

Traitements thermiques / Heat treatment

Optimisation du traitement thermique d'un phosphate application au phosphate du bassin gantour au maroc

M. El Ouardi¹, I. Mrani¹, M. Anoua¹ et H. Chehouani²

¹ Laboratoire de Mécanique et Énergétique, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Chouaib Doukkali BP 20, El Jadida, Maroc
e-mail : m.elouardi@yahoo.fr

² LIMP, Laboratoire de l'Instrumentation, Métrologie & Procédés, BP 549, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Gueliz, Marrakech, Maroc

Mots-clés :

Phosphates; gantour; maroc;
matière organique;
granulométrie; calcination;
mélange; refroidissement

Key words:

Phosphate; gantour; morocco;
organic matter; granulometry;
calcination; mixture; cooling

Résumé – Un protocole de traitement thermique d'un minerai phosphaté visant l'optimisation des dépenses de l'énergie destinée à la calcination est ici présenté. Nous avons mené une étude comparative de la calcination effectuée de deux manières différentes sur du phosphate brut. Cette méthode a été appliquée pour enrichir le phosphate sédimentaire issu d'un nouveau site du Bassin des Gantour (Maroc). Dans un premier temps, nous avons optimisé la température de calcination et le temps de séjour. En effet, les résultats montrent que le traitement à 800 °C pendant 30 min donne un minerai de meilleure concentration en phosphate. Il permet de diminuer le carbone organique et le dioxyde de carbone respectivement de 1,4 % à 0,15 % et 6,6 % à 1,8 %. Ainsi que l'augmentation de la teneur en P₂O₅ de 30,39 % à 34,23 %. De plus, il a été constaté un impact du refroidissement sur la distribution granulométrique. Dans un deuxième temps, il apparaît que la procédure de calcination suivie d'un refroidissement par 33 % de phosphate de même source (mélange à chaud) peut avoir d'importantes retombées sur l'économie de l'énergie et un gain de productivité tout en préservant l'environnement.

Abstract – Optimization of the heat treatment of phosphate application to the gantour phosphate basin / Morocco. A protocol of thermal treatment of ore phosphate for optimization of the expenditure related to the energy needed for the calcination is here presented. We have completed a comparative study of the calcination carried out in two different ways on crude phosphate. This step was applied to enrich sedimentary phosphates coming from a new site of the Gantour Basin. We have firstly optimized temperature and calcination time. Indeed, the results show that the treatment at 800 °C during 30 min gives a phosphate of a better concentration. It permits to decrease the organic carbon and the carbon dioxide respectively from 1.4% to 0.15% and 6.6% to 1.8% and the increase of the phosphate content from 30.39% to 34.23%. Moreover, it has been noted an impact of the cooling on the granulometric distribution. In a second time, it appeared that the procedure of calcination followed by a cooling using 33% of the same phosphate source (hot mixture), can have an important outcome on the energy saving and a gain of productivity while preserving the environment.

Dans la plupart des travaux [1–3], l'élimination de la matière organique et des carbonates par les procédés de calcination à base de lit fluidisé nécessite un apport énergétique important. La calcination qui se fait généralement à une température élevée suivie d'un refroidissement jusqu'à la température ambiante correspond à une perte d'énergie assez considérable. On est donc confronté à un problème d'optimisation du traitement thermique qui a pris ces dernières années une importance particulière en raison du coût élevé de l'énergie et des impératifs d'économie qui en découlent.

Cependant, la connaissance au préalable de la matière organique et des carbonates contenus dans le minerai phosphaté est très importante car elle permet de déterminer exactement le type de traitement approprié. Les différents aspects du traitement thermique des minerais phosphatés en fonction de leur teneur en P₂O₅ ont été étudiés par de nombreux auteurs [4–7]. Les gisements

marocains de phosphates subissent des opérations d'enrichissement de différents types suivant les spécificités granulométriques et chimiques. La calcination est une des méthodes de séparation physique qui peuvent être appliquées. Celle-ci est destinée à éliminer la matière organique et agit également sur les propriétés d'usage (composition, granulométrie, densité, porosité, surface spécifique, dureté, capacité calorifique, conductivité thermique. . .) [8]. Le temps, la température et les propriétés physicochimiques du phosphate étudié sont les principaux paramètres de calcination [9].

Dans ce travail, nous nous intéresserons à l'optimisation du coût énergétique par récupération de l'énergie perdue au cours du cycle de refroidissement. Nous proposons d'utiliser cette énergie dans la calcination d'une quantité déterminée de minerai de phosphate. Ainsi, il nous est apparu intéressant, dans un premier temps, de déterminer le temps de séjour et la température de calcination du minerai phosphaté, et dans un deuxième temps d'étudier les mélanges de phosphates à froid et à chaud.

Matière première utilisée et protocole de calcination

Le minerai de phosphate

Les gisements sédimentaires de phosphates naturels sont composés principalement d'apatite de formule générale : $M_{10}(ZO_4)_6X_2$ avec le plus souvent : $M = Ca, Sr, \dots, Z = P, As, Si, \dots, X = F, OH, Cl \dots$ Ils sont représentés surtout par les pôles fluorapatite-hydroxylée [$Ca_5(PO_4)_3(OH,F)$] et/ou fluorapatite carbonatée (appelée francolite) [$Ca_5(PO_4,CO_3,OH)_3(OH,F)$] [10]. Ces gisements sédimentaires peuvent contenir des apatites ayant une gamme très large de propriétés physiques et des caractéristiques chimiques et cristallographiques très variées, en raison des conditions géologiques et des altérations après dépôt [11].

En plus de la matrice principale contenant le phosphore, les gisements phosphatés contiennent des minéraux accessoires ou des impuretés de la gangue qui se différencient selon les conditions de sédimentation. Ces impuretés sont parfois géologiquement bien isolées sous forme de couches bien séparées ou intimement mélangées au minerai. Elles incluent, dans diverses combinaisons et concentrations, de la matière organique,

de la silice, des minéraux argileux, de la calcite, de la dolomie et des « oxydes hydratés » de fer et d'aluminium [12]. Elles ont une influence sur les processus de valorisation des phosphates et sur l'efficacité du phosphate naturel utilisé en application directe [12].

Données géologiques sur la zone étudiée

Le Maroc dispose des trois quarts de la réserve mondiale en minerais phosphatés et occupe la première place dans l'exportation. Les séries sédimentaires phosphatées marocaines recèlent des quantités relativement importantes de minéraux associés [13]. Les principaux faciès impliqués dans cette étude sont des phosphates sableux granulaires, des calcaires et dolomies, des marnes, argiles et silicifications diagénétiques intercalées. En terme de microfaciès, les phosphorites sont toujours des composites d'origine diversifiée (autochtone et/ou allochtone) [14]. Ces propriétés générales ont été décrites par Bilali et al. [15].

Les échantillons du minerai phosphaté étudié viennent du site de Bouchane à environ 40 km à l'est de la ville de Youssoufia. L'extraction se fait à ciel ouvert (Fig. 1).

Caractérisation physicochimique de la matière première

La répartition granulométrique a été réalisée par tamisage manuel à voie sèche avec une série de tamis de toile en Nylon (maille à trous ronds en progression géométrique). Cette étude a montré que la majeure partie de la masse globale se concentre dans la tranche de 125 μm à 500 μm . Cette distribution granulométrique figure dans le tableau 1.

Au laboratoire, l'échantillon représentatif du minerai phosphaté subit un traitement mécanique (broyage, homogénéisation et quartage) pour réduire les gros grains grâce à un broyeur à marteau avec des opérations successives portant sur les refus de la maille de 500 μm et un tamisage de la partie fine inférieure à 40 μm . Ainsi, on ne récupère que la poudre de granulométrie comprise entre 40 μm et 500 μm riche en phosphore [7].

La composition chimique de l'échantillon brut a été déterminée par volumétrie. Nous nous sommes intéressés aux éléments suivants C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO (Tab. 2). Le taux d'humidité est déterminé par un analyseur d'humidité MRS 120-3.

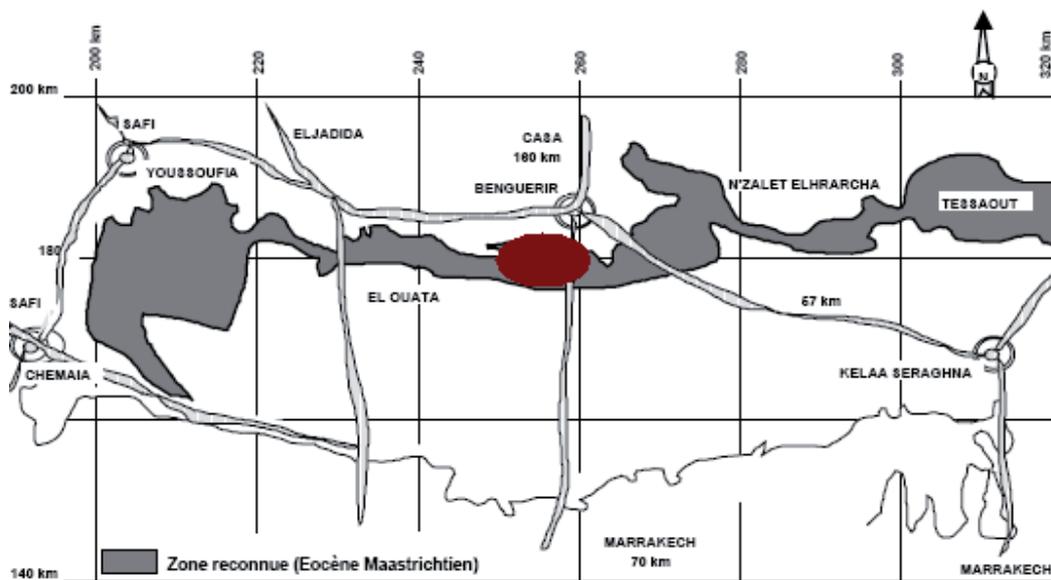


Fig. 1. Localisation géographique du gisement des phosphates du Bassin Gantour.

Fig. 1. Geographic location of the phosphate layers of the Gantour Basin.

Tableau 1. Distribution granulométrique de l'échantillon de phosphate brut.

Table 1. Granulometric distribution of the crude phosphate sample.

Maille (μm)	2000	1250	1000	800	500	315	250	200	160	125	80	40	<40
Refus (%)	3,32	2,68	1,61	7,18	26,83	15,94	10,66	10,83	7,88	7,75	2,27	1,9	1,12

Tableau 2. Composition chimique moyenne du minéral de phosphates du bassin Gantour avant la calcination.

Table 2. Average chemical composition of the Gantour phosphate ore before calcination.

Éléments	P ₂ O ₅	CaO	H ₂ O	C _{org}	CO ₂	Autres
% massique	30,39	48,20	5,6	1,4	6,60	7,81

La teneur en P₂O₅ et en CaO peut être améliorée par calcination. En effet, le traitement thermique permettra la déshydratation du phosphate et la réduction respective des teneurs en matières organiques (%C_{org}) et carbonates (%CO₂). Ces deux types d'impuretés sont responsables des difficultés survenues lors de la valorisation des phosphates naturels notamment pour la synthèse de l'acide phosphorique. À cet égard, la présence des composants organiques constitue un élément gênant : ils réduisent les sulfates en sulfures et entraînent par la suite une intense corrosion des réacteurs [16]. En outre, l'existence de ces composants organiques provoque la formation de mousses qui défavorisent le refroidissement après attaque par l'acide sulfurique. Ce qui provoque une augmentation de la température et de la viscosité et par suite

la formation de phosphogypses hémihydratés. Cela entraîne une mauvaise filtration qui affecte la qualité de l'acide phosphorique en diminuant le rendement chimique [17]. D'ailleurs, le carbone organique contamine également le matériel en donnant une couleur noire à l'acide produit et contribue ainsi à la pollution de l'environnement.

L'analyse minéralogique a été effectuée à l'aide d'un diffractomètre XPRT MPD Panalytical – Philips, à anticathode de cuivre ($\lambda_{\text{Cu}} = 1,5405 \text{ \AA}$). Nous nous sommes intéressés à la tranche broyée de granulométrie comprise entre 40 μm et 500 μm . Le diffractogramme révèle la présence des phases suivantes : la fluorapatite Ca₁₀(PO₄)₆F₂ (2θ : 32,2 ; 49,8 ; 25,8 ; 34,33 ; 53 ; 51,8 ; 48,4 ; 49,6 ; 28,2 ; 52,2), le quartz SiO₂ (2θ : 26,587 ; 50,1 ; 20,885) et les carbonates qui sont sous forme de dolomite CaMg(CO₃)₂ (2θ : 30,9) (Fig. 2). Notons que la dolomite, la calcite et le quartz peuvent présenter des interférences avec la fluorapatite. Les phases enregistrées sont dues à la nature exogangue de ces constituants, alors que les interférences de ces phases avec celle de la fluorapatite seraient dues à leur nature endogangue.

Les mesures thermiques (ATD-ATG) ont été réalisées à l'aide d'un appareil d'analyse

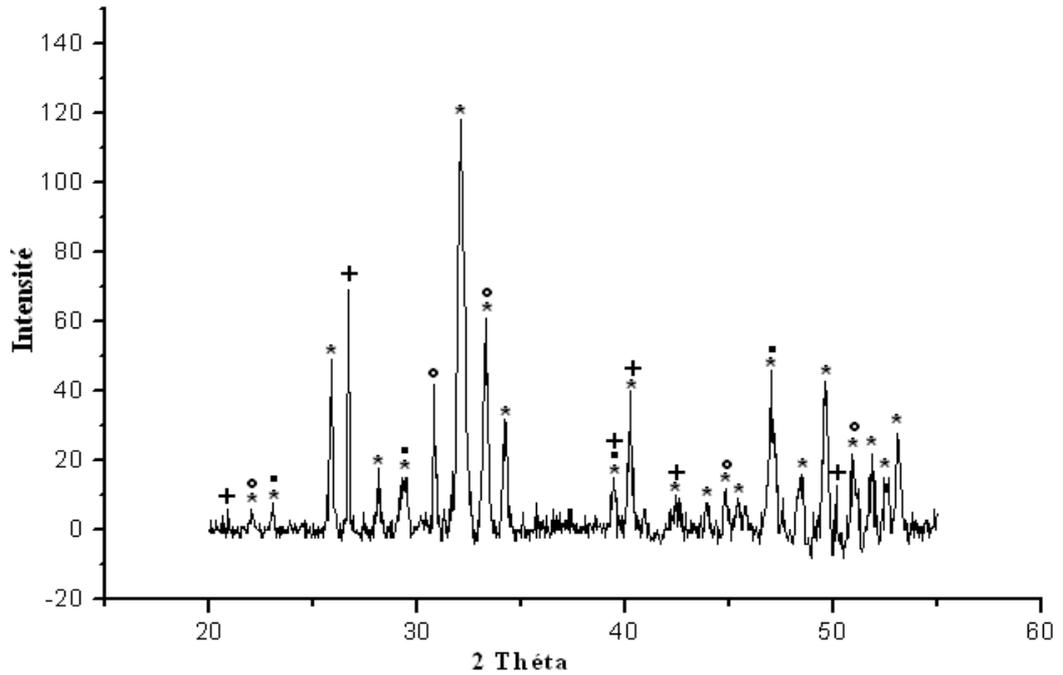


Fig. 2. Diffractogramme de RX d'un échantillon brut (* : Fluoroapatite, + : Quartz, ■ : Calcite, ° : Dolomite).

Fig. 2. X-ray diffractogram of a rough sample (*: Fluoroapatite, +: Quartz, ■: Calcite, °: Dolomite).

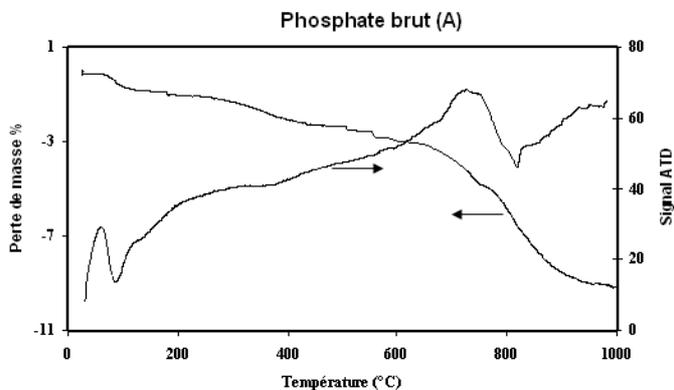


Fig. 3. Courbe ATD-ATG d'un échantillon brut.

Fig. 3. ATD-ATG curve for a crude sample.

thermique de type Labsys TM qui permet d'effectuer des analyses thermiques en mesurant les variations de masse et de température entre le matériau et un échantillon de référence (l'alumine). Ainsi, on peut déterminer la nature endothermique et/ou exothermique des différentes transformations qui ont lieu au sein du matériau lors du traitement thermique. Elles ont été effectuées sous air avec une vitesse de chauffe de 10 °C/min, de la température ambiante jusqu'à 1000 °C sur la tranche classifiée.

L'étude du comportement thermique a mis en évidence trois pertes de masses successives en relation avec trois domaines de températures, attribuées respectivement à l'eau d'adsorption, à l'eau de constitution, aux matières organiques et à la décomposition des carbonates [15].

- La déshydratation : Pic endothermique de faible amplitude attribué au départ de l'eau d'adsorption (humidité), observée de la température ambiante jusqu'à 100 °C (sommet situé vers 80 °C). Cette étape ne constitue pas une transformation majeure (1 à 2 %) et ne modifie pas la structure cristalline de l'apatite.
- La deuxième perte de masse (2 à 3 %) qui débute autour de 200 °C et s'étale jusqu'à 550 °C résulte certainement et simultanément de la superposition d'une réaction endothermique due au départ de l'eau structurale et à une réaction exothermique dont l'origine est la combustion des matières organiques volatiles.
- La troisième perte de masse se déclenche à partir de 550 °C. Elle est due à une continuité du domaine de faible exothermicité visible et qui a certainement pour origine la combustion de la matière organique résiduelle, avec un domaine de forte

endothéricité traduisant la décomposition des carbonates [calcite (CaCO_3) et la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)] avec libération de CO_2 .

Notons que la perte globale à 1000°C est de l'ordre de 9,2 %.

Procédures expérimentales

L'optimisation du temps de séjour et de la température de calcination a été effectuée selon les protocoles (1) et (2) ci-après, en suivant la variation des teneurs en éléments principaux (C_{org} , CO_2 , P_2O_5 , CaO) dans les échantillons calcinés. Les essais ont été effectués au laboratoire. Les échantillons représentatifs du phosphate classifié du bassin Gantour (granulométrie comprise entre $40\ \mu\text{m}$ et $500\ \mu\text{m}$) ont été placés dans une enceinte cylindrique verticale en inox (lit fixe), puis calcinés dans un four électrique à température réglable.

Protocole (1) : l'étude du temps de séjour de calcination est réalisée en introduisant des échantillons de phosphate dans un four à une température T . Toutes les cinq minutes, un échantillon est prélevé pour caractériser les compositions chimiques (C_{org} , CO_2 , P_2O_5 , CaO). La température T est comprise entre 600°C et 900°C et le temps total est de 40 min.

Protocole (2) : Sept échantillons sont placés dans un four à la température de 600°C . À chaque augmentation de la température de 50°C , un échantillon est prélevé, soumis au même type d'analyse. L'intervalle de température exploré est de 600°C à 900°C .

Dans ces deux protocoles, les échantillons ont été aérés par injection d'air d'une façon nominale afin d'éviter la perte de masse d'une apatite riche en phosphore, lors du refroidissement.

Protocole (3) : Pour étudier le refroidissement du phosphate par lui-même, on calcine un échantillon de 200 g de phosphate à la température de calcination T et pendant un temps de séjour t déterminés aux protocoles (1) et (2), puis on refroidit sous air atmosphérique. Cet échantillon est ensuite mélangé à froid (MF) avec une quantité de phosphate de même source et de même classification granulométrique. Le refroidissement par mélange à chaud (MC) se fait en mélangeant à la température T le phosphate calciné avec une quantité du phosphate de même propriété granulo-chimique.

Avant l'analyse chimique des compositions (C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO), on procède

à l'extinction par injection d'air et au tamisage pour éliminer la matière volatile adsorbée et la fraction granulométrique inférieure à $40\ \mu\text{m}$ pauvre en phosphore.

Résultats expérimentaux et discussions

Dans cette étude expérimentale, nous avons étudié le temps de séjour, la température de calcination et le mélange du phosphate à froid et à chaud afin d'optimiser l'énergie destinée à la calcination sans agir sur l'enrichissement.

Étude de la température de calcination

Le protocole expérimental (1) décrit précédemment, nous a permis d'étudier la variation de la composition en C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO en fonction de la température.

Les résultats sont résumés sur la figure 4.

La figure 4a montre que la teneur en carbone organique reste constante à sa concentration initiale (1,4 %) lorsque la température est comprise entre 600°C et 700°C . À 700°C , la décarbonatation commence et semble s'achever vers 800°C . Au-delà de cette température, le pourcentage de C_{org} reste quasi-constant et atteint une valeur minimale de l'ordre de 0,15 %. Par contre, le dioxyde de carbone (Fig. 4b) commence à se dégager à partir de 600°C et atteint une valeur minimale de l'ordre de 2 % à 800°C . Cette valeur reste relativement constante au-delà de cette température. Les teneurs respectives en P_2O_5 et CaO (Figs. 4d, 4c) varient de la même manière avec la température. On note une augmentation jusqu'à 800°C où les teneurs maximales atteintes sont respectivement 34 % en P_2O_5 et 54,56 % en CaO . Ces valeurs restent quasi-invariantes au-delà de cette température.

On conclut donc qu'à partir de 800°C , les valeurs de C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO deviennent sensiblement invariantes.

Étude du temps de calcination

L'étude du temps de séjour est d'une importance capitale dans toute optimisation de l'énergie destinée à la calcination. La figure 5 illustre la variation de la composition (C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO) en fonction du temps à différentes températures allant de 600°C jusqu'à 900°C .

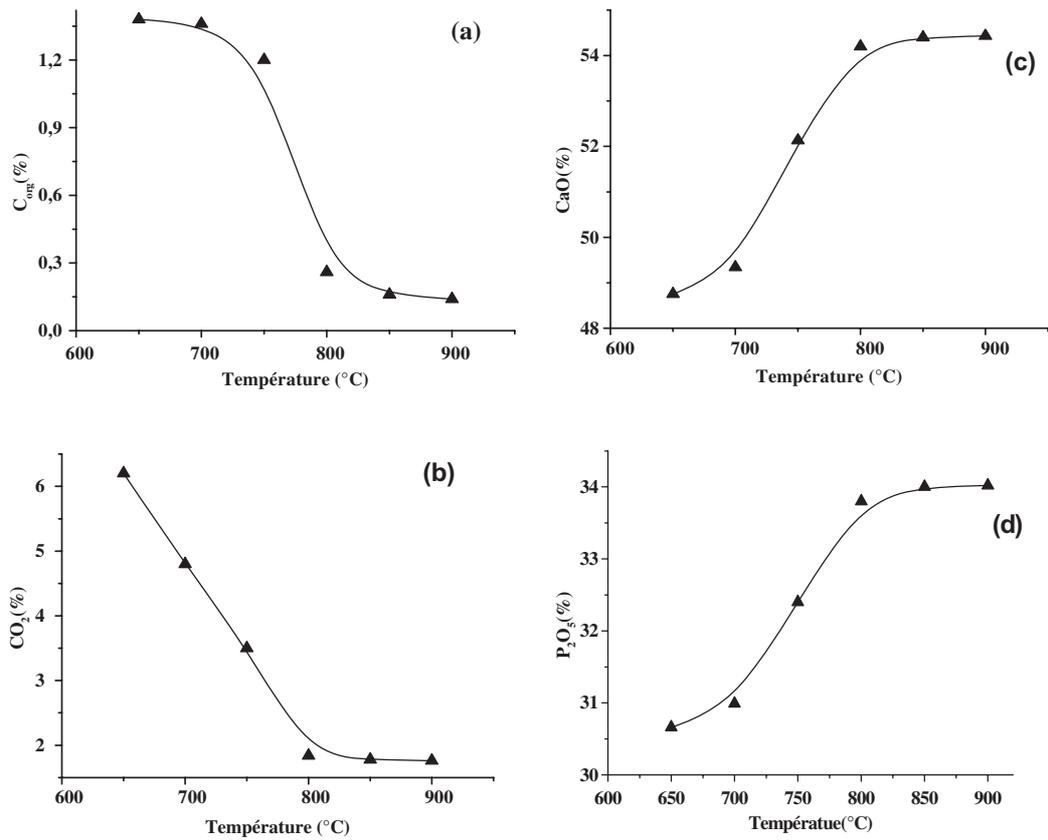


Fig. 4. Variation de C_{org} (a), CO_2 (b), CaO (c) et P_2O_5 (d) en fonction de la température.

Fig. 4. Variation of C_{org} (a), CO_2 (b), CaO (c) and P_2O_5 (d) vs. temperature.

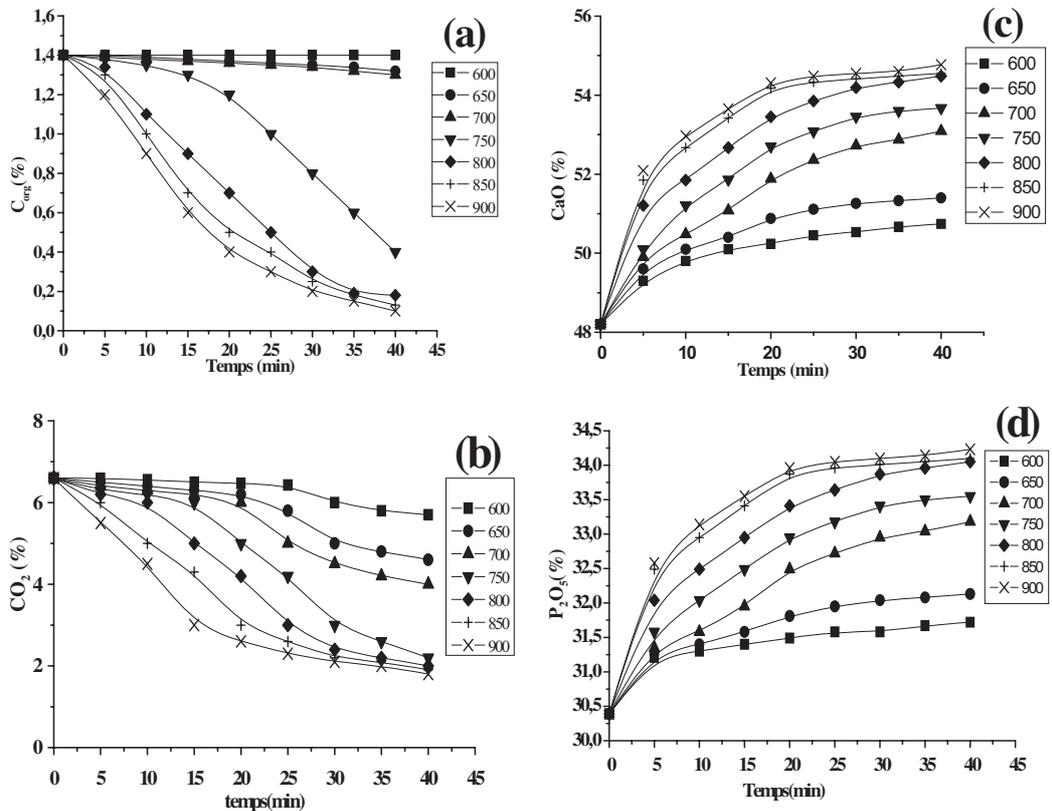


Fig. 5. Variation de C_{org} (a), CO_2 (b), CaO (c) et P_2O_5 (d) en fonction du temps entre 600 °C et 900 °C.

Fig. 5. Variation of C_{org} (a), CO_2 (b), CaO (c) and P_2O_5 (d) vs. time between 600 °C and 900 °C.

Comme nous l'avons vu précédemment, pour une température comprise entre 600 °C et 700 °C la teneur en carbone organique reste quasi-constante. Au-delà de 700 °C, la combustion de la matière organique devient mesurable et s'accélère avec la température. Elle atteint sa limite quasi-stationnaire au-delà de 30 min pour des températures supérieures à 800 °C (Fig. 5a). La teneur en C_{org} atteinte est d'environ 0,15 %.

La figure 5b montre que le dioxyde de carbone commence à se dégager à partir de 600 °C avec une vitesse assez remarquable. Au-delà de 800 °C et à partir d'un temps de maintien de 30 min, les courbes de variation du dioxyde de carbone sont très voisines de 2 %.

Les figures 5c et 5d montrent que les pourcentages en CaO et P_2O_5 varient en fonction de la température et du temps de la même manière. Ils atteignent des valeurs maximales quasi-constantes entre 850 et 900 °C après 30 min. Les valeurs stationnaires atteintes pour P_2O_5 et CaO sont 34,23 % et 54,77 % respectivement.

À noter que ces valeurs sont obtenues pour une température de calcination de 800 °C avec un temps de séjour de 30 min.

On conclut qu'au-delà de 800 °C et avec un temps de séjour de 30 min, les courbes de variation de C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO, présentent des profils quasi-identiques de faible pente et de vitesse d'enrichissement assez faible. Ceci nous indique que les teneurs en matière organique et carbonates deviennent mineures.

Le suivi de l'enrichissement du phosphate étudié en fonction de la température de calcination et du temps de séjour nous a permis de constater que :

- Entre 600 °C et 700 °C, la vitesse d'enrichissement varie assez peu, par déshydratation (endothermique) et combustion (exothermique) des matières organiques (Fig. 3) ; le premier processus se produit brutalement à 600 °C, entraînant la création de pores dans les grains, ce qui contribue à l'aération du phosphate pendant la calcination et facilite le dégagement de la matière volatile.
- À partir de 700 °C, la vitesse d'enrichissement augmente considérablement, car la réaction endothermique due à la décomposition des carbonates (Fig. 3) vient s'ajouter à la réaction d'oxydation de la matière organique. Ce phénomène est responsable du fort dégagement de dioxyde de carbone.

- Entre 800 °C et 900 °C, la vitesse d'enrichissement reste presque constante ; ce qui est traduit par la constance des teneurs en P_2O_5 , C_{org} , CO_2 et CaO. Cela apparaît évident puisque dans cet intervalle de température la perte de masse est très faible et le phénomène de décarbonatation est presque achevé à 800 °C avec un palier de 30 min. La teneur en CO_2 mesurée dans le phosphate calciné à 800 °C avec un palier de 30 min ne peut être expliquée que par le phénomène de recarbonatation de la fluoroapatite déjà observé par Blazy et al. [4]. Ces auteurs avaient expliqué ce résultat par une augmentation de paramètre de la maille de la fluoroapatite par insertion du carbone dans son réseau cristallin.

Refroidissement du phosphate par lui-même sous les conditions standard

L'étude de l'effet de la température et du temps de séjour nous a permis d'optimiser les conditions expérimentales d'enrichissement du phosphate par calcination en optant pour une température de calcination de 800 °C et un temps de séjour de 30 min. Dans ces conditions, nous proposons d'étudier certaines caractéristiques physico-chimiques des mélanges de ce phosphate à froid et à chaud afin de faire une comparaison avec celles du phosphate calciné.

Étude de la variation des éléments (C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO) en fonction du phosphate ajouté

La figure 6 donne l'évolution des teneurs en C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO en fonction du phosphate ajouté au phosphate calciné à froid et à chaud. L'écart des teneurs de ces deux mélanges augmente et atteint un maximum qui reste relativement invariant jusqu'à l'ajout d'une quantité de 33 % tout en gardant des teneurs acceptables. Pour des ajouts supérieurs à 33 %, cet écart diminue d'une façon remarquable et les teneurs en C_{org} , CO_2 , P_2O_5 et CaO obtenues deviennent supérieures aux valeurs utiles [18].

Caractéristiques du phosphate calciné et des mélanges de phosphate à froid et à chaud

Pour mettre en valeur la calcination du phosphate pendant le cycle de refroidissement du

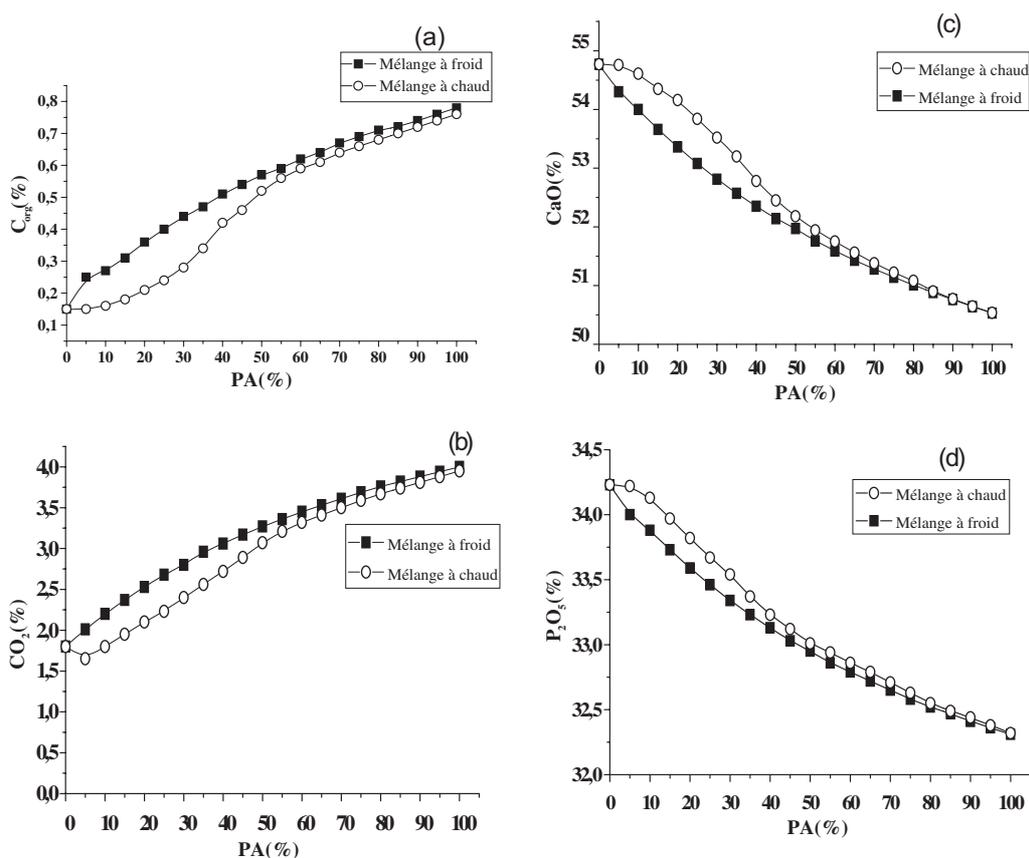


Fig. 6. Variation de C_{org} (a), CO_2 (b), CaO (c) et P_2O_5 (d) en fonction de la masse de phosphate ajouté.

Fig. 6. Variation of C_{org} (a), CO_2 (b), CaO (c) and P_2O_5 (d) vs. mass of added phosphate.

Tableau 3. Conditions de préparation des différents phosphates.

Table 3. Conditions of preparation of various phosphates.

Échantillon	Conditions de préparation
Brut (A)	Phosphate brut
Phosphate calciné (B)	Phosphate calciné à 800 °C pendant 30 min
Mélange à froid (C)	[67 % (B) + 33 % Brut (A)] à température ambiante
Mélange à chaud (D)	[67 % (B) + 33 % Brut (A)] à 800 °C puis refroidi à l'atmosphère

phosphate calciné à 800 °C pendant 30 min, nous avons comparé les caractéristiques de quatre produits : phosphate brut (A), calciné (B), mélanges à froid (C) et à chaud (D) (Tabs. 3, 4 et 5).

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 4 et 5.

D'après les résultats obtenus de la composition chimique, les teneurs en phosphore et calcium sont supérieures dans le mélange à chaud (D) par rapport au mélange à froid (C). Et inversement, les teneurs en C_{org} et en CO_2 ont diminué dans le mélange à chaud grâce aux réactions de décarbonatation et d'oxydations de la matière organique pendant le cycle de refroidissement. Cela est justifié par la comparaison des

courbes d'ATD-ATG (Fig. 7) relatives aux échantillons du phosphate brut (A), calciné (B) et celle du mélange à chaud (D). D'autre part, nous avons noté la très faible valeur des phénomènes exothermiques d'oxydation de la matière organique et l'atténuation du phénomène endothermique de décomposition des carbonates sur la courbe du mélange à chaud (D). La diffraction des rayons X montre nettement la diminution de la teneur en dolomite, sa raie la plus intense ($2\theta = 30,9$) par rapport au produit brut (A).

Au niveau de la granulométrie, nous avons noté une diminution des pourcentages de refus de la maille 350 μm au niveau des deux phosphates traités (B) et (D). Cette variation est due à la rupture des gros grains

Tableau 4. Résultats de la composition chimique moyennes du minerai du phosphate du Bassin Gantour.

Table 4. Average chemical composition of the Gantour phosphate ore.

Éléments	P ₂ O ₅ (%)	CaO (%)	H ₂ O (%)	C _{org} (%)	CO ₂ (%)	Autres (%)
A	30,39	48,20	5,60	1,4	6,6	7,81
B	34,23	54,77	2,10	0,15	1,8	6,95
C	33	52,88	3,5	0,46	3,00	7,16
D	33,45	53,45	3,10	0,30	2,4	7,30

Tableau 5. Distribution granulométrique [refus (%)] du minerai de phosphate du Bassin Gantour.

Table 5. Granulometric distribution [oversize (%)] of the Gantour phosphate ore.

Maille (µm)	500<	350	250	200	160	80	40	<40
A	0	37,66	24,75	15,85	9,98	9,88	1,88	0
B	0	31,27	26,21	20,20	11,30	8,56	1,43	0,03
C	0	33,66	28,34	19,38	10,58	6,52	1,47	0,05
D	0	33,15	27,41	20,32	12,16	5,71	1,18	0,07

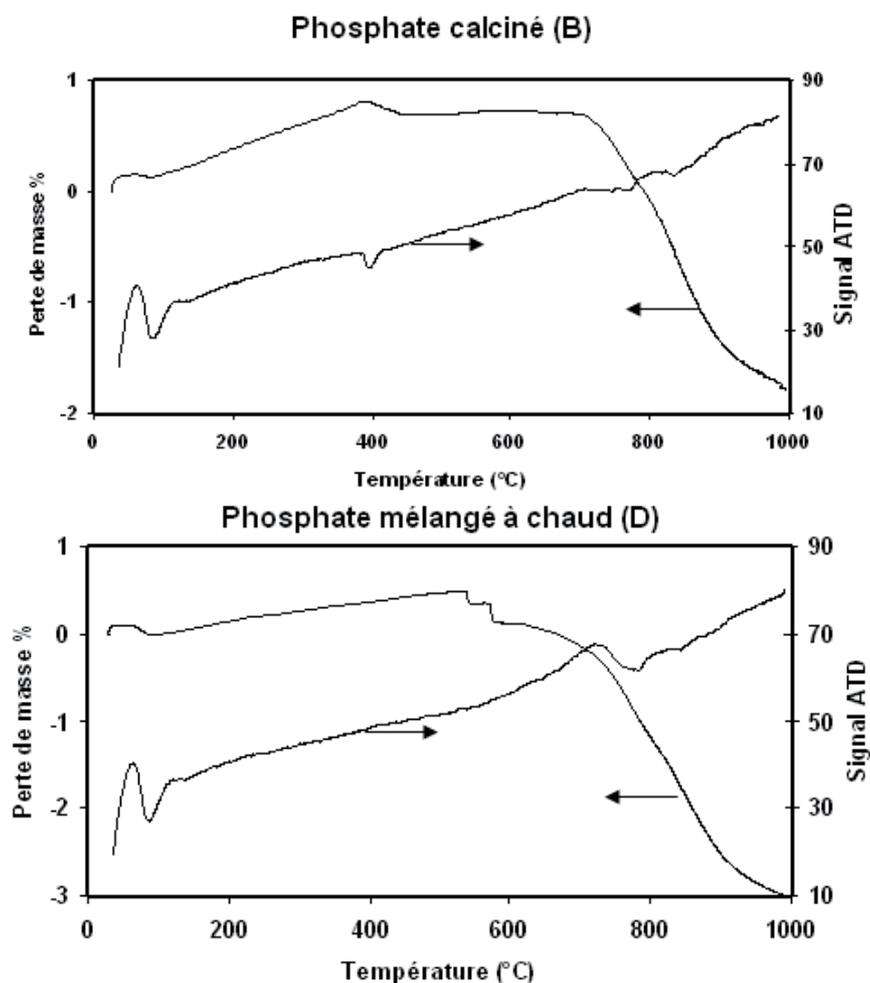
**Fig. 7. Courbes ATD-ATG du phosphate calciné (1) et d'un mélange à chaud du phosphate (2).**

Fig. 7. DTA-GTA Curves of calcined phosphate (1) and hot phosphate mixture (2).

au cours du traitement thermique en raison des réactions de déshydratation, d'oxydation de la matière organique et de décomposition des carbonates. Signalons que les travaux [8,15,19] ont montré que la variation de la distribution granulométrique améliore les propriétés physiques, surtout la surface spécifique et la porosité.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons pu minimiser la perte énergétique en récupérant de l'énergie perdue au cours du cycle de refroidissement du phosphate calciné en l'utilisant pour la calcination du phosphate brut de même source.

La température de calcination de 800 °C et un temps de séjour de 30 min permettent d'obtenir un phosphate riche en P₂O₅ et CaO avec des teneurs en CO₂ et C_{org} très faibles.

La comparaison des teneurs, en C_{org}, CO₂, P₂O₅ et CaO respectives des mélanges du phosphate à froid et à chaud avec celles du phosphate calciné, permet d'avancer que l'ajout d'une quantité de 33 % de phosphate brut au début du cycle de refroidissement du phosphate calciné à 800 °C fournit un concentré de phosphate de meilleure qualité. Ce procédé présente donc des retombées très positives sur l'économie d'énergie et l'augmentation de la productivité d'un concentré de phosphate de meilleure qualité.

Références

- [1] A. Arafan, M. Benchanaa, A. Chik, J. Maghnoij, Étude du traitement thermique des minerais de phosphate : influence des caractéristiques chimiques et minéralogiques, COVAPHOS II (Ed.) Proceedings of the second international conference on the valorization of phosphates and phosphorus compounds, Marrakech, Morocco, 2006, pp. 10-13
- [2] A.K. Ozer, *Fuel* **81** (2002) 41-49
- [3] S. Cooper, C.J. Coronella, *Powder Technol.* **151** (2005) 27-36
- [4] P. Blazy, E.A. Jdid, *C. R. Acad. Sci. Paris, Série Ila* **325** (1997) 761-764
- [5] J.M. Smirnov, S.F. Shinkorenko, in : Pierierabotka Oksilennykh Rud (Processing of Oxidized Ores), Nauka, Moscow, 1985, pp. 155-161
- [6] L.L. Hammond, D.P. Day, A.T. Bachik, A. Bidin, Proceedings of a workshop on phosphate sources for acid soils in, edited by the humid tropics of Asia, Kuala Lumpur, Malaysian Society of Soil Science, 1992, pp. 73-89
- [7] Zafar Iqbal Zafar, M.M. Anwar, D.W. Pritchard, *Int. J. Miner. Process.* **43** (1995) 123-131
- [8] K. Souhila, Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage, Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005
- [9] L. Bilali, M. Benchanaa, A. Mokhlisse, Pyrolyse du phosphate noir de Youssofia par chauffage conventionnel, COVAPHOS I (Ed.) Proceedings of the first international conference on the valorization of phosphates and phosphorus compounds, 2004, pp. 34-37
- [10] M. Cuney, Facteurs contrôlant la nature et la concentration des impuretés dans les phosphates sédimentaires, COVAPHOS I (Ed.) Proceedings of the first international conference on the valorization of phosphates and phosphorus compounds, 2004, pp. 11-14
- [11] G.H. McClellan, S.J.J. Van Kauwenbergh, *Geol. Soc.* **148** (1991) 809-812
- [12] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) & IFDC, Fertilizer manual. Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1998, 615 p
- [13] L. Bilali, M. Kouhila, M. BenChanaa, A. Mokhlisse, A. Belghit, *Energ. Convers. Manage.* **42** (2001) 467
- [14] K. Mohamed, Z. Mahfoud, H. Mohamed, J. Janie, A. Andre, *Fuel* **76** (1997) 14-15
- [15] L. Bilali, M. Benchanaa, A. Mokhlisse, *Ann. Chim. Sci. Mat.* **25** (2000) 663-678
- [16] P. Blazy, E.A. Jdid, *C. R. Acad. Sci. Paris, série Ila* **321** (1995) 287-294
- [17] M. Ashraf, Z.I. Zafar, T.M. Ansari, *J. Res. (Science), Pakistan* **18** (2007) 145-157
- [18] S. O'Connell, M.A. Chandler, *Geol. Soc. Amer. Bull.* **108** (1996) 270-284
- [19] N. Bezzi, D. Merabet, N. Benabdeslem, H. Arkoub, *Ann. Chim. Sci. Mat.* **26** (2001) 5-23