



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

14723-F

ORGANISATION DES NATIONS UNIES
POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL

Distr. LIMITEE

U. DO/IS.533

23 mai 1985

FRANCAIS

Original : ANGLAIS

UTILISATION DU PHOSPHOGYPSE
PRODUIT PAR L'INDUSTRIE DES ENGRAIS*

Document établi par

la Division des études industrielles

774

* Le présent document est une traduction qui a été établie à partir d'un texte n'ayant pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle. Le fait que certaines firmes et produits commerciaux y sont mentionnés ne signifie pas pour autant que ceux-ci ont l'aval de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel.

V.85-31595

TABLE DES MATIERES

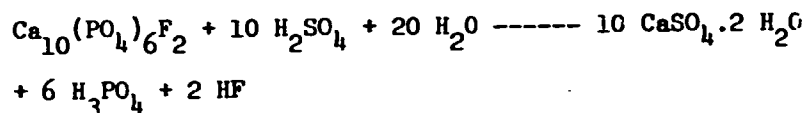
	<u>Page</u>
I. PHOSPHOGYPSE - RENSEIGNEMENTS GENERAUX	4
A. Introduction	4
B. Impuretés contenues dans le phosphogypse	4
C. Applications du phosphogypse	6
D. Difficultés que peut soulever du point de vue de l'utilisation la nécessité de réduire la radioactivité présente à faible dose	6
E. Problèmes écologiques que soulèvent les rejets de phosphogypse en mer ou à terre	7
F. Situation en 1970	9
G. Situation en 1978	9
H. Situation au début des années 80	10
I. Applications nouvelles du phosphogypse	10
J. Facteurs influant sur la rentabilité du recyclage du phosphogypse	11
K. Résumé	11
II. EMPLOI DE PARPAINGS A BASE DE CENDRES VOLANTES ET DE PHOSPHOGYPSE DANS L'INDUSTRIE DU BATIMENT EN CHINE	14
III. TECHNIQUES DE FABRICATION D'ENGRAIS PHOSPHATES PERMETTANT D'OBTENIR DU GYPSE SYNTHETIQUE DE HAUTE QUALITE : EXPERIENCE DU JAPON	17
A. Le procédé Nissan H	17
B. Applications du gypse synthétique dans l'industrie des matériaux de construction au Japon : situation en 1978	19
C. Le procédé Nissan C	21
D. Utilisation des procédés Nissan dans le monde : aperçu	21
IV. EXPERIENCE DE L'AUTRICHE EN MATIERE D'UTILISATION DU GYPSE SYNTHETIQUE	23
A. Traitement du phosphogypse destiné à la fabrication des matériaux de construction : le procédé Donau Chemie	23
B. Recyclage du gypse synthétique par conversion chimique - procédé de la société Chemie Linz	26

	<u>Page</u>
V. LE PHOSPHOGYPSE EN FRANCE	29
VI. LE PHOSPHOGYPSE EN BELGIQUE - LE PROCEDE PRAYON CLASSIQUE ET LE NOUVEAU PROCEDE CENTRAL-PRAYON	31
VII. RADIOACTIVITE DU PHOSPHOGYPSE	33

I. PHOSPHOGYPSE - RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

A. Introduction

Le phosphogypse est un sous-produit de la fabrication par voie humide de l'acide phosphorique à partir de phosphate naturel*. La réaction d'ensemble est la suivante :



Pour chaque tonne de P_2O_5 produite, on obtient entre 4,5 à 5,5 tonnes de phosphogypse. Autrement dit, on obtient environ 1,5 tonne de phosphogypse pour chaque tonne de phosphate naturel traitée. La quantité exacte dépend de la qualité du minerai (1).

Le graphique reproduit dans la figure 1 indique les prévisions relatives à la production mondiale de P_2O_5 et de phosphogypse pour la période 1970-2000 (2). En 1983, la production annuelle de phosphogypse était comprise entre 120 et 150 millions de tonnes. Si les tendances observées par le passé se poursuivent, cette production sera de 150 à 200 millions de tonnes en 1990 et de 220 à 280 millions de tonnes en l'an 2000.

B. Impuretés contenues dans le phosphogypse

A la sortie de l'usine de fabrication d'acide phosphorique, le phosphogypse peut contenir un certain nombre d'impuretés indésirables, en particulier des phosphates et des fluorures. Dans le cas des procédés par voie dihydrate, les pourcentages ci-après sont caractéristiques :

Acide phosphorique (sous la forme de P_2O_5) = 0,66 %

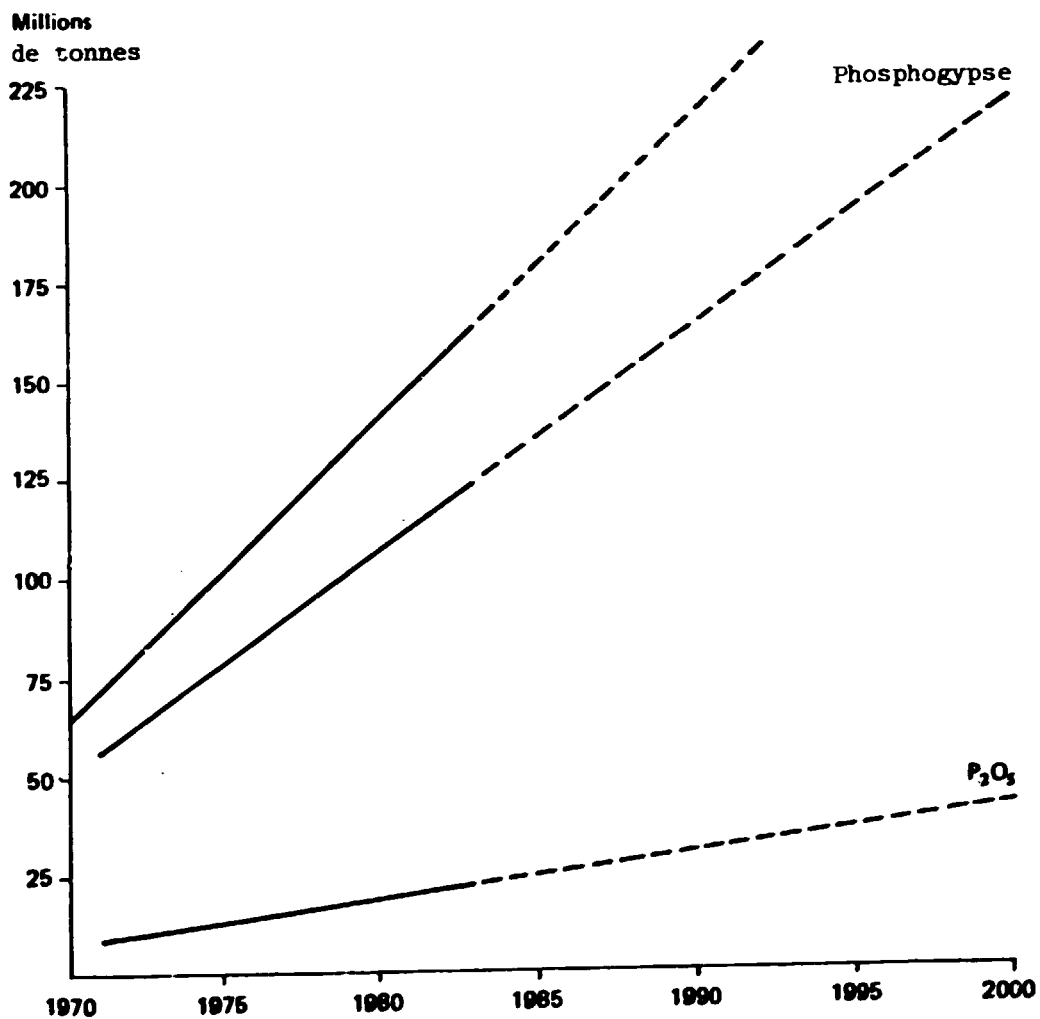
Fluorures (sous la forme de CaF_2) = 1,44 %

La quantité d'impuretés présente dans le phosphogypse dépend surtout du procédé utilisé pour la fabrication de l'acide phosphorique, du fonctionnement de l'usine et de la qualité du phosphate naturel.

* Les termes "phosphogypse" et "gypse synthétique" sont utilisés indifféremment dans la documentation technique. On y rencontre également l'expression "gypse résiduaire" mais celle-ci désigne surtout le phosphogypse dont on se débarrasse.

Figure 1

Production mondiale annuelle de P_2O_5 et de phosphogypse
au cours de la période 1970-2000



Le phosphogypse produit au moyen de procédés permettant d'obtenir de l'acide phosphorique directement sous la forme de dihydrate contient davantage d'impuretés que celui obtenu au moyen de la filière dihydrate/semihydrate.

C. Applications du phosphogypse

Les applications du phosphogypse sont nombreuses dans l'industrie des matériaux de construction. Dans l'industrie du bâtiment, il est surtout utilisé sous la forme de plâtre, de plaques de plâtre et d'éléments de construction et comme additif au ciment. En ce qui concerne cette dernière application, il peut être utilisé de deux façons.

1. Il peut être ajouté avant la préparation du clinker, la quantité à ajouter (sous la forme de SO_3) pouvant osciller entre 1,5 et 3,5 %. Le clinker peut alors être obtenu à une température inférieure d'environ 100 °C à la normale. Le ciment fabriqué avec ce clinker est meilleur que le ciment portland normal car il acquiert plus rapidement de la résistance au départ et offre également une plus grande solidité à long terme et une plus grande résistance à la corrosion par les sulfates.
2. Il peut être ajouté au ciment après l'élaboration du clinker, son rôle principal consistant alors à retarder le temps de prise. Il tend également à compenser le phénomène de contraction qui accompagne en général la prise du béton. Le phosphogypse est beaucoup utilisé pour cette application au Japon, en URSS, en Belgique et en Autriche. La teneur en impuretés (phosphates et fluorures) doit être faible, sinon la résistance du ciment au cours des premiers jours de séchage se trouve réduite.

Le phosphogypse peut également être utilisé dans l'agriculture comme amendement ou pour la fabrication de sulfate d'ammonium utilisable comme engrais. Il peut également être utilisé pour produire de l'acide sulfurique et comme matériau de remblayage et son emploi comme matériau d'encaissement pour les chaussées est à l'expérience.

D. Difficultés que peut soulever du point de vue de l'utilisation la nécessité de réduire la radioactivité présente à faible dose

Le phosphate naturel contient de très faibles quantités de radionucléides (en particulier du radium 226) qui sont libérés au cours du traitement industriel. En l'absence de mesures visant à réduire la concentration de

radium 226, on estime que les personnes vivant dans des maisons ayant des murs intérieurs en phosphogypse seraient soumises à une irradiation supérieure de 30 % à la normale (3). La méthode d'hydrocyclonage employée par la Société Donau Chemie est une solution qui permet de résoudre ce problème puisqu'elle réduit d'environ 30 % la radioactivité du phosphogypse.

E. Problèmes écologiques que soulèvent les rejets de phosphogypse en mer ou à terre

Il ressort des estimations les plus récentes qu'environ 85 % de la production totale de phosphogypse n'est pas réutilisée (4), mais est rejetée soit dans les eaux, soit à terre.

Le rejet de phosphogypse à terre présente notamment l'inconvénient de rendre les zones adjacentes impropres aux utilisations récréatives et d'entraîner le cas échéant l'acidification des nappes d'eau souterraines par lixiviation. Dans les régions où les terrains sont rares, il se peut également qu'on manque d'espace suffisant.

Le phosphogypse stocké à terre n'est pas classé parmi les déchets toxiques dangereux par l'Environment Protection Agency des Etats-Unis (5). Un certain nombre d'études ont montré que ni le radium ni les oligo-éléments présents dans les terrils de phosphogypse ne contaminaient les sols sous-jacents par lixiviation. Bien qu'étant très faible (entre 2,10 et 3,75, selon les échantillons étudiés), le Ph du phosphogypse ainsi stocké n'est pas assez bas pour que celui-ci soit considéré comme corrosif en application des normes de l'EPA (6). Pour cela, il faudrait que son Ph soit égal ou inférieur à 2.

La solution qui est parfois retenue parce qu'elle est la moins coûteuse consiste à déverser le phosphogypse sous forme de bouillie dans un bassin de retenue. Toutefois, cette méthode soulève des objections d'un point de vue écologique en raison du degré d'acidité élevé de l'eau qui est rejetée et de sa forte teneur en ions divers. Les degrés de concentration pertinents sont indiqués dans le tableau 1 (7).

Les déversements effectués dans les cours d'eau et dans les eaux côtières présentent notamment l'inconvénient de détruire la vie aquatique, de rendre l'eau impropre aux utilisations industrielles en aval du point de rejet, d'entraver l'entretien des couloirs de navigation et de compromettre le bon fonctionnement du matériel. Un certain nombre d'études ont montré que la destruction de la vie aquatique est surtout imputable aux solides en suspension. On a également avancé que les rejets de phosphogypse entraînaient la disparition des crevettes, des moules et des homards.

Tableau 1

Concentrations d'ions en situation d'équilibre
dans l'eau des bassins de rétention de phosphogypse

<u>Ions</u>	<u>Concentrations en mg/l</u>
Phosphates (sous la forme de P_2O_5)	6 000 - 12 000
Fluorures	3 000 - 5 000
Sulfates	2 000 - 4 000
Calcium	350 - 1 200
Ammonium (sous la forme de NH_3)	0 - 100
Nitrates	0 - 100
Ph	1,0 - 1,5

F. Situation en 1970

En 1970 la quasi-totalité du gypse synthétique n'était pas réutilisée. Par exemple, la quantité de phosphogypse accumulée en Floride atteignait 152 millions de tonnes en 1972 et augmentait au rythme de 21 millions de tonnes par an (1). Ce dernier chiffre représentait le triple de la quantité de gypse naturel produite aux Etats-Unis au cours de la même année. En 1970, la production mondiale de gypse résiduaire résultant de la fabrication de l'acide phosphorique s'est élevée au moins à 50 millions de tonnes.

Cette même année, l'Europe s'est émue du projet initial de la société suédoise Boliden AB tendant à rejeter 500 000 tonnes de gypse résiduaire résultant de la production d'acide phosphorique dans l'Oeresund entre la Suède et de Danemark. Bien qu'ayant obtenu l'autorisation nécessaire, la société avait abandonné ce projet dès l'automne de la même année et signé avec deux fabricants de matériaux de construction un contrat prévoyant la livraison de 300 000 tonnes de gypse synthétique pour la production de plaques de parement et de ciment (8).

G. Situation en 1978

En 1978, on estimait que la production mondiale de phosphogypse était de 120 à 150 millions de tonnes par an et qu'on réutilisait seulement 10,5 % de cette production (9). Le pourcentage de réutilisation était de 22 % en Europe, soit le double de la moyenne mondiale, et il avoisinait 45 % en Asie. Parmi les pays européens, la Belgique se situait dans la moyenne puisqu'elle recyclait en 1977 environ 25 % de sa production totale de phosphogypse, laquelle s'élevait à 1 500 000 tonnes. Environ 250 000 tonnes étaient réutilisées par l'industrie du ciment liégeoise et l'industrie du bâtiment en absorbait 120 000 tonnes (réparties équitablement entre Anvers et Liège) (7). Deux pays, l'un européen et l'autre asiatique, à savoir l'Autriche et le Japon, ont pris l'initiative de réutiliser la totalité de leur production de gypse résiduaire. L'expérience de ces deux pays sera examinée de façon plus approfondie dans les sections III et IV. En 1978, on utilisait environ 15 millions de tonnes de gypse synthétique dans le monde contre 60 millions de tonnes de gypse naturel (9).

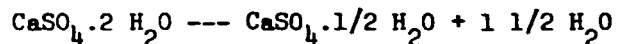
H. Situation au début des années 80

On estime qu'en 1980, la production annuelle de phosphogypse était de l'ordre de 120 à 150 millions de tonnes. D'après une enquête effectuée en 1981 auprès d'un échantillon de sociétés produisant du phosphogypse présumées représentatives, 14 % de la production totale étaient retraités, 58 % étaient stockés et 28 % étaient rejetés en 1980. Dans l'hypothèse où 15 % de la production totale sont actuellement recyclés et 28 % sont rejetés, cela signifie qu'il faut stocker chaque année 70 à 85 millions de tonnes supplémentaires (4). La nécessité de trouver des installations appropriées pour stocker des quantités aussi importantes est un facteur qui incite de plus en plus à étudier les possibilités de retraitement. Parmi les solutions mises au point récemment en vue de résoudre les problèmes que soulève ce retraitement d'un point de vue économique et technique, il convient de citer un procédé permettant de transformer le phosphogypse en chaux, en anhydride sulfureux et en acide sulfurique et un projet prévoyant d'utiliser cette substance pour créer des îles à vocation récréative en mer.

I. Applications nouvelles du phosphogypse

Un certain nombre d'applications nouvelles du phosphogypse comme matériau de construction dans l'industrie du bâtiment et comme matière première dans l'industrie chimique sont apparues à la fin des années 70. Selon certaines informations, une filiale de Rhône-Poulenc, la société SCIAG, construisait trois usines de production de matériaux de construction à base de phosphogypse au Brésil et la société suédoise Boliden AB produisait de l'acide phosphorique au moyen du procédé Central-Prayon, lequel permettrait d'obtenir un gypse suffisamment pur pour être utilisé dans la fabrication de plaques de plâtre et de ciment. La société ouest-allemande Knagsack prévoyait d'adopter le procédé Guilini afin de produire quotidiennement 250 tonnes de gypse synthétique destiné à la fabrication de matériaux de construction. La société Nitrigin Elrann Jecranta avait l'intention de faire de même dans son usine d'Arklow en Irlande (9). Aux Etats-Unis, on envisage d'utiliser le phosphogypse comme matériau de remplissage dans l'asphalte (jusqu'à concurrence de 30 %) (1).

L'usine d'engrais TSP de Chittagong (Bangladesh) recycle également du phosphogypse. Le dihydrate récupéré après élimination des acides et des autres impuretés est transformé en plâtre de Paris par le biais de la réaction suivante :



Le temps de prise du plâtre de Paris issu de cette réaction ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O} + 1 \ 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ---- $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) était trop rapide (2 minutes 30 secondes), on s'est rendu compte à la suite d'expériences qu'il pouvait être porté à 5 minutes grâce à l'adjonction de 1 % de borax et de 0,1 % de colle (10).

J. Facteurs influant sur la rentabilité du recyclage du phosphogypse

Les principaux facteurs qui incitent les fabricants d'engrais à recycler le phosphogypse qu'ils produisent sont 1.) la qualité du phosphogypse résultant de la production d'acide phosphorique, 2) la quantité produite, 3) le coût de l'énergie, 4) la distance entre les lieux de production et de commercialisation du phosphogypse, 5) la distance entre les lieux de production et de commercialisation du gypse naturel. Par exemple, les frais de transport s'élevaient à 140 FB/tonne pour 100 km en Belgique en 1977 (7).

K. Résumé

La mise en valeur des ressources en phosphates et la fabrication de l'acide phosphorique continuent à susciter beaucoup d'intérêt dans les pays en développement. Le tableau 2 donne une liste des principaux producteurs de phosphate naturel et de P_2O_5 du tiers monde. Comme le montre ce tableau, la quasi-totalité de ces pays prévoient à la fois de construire de nouvelles usines de fabrication de P_2O_5 et de développer la production nationale de ciment. Compte tenu de ces deux éléments, l'utilisation de phosphogypse pour faire face aux besoins en matériaux de construction serait tout indiquée. Le tableau 3 indique le niveau atteint par la production de ciment dans ces mêmes pays en 1981 ainsi que son taux d'augmentation au cours de la décennie écoulée. On peut s'attendre à ce que le marché pour les produits à base de phosphogypse soit particulièrement favorable dans les pays où l'augmentation de la production de ciment a été rapide et doit se poursuivre. L'Indonésie, qui importe des quantités considérables de gypse, pourrait étudier s'il serait techniquement possible et économiquement avantageux de remplacer le gypse importé par du phosphogypse recyclé.

Tableau 2

Principaux producteurs de phosphate naturel
et d'acide phosphorique du tiers monde
(4), (12), (13)

	Production de P ₂ O ₅ supérieure à 100 000 tonnes par an	Production de phosphate naturel supérieure à 100 000 tonnes par an	Usines de fabrication de P ₂ O ₅ en projet	Ouverture de nouveaux bassins d'extraction de phosphate en projet	Accroissement de la production de ciment souhaité
Algérie		x	x		x
Brésil	x	x	x	x	x
Chine	x	x	x	x	x
Egypte			x	x	x
Inde	x		x		x
Indonésie	x		x		x
Jordanie		x	x	x	x
Mexique	x			x	x
Maroc	x	x	x	x	x
Sénégal		x	x	x	
Togo		x	x		
Tunisie	x	x	x	x	x
Turquie	x		x		x

Tableau 3

Production de ciment des principaux producteurs
de phosphate naturel et d'acide phosphorique
du tiers monde (en milliers de tonnes)

	1971	1981	Augmentation/ diminution (moyenne annuelle)	Pourcentage d'augmentation au cours des 10 années considérées
Algérie	967	4 440	347	359 %
Brésil	9 804	24 864	1 506	154 %
Chine	ND	ND	ND	ND
Egypte	3 924	3 422	-50	-13 %
Inde	14 928	20 772	584	39 %
Indonésie	ND	ND	ND	ND
Jordanie	419	960	54	129 %
Mexique	7 524	17 844	10 320	137 %
Maroc	1 481	3 606	212	143 %
Sénégal	241	372 ⁽¹⁹⁸⁰⁾	14	60 %
Togo	ND	ND	ND	ND
Tunisie	584	2 028	144	247 %
Turquie	7 548	15 036	749	99 %

II. EMPLOI DE PARPAINGS A BASE DE CENDRES VOLANTES ET DE PHOSPHOGYPSE DANS L'INDUSTRIE DU BATIMENT EN CHINE

La Chine doit construire d'urgence de grandes quantités de logements à bon marché pour faire face à l'expansion démographique et à l'exiguïté relative de l'espace vital disponible par habitant et c'est pourquoi elle s'est notamment fixé comme objectif prioritaire de développer le parc immobilier. Depuis la fin des années 70 en particulier, on s'efforce sans relâche de construire de nouveaux logements, dans l'espoir d'offrir à chaque famille son propre appartement d'ici à l'an 2000. Pour atteindre cet objectif, il faudrait construire 100 millions de mètres carrés par an et mettre en service 30 millions d'unités entre uniquement 1981 et 1990.

Depuis plus de 20 ans, la Chine étudie la possibilité de construire des immeubles résidentiels avec des parpaings à base de cendres volantes. Cette solution a suscité de l'intérêt notamment pour les trois raisons suivantes : les ressources naturelles du pays sont limitées, d'importantes quantités de déchets industriels sont disponibles et on s'est rendu compte qu'il fallait mécaniser l'industrie du bâtiment si l'on voulait atteindre les objectifs fixés en matière de construction de logements.

Pour atteindre son objectif de 100 millions de mètres carrés par an, il est nécessaire que la Chine mécanise l'industrie du bâtiment. Toutefois, cette mécanisation doit suivre l'évolution des compétences techniques disponibles dans le pays. Tant la fabrication de parpaings à base de cendres volantes que les techniques de construction fondées sur l'emploi de ces parpaings permettent une mécanisation accrue. Les techniques utilisées étant relativement simples, on a estimé qu'elles convenaient très bien aux entreprises chinoises. En particulier, les travaux faisant appel aux parpaings à base de cendres volantes se prêtent davantage à l'utilisation de matériel de levage mécanisé que ceux faisant appel à la brique. L'emploi d'un tel matériel a notamment pour effet de réduire la durée des chantiers et de rendre les ouvriers plus heureux, deux considérations qui sont importantes pour la Chine.

Etant donné la pénurie relative de ressources que connaît la Chine, le coût des matériaux représente une proportion importante du coût total des frais de construction (entre 60 et 70 %). Par conséquent, afin de réduire le coût du programme massif de construction de logements qu'elle a entrepris, la Chine s'est intéressée de très près à la mise au point de matériaux peu coûteux.

Or, une excellente manière de réduire le coût de ces matériaux consiste à utiliser des résidus. Etant donné que l'évacuation des résidus constituait justement pour elle une source importante de préoccupations, elle a été d'autant plus incitée à essayer de les utiliser de façon productive.

Il y a longtemps que la Chine cherche une solution au problème de l'évacuation des cendres volantes provenant des hauts fourneaux et des fours industriels. La fabrication de parpaings est l'une des solutions que l'on est parvenu à mettre au point dans le cadre des recherches visant à utiliser les cendres volantes de façon productive. En outre, deux autres résidus industriels entrent dans la fabrication de ces parpaings, à savoir le phosphogypse et la chaux résiduelle produite par les aciéries. On estime qu'au cours de la période 1963-1981, l'emploi de cendres volantes pour la fabrication de parpaings a permis de réaliser des économies de 7 millions de yuan uniquement à Shanghai.

Outre qu'ils offrent pour certains déchets industriels un débouché sans risque pour l'environnement, les parpaings en cendres volantes sont, d'après les autorités chinoises, supérieurs d'un point de vue technique aux briques en argile traditionnelles et aux travaux de maçonnerie en briques, et coûtent moins cher à produire (14).

Les cendres volantes doivent répondre aux critères de qualité ci-après :

- a) perte au feu inférieure à 15 %, b) teneur en SiO_2 supérieure à 4 %, c) teneur en Al_2O_3 supérieure à 15 % et d) teneur en résidus inférieure à 20 % après passage dans un tamis de 88 mm. Les principales étapes du procédé de fabrication sont le concassage des matières premières, le malaxage, le moulage des parpaings, le séchage à la vapeur et l'empilage des produits finis.

Les parpaings en cendres volantes sont suffisamment solides pour être utilisés pour la construction de structures porteuses. En fait, ils ont déjà été utilisés pour bâtir de grands ensembles résidentiels, des principes de construction rationnels ayant été suivis pour concevoir des structures spécialement adaptées à ce type de matériau. Les Chinois se sont rendu compte que ces parpaings se prêtaient mieux aux techniques de construction mécanisée que la brique.

Les immeubles qui ont été construits avec ce matériau dans de nombreuses villes chinoises au cours des 10 dernières années ne présentent pas encore de signes extérieurs de dégradation due aux intempéries ou à d'autres causes. Même ceux construits à Qiqihaer, ville située dans le nord du pays où les températures vont de -30 à +40 °C, sont toujours en bon état et la surface extérieure de leurs murs est encore intacte.

L'emploi de cendres volantes pour la fabrication de parpaings permet de réaliser des économies tant au stade de la production que de la construction. Au stade de la production, ces économies résultent du fait que les installations de fabrication de parpaings à base de cendres volantes sont environ deux fois plus productives qu'un four à brique ordinaire. Les investissements peuvent être entièrement amortis en l'espace de sept ans, alors qu'il faut 10 ans dans le cas d'un four à brique. En outre, la quantité d'énergie nécessaire à leur fabrication est inférieure de 30 % à la quantité nécessaire à la fabrication des briques en argile, ce qui est très important pour la Chine.

Les économies réalisées au stade de la construction sont dues dans une large mesure au fait que l'emploi de parpaings permet de mécaniser davantage les travaux de construction, ce qui se traduit par un gain de productivité de la main-d'oeuvre d'environ un tiers et une réduction du temps de construction d'environ 30 %. En outre, cela permet également de réduire de 4,7 kilos la quantité de ciment nécessaire par mètre carré de construction. Etant donné qu'il est extrêmement important pour la Chine d'économiser les matériaux de construction, cela représente également un avantage non négligeable.

La dernière application des cendres volantes, du phosphogypse et de la chaux résiduelle qui a été mise au point en Chine consiste à utiliser ces substances pour fabriquer des panneaux en béton. La réutilisation de ces résidus est désormais une chose acquise en Chine et on peut s'attendre à ce que ce pays apporte d'autres contributions dans ce domaine à l'avenir.

III. TECHNIQUES DE FABRICATION D'ENGRAIS PHOSPHATES PERMETTANT D'OBTENIR DU GYPSE SYNTHETIQUE DE HAUTE QUALITE : EXPERIENCE DU JAPON

Alors que tous les autres pays accumulaient des quantités considérables de gypse, le Japon a fait exception. Dès 1970, l'industrie japonaise du bâtiment utilisait 1,5 million de tonnes de phosphogypse pour la fabrication de ciment et de plaques de plâtre. A cette date, les fabricants de plaques de plâtre à base de phosphogypse étaient au nombre d'une vingtaine. Cette activité a contribué au déclin de la production de gypse naturel dans le pays qui, de 753 000 tonnes en 1964, est tombée à 550 000 tonnes en 1970 (8).

A. Le procédé Nissan H

L'essor qu'ont connu les applications du gypse synthétique au Japon depuis 1959 s'explique dans une large mesure par la mise au point d'un procédé de fabrication d'acide phosphorique par voie semi-hydrate-dihydrate qui permet d'obtenir un phosphogypse dont la teneur en impuretés est plus faible que celui obtenu par voie dihydrate. L'exploitation commerciale de ce nouveau procédé dans ce pays a débuté en 1955, date à laquelle est entrée en service la première usine de production d'acide phosphorique de la société Nissan Chemical Industries LTD utilisant le procédé Nissan H (15).

La nécessité d'obtenir du gypse synthétique aussi pur que possible est l'un des principaux facteurs qui ont motivé la mise au point du procédé H. Etant donné que les ressources en gypse naturel dont dispose le Japon sont limitées, le phosphogypse obtenu comme sous-produit de la fabrication de l'acide phosphorique revêt une certaine valeur commerciale.

Le procédé H consiste à bien malaxer du phosphate naturel broyé avec un mélange d'acide sulfurique et d'acide phosphorique dilué récupéré à la sortie du filtre. La réaction a lieu à température élevée de manière à décomposer la plus grande partie du phosphate naturel et à obtenir du sulfate de calcium semi-hydrate. A la différence du sulfate de calcium dihydrate, qui est stable lorsque le degré d'acidité et la température sont faibles, le sulfate de calcium semi-hydrate est stable lorsque le degré d'acidité et les températures sont plus élevés.

Tableau 4

Propriétés et caractéristiques d'emploi normales du gypse synthétique obtenu au moyen du procédé Nissan H à partir de phosphate naturel de Floride

<u>Elément constitutif</u>	<u>Pourcentage</u>		
CaO	31,88		
SO ₂	44,52		
Quantité totale de P ₂ O ₅	0,24		
P ₂ O ₅ soluble dans l'eau	0,04		
P ₂ O ₅ soluble dans l'acide citrique	0,06		
Eau de constitution	20,59		
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0,21		
<hr/>			
<u>Propriétés du plâtre</u>	<u>Plâtre obtenu à partir de phosphogypse</u>		<u>Spécifications normales</u>
Consistance ^a	68 %		Max. 75 %
Temps de prise initial	4 min 30 sec		-
Temps de durcissement en surface	7 min 30 sec		-
Temps de prise total	21 min 30 sec		Max. 35 min
Résistance à la traction (humide)	11,3 kg/cm ²		Min. 9,5 kg/cm ²
<hr/>			
<u>Propriétés du ciment</u>	<u>Ciment utilisant du phosphogypse comme retardateur</u>		<u>Spécifications normales</u>
Temps de prise initial	1 h 36 min		Min. 1 h
Temps de prise total	3 h 21 min		Max. 10 h
Résistance à la flexion			
Après 3 jours	26 kg/cm ²		Min. 15 kg/cm ²
Après 7 jours	40 kg/cm ²		Min. 25 kg/cm ²
Après 14 jours	51 kg/cm ²		-
Après 28 jours	65 kg/cm ²		Min. 40 kg/cm ²
Résistance à la compression			
Après 3 jours	86 kg/cm ²		Min. 55 kg/cm ²
Après 7 jours	205 kg/cm ²		Min. 55 kg/cm ²
Après 14 jours	286 kg/cm ²		-
Après 28 jours	351 kg/cm ²		Min. 220 kg/cm ²

^{a/} 100 g d'eau/grammes de plâtre nécessaires x 100 = % de consistance

La bouillie obtenue est refroidie et recristallisée sous la forme de dihydrate en présence de cristaux de sulfate de calcium dihydrate qui servent d'amorce. La recristallisation du sulfate de calcium semi-hydrate en dihydrate permet d'obtenir des cristaux faciles à filtrer et d'achever en même temps de décomposer le phosphate naturel résiduel. Nissan affirme que la qualité du gypse obtenu à la sortie du filtre est suffisante pour que celui-ci puisse être utilisé sans subir de traitement supplémentaire pour la fabrication de divers matériaux de construction.

B. Applications du gypse synthétique dans l'industrie des matériaux de construction au Japon : situation en 1978

En 1978, plus de 90 % du gypse produit au Japon était d'origine synthétique. En 1972, 427 000 tonnes de gypse naturel ont été extraites et environ 4 millions de tonnes de gypse synthétique ont été utilisées. En 1973, la production de gypse naturel était tombée à 65 000 tonnes alors que la consommation de gypse synthétique était passée à environ 5 millions de tonnes. Tout au long de cette période, le Japon a utilisé chaque année pour sa consommation intérieure plus de 4 millions de tonnes de gypse pour fabriquer divers produits, principalement des matériaux de construction. En moyenne, environ 2 millions de tonnes ont été utilisées comme retardateur de prise pour le ciment, entre 1,3 et 1,7 million de tonnes pour la fabrication de plaques de plâtre et 0,5 million de tonne comme plâtre de Paris.

L'incidence du procédé Nissan H sur l'utilisation du gypse synthétique au Japon a été considérable. D'après l'édition de 1978 de la publication "The Economics of Gypsum", deux des trois plus grands producteurs de gypse synthétique du Japon, Nissan Chemical Industries Ltd (330 000 tonnes par an) et Rasa Industries Ltd (200 000 tonnes par an), utilisaient le procédé Nissan. Les quantités fabriquées par les différents producteurs japonais au cours de la même année sont indiquées dans le tableau 5 (9). Le fait le plus notable est qu'ils n'ont pas entreposé ni rejeté la moindre quantité de gypse synthétique mais qu'au contraire ils ont recyclé la totalité de leur production.

Tableau 5

Production et utilisations finales du gypse synthétique au Japon
(situation en 1978)

Nom de la société	Production annuelle estimée (en milliers de tonnes/an)	Quantités stockées ou rejetées	Utilisations finales éventuelles du gypse produit
Mitsubishi Chemical Industries Ltd. 5-2 Marunouchi 2-chome, Chiyoda-ku Tokyo 100	130	Néant	Vendu à des fabricants de matériaux de construction
Nippon Kasei Chemical Company Ltd 1-4-1 Yurakucho Chiyoda-ku, Tokyo	80	Néant	Vendu à des fabricants de matériaux de construction
Nissan Chemical Industries Ltd. Kowa Hitotsubashi Building, 7-1, 3-chome, Kanda-Nishiki-cho Chiyoda-ku, Tokyo	330	Néant	Nissan en utilise une partie pour la fabrication de matériaux de construction. Le reste est vendu à d'autres fabricants pour les mêmes applications.
Rasa Industries Ltd. 2, 1-chome, Kyobashi, Chuo-ku, Tokyo	200	Néant	La plus grande partie est vendue à des fabricants de matériaux de construction (plâtre et plaques de plâtre)
San Kagaku Co. Ltd. Exploitation Div. 9, 1-chome Hatsch-Bori, Chuo-ku, Tokyo 104	320	Néant	Vendu à des fabricants de plaques et de plâtre au gypse
Sumitomo Chemical Co. Ltd, 15, 5-chome, Kitahama, Higashi-ku, Osaka	160	Néant	Vendu à des fabricants de ciment et de matériaux de construction
Taki Chemical Co. Ltd., 2 Nidon-Machi Befu-cho, Kakogana-shi, Hyogo-ken, Japon	50	Néant	Utilisé pour la fabrication de plaques de parement
Tonoku Hiryo K-K, Taihei Building, 3-7, 2-chome Ginza Chuo-ku, Tokyo	200 (300)	Néant	La quasi-totalité de la production est vendue à une usine voisine de fabrication de plaques de plâtre

C. Le procédé Nissan C

C'est en 1974 que la société Nissan Chemical Industries Ltd. a construit la première usine de fabrication d'acide phosphorique exploitant le nouveau procédé C. Ce procédé a été décrit lors de la conférence technique de l'Association internationale des fabricants de superphosphates et d'engrais composés tenue à La Haye (Pays-Bas), dont le rapport a été publié en 1977 (16). A l'époque où ce document a été présenté, des usines d'une capacité de production de 40 et 100 tonnes par jour avaient été construites et étaient en service. Alors que dans le cas du procédé H, on obtient la recristallisation du gypse uniquement en abaissant la température de la bouillie contenant le dihydrate, dans le cas du procédé C, on obtient la recristallisation en changeant à la fois la température et le degré d'acidité. Le procédé C donne de l'acide phosphorique très concentré (45 à 50 % de P_2O_5) sans évaporation ainsi qu'un gypse synthétique d'une qualité encore supérieure à celui résultant du procédé H. Nissan affirme que celui-ci peut être utilisé directement comme plâtre, pour la fabrication de plaques de parement et comme retardateur pour le ciment. En outre, comme le phosphate naturel utilisé n'a pas besoin d'être broyé aussi finement que dans le cas du procédé H, la consommation d'énergie est moindre.

D. Utilisation des procédés Nissan dans le monde : aperçu

Le procédé H est utilisé par 25 usines gérées directement par Nissan ou exploitées sous licence au Japon, en Australie, en Irlande, en France, au Bangladesh, en Belgique, en Inde, au Brésil, au Maroc, aux Pays-Bas, à Taïwan, en Turquie et en Algérie. Trois usines utilisant le procédé C ont été construites par Nissan au Japon, et une usine exploite ce procédé sous licence en Indonésie. La capacité de production totale des usines d'engrais exploitant le procédé H (y compris les usines Nissan) est de 8 090 tonnes par jour (acide phosphorique sous forme de P_2O_5). Si l'on y ajoute les usines exploitant le procédé C, on obtient un chiffre voisin de 9 000 tonnes, ce qui correspond à une production annuelle de gypse supérieure à 13 millions de tonnes (17) si elles sont toutes exploitées à pleine capacité. La totalité de cette production peut être recyclée si les usines sont exploitées correctement.

Tableau 6

Comparaison entre les propriétés des produits fabriqués à partir
du phosphogypse obtenu au moyen des procédés Nissan C et H

Plaques de parement	Source de phosphogypse	
	Procédé Nissan C	Procédé Nissan H
Densité en vrac (g/ml)	0,900	0,623
Consistance (%)	64,5	74,8
Temps de prise initial (secondes)	349	357
Temps de durcissement de la surface	469	509
Temps de prise total	1651	1428
pH	6,0	5,8
Résistance à la traction (kg/cm ²)	18,8	10,0
Adhérence (%)	86	50
Retardateur de prise pour ciment	Source de phosphogypse	
	Procédé Nissan C	Procédé Nissan H
Temps de prise initial (minutes)	215	225
Temps de prise total (heures)	5,2	5,1
Stabilité	satisfaisante	satisfaisante
Résistance à la compression (kg/cm ²)		
Après 3 jours	139	128
Après 7 jours	223	215
Après 28 jours	396	382

IV. EXPERIENCE DE L'AUTRICHE EN MATIERE D'UTILISATION DU GYPSE SYNTHETIQUE

A. Traitement du phosphogypse destiné à la fabrication de matériaux de construction : le procédé Donau Chemie

A Pischelsdorf, localité située à environ 50 km à l'ouest de Vienne, la société Donau Chemie AG exploite une usine de production d'acide phosphorique d'une capacité de 50 000 tonnes par an qui utilise le procédé au dihydrate Rhône-Poulenc. Etant donné qu'il n'y avait pas d'endroit approprié pour se débarrasser du phosphogypse et que l'usine était tenue d'éviter toute pollution de l'environnement, la société Donau Chemie s'est efforcée dès 1970 de trouver une nouvelle formule pour utiliser les quantités importantes de phosphogypse qu'elle produisait.

Grâce à une étude de marché, on s'est aperçu que l'industrie du bâtiment à Vienne et dans les environs offrait des débouchés pour le plâtre, la demande existante dans un rayon de 250 km autour de l'usine étant alors suffisante pour absorber la production d'une usine de traitement de gypse d'une capacité de 50 000 tonnes par an. En tout état de cause, la commercialisation de cette production au-delà de 500 km n'était pas rentable en raison des frais de transport.

Le phosphogypse obtenu au moyen du procédé Rhône-Poulenc au dihydrate contient un certain nombre d'impuretés et ne peut pas être utilisé tel quel comme matériau de construction. Dans le tableau 7, on compare la teneur moyenne en impuretés du phosphogypse produit par la société Donau Chemie avec les normes de pureté fixées par cette dernière pour son utilisation dans la fabrication du plâtre.

Les impuretés solubles présentes en petite quantité dans le phosphogypse (acides libres, phosphates et fluorures) compromettent la qualité du gypse dans une mesure bien plus grande que, par exemple, les impuretés insolubles que l'on peut rencontrer dans le gypse naturel. Les phosphates solubles influent sur le temps de prise et exercent un effet corrosif lors de la réduction du gypse en semi-hydrate. Les fluorures réduisent l'efficacité des retardateurs de prise. La présence de sodium et de potassium provoque des efflorescences. Les sels solubles dans l'eau réduisent en général la solidité du gypse une fois durci.

La présence de matières organiques entraîne une décoloration et des temps de prise irréguliers et exerce une incidence négative sur les propriétés mécaniques du produit fini. Les particules de silice et les particules de phosphate naturel inattaquées n'ont en général guère d'influence sur la qualité du gypse mais entraînent une usure plus rapide du matériel de traitement.

Tableau 7

Comparaison entre les teneurs moyennes en impuretés du phosphogypse obtenu au moyen du procédé Donau Chimie et les normes de qualité à respecter pour la fabrication du plâtre

	Teneur en impuretés du phosphogypse obtenu à partir du phosphate naturel de Djebel Onk (Algérie)	Normes de qualité à respecter pour la fabrication du plâtre
Teneur totale en P_2O_5	0,8 %	0,5 %
P_2O_5 soluble dans l'eau	0,1 %	0,01 %
Teneur totale en fluor	0,7 %	0,5 %
Fluor soluble dans l'eau	0,1 %	0,05 %
Na	0,1 %	0,05 %
pH	3,5	5,0

Le procédé Donau Chemie consiste à éliminer les impuretés solubles dans l'eau grâce à une série de lavages, puis à éliminer les particules fines par hydrocyclonage. Le recyclage de l'eau grâce à un système de lavage à contre-courant permet de réduire la demande en eau de procédé. Le gypse ainsi purifié passe ensuite sous forme de bouillie dans un filtre rotatif et le gâteau de gypse obtenu à l'issue de ce filtrage est placé dans une centrifugeuse afin d'en réduire encore davantage la teneur en humidité.

De 1974 à 1981, après être passé par le filtre et la centrifugeuse, le gâteau de gypse était placé dans un séchoir à action instantanée fonctionnant au fuel, puis il était réduit en semi-hydrate dans un incinérateur chauffé indirectement par les gaz résultant de la combustion du mazout. Avec ce procédé, la consommation de combustible s'élevait à 50 kg par tonne de semi-hydrate produite.

Fort heureusement, la société Donau Chemie a construit en 1981, une nouvelle usine de production d'acide sulfurique à côté de son usine de fabrication d'acide phosphorique. Or, les usines de ce type produisent de grandes quantités de chaleur résiduelle. L'emploi d'une technique spéciale mise au point par la société Lurgi permet de recueillir cette chaleur résiduelle à 120 °C, ce qui est suffisant pour obtenir en une seule étape une concentration de P_2O_5 allant jusqu'à 54 % dans une unité de traitement à vide. La vapeur chaude produite dans les usines d'acide sulfurique est acheminée jusqu'à l'usine de gypse. Le séchoir à action instantanée et l'incinérateur sont remplacés par du matériel utilisant cette vapeur chaude. L'emploi de ce procédé a permis de réduire d'un tiers le coût énergétique des opérations de séchage et d'incinération.

Les produits à base de gypse de la société Donau Chemie se sont particulièrement bien vendus à la suite de cette réduction des coûts énergétiques. La vente de ces produits est encore plus rentable pour la société si l'on prend en considération le coût du transport et autres opérations qui auraient été nécessaires autrement pour se débarrasser sans risque du phosphogypse.

La moitié de la production de gypse de la société Donau Chemie est vendue comme plâtre de Paris et 30 % sont utilisés pour la fabrication de cloisons en plâtre. Ces cloisons sont obtenues par moulage, le séchage étant effectué au moyen de la chaleur résiduelle produite par l'usine de fabrication d'acide sulfurique. Les 20 % restants sont commercialisés sous la forme de plâtre pour joints, de mortier et d'enduit de finition au plâtre à la chaux.

Les économies que l'utilisation de chaleur résiduelle permet de réaliser s'élèvent à 600 000 dollars par an pour la production de gypse et à 300 000 dollars par an pour le séchage des cloisons. Grâce à cette réduction des coûts de production, la société Donau Chemie peut désormais commercialiser rentablement ses produits à base de gypse dans un rayon de 500 km. De ce fait, elle pourrait envisager ultérieurement d'accroître simultanément sa production d'acide phosphorique et de gypse.

B. Recyclage du gypse synthétique par conversion chimique - procédé de la société Chemie Linz

Pour recycler le phosphogypse, la société Chemie Linz a adapté des méthodes de conversion chimique mises au point initialement pour le gypse naturel. Le phosphogypse peut être transformé soit en ciment et en acide sulfurique, soit en sulfate d'ammonium. En outre, la purification des gaz de queue permet de transformer l'acide fluorhydrique (HF) et le SiF_4 qu'ils contiennent en acide fluosilicique. Par la suite, du fluorure d'aluminium est obtenu.

1. Transformation du phosphogypse en ciment et en acide sulfurique au moyen du procédé Müller-Kühne (19).

L'usine Müller-Kühne utilise un mélange de départ composé de phosphogypse séché et grillé (teneur en eau : environ 6 %), d'argile, de coke et de sable. Le phosphogypse doit contenir moins de 0,5 % de P_2O_5 et 0,15 % de fluor comme impuretés. Après le pesage des constituants, le mélange est préchauffé à 700 °C au moyen des gaz d'échappement d'un four rotatif dans lequel il est ensuite placé. L'emploi de la chaleur résiduelle permet de réduire la consommation en combustible de l'usine. Dans le four rotatif, le mélange est réduit en clinker de ciment portland à une température d'environ 1 400 °C. (La température de la réaction atteindrait 1800 °C si le mélange n'était pas additionné de silice.) Le gaz de sortie du four rotatif contient environ 9 % de SO_2 . Après avoir été nettoyé dans un précipitant, purifié et refroidi, ce gaz sert à alimenter l'usine de fabrication d'acide sulfurique. Un certain nombre de techniques courantes peuvent être utilisées pour transformer le SO_2 en acide sulfurique.

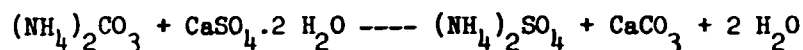
Pour produire une tonne d'acide sulfurique et 0,9 tonne de clinker, il faut 1,65 tonne de gypse synthétique (sous la forme d'anhydrite, CaSO_4), 0,11 tonne de cendres volantes (sèches), 0,15 tonne de sable (sec), 0,04 tonne d'argile (sèche), 0,11 tonne de coke (sec), 0,03 tonne de gypse naturel qui doit être ajouté lors du broyage du clinker, 90 à 100 m^3 de gaz naturel (8 400 Kcal/kg, selon la teneur en humidité du gypse synthétique), 156 kg de mazout (9 500 Kcal/kg), 320 kWh d'électricité, 110 m^3 d'eau de refroidissement et 0,6 m^3 d'eau de procédé.

Comme le montre la figure 2, la production d'acide phosphorique à partir de phosphate naturel et l'utilisation des sous-produits de cette fabrication (le phosphogypse et l'acide fluosilicique) se font en circuit fermé. Le phosphogypse est transformé en ciment et en acide sulfurique et cette dernière substance est ensuite réutilisée dans l'usine de fabrication d'acide phosphorique. L'acide fluosilicique est transformé en fluorure d'aluminium.

2. Attaque du phosphogypse par du carbonate d'ammonium pour produire du sulfate d'ammonium (20)

Comme engrais, le sulfate d'ammonium sert à remettre en état les sols trop alcalins. Outre qu'il réduit le pH, il constitue une source d'azote pour les plantes. Il présente également un intérêt supplémentaire dans le cas des sols pauvres en soufre ou de certaines plantes qui, comme le maïs, ont besoin d'une source de soufre pour mobiliser les enzymes qui transforment l'azote en protéines.

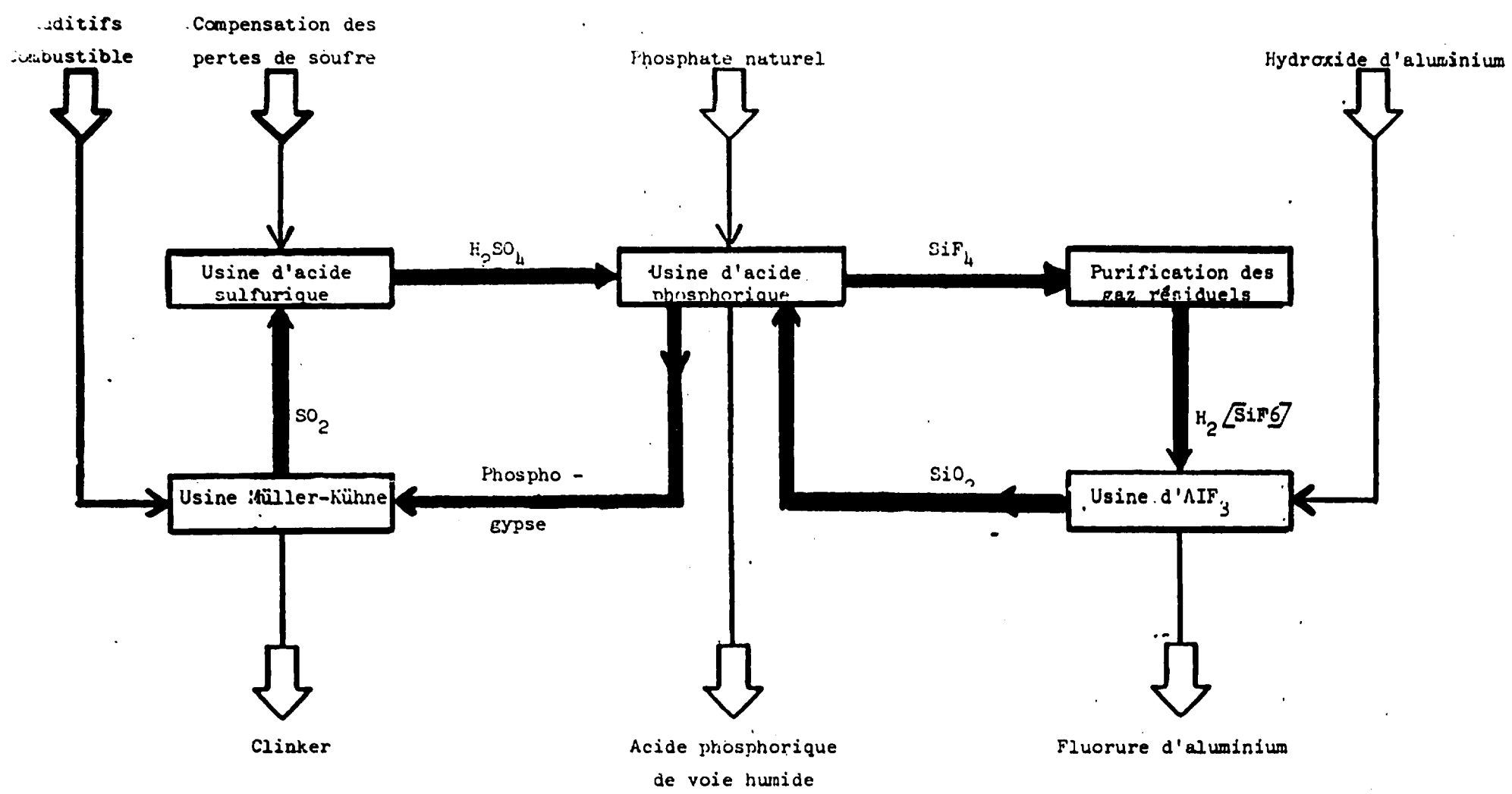
La première opération consiste à produire du carbonate d'ammonium en faisant entrer du gaz carbonique en réaction avec de l'ammoniaque. La réaction entre le phosphogypse et le carbonate d'ammonium dont est issu le sulfate d'ammonium est la suivante :



Le produit est isolé par neutralisation de la solution et par évaporation. Il est ensuite cristallisé, centrifugé et séché.

Le deuxième produit issu de cette réaction (CaCO_3) peut également être commercialisé sous deux formes. Premièrement, en le combinant avec du nitrate d'ammonium, on obtient un engrais à base de nitrate d'ammonium et de chaux qu'il n'est pas nécessaire de broyer. Deuxièmement, on peut également fabriquer du ciment portland avec du carbonate de calcium de très bonne qualité. En fait, le filtrage et le lavage du gâteau de carbonate de calcium, qui sont les opérations les plus importantes pour assurer la qualité du produit, peuvent être effectués au moyen d'un filtre rotatif du même type que celui utilisé pour filtrer l'acide phosphorique (filtre de type Prayon). La chaleur résiduelle produite par la cimenterie peut être utilisée pour sécher le CaCO_3 . Une usine pakistanaise est parvenue à fabriquer du ciment en utilisant du carbonate de calcium obtenu à partir de gypse naturel (20). Il semblerait qu'on ne se soit pas penché sérieusement sur la possibilité d'utiliser à cette fin le carbonate de calcium issu de la réaction entre le phosphogypse et le carbonate d'ammonium qui est décrite plus haut.

Figure 2



V. LE PHOSPHOGYPSE EN FRANCE

En 1977, la France produisait 6,7 millions de tonnes de phosphogypse à partir de phosphate naturel importé du Maroc, du Togo, d'Israël et de Floride. Environ 13 % de ce phosphogypse étaient recyclés, surtout dans l'industrie du bâtiment où on l'utilisait sous la forme de plâtre et de plaques de plâtre.

La plus grande partie du phosphogypse produit est rejetée dans la mer, les estuaires et les cours d'eau. Environ 10 % des déversements se font à terre dans des dépôts, des carrières ou des bassins de décantation. L'estuaire de la Seine, où 4 millions de tonnes de phosphogypse ont été déversées en 1977, est le principal point de rejet. Ces déversements constituent une source de contentieux. Les pêcheurs normands estiment qu'ils entraînent une raréfaction des poissons et rendent les moules impropres à la consommation. Le coût de l'élimination du phosphogypse (par tonne de poids sec) est compris entre 10 francs (évacuation dans des dépôts après décantation) et 100 francs (rejet en mer à partir de péniches).

Trois procédés sont utilisés pour la fabrication de matériaux de construction :

- 1) Le procédé japonais Yoshino est utilisé pour préparer du plâtre destiné à la fabrication de plaques de plâtre. Ce procédé, est exploité conjointement avec le procédé de fabrication d'acide phosphorique de Nissan, par une usine alsacienne qui produit des plaques de parement pour l'exportation vers l'Allemagne. En 1977, la capacité normale de production, calculée sur la base du phosphogypse utilisé, était de 165 000 tonnes par an;
- 2) Le procédé Rhône-Poulenc consiste à transformer le phosphogypse en anhydrite (gypse grillé) après l'avoir purifié. Un plâtre de construction contenant 60 % de semi-hydrate et 40 % d'anhydrite est ensuite préparé;
- 3) Le procédé de CdF Chimie et d'Air Industrie donne un semi-hydrate purifié qui peut être utilisé pour fabriquer des plaques de construction. La purification consiste pour l'essentiel à tamiser la bouillie de phosphogypse afin d'isoler les grains les plus gros (surtout du quartz et du phosphate naturel inattaqué). Les acides et les sels solubles dans l'eau présents après brassage restent en solution. Le gypse purifié est ensuite séché et grillé selon un procédé exclusif qui permet d'obtenir du semi-hydrate.

Tableau 8

Quantités de phosphogypse réutilisées en France en 1976-1977
par le biais de la production de plâtre

Région	Capacités nominales de production (en milliers de tonnes de gypse sec/an)	Quantités effectivement réutilisées (en milliers de tonnes)	
		1976	1977
Normandie	250	80	140
Région lyonnaise	60	35	35
Nord, Pas de Calais	250	100	200
Alsace	165	102	102
Total	725	317	477
Pourcentage de la capacité nominale de production	100	44	66

Du fait de l'abondance de gypse naturel, la recherche-développement dans le domaine du recyclage du phosphogypse n'a guère suscité d'enthousiasme en France d'une manière générale. Toutefois, un programme de R-D dont le budget annuel est de 2,5 millions de francs a été créé en 1976 en Normandie, région qui produit deux tiers du phosphogypse français.

Le phosphogypse pourrait également trouver de nouveaux débouchés dans l'industrie du ciment dans le nord du pays. En effet, les cimenteries de cette région utilisent actuellement du gypse naturel qui doit être transporté sur de longues distances puisqu'il provient de la région parisienne.

La France exporte environ 100 tonnes de phosphogypse par an sous la forme de plaques de plâtre vers l'Allemagne et la Belgique. En 1976, elle a également exporté environ 100 tonnes de plâtre. Ce chiffre est passé à 200 tonnes en 1977. C'est lorsqu'il est produit dans une région qui ne possède pas de réserve exploitable de gypse naturel que le phosphogypse français est le plus concurrentiel comme matériau de construction. Autrement dit, comme la principale source de gypse naturel est la région parisienne, la production de plâtre à partir de phosphogypse ne présente de l'intérêt que dans les endroits éloignés de la capitale.

VI. LE PHOSPHOGYPSE EN BELGIQUE - LE PROCÉDE PRAYON CLASSIQUE ET
LE NOUVEAU PROCÉDE CENTRAL-PRAYON

Le procédé Prayon classique, ou procédé Prayon au dihydrate, et le procédé Central-Prayon sont utilisés industriellement en Belgique par la société chimique Prayon-Rupel ainsi que dans le monde entier par des usines exploitées sous licence (16).

Avec le procédé Prayon classique, on obtient du gypse sous la forme de dihydrate qui doit faire l'objet d'un nettoyage supplémentaire. Ce dihydrate est purifié au moyen d'un procédé semblable à celui utilisé par la société Donau Chemie (voir la section IV. A), puis séché et partiellement calciné de manière à obtenir du semi-hydrate. Le procédé Prayon classique est utilisé commercialement depuis 30 ans. Diverses améliorations apportées au fil des décennies ont permis d'accroître les capacités, de produire de l'acide phosphorique de meilleure qualité et d'utiliser efficacement du phosphate naturel de qualité inférieure comme matière première. Le procédé Central-Prayon est exploité dans le cadre d'un accord entre une société japonaise, la Central Glass Company, et la société chimique Prayon-Rupel. En Belgique, son exploitation commerciale a débuté en 1965 dans l'usine d'Engis de la société chimique Prayon-Rupel. La deuxième usine a été créée par la Central Glass Company en 1967. Avec ce procédé, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 6, l'usine d'acide phosphorique produit du gypse semi-hydrate qui n'a pas besoin d'être purifié. Après l'avoir fait sécher en tas à l'air libre de manière à obtenir du dihydrate, le phosphogypse est tamisé et broyé. Le produit ainsi obtenu peut être utilisé directement dans l'industrie du plâtre ou comme retardateur de prise dans l'industrie du ciment.

La société chimique Prayon-Rupel a vendu 102 usines exploitant le procédé Prayon au dihydrate et 11 usines exploitant le procédé Central-Prayon dans le monde entier. Les usines exploitant le procédé au dihydrate produisent environ 33 500 tonnes de P_2O_5 par jour. Par exemple, la société Chemie Linz mentionnée dans la section IV.B, en produit 60 tonnes par jour. Les usines qui exploitent le procédé Central-Prayon en produisent quant à elles 2 300 tonnes par jour.

Tableau 9

Production d'acide phosphorique et de phosphogypse semi-hydrate au moyen du procédé Central-Prayon

Première phase

- Première opération : Obtention d'une bouillie A constituée d'acide phosphorique et de phosphogypse après attaque du phosphate naturel par de l'acide sulfurique et de l'acide sulfophosphorique recyclé.
- Deuxième opération : Séparation de la bouillie A en deux fractions, à savoir :
a) l'acide phosphorique et b) une bouillie B plus épaisse dont la teneur en phosphogypse est plus importante.

Deuxième phase

- Troisième opération : Transformation du phosphogypse contenu dans la bouillie B en semi-hydrate par adjonction d'acide sulfurique et par élévation de la température. Obtention d'une bouillie C constituée de semi-hydrate en suspension dans de l'acide sulfophosphorique.
- Quatrième opération : Séparation de la bouillie C en deux fractions, à savoir :
a) le semi-hydrate dont l'acide sulfophosphorique a été extrait par lavage à contrecourant et b) l'acide sulfophosphorique ainsi extrait. Cet acide est réutilisé pour la première opération.
- Cinquième opération : Stockage du semi-hydrate en piles de séchage en vue de son utilisation ultérieure.

VII. RADIOACTIVITE DU PHOSPHOGYPSE

Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants a déterminé que la plus grande partie du radium 226 contenu dans le minerai de phosphate se retrouve dans le phosphogypse. Le Comité a estimé en outre que compte tenu des nucléides présents (radium 226, radon 222 et produits éphémères de sa désintégration) et des conditions dans lesquelles elle se produit (intérieur des logements), l'irradiation à laquelle seraient soumises des personnes vivant dans des maisons construites avec du phosphogypse pourrait, dans le pire des cas, être supérieure de 30 % à la normale. C'est surtout par inhalation que l'homme est exposé au radon 222 et aux produits éphémères de sa désintégration.

Dans son étude, Weterings (22) a exposé brièvement trois méthodes pour réduire le degré de radioactivité du phosphogypse. Dans les exemples cités, la radioactivité initiale du phosphogypse est de 22 pCi par gramme*.

- 1) En traitant le phosphogypse avec une solution d' H_2SO_4 et de $BaSO_4$ à 98 °C et en éliminant les particules d'une taille supérieure à 70 microns (dont la radioactivité est de 70 pCi par gramme) on obtient un gypse résiduel dont la radioactivité est de 2 pCi par gramme;
- 2) En le traitant avec une solution à 60 % d' HNO_3 à 60 °C, on en abaisse la radioactivité à 5 pCi par gramme;
- 3) En éliminant par hydrocyclonage les fines particules de gypse (30 microns) dont la radioactivité est la plus élevée, on obtient un gypse résiduel dont la radioactivité est de 16 pCi par gramme.

La dernière méthode citée permet de réduire le niveau de radioactivité du phosphogypse de 30 %. Ce traitement doit être considéré comme un minimum lorsque la radioactivité initiale est supérieure à 16 pCi par gramme.

* Le curie, qui est une unité courante de mesure de la radioactivité, correspond à $3,70 \times 10^{10}$ désintégrations par seconde. Le picocurie (pCi) correspond à 1 curie $\times 10^{-12}$.

VIII. LE CAS D'UN PAYS OU LES POSSIBILITES DE SE DEBARRASSER
DE RESIDUS COMME LE PHOSPHOGYPSE SANS NUIRE
A L'ENVIRONNEMENT SONT LIMITEES : LE DALMAR

Le Dalmar est un pays d'orientation socialiste dont le gouvernement finance directement la création de moyens de production par le biais d'entités qu'il contrôle. Au cours des années 70, il a cherché à s'industrialiser rapidement en entreprenant un programme d'investissement de grande ampleur dont les industries cimentières et chimiques ont bénéficié. L'ampleur de ce programme a dépassé l'aptitude du secteur public à faire face aux problèmes de gestion, de dotation en effectifs et de planning des entreprises. Par conséquent, le Dalmar doit s'efforcer au cours des années 80 de mener à terme son programme d'investissement et d'amener les diverses usines existantes à utiliser pleinement et efficacement leurs capacités de production.

A. Le recyclage du phosphogypse - une nécessité

Dans le cadre de ses travaux d'équipement dans le secteur de la chimie, le Dalmar a construit un grand complexe de fabrication d'engrais qui produit notamment de l'acide phosphorique. On s'est aperçu rapidement au cours des travaux de planification que si on déversait le phosphogypse auprès de ce complexe, on risquait de polluer les eaux souterraines et de compromettre l'utilisation d'un lac voisin à des fins récréatives. Or, les ressources en eau du pays étant limitées, les eaux souterraines sont importantes pour l'agriculture et la consommation des ménages. Quant au lac, sa valeur récréative est importante. C'est pourquoi le Dalmar s'est intéressé aux possibilités de recyclage.

B. Perspectives d'utilisation du phosphogypse pour la fabrication de matériaux de construction et d'engrais

Vers le milieu des années 80, la production de ciment du Dalmar devrait être le double de ce qu'elle était à la fin des années 70. La demande intérieure ayant augmenté fortement au cours des années 70 dans le cas de tous les matériaux de construction, on peut s'attendre à ce qu'elle augmente encore au cours des années 80. S'il parvient à doubler sa production, le Dalmar devrait devenir

Note : Bien que les études des deux cas qui suivent aient été élaborées à partir d'enquêtes effectuées sur le terrain par l'ONUDI dans des pays en développement, les noms de ces derniers ont été remplacés par des noms fictifs afin de respecter le caractère confidentiel de certains renseignements en matière de planification économique d'investissement.

un exportateur net de ciment malgré cette forte demande intérieure. Compte tenu des déficits anormalement élevés de sa balance des paiements et de son budget ce serait un avantage important. Autrement dit, on peut s'attendre à ce que tout excédent de production éventuel soit absorbé par les exportations.

Bien que le Dalmar n'ait pas l'intention d'effectuer de nouveaux investissements industriels dans un proche avenir, il s'efforcera d'accroître la production alimentaire. Ces efforts, qui consisteront notamment à développer l'éducation, à restructurer les prix des denrées agricoles et à accroître dans une certaine mesure la superficie irriguée, recevront un degré de priorité élevé, car l'irrégularité de la production agricole a contribué dans une large mesure aux difficultés budgétaires et aux problèmes de balance des paiements du pays. La demande d'engrais devrait donc progresser fortement à mesure que le pays s'efforcera d'accroître les rendements par hectare en améliorant les techniques d'exploitation et d'augmenter la superficie des cultures intensives. En résumé, le marché devrait rester favorable jusqu'à la fin des années 80 aussi bien pour les matériaux de construction que pour les engrais.

C. Considérations économiques : coûts de l'élimination du phosphogypse et débouchés potentiels pour ce produit

Dans le cadre de son programme d'investissement, le Dalmar a entrepris de construire un grand complexe de production d'engrais sur l'emplacement d'une usine existante qui dispose de bonnes liaisons routières et ferroviaires et qui doit bientôt être desservie par une ligne ferroviaire supplémentaire. Cette nouvelle ligne reliera l'usine à un bassin d'extraction de phosphate et à un port situés à chaque extrémité. Des enquêtes ont permis de se rendre compte rapidement qu'il ne serait pas possible de déverser le phosphogypse résultant de la production d'acide phosphorique à proximité de ce complexe. Cela a incité le gouvernement à étudier la possibilité soit de se débarrasser du phosphogypse dans d'autres endroits, soit de le réutiliser pour produire des marchandises commercialisables.

On estime que la production annuelle de phosphogypse atteindra 938 000 tonnes lorsque l'usine de production d'acide phosphorique prévue fonctionnera à pleine capacité. Une étude a été entreprise pour déterminer a) les dépenses qu'entraînerait l'élimination du phosphogypse ainsi produit selon des méthodes acceptables d'un point de vue écologique et b) les produits dérivés du phosphogypse pouvant être commercialisés avec succès dans le pays. La réutilisation du phosphogypse aurait

pour avantage principal de résoudre le problème que soulève son élimination. En outre, le Dalmar s'est rendu compte, en étudiant la gamme de produits pouvant être obtenue à partir du phosphogypse, qu'il bénéficierait de retombées secondaires s'il se lançait dans la fabrication de certains d'entre eux, surtout parce que cela lui permettrait de substituer ces produits à d'autres qu'il doit importer et d'utiliser d'autres résidus. Ces retombées augmentaient d'autant l'intérêt du recyclage.

1. Coûts des opérations d'évacuation du phosphogypse, eu égard à la nécessité de protéger l'environnement.

Deux sites se prêtant à l'évacuation et au stockage à long terme du phosphogypse ont été localisés. L'un d'entre eux était situé à environ 45 km du complexe de fabrication d'engrais mais n'était pas relié à ce dernier par rail. Il aurait fallu soit transporter le phosphogypse par camion, soit construire un système de transport spécial. Dans le cas de cette dernière formule, on a estimé que les coûts initiaux s'élèveraient à 100 millions de lires du Dalmar (LD), ce qui a été jugé prohibitif. L'autre solution (transport par camion) a également été jugée prohibitive car il aurait fallu acheter 30 véhicules et employer 150 personnes.

Le deuxième site d'évacuation retenu était le bassin d'extraction du phosphate. Cette solution permettrait d'utiliser la voie ferrée reliant le complexe de production d'engrais au bassin minier car le phosphogypse pourrait être réexpédié vers ce dernier au moyen des wagons de minerai vidés. Pour cela, il faudrait équiper l'usine d'engrais d'une station de chargement pour le phosphogypse et construire une station de déchargement et un réseau de distribution dans le bassin minier. Etant donné que le phosphogypse est plus volumineux que le phosphate naturel, il faudrait également acheter quelques wagons supplémentaires.

Le montant total des investissements nécessaires a été estimé à 9 millions de LD. Sur la base d'un taux d'intérêt de 9 % pour les emprunts à long terme et de 7 % pour le prêt à la construction, cela représenterait une charge financière annuelle (versements des intérêts plus remboursement des emprunts) d'un montant de 1,5 million de LD, soit 16,67 % du montant total des investissements. Les frais de réexpédition du phosphogypse vers la zone minière sont présentés de façon détaillée dans le tableau ci-après :

Tableau 10

Coût total annuel des opérations de déversement

Poste de dépense	Nombre d'unités requises	Prix unitaire	Coût total (LD)
Chaux pour protéger les wagons	3 125 t	275,00	860 000
Fret ferroviaire	1 250 000 t	7,80	9 750 000
Main d'oeuvre	50 hommes	8 000,00	400 000
Frais généraux (150 % du coût de la main-d'oeuvre)			600 000
Frais d'entretien (2 % du montant total des investissements)			180 000
Charge financière annuelle			<u>1 500 000</u>
Coût total annuel			13 290 000

L'enlèvement et l'évacuation des 938 000 tonnes de phosphogypse produites chaque année coûteraient donc au total 13 290 000 LD soit 14,17 LD par tonne. En conséquence, il a été recommandé à l'issue de cette étude que toute solution permettant le recyclage du phosphogypse bénéficie d'un crédit de 14 LD par tonne.

2. Etude de marché

Le Dalmar a examiné les possibilités de commercialiser un éventail complet de marchandises pouvant être obtenues par recyclage du phosphogypse. La liste des produits étudiés est la suivante :

- a. Amendement du sol
- b. Plaques de plâtre
- c. Sulfate de sodium
- d. Plâtre de Paris, employé notamment pour la fabrication de blocs
- e. Retardateur de prise pour le ciment
- f. Production d'acide sulfurique et de ciment (procédé Müller-Kühne)
- g. Sulfate d'ammonium.

On est parvenu à la conclusion que les quatre derniers produits cités étaient ceux qui convenaient le mieux à la situation du pays. Après avoir mentionné brièvement les raisons qui ont conduit à rejeter les trois autres, nous examinerons ci-après de façon plus détaillée les aspects économiques de la production et de la commercialisation de ces quatre produits.

- a) La production d'amendement à base de phosphogypse a été éliminée parce qu'on ne rencontre pas au Dalmar les sols de type argileux pour lesquels cet amendement convient le mieux;
- b) Les plaques de parement ont été éliminées d'une part parce que leur fabrication aurait exigé l'importation d'un carton spécial et d'autre part parce qu'il n'existe pas de marché pour ce produit dans le pays. Un tel marché aurait été difficile à créer, étant donné que les plaques de parement ne présentent aucun avantage économique ou autre par rapport au plâtrage manuel au Dalmar;
- c) Le sulfate de sodium a également été éliminé faute de débouchés. Toutefois, à la différence des plaques de parement, on prévoyait que le marché pour ce produit se développerait prochainement. Le sulfate de sodium, qui n'est pas disponible au Dalmar, est nécessaire aux industries de la pâte et des papiers et des détergents. Etant donné que ces industries ne faisaient que commencer à se développer au moment où l'étude a été réalisée, le Dalmar estime qu'il faudrait réexaminer la possibilité de fabriquer du sulfate de sodium lorsqu'elles atteindront le niveau de production prévu. L'emploi de phosphogypse pour fabriquer le sulfate de sodium nécessaire éviterait alors au Dalmar d'importer ce produit;
- d) Plâtre de Paris/blocs de construction : l'étude a permis d'établir qu'il était possible de produire du plâtre de Paris à meilleur marché à partir du phosphogypse qu'à partir du gypse naturel, quelle que soit la capacité de production. En conséquence, les débouchés prévus constituent le seul facteur limitatif. Etant donné que les frais de transport représentent une part substantielle du prix de vente du plâtre de Paris, ce produit ne peut être

commercialisé que dans un rayon restreint. On a établi qu'à l'intérieur de ce rayon, on pouvait écouler 200 tonnes de plâtre de Paris par jour environ et l'on pensait que ce marché se développerait progressivement. On a donc recommandé de consacrer des quantités croissantes de phosphogypse à la fabrication de ce produit à mesure que ses débouchés se développeront.

- e) Retardateur de prise pour le ciment : à la différence du plâtre de Paris, le retardateur de prise pour ciment peut être obtenu à meilleur marché à partir du gypse naturel que du phosphogypse. Par conséquent, le retardateur de prise fabriqué à partir de phosphogypse ne serait commercialisable que dans les cas où le complexe de production d'engrais est mieux situé par rapport au marché. Etant donné que celui-ci est bien situé et qu'il est relié au réseau ferroviaire, il jouit donc de ce point de vue d'atouts décisifs qui sont suffisants pour lui permettre d'être concurrentiel sur le marché du retardateur de prise pour ciment.

Le coût de production du retardateur de prise est de 12 LD par tonne lorsqu'on utilise du gypse naturel. On a estimé que dans le cas d'une usine d'une capacité de production de 500 tonnes par jour utilisant du phosphogypse, ce chiffre serait de 23,69 LD par tonne; soit 11,69 LD de plus. Pour que le prix du retardateur fabriqué à partir de phosphogypse par l'usine d'engrais soit intéressant pour les clients potentiels, c'est-à-dire les cimenteries, il faudrait donc que les coûts de transport soient inférieurs d'au moins 11,69 LD par tonne aux coûts de transport du retardateur de prise à base de gypse naturel;

Dans la région où le complexe de fabrication d'engrais pourrait commercialiser sa production de retardateur de prise, il n'y a qu'une seule entreprise qui fabrique ce produit à partir du gypse naturel. Les distances séparant cette dernière ainsi que le complexe de fabrication d'engrais de sept consommateurs de retardateur de prise sont indiqués dans le tableau reproduit plus bas. Les moyens de transport disponibles dans chaque cas sont

également indiqués, de même que la différence éventuelle entre les coûts de transport à l'avantage du complexe de production d'engrais. Comme on peut le voir, cette différence est suffisante (égale ou supérieure à 11,69 LD) pour lui permettre d'offrir des prix concurrentiels à quatre clients. Dans les quatre cas, cet avantage est dû au fait qu'il a accès aux transports ferroviaires. En effet, le transport par rail revient à 7 LD par tonne aux 100 km alors que l'on estime que le transport par camion coûte le double, soit 14 LD;

Tableau 11
Analyse des frais de transport*

Cimenterie	Longueur du trajet depuis l'entreprise concurrente et mode de transport	Longueur du trajet depuis le complexe et mode de transport	Différence par tonne à l'avantage du complexe de production d'engrais
1	160 / C	200 / R	8,40
2	140 / C	40 / R	16,80
3	100 / C	20 / R	12,60
4	20 / C	220 / C	aucune
5	140 / C	100 / R	12,60
6	60 / C	100 / C	aucune
7	190 / C	100 / C	12,60

*C = camion

R = rail

Unité monétaire = LD

Distances en km

Dans le cas des quatre clients que le complexe de production d'engrais pourrait approvisionner, la différence à l'avantage de ce dernier serait d'au moins 12,60 LD, soit 0,93 LD de plus que le minimum nécessaire (11,69 LD) pour que son retardateur de prise soit concurrentiel. Il pourrait profiter de cet écart de 0,93 LD par tonne pour réaliser un bénéfice en fixant un prix de vente correspondant à son prix de revient par tonne (23,69 LD) majoré jusqu'à concurrence d'un montant équivalent;

Le retardateur de prise et le plâtre de Paris dont il est question plus haut devraient être produits dans la même usine. La demande des quatre utilisateurs potentiels de retardateur de prise s'élève au total à 600 tonnes par jour, lorsqu'elles utilisent pleinement leurs capacités de production. Il ne fallait pas s'attendre toutefois à ce que cela soit le cas tout au long de l'année. Il a donc été recommandé de prévoir une usine produisant 200 tonnes de plâtre de Paris et 400 tonnes de retardateur de prise par jour. A mesure que le plâtre de Paris trouvera de nouveaux débouchés, la production de retardateur de prise pourra être progressivement éliminée;

Les investissements nécessaires à la création d'une usine d'une capacité de 600 tonnes par jour ont été estimés à 24 250 000 LD, les besoins de trésorerie, y compris avant le lancement de la production, à 1 697 000 LD, soit un montant total de 25 947 000 LD. L'usine devait être amortie sur une période de 20 ans. La production de 600 tonnes par jour de plâtre de Paris/retardateur de prise absorberait environ 660 tonnes de phosphogypse par jour sur les 3 000 tonnes produites par l'usine de production d'acide phosphorique.

- f) Production d'acide sulfurique et de ciment (procédé Müller-Kühne) : le Dalmar est un importateur net de soufre pour la production d'acide sulfurique et on pense qu'il le restera à l'avenir malgré une augmentation probable de la production locale. En conséquence, le fait de produire de l'acide sulfurique à partir du phosphogypse éviterait au pays de devoir importer le soufre nécessaire. D'un point de vue technique, on peut envisager de construire une usine d'une capacité soit de 570 tonnes par jour, soit de 850 tonnes par jour.

Comme on le montre plus loin, seule une usine d'une capacité de 850 tonnes par jour serait rentable.

Dans le cas d'une usine d'une capacité de traitement de 850 tonnes par jour, on a estimé que le coût de production d'une tonne de ciment et d'une tonne d'acide sulfurique produites conjointement s'élèverait environ à 360 LD. Le coût de production du ciment fabriqué au Dalmar à partir de matières premières classiques est de 145 LD par tonne. En conséquence, on pouvait attribuer à l'acide sulfurique un prix de revient de 215 LD par tonne (360-145). Or, une usine d'une capacité de 850 tonnes par jour produisant de l'acide sulfurique à partir de soufre n'aurait des coûts de production aussi élevés que si le prix de cette matière première était de 150 dollars par tonne. Au moment où le Dalmar a effectué son enquête, d'importantes quantités de soufre provenant de puits de gaz naturel acide étaient récupérées au Canada. Etant donné que le soufre coûtait entre 70 et 75 dollars par tonne, on ne pouvait pas s'attendre à ce que son prix augmente suffisamment à brève échéance pour que la production d'acide sulfurique à partir de phosphogypse puisse être rentable.

Toutefois, le prix de revient initial de 360 LD par tonne a été calculé en se fondant sur l'hypothèse que l'on emploierait du mazout comme source de chaleur pour l'exploitation du procédé Müller-Kühne. Or, il est possible de remplacer ce combustible par du coke de pétrole, produit qui est disponible au Dalmar à des prix bien inférieurs. En fait, au moment où le présent rapport a été établi, le coke de pétrole était considéré comme un résidu et son élimination soulevait des problèmes écologiques surtout parce que sa combustion libère de l'anhydride sulfureux dans l'atmosphère. Dans le cas du procédé Müller-Kühne, il ne se produit aucun dégagement d'anhydride sulfureux puisque ce gaz est utilisé pour la fabrication de l'acide sulfurique. Par conséquent, l'emploi du coke de pétrole à la place du mazout permettrait à la fois de réduire le prix de revient du ciment et de l'acide sulfurique et d'aider le Dalmar à se débarrasser de ce produit.

Au moment où l'étude a été effectuée, le coke de pétrole était considéré comme un résidu n'ayant aucune valeur commerciale. Auparavant, il était vendu au prix de 70 LD la tonne. En se basant sur ces deux éventualités (prix nul et 70 LD la tonne), le coût de production d'une tonne de ciment et d'une tonne d'acide sulfurique à partir du phosphogypse serait compris entre 255 et 285 LD, ce qui, en retenant à nouveau le chiffre de 145 LD la tonne pour le ciment, donnerait un prix de revient compris entre 110 et 140 LD la tonne pour l'acide sulfurique. Une usine d'une capacité de 850 tonnes par jour qui utilise du gypse naturel a des coûts de production comparables lorsque le soufre coûte entre 65 et 85 dollars la tonne. En conséquence, sur la base des cours du soufre alors pratiqués sur les marchés mondiaux, l'acide sulfurique produit à partir de phosphogypse aurait pu être concurrentiel à condition d'utiliser du coke de pétrole comme combustible.

Une usine d'une capacité de 570 tonnes par jour n'aurait pas été rentable même en utilisant du coke de pétrole comme combustible. En effet, même si le coût du coke de pétrole était nul, le coût de production d'une tonne de ciment et d'une tonne d'acide sulfurique atteindrait 305 LD par tonne. Par conséquent, le coût de production imputable à l'acide sulfurique serait de 160 LD par tonne. Pour que l'acide sulfurique ainsi produit puisse concurrencer celui obtenu à partir du soufre naturel, il faudrait que les cours mondiaux pour ce dernier produit atteignent 100 dollars par tonne.

On a estimé que, dans le cas d'une usine d'une capacité de 850 tonnes par jour, les dépenses d'investissement s'élèveraient à 325 millions de LD et les dépenses de préinvestissement et les besoins en capital circulant à 22 750 000 LD, soit un total de 347 750 000 LD. Une usine Müller-Kühne de cette taille consommerait 1 725 tonnes de phosphogypse par jour. En conséquence, l'usine de production de plâtre de Paris/retardateur de prise pour ciment et l'usine Müller-Kühne absorberaient au total 2 385 tonnes de phosphogypse sur les 3 000 environ qui sont produites quotidiennement. Les 600 tonnes restantes seraient utilisées pour produire du sulfate d'ammonium.

g) Sulfate d'ammonium

Commercialisé comme engrais, le sulfate d'ammonium entrerait en concurrence avec l'urée déjà produite par le complexe de fabrication d'engrais. Toutefois, plusieurs facteurs ont permis de déterminer qu'il serait intéressant d'un point de vue économique de produire du sulfate d'ammonium. Tout d'abord, ce produit convient mieux que l'urée dans les zones irriguées. Or la superficie irriguée est relativement importante au Dalmar et on espère l'accroître encore davantage dans le cadre des efforts visant à augmenter la production alimentaire. En outre, comme le complexe d'engrais pourrait produire plus d'ammonium que l'on n'en consomme à l'intérieur du pays, les excédents pourraient soit être utilisés avec du phosphogypse pour produire du sulfate d'ammonium, soit exportés. Dans ce dernier cas, il faudrait construire des installations portuaires spéciales. Si on utilisait l'ammoniaque pour fabriquer du sulfate d'ammonium, ce dernier produit remplacerait l'urée consommée à l'intérieur du pays, ce qui obligerait alors à exporter de l'urée. Toutefois, cela n'exigerait pas la construction d'installations portuaires spéciales. En conséquence, on a estimé qu'il serait plus intéressant d'un point de vue économique d'utiliser les excédents d'ammoniaque pour produire du sulfate d'ammonium et d'exporter l'urée plutôt que l'ammoniaque.

Avec l'excédent quotidien de 600 tonnes de phosphogypse qui ne serait pas utilisé pour la fabrication de retardateur de prise, de plâtre de Paris, de ciment et d'acide sulfurique, on pourrait produire 400 tonnes de sulfate d'ammonium. A cette échelle, les coûts de production dépasseraient de 8 LD par tonne les cours mondiaux. Toutefois, étant donné que l'on obtiendrait comme sous-produit de la fabrication du sulfate d'ammonium environ 340 tonnes de carbonate de calcium dont la valeur commerciale est d'au moins 25 LD par tonne, on pourrait utiliser le produit de la vente de ce carbonate de calcium pour subventionner la vente du sulfate d'ammonium. On a estimé que les investissements nécessaires pour une usine de sulfate d'ammonium s'élèveraient à 100 357 250 LD et que les dépenses de préinvestissement et les besoins en capital circulant atteindraient 7 025 000 LD, soit un montant total de 107 383 250 LD.

D. Fabrication de cinq produits finals à partir de phosphogypse : examen des apports nécessaires et des coûts de production

Les apports nécessaires pour chacune des trois filières jugées rentables pour le Dalmar sont présentés dans les tableaux 12 et 13. On y précise notamment la consommation de matières premières, d'eau et d'énergie par tonne de production ainsi que, lorsqu'ils sont connus, les coûts par unité, les coûts par tonne de production et les dépenses totales annuelles. Après avoir indiqué les apports nécessaires, on donne un aperçu des investissements, des dépenses de main-d'oeuvre, des frais généraux et des frais d'entretien pour l'ensemble de l'opération de retraitement.

Sur la base d'une période de remboursement de 20 ans et d'un taux d'intérêt de 9 % pour les prêts à long terme, on a calculé que le taux de rendement interne des trois usines exploitées conjointement serait supérieur à 12 %, ce qui a été jugé suffisamment intéressant pour justifier la réalisation d'études de faisabilité détaillées.

Tableau 12

Apports nécessaires, retardateur de prise pour ciment/plâtre de Paris

Article	Unités nécessaires pour obtenir une tonne de produit	Prix de l'unité	Coût par tonne de produit	Coût total annuel
Phosphogypse	1,4 t	0	0	0
Eau	3 - 5 m ³	,04/m ³	,12 - ,20	72 - 120
Electricité	60 kWh	,05/kWh	3	1 800
Mazout	0,062 t	288/t	17,85	10 714
Hydroxyde de calcium	0,005	NC	NC	NC
Ciment/Acide sulfurique (procédé Müller-Kühne)				
Phosphogypse	2,24 t	0	0	0
Argile	0,07 t	NC	NC	NC
Sable	0,07 t	NC	NC	NC
Coke de pétrole	0,43 t	70/t	30,10	25 585
Eau	80 m ³	,04/m ³	3,20	2 720
Electricité	230 kWh	,05/kWh	11,50	9 775
Sulfate d'ammonium				
Phosphogypse	1,5 t	0	0	0
Ammoniaque	,27 t	125/t	33,75	13 500
Acide sulfurique	,06 t	125/t	7,50	3 000
Gaz carbonique	,35 t	NC	NC	NC
Eau	52 m ³	,04/m ³	2,08	832
Electricité	50 kWh	,05/kWh	2,50	1 000
Vapeur	,65 t	30/t	19,50	7 800
Mazout	,0075 t	288/t	2,16	864

Note : Unité monétaire * LD

Tableau 13

Capitaux nécessaires et dépenses annuelles de fonctionnement

Capitaux nécessaires (LD)				
	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Total
Investissements	24 250 000	325 000 000	100 357 257	449 607 257
Capital circulant et dépenses de préinvestissement	1 697 000	22 750 000	7 025 000	31 472 000
TOTAL	25 947 000	347 750 000	107 382 257	481 079 257
Dépenses annuelles de fonctionnement (LD)				
Entretien (2 % du montant des investissements)			8 992 000	
Main-d'oeuvre (140 employés x 8 000)			1 120 000	
Frais généraux (150 % du coût de la main-d'oeuvre)			1 680 000	
TOTAL			11 792 000	

E. Conclusions

Le cas du Dalmar est représentatif du type de situation économique dans laquelle se trouvent de nombreux pays du tiers monde et des différents facteurs économiques qui déterminent la rentabilité du recyclage du phosphogypse. Il est important pour le Dalmar d'accroître l'offre de matériaux de construction et la production alimentaire, tant pour assurer sa croissance interne que pour contribuer à résoudre ses problèmes de balance des paiements. Il en résulte que les débouchés potentiels pour les produits pouvant être fabriqués à partir du phosphogypse sont nombreux. Néanmoins, comme cela est fréquemment le cas, aucun marché n'est suffisamment étendu pour justifier la transformation de la totalité du phosphogypse disponible en un seul produit. En outre, comme

le recyclage du phosphogypse coûte relativement cher, il faut bien souvent que l'usine de production d'acide phosphorique bénéficie de certains avantages économiques pour que cette option soit rentable. Dans le cas du Dalmar, le fait que cette usine soit bien située et bien desservie et qu'elle dispose d'une source de combustible bon marché constitue un atout décisif de ce point de vue. Les frais de transport et les frais de combustible sont en général les deux éléments les plus importants à prendre en considération pour déterminer si le recyclage du phosphogypse est ou non rentable.

L'exemple du Dalmar montre également l'intérêt croissant que présente le recyclage à mesure que les possibilités d'évacuation deviennent plus limitées et plus coûteuses. C'est à cause de ces problèmes que le Dalmar a commencé à s'y intéresser. La réglementation peut également avoir pour effet de rendre les frais d'évacuation si élevés qu'il devient pratiquement impossible d'envisager d'autres solutions. Le recyclage peut également résoudre les problèmes soulevés par d'autres sous-produits comme par exemple les excédents d'ammoniaque et le coke de pétrole au Dalmar. Enfin cette formule peut donner la possibilité à des pays comme le Dalmar de fabriquer eux-mêmes des produits essentiels comme l'acide sulfurique, le ciment, le sulfate de sodium, le gypse et les engrais, au lieu de les importer.

IX. LE CAS D'UN PAYS QUI ENVISAGE DE RECOURIR AU PROCÉDE MÜLLER-KÜHNE
POUR SATISFAIRE SES BESOINS EN ACIDE SULFURIQUE : LE NAAGEL

Le Naagel est un pays dont le gouvernement joue un rôle actif dans l'économie. Les prix d'un large éventail de produits essentiels sont alignés sur les salaires des travailleurs urbains par le biais de taxes, de subventions et de la réglementation des importations. Le gouvernement exécute également des programmes d'investissement de grande ampleur, surtout par le biais d'organismes publics semi-autonomes. L'expansion économique a été très forte au cours des années 70 et le Naagel a profité de ce que ses produits se vendaient bien à l'étranger pour entreprendre un programme d'investissement intensif dont l'un des objectifs principaux était d'accroître la valeur des exportations. L'industrie des phosphates et de l'acide phosphorique était au nombre des secteurs qui devaient bénéficier de cette politique.

A. Arguments en faveur de la création d'une source nationale d'acide phosphorique

Le phosphate naturel et ses dérivés jouent un rôle important dans l'économie du pays. Etant donné que celui-ci extrait du phosphate naturel et qu'il produit de l'acide phosphorique depuis un certain nombre d'années, il produit aussi du phosphogypse auquel il a commencé à s'intéresser dans le cadre de ses efforts visant à accroître la valeur de ses exportations. Ses ressources en soufre étant insuffisantes, il doit en importer pour obtenir l'acide sulfurique nécessaire à la fabrication de l'acide phosphorique. Or, cette expérience n'a pas donné de bons résultats en raison des incidences négatives que les fluctuations importantes des cours mondiaux du soufre ont exercé sur les coûts de production, la stabilité et la rentabilité des usines de production d'acide phosphorique du pays. On s'est rendu compte qu'il n'était guère souhaitable que le pays reste tributaire des importations de soufre s'il voulait développer sa production d'acide phosphorique et accroître ses ventes à l'étranger.

La production d'acide phosphorique est appelée à jouer un rôle de plus en plus important dans la prospérité économique du pays d'ici la fin des années 80 et 90. A la fin des années 80, sa production de phosphate naturel devrait être le double de ce qu'elle était à la fin des années 70 et on prévoit qu'elle augmentera encore au cours des années 90. Les capacités dont dispose le pays pour transformer ce minerai en acide phosphorique et en produits apparentés augmenteront au moins aussi rapidement.

Au cours de la première moitié des années 70, les recettes provenant de la vente de phosphate naturel dépassaient de loin celles provenant de la vente d'acide phosphorique. Après avoir enregistré un équilibre approximatif à la fin de la décennie, on peut s'attendre à ce que le rapport s'inverse au cours des années 80. L'évolution de la production de phosphate naturel et d'acide phosphorique et des recettes provenant de leur exportation est présentée sous forme de graphiques dans les figures 1, 3 et 4.

Les tendances que font apparaître les figures 1, 3 et 4 sont lourdes de conséquences. Tout d'abord, le Naagel aura besoin d'une quantité croissante d'acide sulfurique pour traiter le phosphate naturel. Deuxièmement, étant donné qu'elles dépendront davantage des produits à base de phosphate que du phosphate naturel, les recettes d'exportation du Naagel seront de plus en plus sensibles aux fluctuations des prix de l'acide sulfurique. Par conséquent, le pays aura de plus en plus intérêt à s'assurer une source stable d'acide sulfurique à des prix avantageux. Enfin, le Naagel produira d'importantes quantités de phosphogypse qu'il devra soit éliminer, soit retraiter. Sachant que la production d'acide phosphorique doit augmenter de 0,5 million de tonnes par an, il faudra chaque année se débarrasser de 2,75 millions de tonnes de phosphogypse de plus. Le procédé Müller-Kühne serait intéressant car il permettrait à la fois de produire de l'acide sulfurique et de résoudre le problème que soulève l'élimination du phosphogypse.

B. Arguments en faveur d'un accroissement de la production de matériaux de construction

Bien que le Naagel s'intéresse surtout au recyclage du phosphogypse pour obtenir de l'acide sulfurique, le gouvernement a d'autres raisons d'envisager d'adopter le procédé Müller-Kühne. En effet, bien que les exportations aient augmenté dans certains secteurs à la suite du programme d'investissements, le Naagel est aux prises avec un chômage chronique. En outre, on ne peut pas s'attendre à ce que ses recettes d'exportation continuent à augmenter au même rythme qu'au cours de la dernière décennie, si bien que la lutte contre le chômage devra s'inscrire dans le cadre de restrictions financières. Par conséquent, le Naagel doit envisager de modifier ses programmes d'investissement. Il lui faudra privilégier davantage les secteurs industriels à forte intensité de main-d'oeuvre, au détriment des secteurs à forte intensité de capital. Le bâtiment étant un secteur tout indiqué pour ces investissements, il est probable qu'il en bénéficiera. Lorsqu'il se penchera sur la question de savoir s'il est

souhaitable et nécessaire d'entreprendre des programmes de construction de grande ampleur, le Naagel devra garder présent à l'esprit que l'offre de matériaux est le facteur qui risque le plus de poser un problème mais qu'il est possible de remédier à ce problème grâce au phosphogypse.

Si le Naagel essaye de stimuler le secteur du bâtiment, il se heurtera très probablement à des pénuries de matériaux de construction. Par exemple, il a toujours dû importer du ciment pour faire face à la demande et bien qu'il se soit fixé pour objectif de parvenir à l'autosuffisance dans ce domaine, sa production n'a pas, en règle générale, augmenté aussi vite que sa consommation. Etant donné que la construction de nouvelles cimenteries est prévue, il est possible qu'il parvienne à satisfaire cette demande d'ici à la fin des années 80. Toutefois, le surcroît de production pourrait facilement être absorbé par un programme de construction de grande ampleur. Pour faire la soudure, on pourrait transformer les quantités croissantes de phosphogypse disponibles dans le pays en ciment, en produits intermédiaires à base de plâtre ou en blocs de construction à base de cendres volantes.

C. Aspects économiques du retraitement du phosphogypse au moyen du procédé Müller-Kühne au Naagel

Comme on le montre dans les paragraphes qui suivent à propos du Naagel, le coût des matières premières et les prix des produits influent de façon décisive sur la rentabilité d'une usine exploitant le procédé Müller-Kühne.

Dans le cadre de sa politique visant à développer ses ventes à l'étranger et à accroître la valeur de ses recettes d'exportation, le Naagel a cherché à augmenter sa production d'acide phosphorique. Pour atteindre cet objectif, il s'est rendu compte qu'il avait intérêt à ne plus dépendre du soufre importé. L'un des moyens d'y parvenir était de tirer parti de sa production croissante de phosphogypse. Grâce au procédé Müller-Kühne (voir section IV.B.1), le Naagel pouvait remplacer l'acide sulfurique obtenu à partir du soufre importé par de l'acide sulfurique produit à partir du phosphogypse, mais il lui fallait déterminer si cette solution serait rentable.

Vers le milieu des années 70, le Naagel a entrepris une étude de faisabilité économique pour savoir si le procédé Müller-Kühne résoudrait de façon satisfaisante le problème que soulève la nécessité d'importer du soufre. Cette étude a permis d'établir que les usines d'acide phosphorique du pays pouvaient être facilement modifiées de manière à obtenir le type de phosphogypse nécessaire

Figure 3. Production de phosphate naturel et d'acide phosphorique

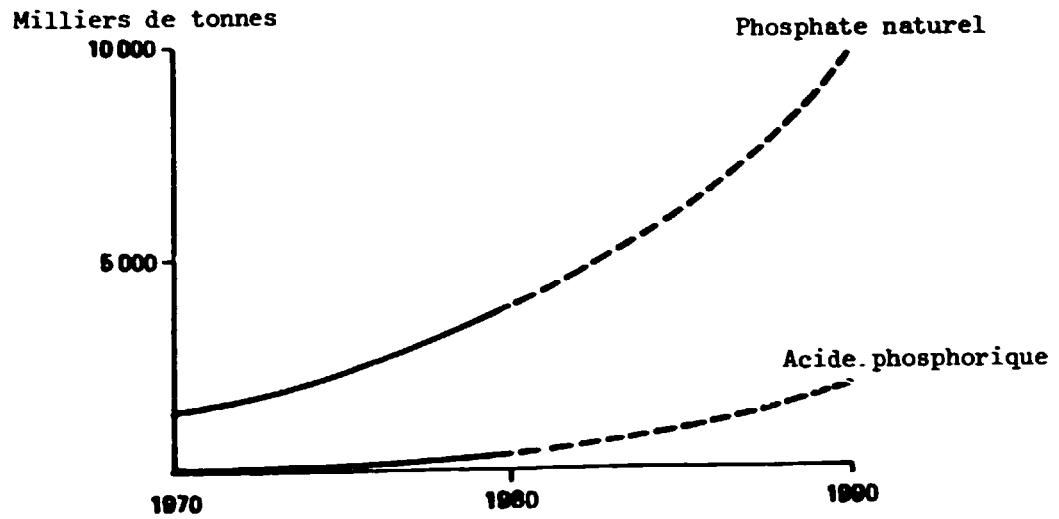
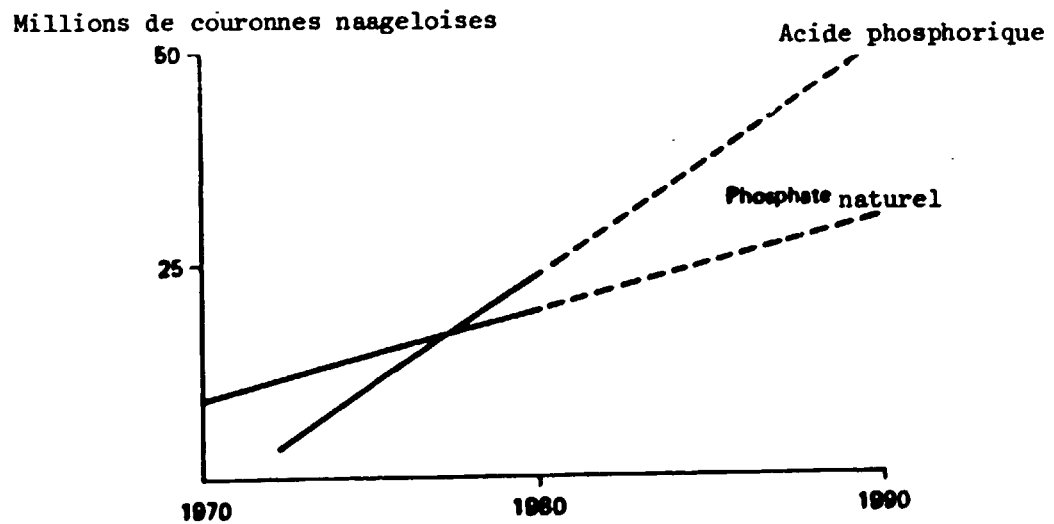


Figure 4. Valeur des exportations de phosphate naturel et d'acide phosphorique



Note: Les pointillés correspondent aux prévisions

pour le procédé Müller-Kühne. Les modifications nécessaires pouvaient, moyennant un coût minimum, être apportées tant aux usines existantes qu'à celles qu'on était en train de concevoir et de construire. Toutefois, le procédé Müller-Kühne consomme du coke et produit non seulement de l'acide sulfurique mais également du ciment. Ces deux facteurs ont soulevé des problèmes pour déterminer si le Naagel aurait ou non intérêt à investir dans des unités de traitement Müller-Kühne.

1. Faut-il importer du coke ou du soufre ?

Le procédé Müller-Kühne permet d'obtenir de l'acide sulfurique à partir du phosphogypse mais requiert du coke, produit qui n'est pas disponible au Naagel. En conséquence, la question qui se pose est de savoir s'il serait avantageux pour le pays de se mettre dans l'obligation d'importer du coke pour se libérer de l'obligation d'importer du soufre.

Dans l'étude de faisabilité, on envisageait la construction d'une usine ayant une capacité de production annuelle de 330 000 tonnes d'acide sulfurique et de 330 000 tonnes de ciment. Au moment où l'étude a été réalisée, les importations de soufre nécessaires pour produire 330 000 tonnes d'acide sulfurique auraient coûté 2 464 000 couronnes naageloises (CN). Les importations de coke nécessaires pour produire la même quantité d'acide à partir du phosphogypse auraient coûté 1 700 000 CN. Par conséquent, le Naagel aurait réduit ses dépenses d'importation en adoptant le procédé Müller-Kühne, c'est-à-dire en important du coke plutôt que du soufre.

Etant donné que les prix tant du coke que du soufre ont beaucoup évolué au cours des décennies écoulées, il y a lieu de prendre en considération dans une certaine mesure l'évolution future possible. Au moment où l'étude a été réalisée, le prix du soufre se situait dans le tiers inférieur de la fourchette enregistrée au cours des 10 années précédentes. Le prix du coke en revanche augmentait rapidement et était plus élevé que jamais. Si cette augmentation se poursuivait, on pouvait s'attendre à ce que l'importation de coke devienne la solution la plus coûteuse. Le Naagel pensait toutefois pouvoir obtenir des contrats de livraison à long terme à des prix inférieurs à ceux utilisés pour calculer les avantages du coke. En revanche, il n'était guère probable que le soufre devienne plus avantageux à la longue, étant donné que les prix utilisés aux fins du calcul étaient déjà relativement bas. En outre, la conclusion d'un contrat de livraison à long terme assurerait au moins la stabilité des prix, ce qui est un avantage important en soi. Toutefois, il n'a pas été nécessaire d'analyser ce problème

de façon plus approfondie principalement parce qu'un obstacle plus important encore s'opposait à une exploitation rentable du procédé Müller-Kühne au Naagel. En effet, en raison de la politique alors suivie par le pays pour la fixation des prix du ciment, il était impossible de réaliser un bénéfice au moyen de ce procédé.

2. Politique de fixation des prix du ciment

Le procédé Müller-Kühne produit simultanément du ciment et de l'acide sulfurique. Par conséquent, il n'est pas possible de comparer directement le coût de production de l'acide obtenu à partir du phosphogypse avec celui de l'acide obtenu à partir du soufre. Les auteurs de l'étude de rentabilité n'ont pas cherché à imputer une partie des dépenses d'investissement et des coûts de production à l'acide sulfurique et le reste au ciment mais plutôt à répondre à la question de savoir si la valeur des marchandises produites justifiait les investissements que représentait la création d'une usine Müller-Kühne.

L'étude a permis de déterminer que le coût de production d'une tonne d'acide sulfurique et d'une tonne de ciment s'élèverait à 27,37 CN. Ce chiffre, qui est valable pour une usine capable de produire quotidiennement 1 000 tonnes de chaque produit et dont les capacités seraient pleinement utilisées, comprend le remboursement d'un prêt suffisant pour couvrir le coût initial des travaux de construction et du matériel ainsi que les dépenses de mise en route. On a supposé que le taux d'intérêt sur ce prêt serait de 8 %. Etant donné que l'acide sulfurique n'était pas destiné à être commercialisé, on ne pouvait pas se baser sur son prix de vente pour en déterminer la valeur. On a retenu à la place le coût de production actuel de l'acide obtenu à partir du soufre, soit 14 CN par tonne. Le prix fixé par le gouvernement pour le ciment produit par les cimenteries locales étant de 7,20 CN par tonne, on peut donc considérer que la valeur totale d'une tonne d'acide sulfurique et d'une tonne de ciment obtenu à partir du phosphogypse serait de 21,20 CN, soit 6,17 CN de moins que le coût de production (27,37 CN). Dans ces conditions, la conclusion qui s'imposait était que la production d'acide sulfurique au moyen du procédé Müller-Kühne ne serait pas rentable. Toutefois, les chercheurs ont estimé que ce résultat pouvait être dû au fait que les prix fixés par le Naagel pour le ciment ne correspondaient pas à la valeur réelle de ce produit.

Le prix fixé pour le ciment local était inférieur de plus de la moitié au prix du ciment importé. Les cimenteries étaient en mesure d'accepter ce prix parce que la totalité de leur production était assurée par des usines entièrement amorties au moment où l'étude a été effectuée. Dans le cas d'une usine Müller-Kühne, qui

en fait serait une nouvelle cimenterie, il faudrait que le prix du ciment soit suffisant pour amortir les investissements. Le ciment produit par la nouvelle "cimenterie" Müller-Kühne serait de qualité égale au ciment importé et pourrait donc remplacer celui-ci à quantité égale.

On a donc proposé dans cette étude de verser aux nouveaux producteurs de ciment un prix égal au prix du ciment importé. Sur cette base (15 CN par tonne), la valeur totale d'une tonne d'acide sulfurique et d'une tonne de ciment serait de 29 CN, ce qui suffirait à couvrir les coûts de production et les dépenses d'investissement (27,37 CN par tonne). On a fait remarquer qu'en réalité, le procédé Müller-Kühne permettrait d'obtenir non pas un seul mais deux produits qui autrement devraient être importés, à savoir le ciment et l'acide sulfurique. Etant donné que le Naagel souhaite parvenir à satisfaire lui-même la totalité de ses besoins en ciment et est désireux de s'industrialiser, la proposition tendant à accorder aux nouveaux producteurs de ciment un prix plus favorable qui est avancée dans l'étude mérite d'être sérieusement prise en considération.

D. Coûts de production d'une unité Müller-Kühne d'une capacité de 1 000 tonnes par jour

On a estimé que le montant total des frais d'exploitation d'une usine Müller-Kühne d'une capacité de production annuelle de 330 000 tonnes de ciment et de 330 000 tonnes d'acide sulfurique s'élèverait à 9 033 000 CN par an. Pour calculer ce montant, qui comprend l'amortissement financier d'un prêt d'investissement initial de 26 100 100 CN assorti d'un taux d'intérêt de 8 %, on a supposé que les capacités seraient pleinement utilisées. La répartition des frais d'exploitation est présentée en détail dans les paragraphes qui suivent et elle est également résumée dans le tableau récapitulatif qui vient après cet exposé. En supposant qu'il faille attendre trois ans avant que les capacités de production de l'usine soient pleinement utilisées, les investissements nécessaires s'élèveraient à 29 650 000 CN. Le supplément de 3 550 000 CN serait nécessaire pour combler le déficit d'exploitation au cours des deux premières années.

1. Investissements initiaux

Les dépenses d'investissement initiales englobent les travaux de génie civil, la construction des bâtiments, l'achat du matériel, les versements au titre des transferts de technologie et les frais de mise en route. On a calculé qu'elles s'élèveraient au total à 26 100 000 CN et que 75 % de ce montant devrait être

dépensé en monnaies étrangères. Leur ventilation est indiquée dans le tableau 14.

Tableau 14

Frais de premier établissement

<u>Poste de dépense</u>	<u>Coût en CN</u>
Travaux de construction et de génie civil	3 000 000
Matériel	17 900 000
Services d'ingénierie et honoraires	1 600 000
Frais de mise en route	3 600 000
Prêt initial nécessaire	<u>26 100 000</u>
Charges financières annuelles	3 748 000

Les travaux de génie civil et les bâtiments seraient amortis sur une période de 20 ans. Tous les autres coûts devaient être amortis sur une période de 10 ans. Dans les deux cas, on s'est fondé sur des taux d'intérêt annuels de 8 %. Sur cette base, le montant total des versements annuels (intérêts et remboursement) s'élèverait à 3 748 000 CN.

2. Matières premières et fournitures

Comme l'indique le tableau ci-après, le coût total annuel des matières premières et des fournitures s'élèverait à 1 814 000 CN.

Tableau 15

Matières premières et fournitures nécessaires

<u>Article</u>	<u>Quantités nécessaires</u> (en tonnes)	<u>Prix par tonne</u>	<u>Coût total annuel</u>
Phosphogypse	700 000	-	-
Sable et argile	97 000	0,5	48 500
Coke	34 000	50,0	1 700 000
Matériel et fournitures divers			<u>65 000</u>
Coût annuel des matières premières et des fournitures			1 813 500

3. Main d'oeuvre

On a estimé qu'il faudrait, toutes catégories confondues, 150 employés au total pour couvrir les besoins en main-d'oeuvre. Sur la base d'un salaire annuel moyen de 2 000 CN par employé, y compris les impôts et les charges sociales, le coût annuel de la main-d'oeuvre s'élèverait à 330 000 CN.

4. Energie et eau

L'exploitation du procédé Müller-Kühne nécessite de la vapeur, de l'électricité, de l'eau de refroidissement et du gaz. Le gaz et l'électricité seraient fournis par les services publics de distribution. Le prix du kw/h indiqué dans le tableau 16 comprend, outre le prix de l'électricité proprement dite, les frais de branchement initial, les taxes et les redevances forfaitaires correspondant aux services fournis. Les dépenses totales annuelles d'énergie et d'eau s'élèveraient à 1 582 000 CN.

Tableau 16

Dépenses d'énergie et d'eau

<u>Poste de dépenses</u>	<u>Quantité nécessaire</u>	<u>Coût par unité</u> (en CN)	<u>Coût total annuel</u>
Vapeur (en tonnes)	100 000	0,813	81 300
Electricité (kw/h)	71 x 106	0,01426	884 660
Eau de refroidissement (m3)	33 x 106	0,003	99 000
Gez naturel (Nm3 à 10,5 kcal/Nm3)	63 x 106	0,0082	<u>516 600</u>
Dépenses annuelles d'énergie et d'eau			1 581 560

5. Capital circulant

Pour calculer les besoins en capital circulant, on s'est basé en gros sur l'équivalent de deux mois d'approvisionnement en matières premières et en matériel divers et d'un mois de salaire pour les employés et sur la valeur de la production obtenue en 15 jours. La valeur assignée aux produits finis (ciment et acide sulfurique) correspond au coût de production sans les charges financières. Sur cette base, ces besoins s'élèveraient à 600 000 CN. On a supposé que ce montant serait financé par le déficit, moyennant un taux d'intérêt de 8 %, ce qui entraînerait une charge financière annuelle de 48 000 CN. Les besoins en capital circulant sont indiqués dans le tableau 17.

Tableau 17

Besoins en capital circulant

<u>Poste de dépense</u>	<u>Valeur (en NC)</u>
Matières premières	285 000
Matériel et fournitures divers	10 000
Sacs de ciment	40 000
Salaires	30 000
Produits finis	235 000
Total	600 000
Charge financière annuelle	48 000

6. Autres frais

On a supposé que les frais d'entretien s'élèveraient à 5 % des frais de premier établissement, les frais généraux à 15 % du montant versé chaque année sous la forme de salaires*, et les frais d'assurances à 0,6 % des frais de premier établissement. Ces coûts ainsi que ceux mentionnés dans les paragraphes précédents apparaissent dans le tableau 18.

* Le pourcentage retenu pour les frais généraux dans la présente étude (15 % des salaires) est beaucoup plus faible que celui utilisé dans l'étude sur le Dalmar (150 % du coût de la main-d'oeuvre). Cela s'explique par le fait qu'ils n'ont pas été calculés de la même façon. Le cas du Dalmar n'a pas fait véritablement l'objet d'une étude de rentabilité mais simplement d'une étude préliminaire. Ainsi, par exemple, au lieu d'établir des budgets détaillés pour le personnel administratif et le personnel de gestion, on s'est contenté de répercuter les coûts correspondants sur les frais généraux.

Tableau 18

Etat récapitulatif

<u>Objet de dépenses</u>	<u>Coût total annuel (CN)</u>	<u>Coût de production pour 1 tonne de ciment et 1 tonne d'acide sulfurique</u>
Matières premières et fournitures	1 814 000	5,497
Main-d'oeuvre	330 000	1,000
Energie et eau	1 582 000	4,794
Amortissement de l'emprunt initial	3 748 000	11,357
Financement du capital circulant	48 000	145
Entretien	1 305 000	3,955
Frais généraux	50 000	151
Assurances	156 000	473
Total	9 033 000	27,372

E. Conclusion - Intérêt du procédé Müller-Kühne

Le chiffre de 27,37 CN mentionné plus haut pour le coût de production d'une tonne d'acide sulfurique et d'une tonne de ciment a été obtenu en se basant sur l'hypothèse que les capacités de production de l'usine seraient pleinement utilisées dès la première année. Or, il est plus réaliste d'escompter que cela ne sera pas le cas avant la troisième année. En conséquence, il faudrait, pour rembourser le montant total des investissements nécessaires (29 650 000 CN), que la valeur totale d'une tonne de ciment et d'une tonne d'acide sulfurique atteigne 29,01 CN. En attribuant une valeur de 14 CN par tonne à l'acide sulfurique et de 15 CN par tonne au ciment, cela serait possible. Toutefois, on ne disposerait d'aucune marge permettant soit de réaliser un bénéfice, soit de faire face à l'éventualité d'une sous-utilisation des capacités ou d'une évolution défavorable du coût des apports ou du prix des produits. En revanche, les économies que l'usine d'acide phosphorique permettrait de réaliser sur les coûts d'évacuation et de stockage du phosphogypse ne sont pas évaluées dans l'étude.

Même si la Naagel permettait à une usine Müller-Kühne de vendre sa production de ciment à un prix équivalent à celui du ciment importé, celle-ci ne serait que marginalement rentable dans le meilleur des cas. Depuis que l'étude a été effectuée, les taux d'intérêt ont augmenté de façon substantielle et il serait sans doute impossible d'obtenir en ce moment un prêt à long terme avec un taux

d'intérêt de 8 %. Or ce taux correspond au coût d'opportunité actuel de l'argent au Naagel. Selon toute vraisemblance, il ne serait donc pas rentable d'investir dans une usine Müller-Kühne dans ce pays à l'heure actuelle.

Etant donné qu'il consomme beaucoup d'énergie, le procédé Müller-Kühne est surtout intéressant dans les régions qui ont accès à des sources d'énergie bon marché ou dans lesquelles l'énergie est gaspillée. Comme on l'a vu, ce n'est pas le cas au Naagel puisqu'il faudrait importer du coke pour retraiter le phosphogypse. Comme on l'a montré dans la section VIII.2.f) à propos du Dalmar, pays qui cherche lui aussi à utiliser ses ressources en phosphogypse, l'accès à une source d'énergie bon marché influe sur la rentabilité du procédé Müller-Kühne. Dans le cas du Dalmar, une telle usine ne serait rentable que si l'on remplaçait le coke par un autre combustible bon marché disponible localement, à savoir le coke de pétrole. Le Naagel a dû quant à lui renoncer finalement à l'idée de créer sa propre source d'acide sulfurique parce qu'il ne disposait pas d'une source locale de combustible bon marché.

VIII. Recommandations

- 1) Les dossiers d'appels d'offres établis en vue de la construction de nouvelles usines devraient prescrire un procédé permettant d'obtenir du phosphogypse recyclable.
- 2) Dans le cas des usines existantes, il conviendrait d'entreprendre une étude de faisabilité afin de déterminer les modifications éventuelles à apporter (perfectionnement des agitateurs dans la section d'attaque, par exemple) pour obtenir du phosphogypse plus facile à réutiliser.
- 3) Une étude de marché devrait être entreprise pour déterminer les débouchés existants et potentiels pour les produits à base de gypse dans la région environnante.
- 4) Des contacts devraient être établis avec des instituts s'occupant des matériaux de construction, des sociétés d'entrepreneurs de construction et d'autres organisations similaires en vue de diffuser des renseignements sur les produits à base de gypse.
- 5) Les gouvernements devraient limiter à 16 pCi/g le degré maximum de radioactivité admissible pour le gypse et assurer le respect de cette norme.
- 6) Les entreprises devraient mesurer systématiquement le degré de radioactivité de leur phosphogypse et faire en sorte qu'il ne dépasse pas 16 pCi/g.
- 7) Les entreprises devraient essayer d'employer de la chaleur résiduelle pour la fabrication et pour le séchage de leurs produits à base de gypse.
- 8) Si l'usine d'acide phosphorique se trouve dans une région où l'énergie est abondante et bon marché, le phosphogypse qu'elle produit peut être transformé en produits chimiques et en ciment et/ou en matériaux de construction. Si l'énergie est coûteuse, la fabrication de matériaux de construction sera sans doute la filière la plus intéressante.
9. Les pays en développement pourront envisager de faire appel à l'ONUDI pour mettre en place des arrangements en matière de transfert de technologie avec des entreprises des pays développés.

REFERENCES

- (1) Sweeney, John W. and Bobby J. Timmons. "Availability and Potential Utilization of By-Product Gypsum in Florida Phosphate Operations." Geological Survey, Iowa. Publication Information Circular No. 5, p. 89 à 97, février 1973.
- (2) The British Sulphur Corporation, communication privée.
- (3) Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants. "Ionizing Radiation : Sources and Biological Effects." Rapport à l'Assemblée générale pour 1982 et annexes; numéro de vente E.82.IX.8.
- (4) Roskill Information Services Ltd., The Economics of Gypsum. Troisième édition, 1983.
- (5) May, Alexander and John Sweeney. "Evaluation of Radium and Toxic Element Leaching Characteristics of Florida Phosphogypsum Stockpiles". US Department of the Interior, Bureau of the Mines Report of Investigations 8776, 1983.
- (6) May, Alexander and John Sweeney. "Assessment of Environmental Impacts Associated with Phosphogypsum in Florida". US Department of the Interior, Bureau of the Mines Report of Investigations. 8639, 1982.
- (7) Fédération des industries chimiques de Belgique. Communication privée.
- (8) Roskill Information Services Ltd. Gypsum and Anhydrite, World Survey of Production and Consumption with Special Reference to Future Demand and Prices. Londres, février 1972.
- (9) Roskill Information Services Ltd. The Economics of Gypsum. Deuxième édition, 1978. Londres.
- (10) Easin, M., M. Hanif and M.N. Islam. Studies on the Setting of Plaster of Paris Prepared from Gypsum Waste of T.S.P. Fertilizer Complex. Bangladesh J. Sci. Ind. Res. XIV(1-2), 1979.
- (11) US Department of the Interior, Bureau of the Mines Minerals Yearbook, tirages préliminaires de 1982 et 1983.
- (12) Natural Environment Council, Institute of Geological Sciences, World Mineral Statistics 1977-1981, HMS Office, Londres 1983.
- (13) The British Sulphur Corporation Ltd. World Fertilizer Atlas, 7ème édition, Londres, 1983.
- (14) Zhen Hua, Wang Fuyun, Huang Yinghong. "Steam-Cured Fly-Ash Concrete Masonry System for Residential Construction in Shanghai." Document établi pour l'Atelier sur les matériaux et les systèmes de construction peu coûteux, 21 octobre-4 novembre 1983, Beijing-Hangzhou, Chine, China Building Information Centre, 19 Che Gong Zhuang Street, Beijing, Chine.

(15) Phosphoric Acid. Volume 1, Part I. Ed. A.V. Slack. Edward Arnold (Publishers) Ltd., 501 p., Londres, 1968.

(16) New Developments in Phosphate Fertilizer Technology. Actes de la Conférence technique de 1976 de l'Association internationale des fabricants de superphosphates et d'engrais phosphatés, La Haye, Pays-Bas, 13-16 septembre 1976. Edité par L.J. Carpenter. Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.

(17) Nissan Chemical Industries Ltd. "Nissan Phosphoric Acid Process in Mini Fertilizer Plants." 14 p. (By N. Yamanaka). Document établi pour le Séminaire de l'ONUUDI sur les mini-usines d'engrais, Lahore, Pakistan, 15-20 novembre 1982.

(18) Donau Chemie AG. The Donau Chemie Phosphogypsum Process. 10 p. Vienne, Autriche, 1984.

(19) Voest-Alpine AG. Recycling of By-Product Gypsum. Linz, Autriche (non daté).

(20) Voest-Alpine AG. Information about Ammonium-Sulfate Plants. 13 p. Document établi pour le Séminaire de l'ONUUDI sur les mini-usines d'engrais, Lahore, Pakistan, 15-20 novembre 1982.

(21) Nawaz, Dr. A. Shah. Manufacture of Ammonium Sulphate from Gypsum at Low Capacities. 6 p. (non publié).

(22) Weterings, K. "The Utilization of phosphogypsum." Proceedings No. 208, The Fertilizer Society. Londres, 1982.

(23) Société chimique Prayon-Rupel. Brochures techniques et communication privée (1984).

Nous vous serions reconnaissants, pour nous guider dans l'organisation et l'orientation de notre programme de publications, de bien vouloir remplir le questionnaire ci-dessous et de le retourner à l'adresse suivante :

ONU
Division des études industrielles
P.O. Box 300, A-1400 Vienne, Autriche

QUESTIONNAIRE

Utilisation du phosphogypse produit par l'industrie des engrais :

(veuillez cocher la case désirée)

oui non

- 1) Avez-vous trouvé utiles les renseignements contenus dans cette étude ?
- 2) L'analyse était-elle correcte ?
- 3) Vous a-t-elle apporté des informations nouvelles ?
- 4) Etes-vous d'accord avec la conclusion ?
- 5) Etes-vous d'accord avec les recommandations ?
- 6) Avez-vous apprécié la présentation et le style ?
- 7) Désirez-vous figurer sur la liste des destinataires de nos publications ?

Si oui, précisez les domaines qui vous intéressent

- 8) Désirez-vous recevoir la dernière liste des documents établis par la Division des études industrielles ?
- 9) Avez-vous d'autres commentaires ?

Nom :
(en majuscules)
Institution
(prière de donner l'adresse complète)
Date :