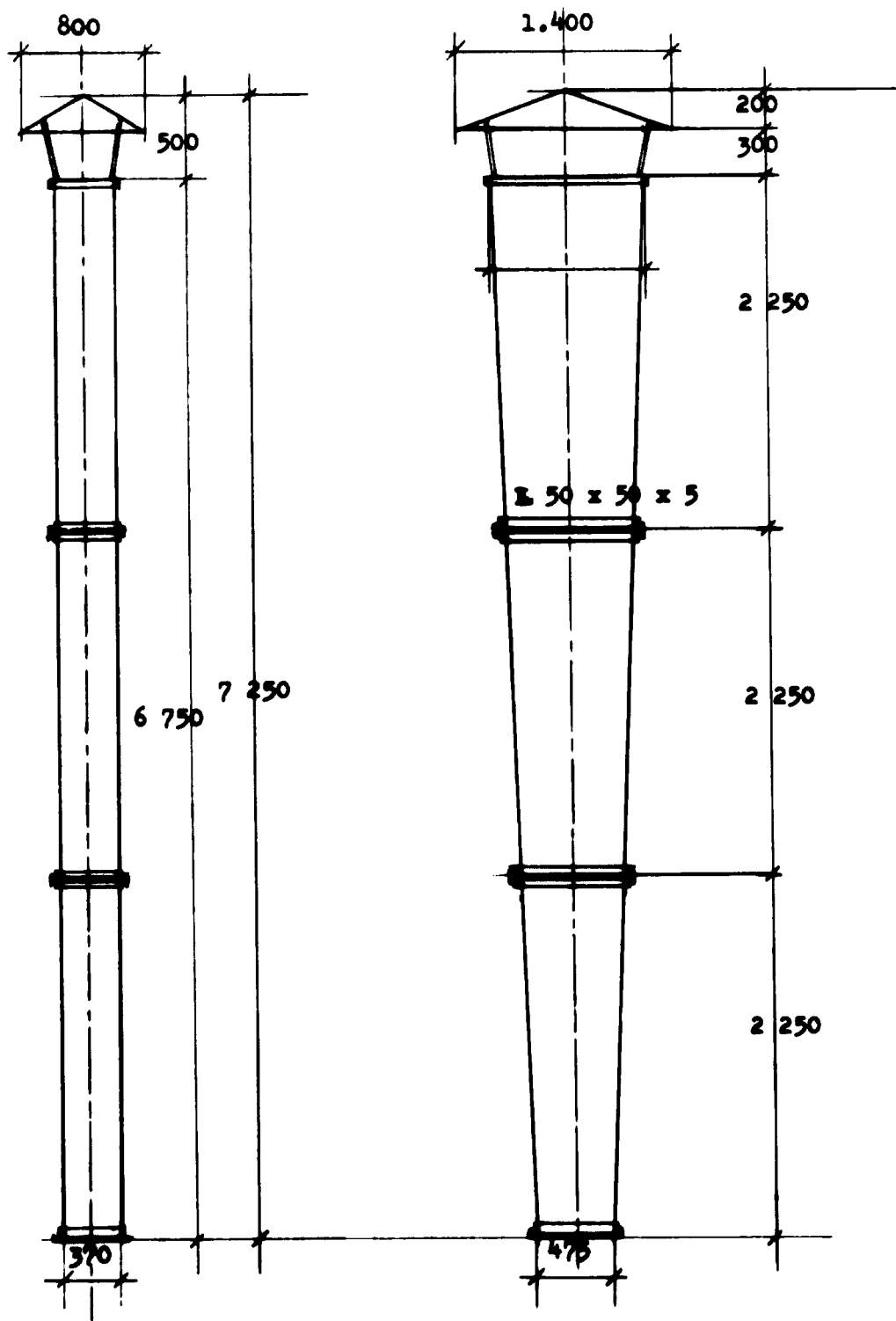


Figure V. Fondation pour le ventilateur, tuyauterie de raccordement et cheminée d'évacuation



Cheminée à ejecteur de section rectangulaire, en 3 tronçons, en tôle de 3 mm d'épaisseur avec brides en L (50 x 50 x 5)

Figure VI. Cheminée à éjecteur

ASTM	mm	Refus en g	Passant	
			en g	en %
4	5			
10	2			
18	1			
20	0,86			
35	0,50			
40	0,42			
60	0,25			
100	0,15			
200	0,075			
300				

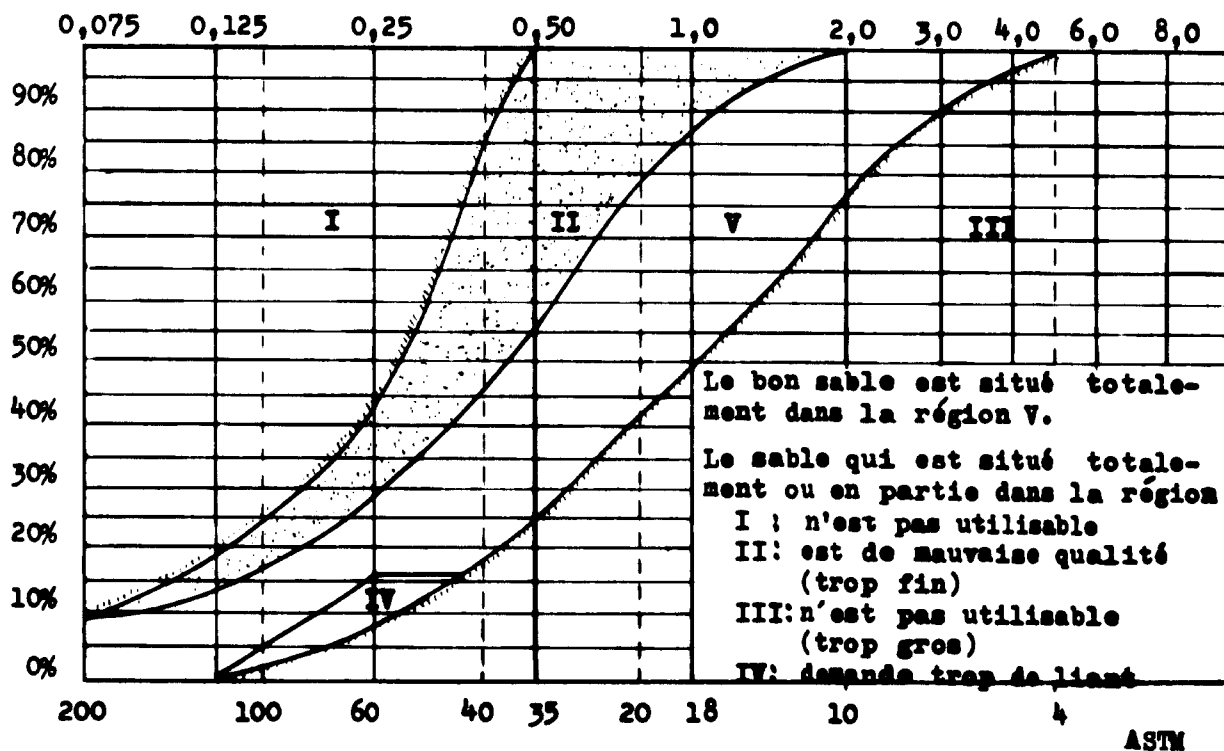


Figure VII. Granulométrie du sable.

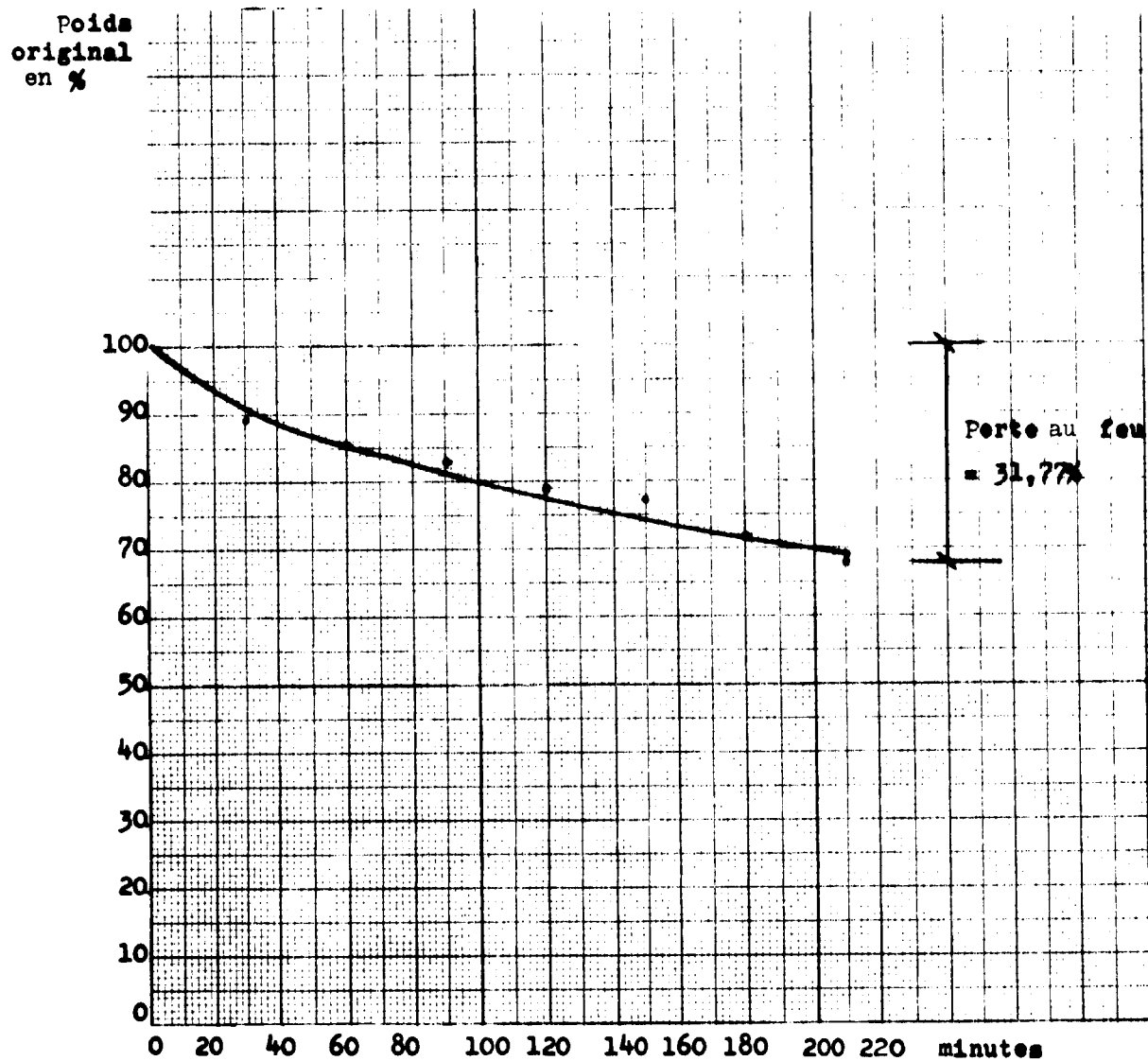
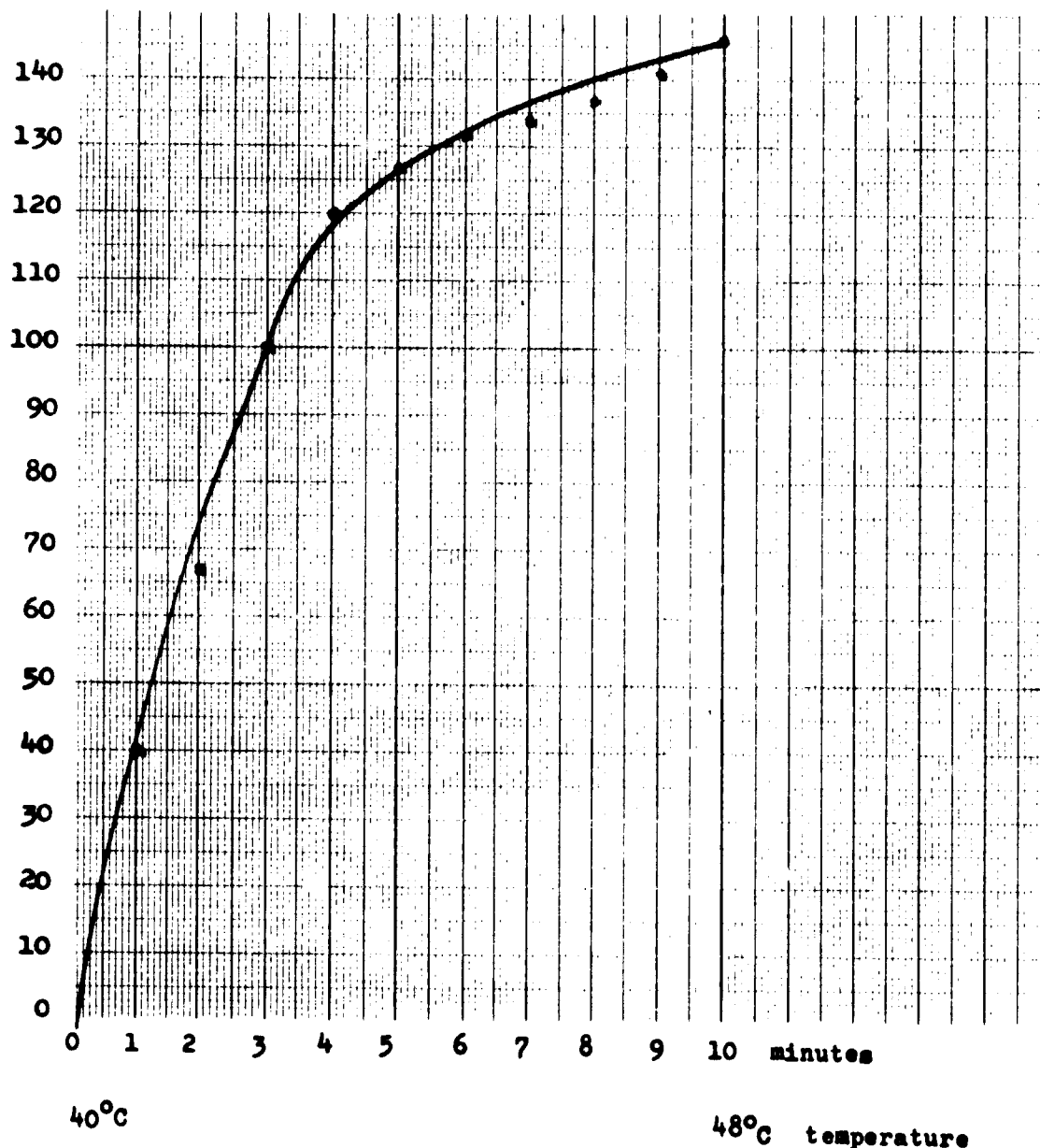


Figure VIII. Diagramme de la cuisson du travertin G 16 de Gihungwe à 900° C

ml 4-n HCl



En ajoutant un échantillon de 50 g de chaux vive à 1 litre d'eau à 40°C, on note une quantité de HCl 4-N consommée chaque minute, en utilisant la phénolphtaléine comme indicateur. On fait une courbe montrant la rapidité avec laquelle la chaux est hydratée et neutralisée par l'acide; cela indique si la chaux est trop ou trop peu cuite. Une chaux trop cuite peut utiliser aussi peu que 20 ml d'HCl durant un test de 10 minutes. La consommation normale est de l'ordre de 430 ml pour une chaux pure.

Après 20 minutes la consommation totale de HCl était de 171 ml
Consommation totale théorique : 380 ml

Figure IX. Détermination de l'activité de la chaux G 27

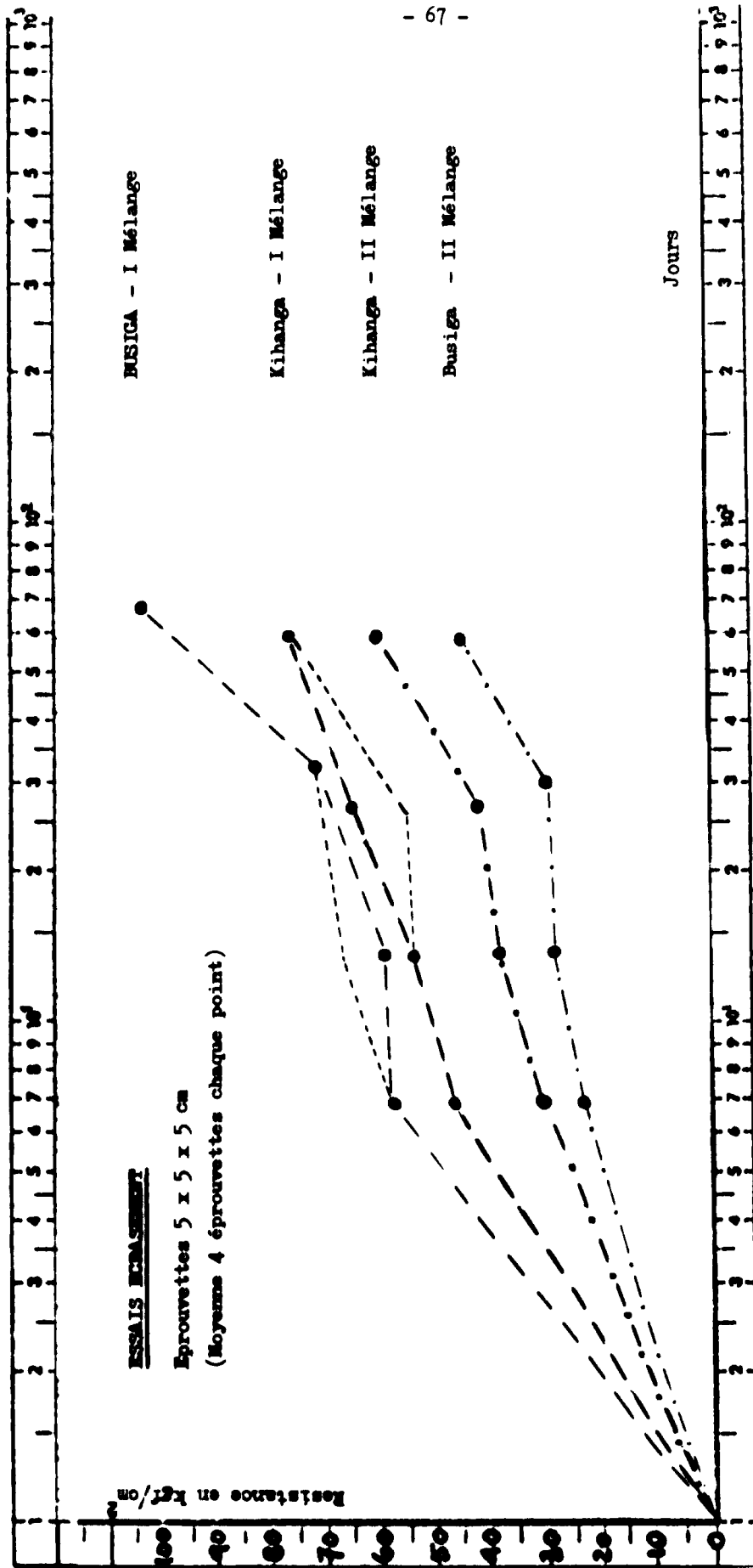
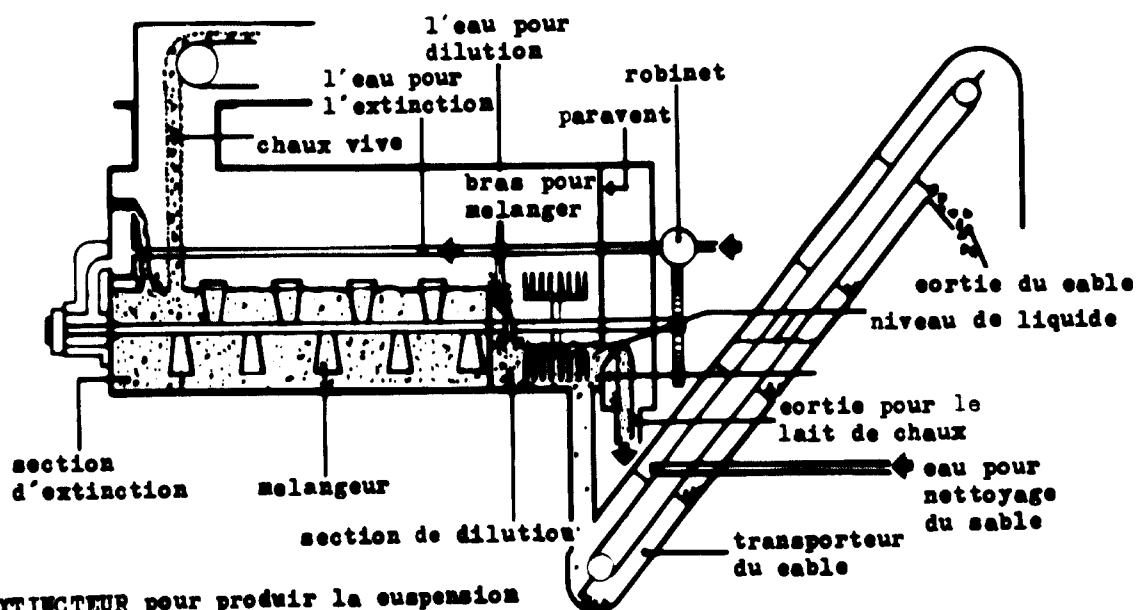
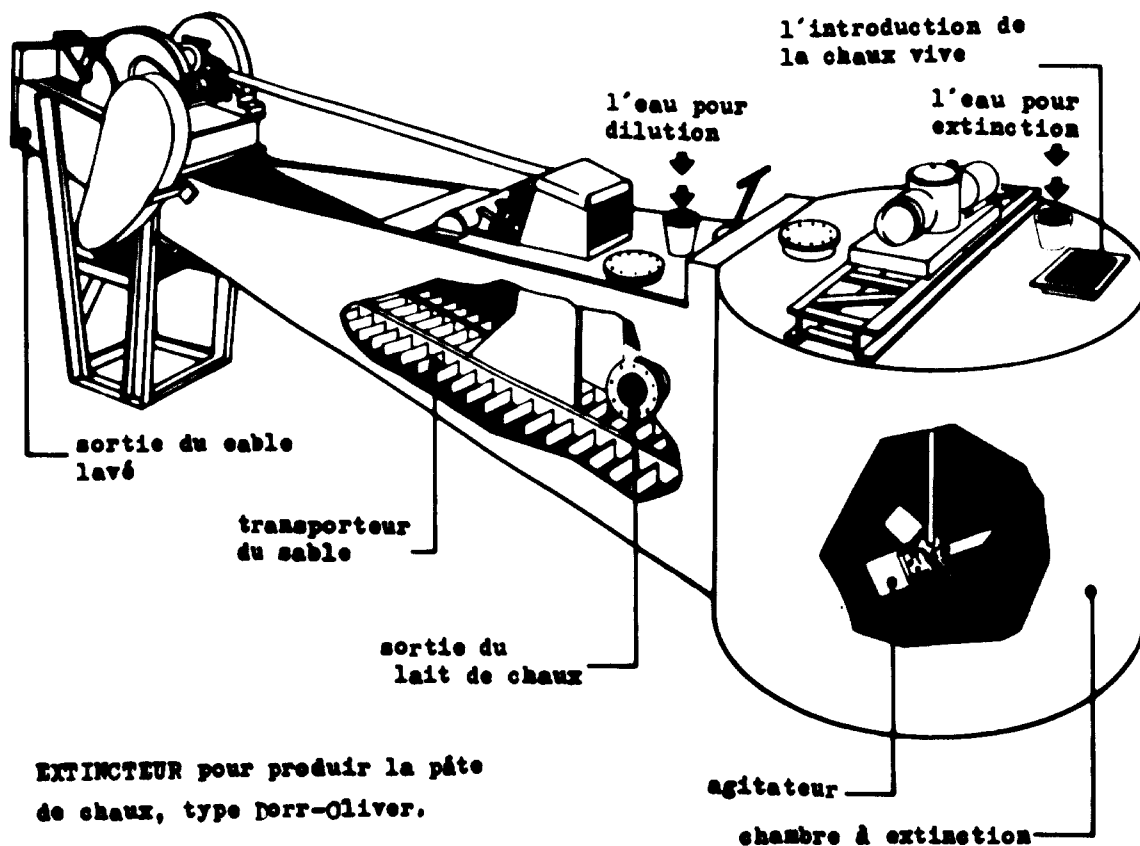


Figure X. Résultats de la résistance à la compression



EXTINCTEUR pour produire la suspension de chaux, type Wallace-Tiernan.



EXTINCTEUR pour produire la pâte de chaux, type Dorr-Oliver.

Figure XI. Extincteurs de chaux, type Wallace-Tiernan et Dorr-Oliver

Légende

- | | |
|--|---|
| 1. Broyeur | 8. Aération |
| 2. Elévateur | 9. Elévateur |
| 3. Silo | 10. Tuyauterie de connection |
| 4. Clapet | 11. Séparateur avec table de dispersion |
| 5. Contrôleur d'alimentation | 12. Transporteur |
| 6. Extincteur de chaux à trois étages | 13. Broyeur |
| 7. Tuyauterie pour l'eau fraîche et le lait de chaux | |

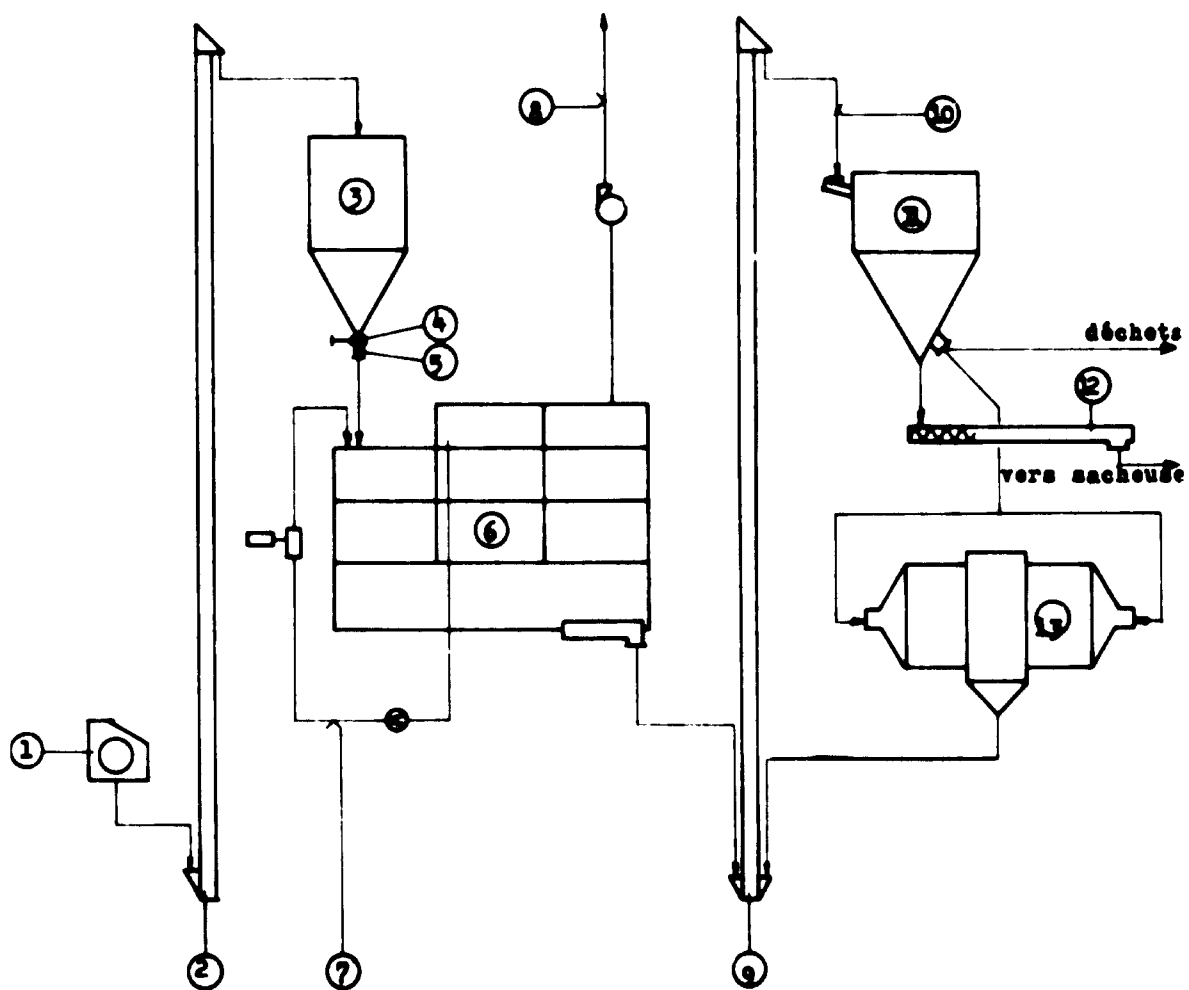
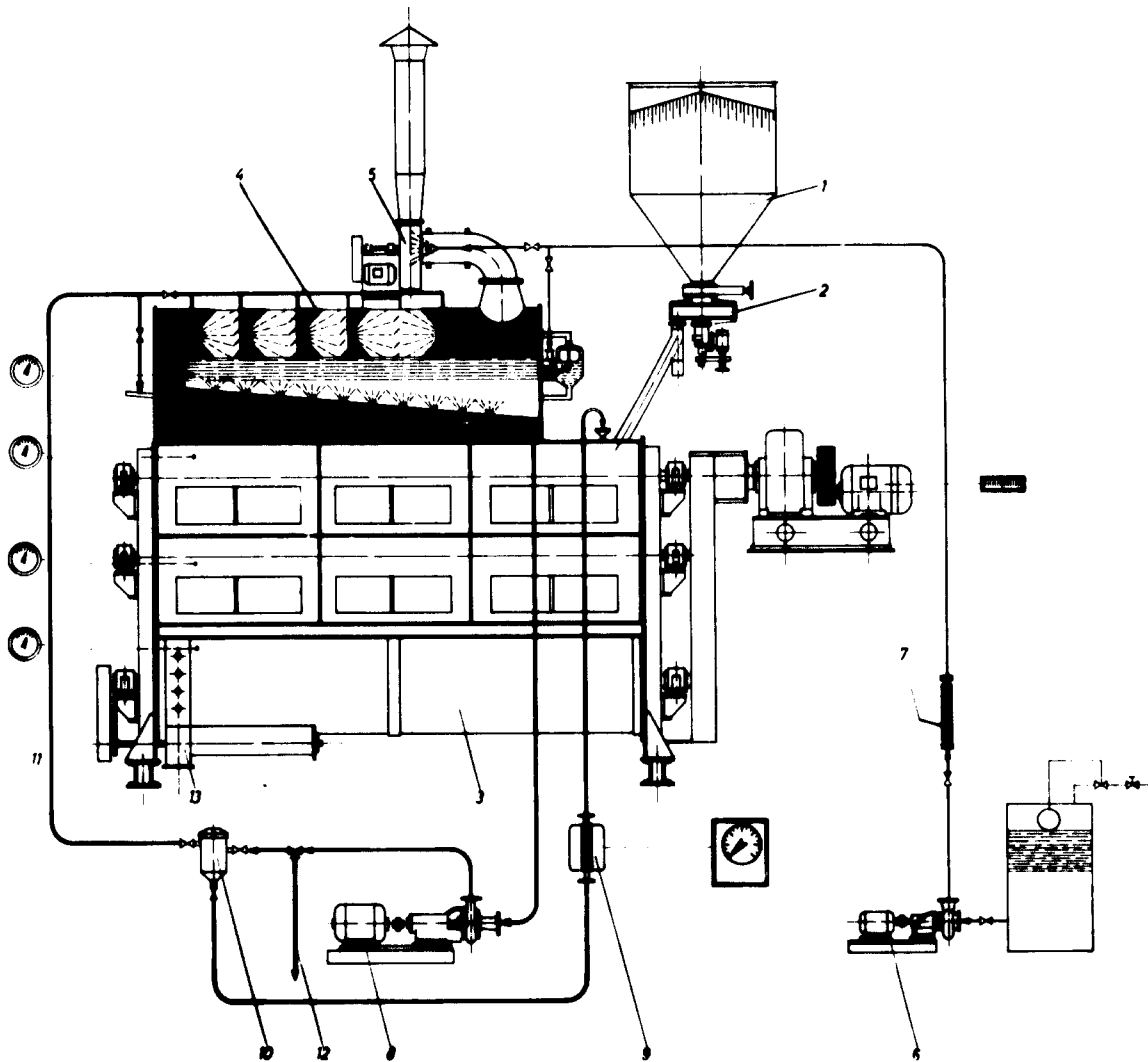
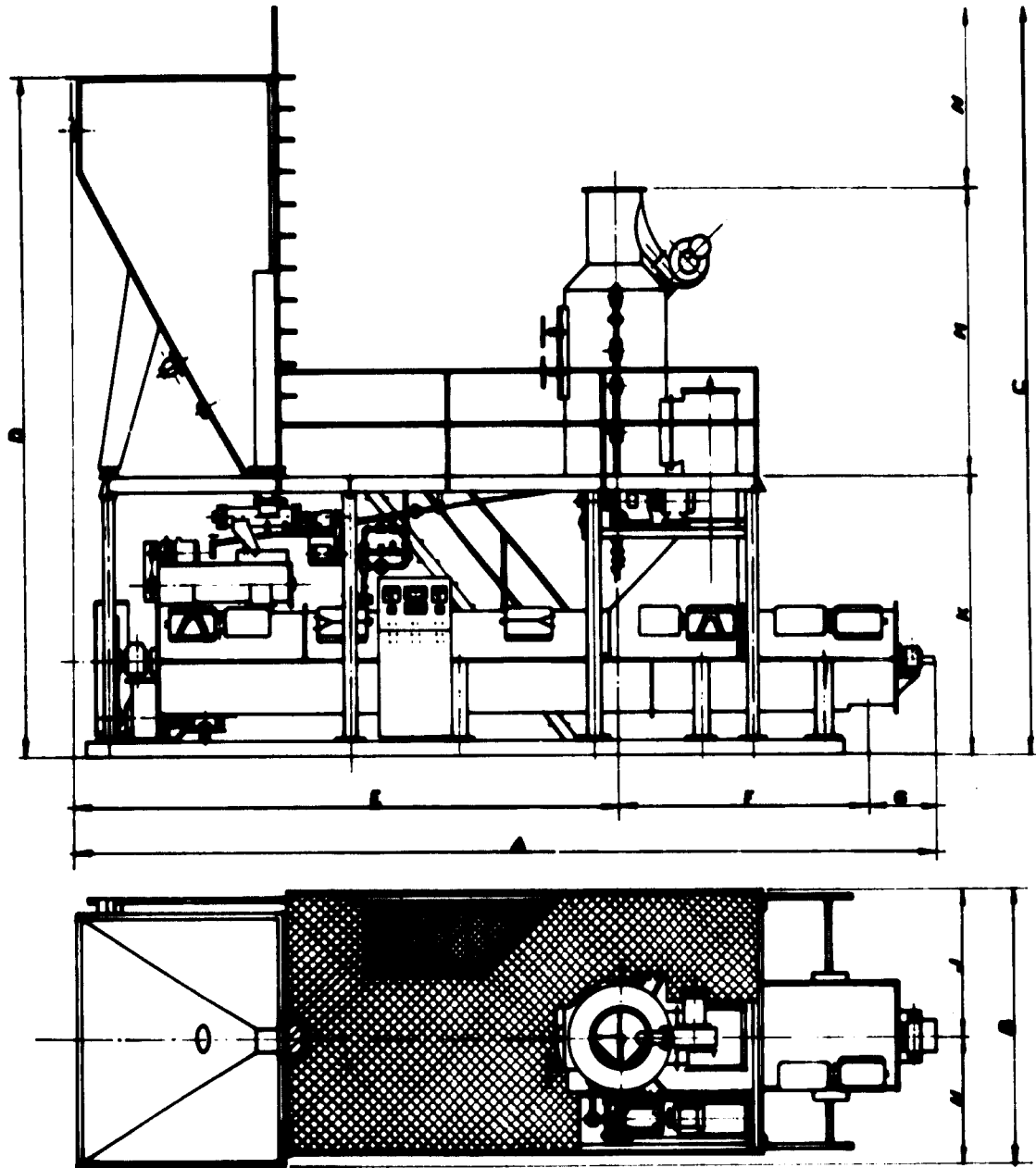


Figure XII. Schéma d'une installation d'extinction de chaux à trois étages, type KLD



- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. Silo d'alimentation
pour la chaux vive | 9. Appareil de mesure |
| 2. Sole doseuse | 10. Séparateur de déchets |
| 3. Extincteur à trois étages | 11. Indicateur de température |
| 4. Dépoussiereur à voie
humide | 12. Sortie en cas d'urgence |
| 5. Ventilateur | 13. Sortie pour chaux hydratée |
| 6. Pompe pour l'eau fraîche | |
| 7. Appareil de mesure | |
| 8. Pompe de circulation | |

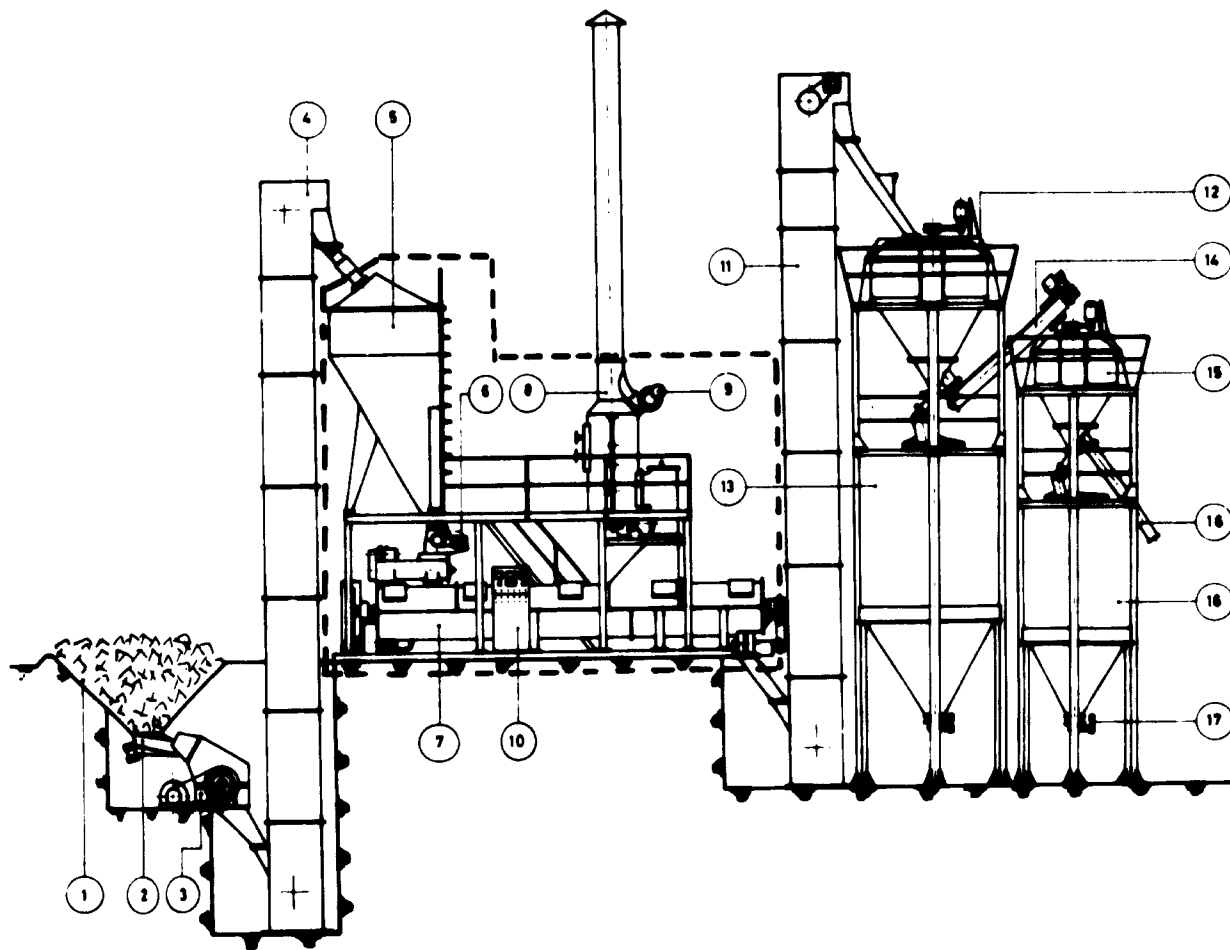
Figure XIII. Extincteur à trois étages, type KLD



Encombrement de l'appareil

TIPO	PRODUCCION HIDRATO BRUTO Tm/h	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	M	N	KG.
1	0,5-1	5300	2400	7000	6000	3000	1800	500	1200	1200	2800	2700	1700	6300
2	1-1,5	6300	2420	7170	6167	3700	2050	550	1230	1190	2850	2700	1820	7200
3	2-2,5	7500	2550	7200	6200	4400	2300	600	1200	1300	2820	2700	1880	8750
4	3-3,5	8250	2600	7380	6383	5200	2400	650	1200	1400	2812	2700	2088	9800
5	4,5-5	9250	2650	7500	6500	5400	3150	700	1200	1450	2820	2700	2190	11480

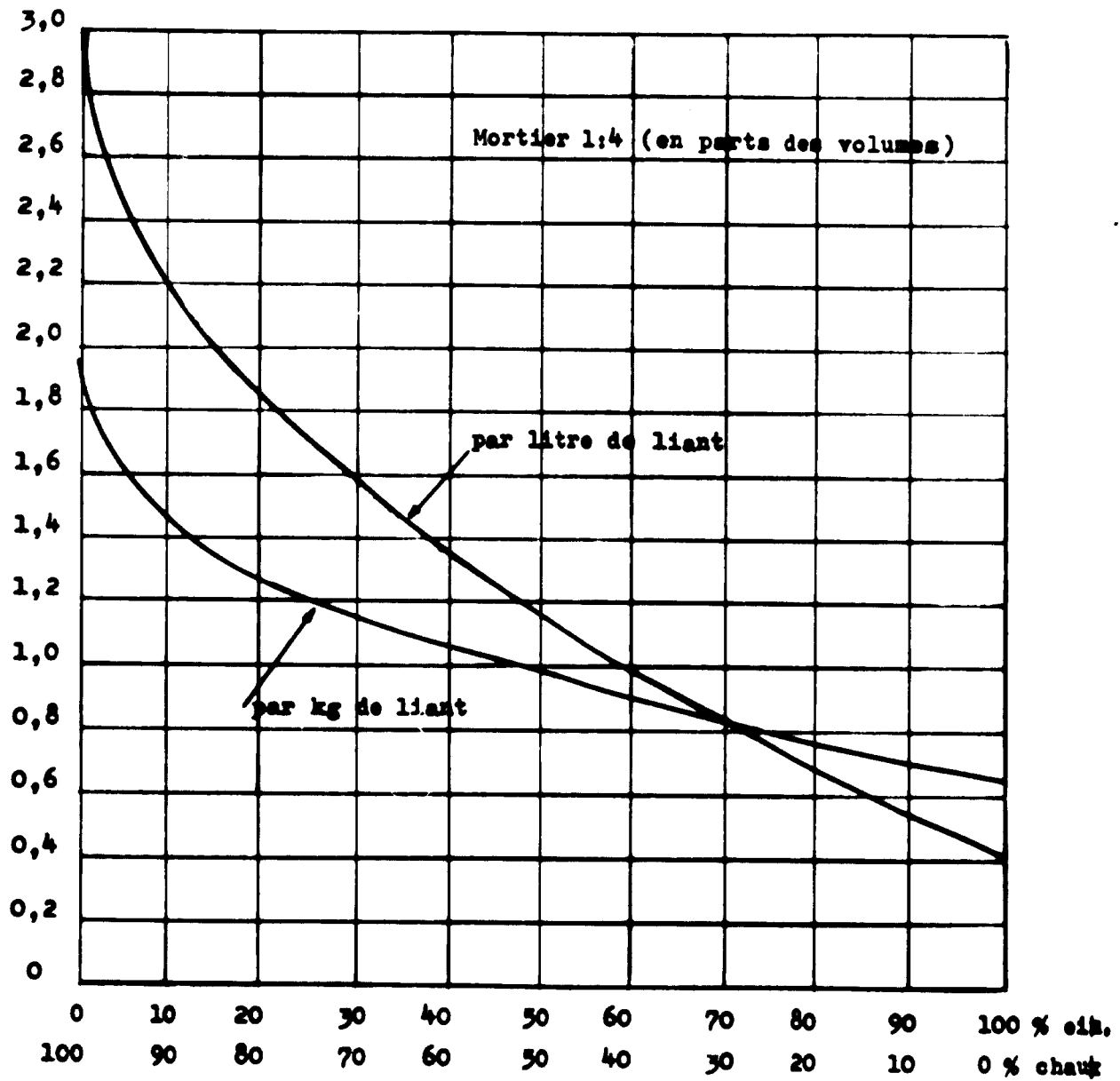
Figure XIV. Installation d'extinction de chaux, de type Peach-Rover



Liste de positions

1. Silo à chaux vive
2. Alimentateur vibrant
3. Moulin à marteaux
4. Elevateur à godets
5. Doseur à chaux vive
7. Extincteurs
8. Condenseur-dépoussiéreur
9. Exhausteur
- 10.. Armoire électrique de commande et d'automatation
11. Elevateur à godets
12. Sélecteur à air primaire
13. Silo à hydrate
14. Transporteur de refus
15. Sélecteur à air secondaire
16. Silo à hydrate
17. Ensaheurs
18. Refus

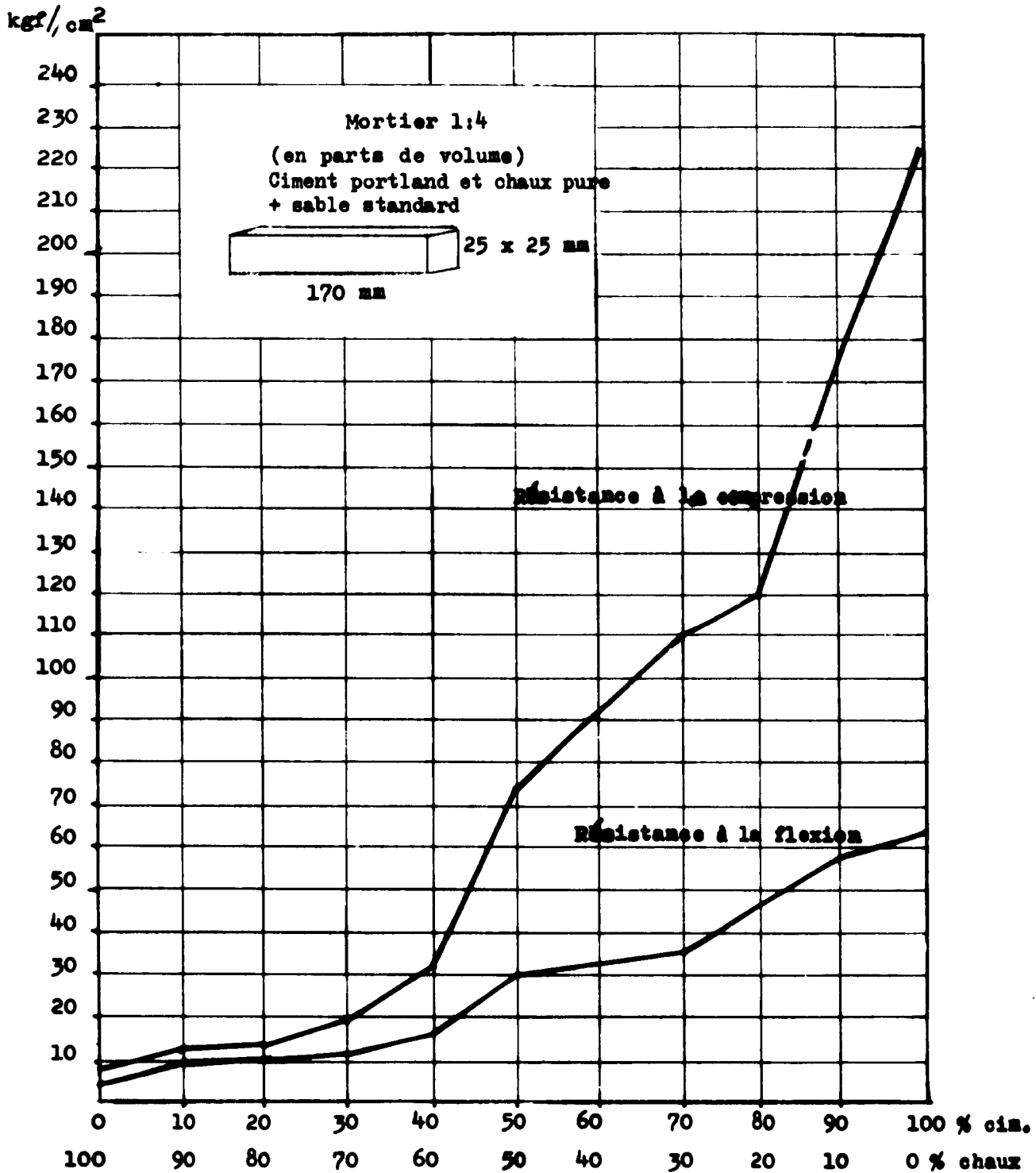
Figure XV. Modèle d'une installation simple d'hydratation



Source : Hogberg, op. cit.

g/ Pour produire la même consistance.

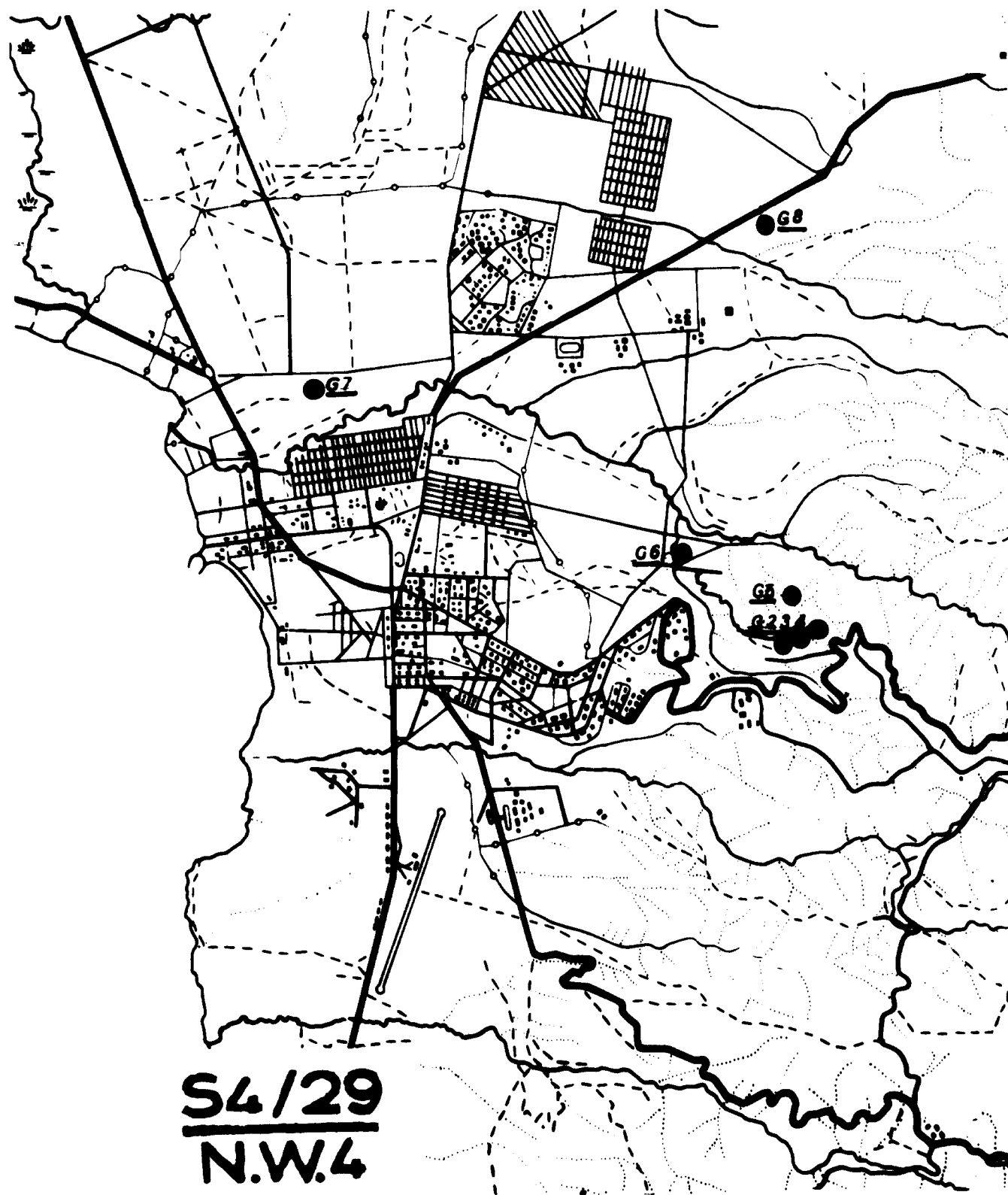
Figure XVI. Besoins en eau des mortiers



Source : Hogberg, *op. cit.*

a/ Après 3 mois, à 70 % d'humidité relative.

Figure XVII. Résistance des mortiers mixtes



S4/29
N.W.4

Figure XVIII. Carte de Bujumbura NW4

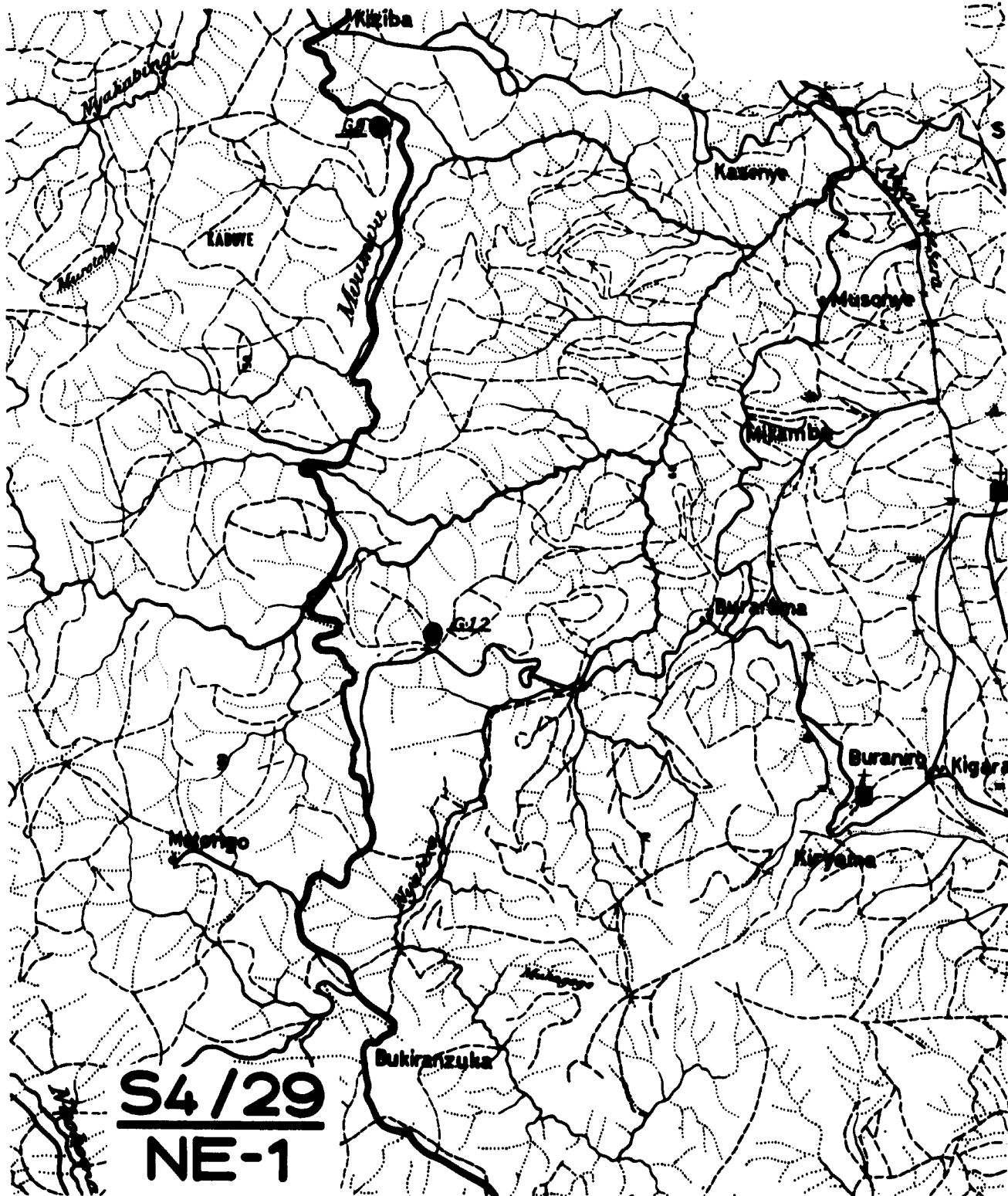
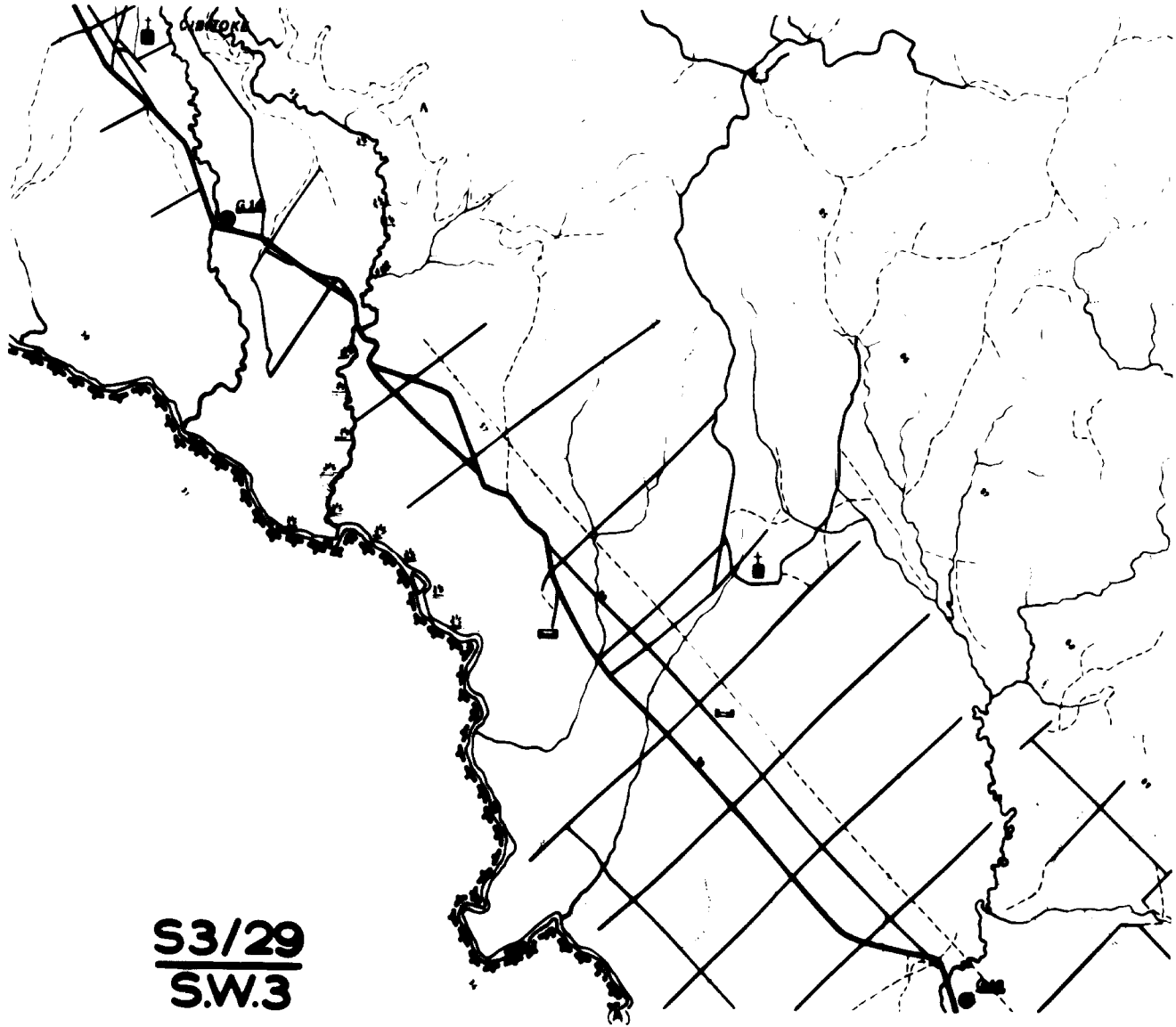
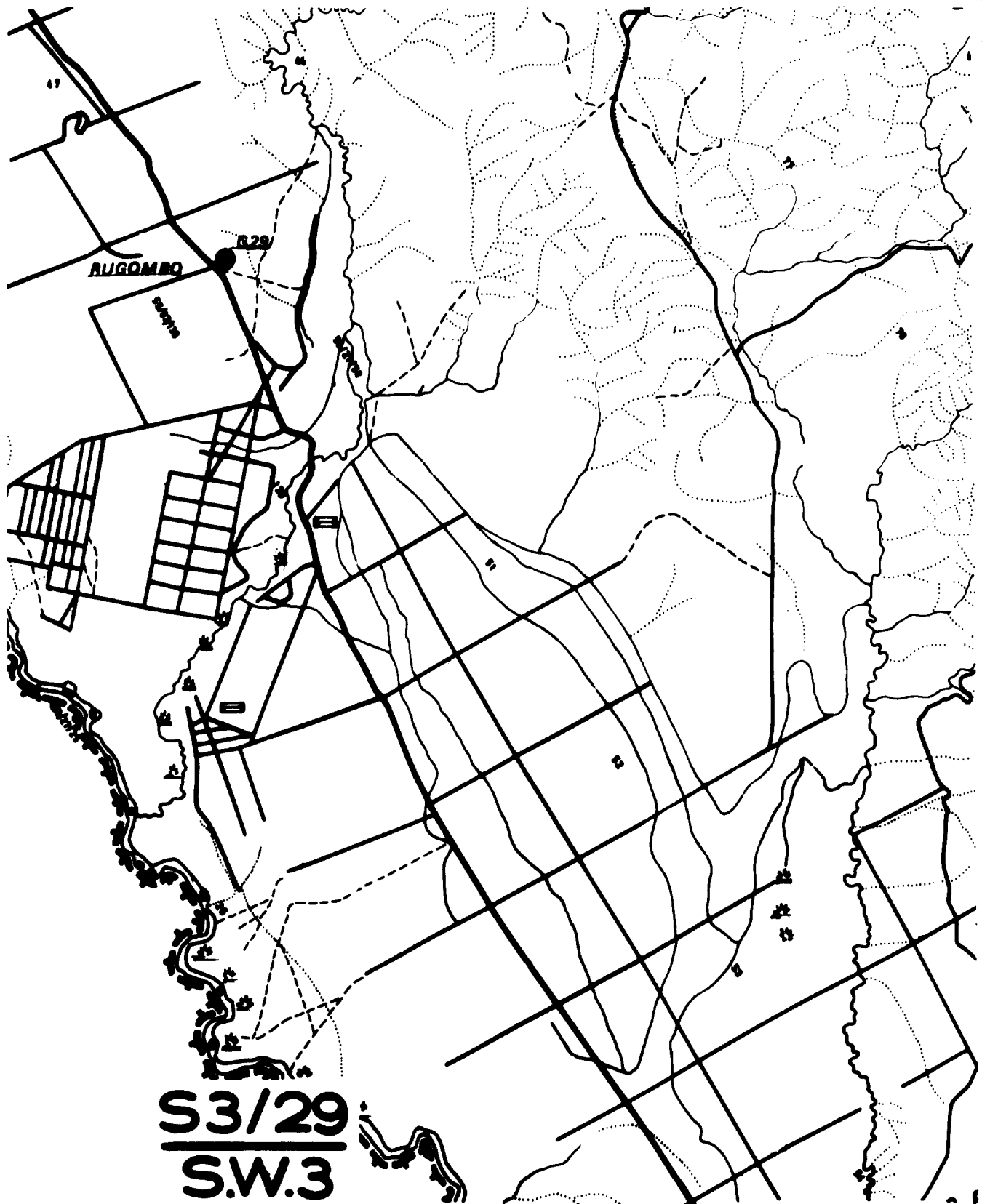


Figure XIX. Carte de Gitega



S3/29
S.W.3

Figure XX. Carte de Cibitoke



S3/29
S.W.3

(3)

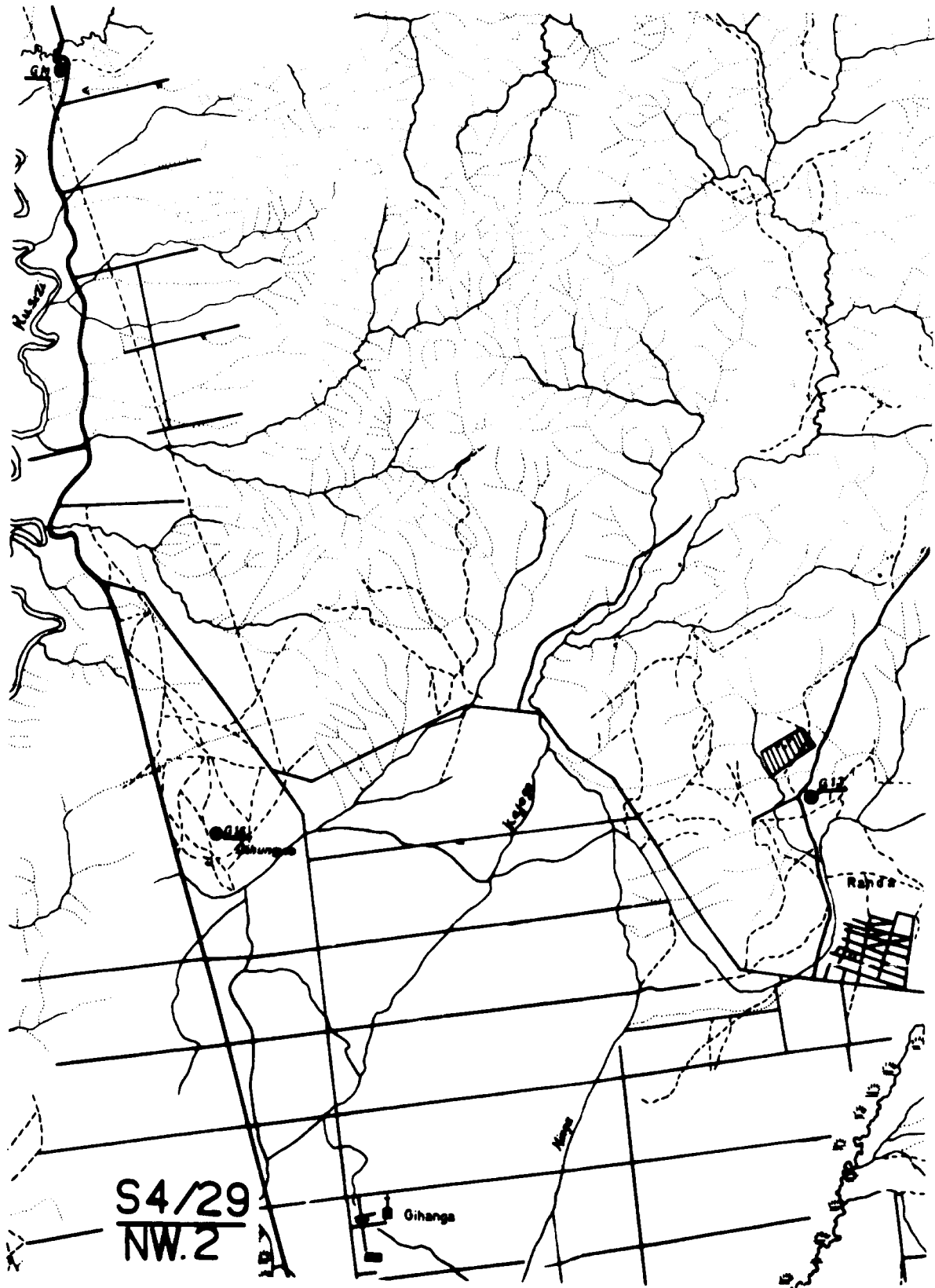


Figure XXI. Carte de Bujumbura NW2

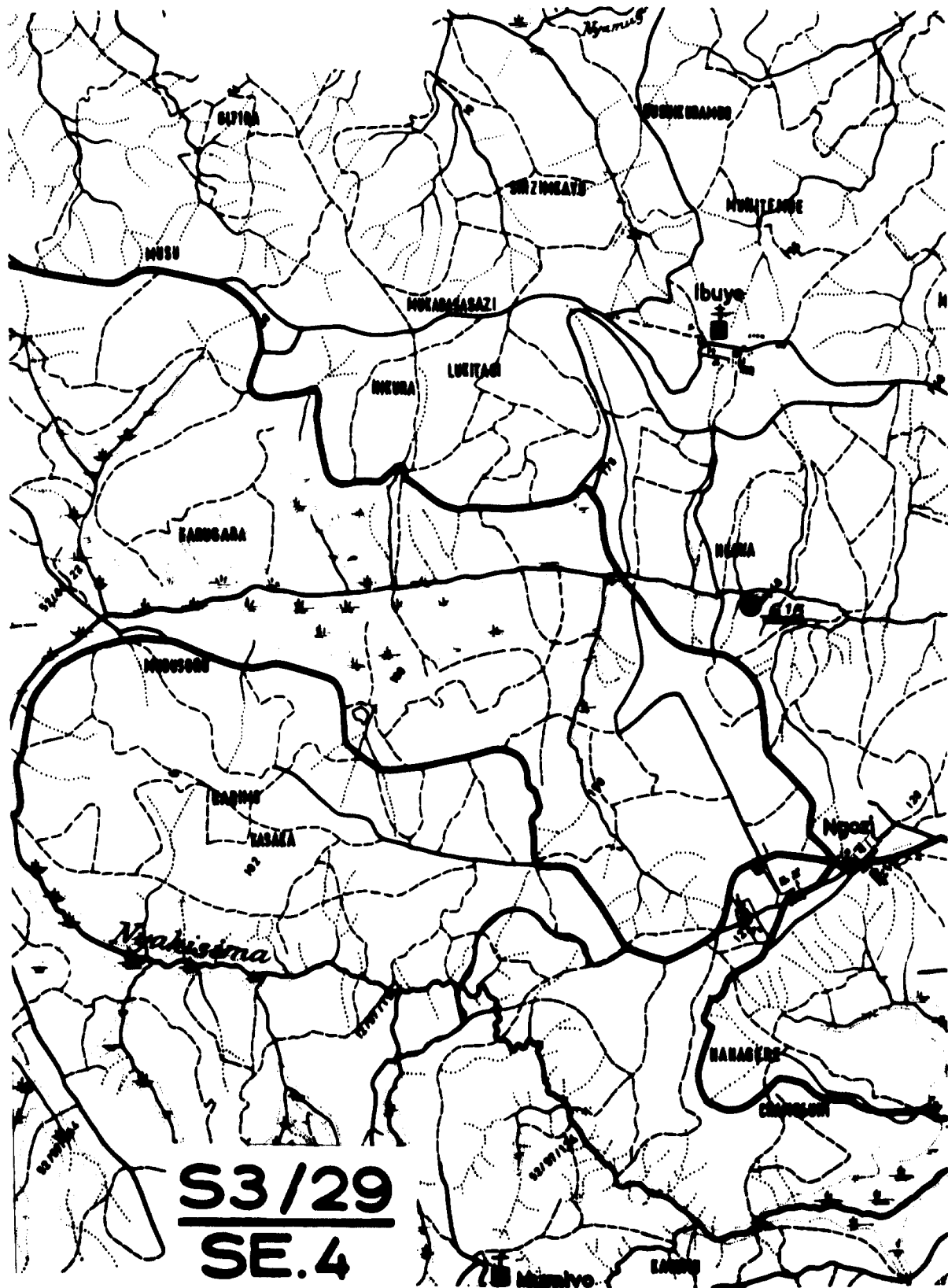


Figure XIII. Carte de Ngosi

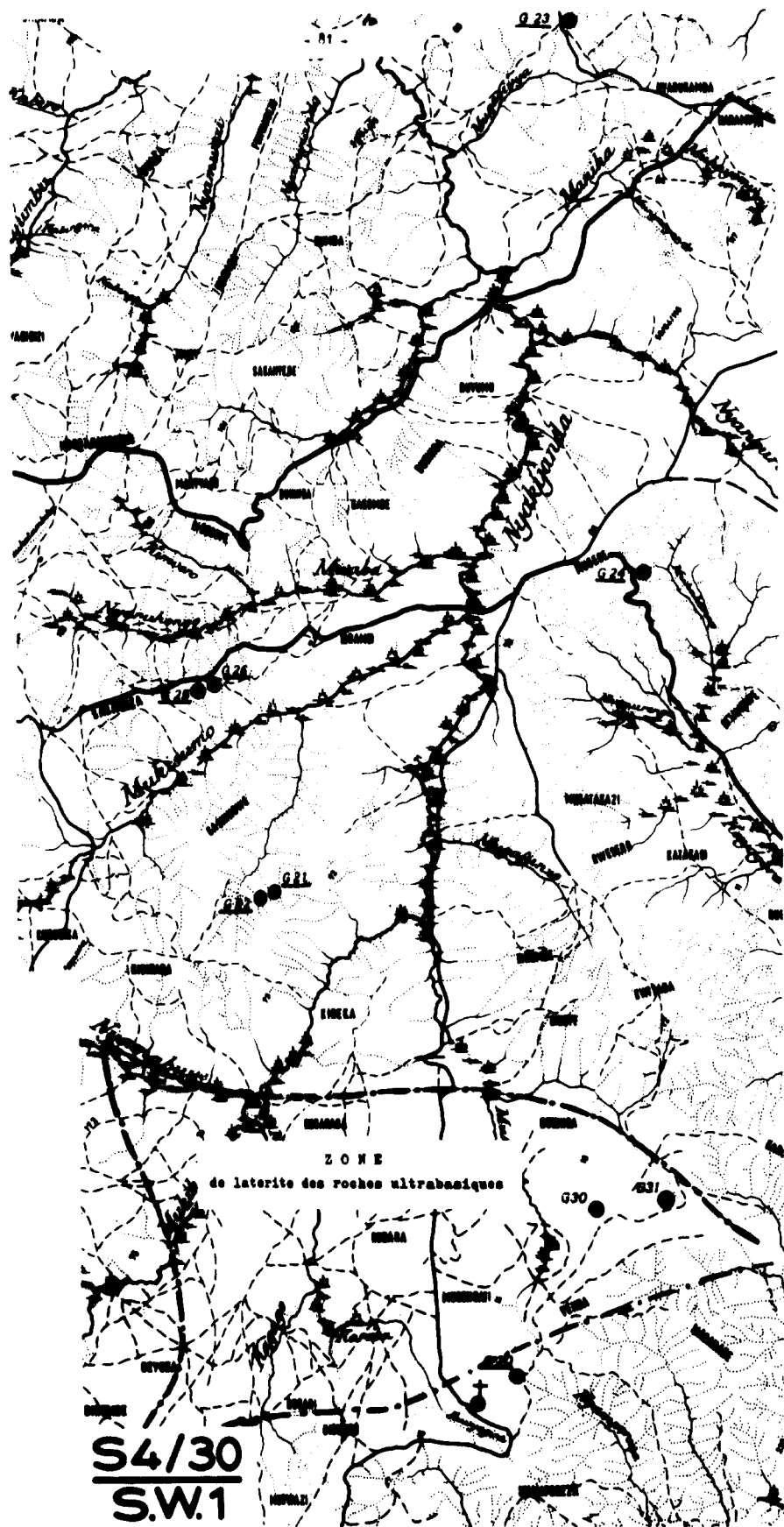


Figure XXIII. Carte de Mwishanga

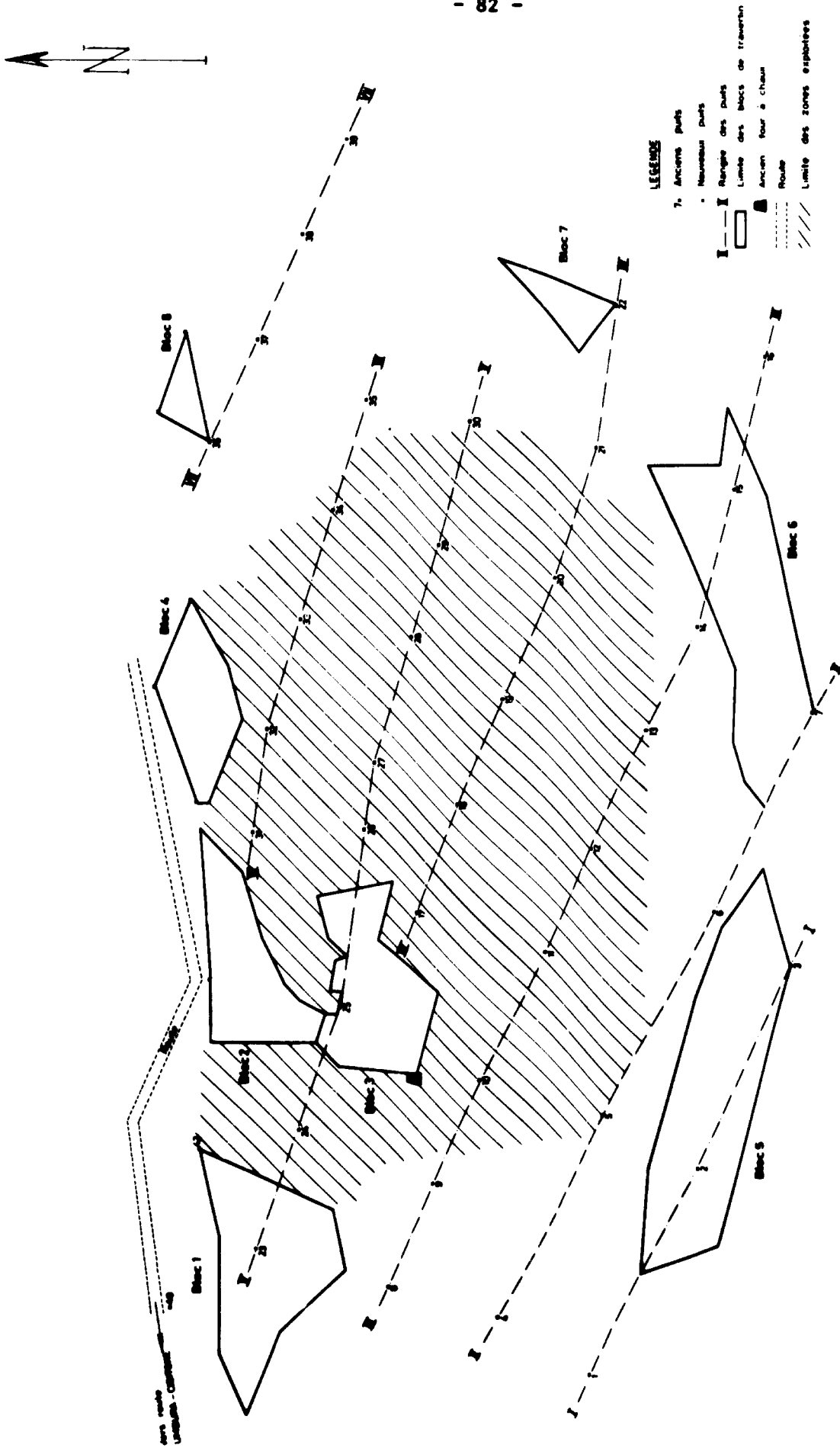


Figure XXIV. Gisement de travertin de Gihungwe

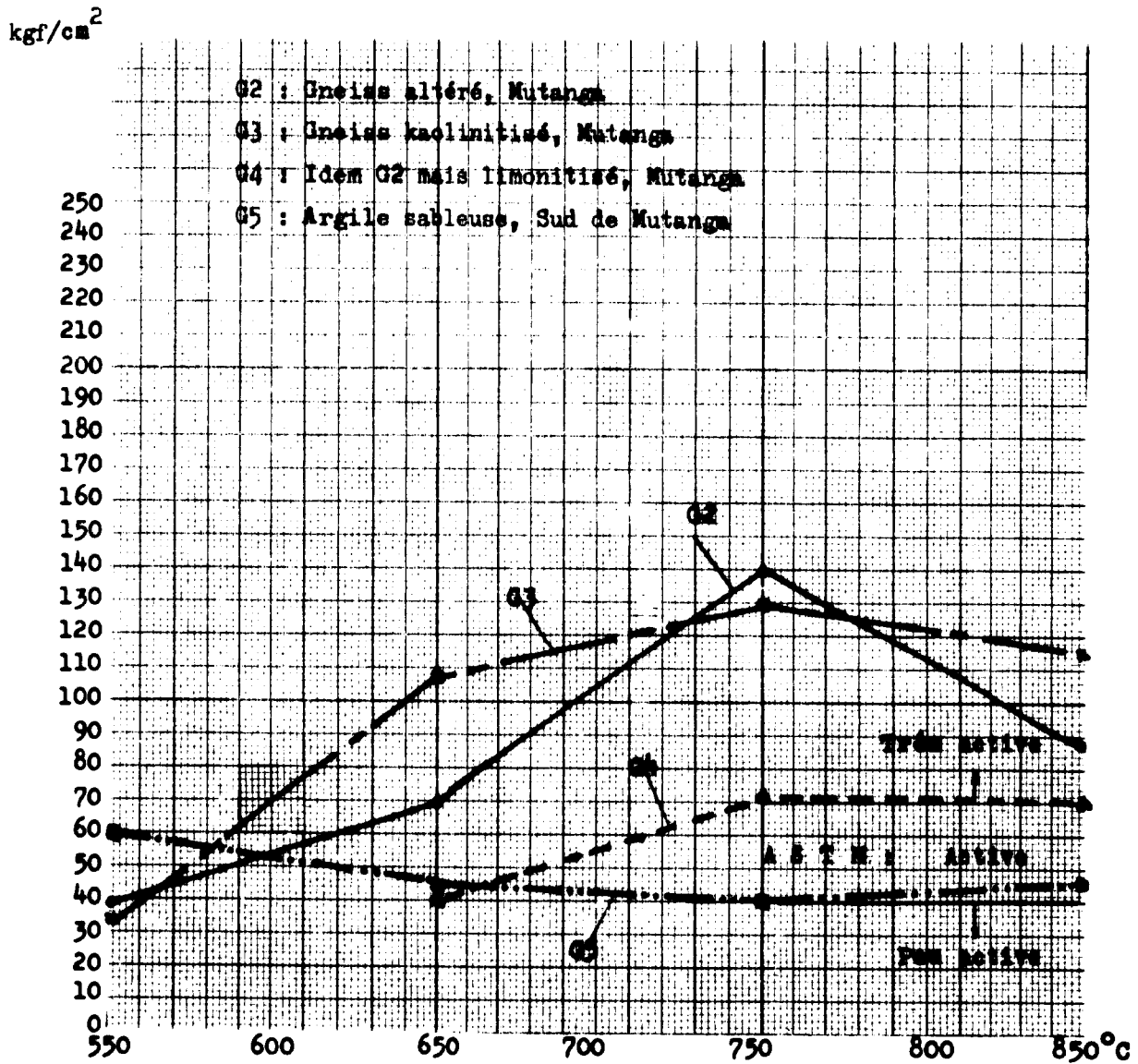


Figure XXV. Détermination de l'activité pouzzolanique

- G7 : Argile sableuse, NTAHANGWA
- G8 : Argile sableuse, KAMENGE
- G9 : Argile kaolinitique, MWUMWU
- G10: Argile sableuse, KABULANTWA

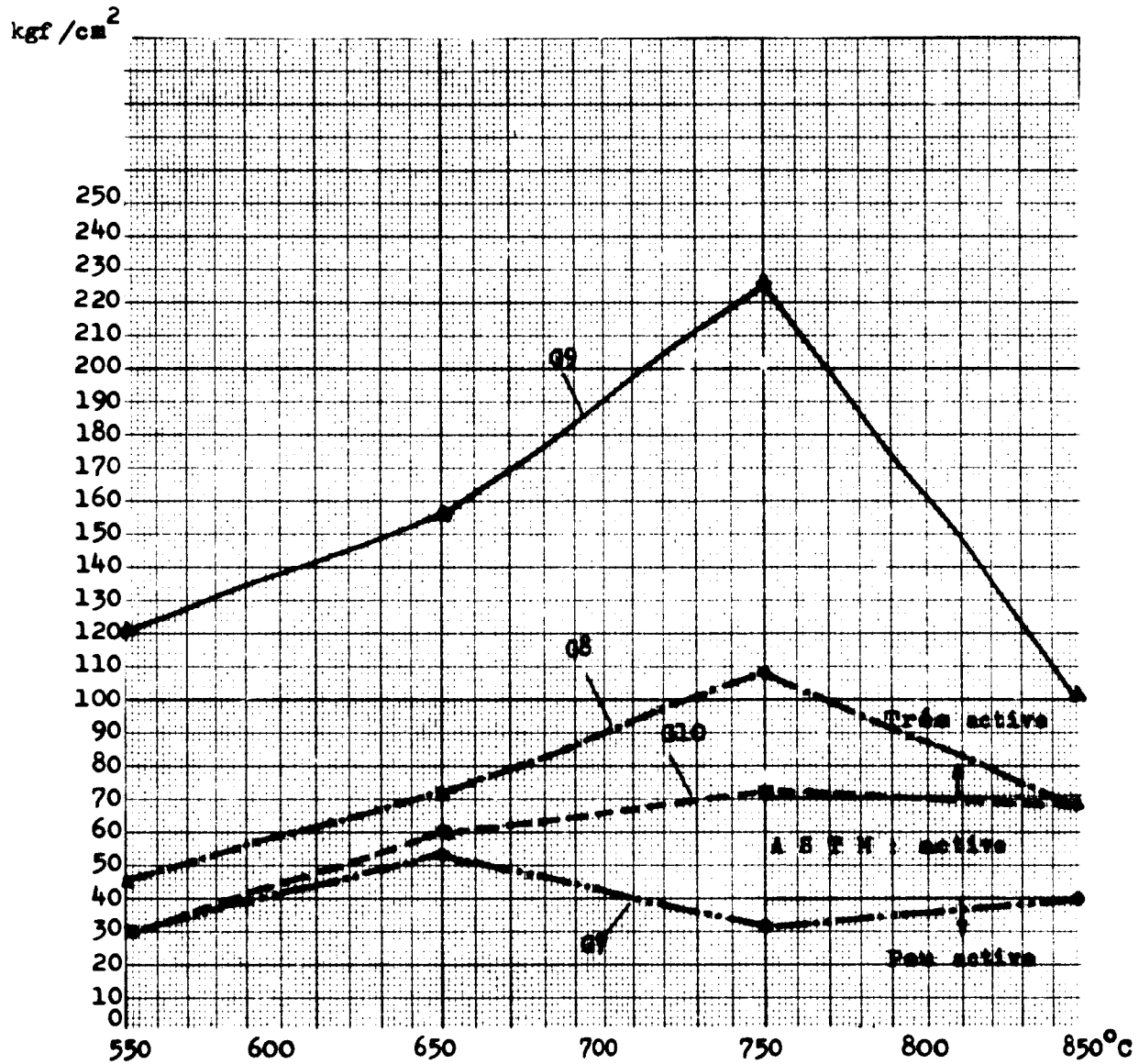


Figure XXVI. Détermination de l'activité pouzzolanique

- G11 : Argile limoneuse, KAGUNUZI
- G12 : Argile ferrugineuse, BANGA
- G13 : Argile laterisée, BUBANZA
- G15 : Argile kaolinitique, NGOZI

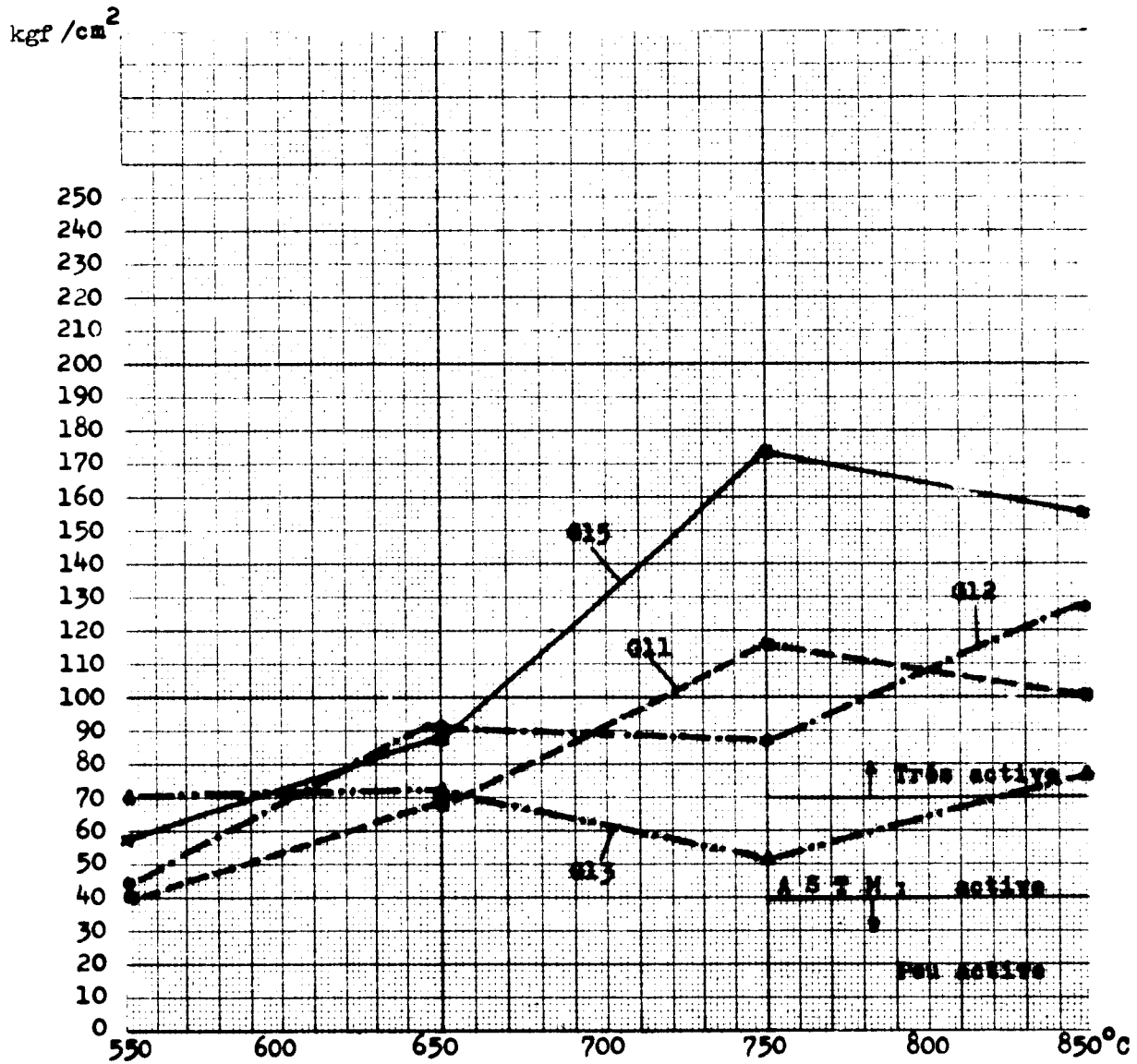
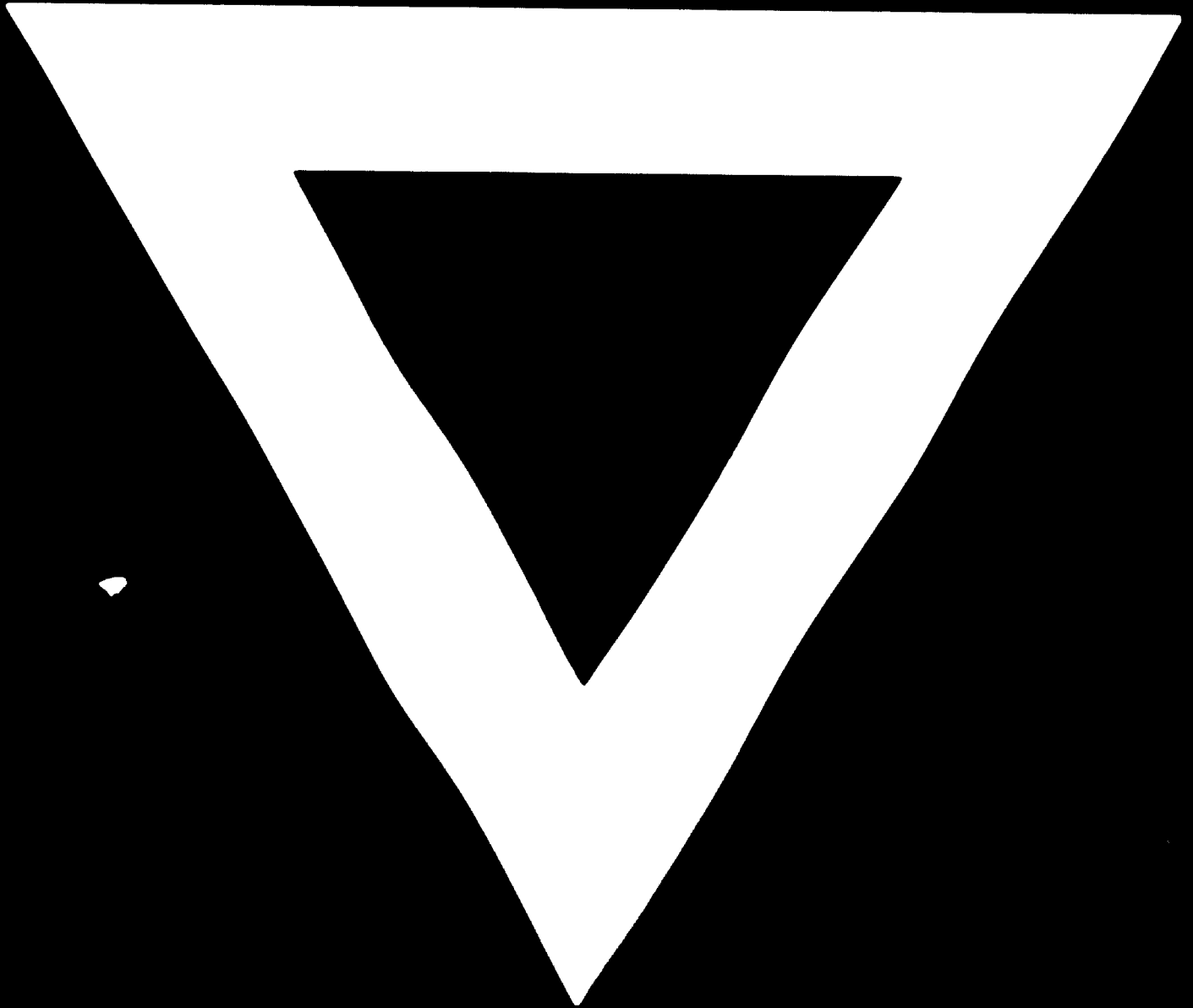


Figure XXVII. Détermination de l'activité pouzzolanique

C-344



77.10.06