

Les ressources naturelles pour la fabrication des engrais : une introduction

Véronique Tournis, Michel Rabinovitch¹.

Trois éléments majeurs entrent dans la composition des engrais : l'azote, le phosphore et la potasse. Dans le cas des **engrais azotés**, même si l'azote provient de l'air, c'est le gaz naturel qui fournit l'hydrogène. Le point de départ est la synthèse du gaz ammoniac dont dérivent les deux grandes filières : ammonitrates (via l'acide nitrique) et urée. Les **phosphates** extraits dans le monde sont principalement d'origine sédimentaire, dans une moindre mesure liés à des intrusions alcalines. Les premiers se présentent en couches de grande extension, exploitées de façon très mécanisée, en général à ciel ouvert. Des impuretés peuvent poser problème, principalement les carbonates (calcite et dolomie), la matière organique ou des métaux comme le cadmium. Ces impuretés sont éliminées pour l'essentiel au niveau du traitement des phosphates (traitements gravimétriques, flottation, traitement thermique). Les phosphates sont aussi souvent une source d'uranium. Le commerce porte sur les phosphates bruts (plus ou moins enrichis), l'acide phosphorique issu de l'attaque des phosphates par l'acide sulfurique, les superphosphates (simple ou triple) et, bien entendu toute la gamme des engrais à composante P. La **potasse** se présente aussi en couches sédimentaires de grande extension dans des séquences évaporitiques. Contrairement aux phosphates, elle est en général exploitée en souterrain. L'enrichissement du minerai se fait par voie thermique ou par flottation. Une petite partie est extraite par évaporation de milieux marins sursaturés (Mer Morte). Les développements qui suivent présentent les grandes lignes de la géologie, de l'extraction et du marché de ces trois éléments.

Azote

Les nitrates naturels, tels que ceux qui étaient exploités au Chili ou au Pérou, ont eu leur heure de gloire et l'on trouvera dans l'article de B. Muratet (ce numéro) un bref aperçu de ce passé. L'azote (N) est le principal constituant de l'air dont il représente plus de 75 % en poids. Comme nous l'avons déjà évoqué, la fabrication industrielle des engrais azotés commence par la production d'ammoniac. Aux États-Unis, ce gaz, qui représente un quart de la fertilisation azotée, est liquéfié sous pression et directement injecté dans le sol. Cette technique n'est pas employée en France. La capacité mondiale de production d'ammoniac est estimée à 181 Mt en 2008, avec en tête la

Chine et les États-Unis.

Environ un tiers de l'ammoniac produit sert à fabriquer de l'urée, le plus riche composant azoté (46% N), utilisé à 80% dans les engrais. L'urée fait l'objet d'un important commerce international (16,7 millions de t de N, en 2007), transportée en vrac par voie maritime. Le nitrate d'ammonium est utilisé dans la fabrication d'engrais (à 90 % en France) sous forme d'engrais NP, NPK, de solutions urée-nitrate et surtout solide comme engrais simple dénommé ammonitrate, qui représente 42 % de la fertilisation azotée en France. La production de sulfate d'ammonium est bien moins importante.

L'utilisation de gaz naturel représente 75% du coût de production de l'ammoniac et entre 55 et 70 % du coût de production des engrais azotés. À l'évidence, le marché du pétrole et du gaz influence le cours de l'azote. Les pays producteurs de gaz naturel (Pays du Golfe, Arabie saoudite, Égypte, Russie) développent naturellement une industrie de l'ammoniac extrêmement concurrentielle. Il en est de même pour la Chine, passée n°1 mondial pour la production d'azote.

Phosphore

Les gisements de phosphate ont tous pour minéral porteur de phosphore l'apatite, dont la formule générale est $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, la fluorapatite étant de loin le constituant principal de ces gisements. Ceux-ci relèvent de trois grands groupes selon qu'ils sont associés à une intrusion magmatique, un dépôt continental ou des formations sédimentaires marines. Les premiers représentent 1% des réserves et l'importance des seconds est négligeable, ce qui revient à dire que l'essentiel des gisements de phosphates est lié à des formations sédimentaires marines.

Repères géologiques

Les gisements de **type magmatique** sont associés à des intrusions alcalines, syénites néphéléniques à cœur de carbonatites le plus souvent : presque île de Kola (Russie), gisements du Canada, Palabora en Afrique du Sud et gisements du Brésil. Dans de nombreux cas, la composante phosphatée est associée à d'autres métaux, représentant éventuellement la composante la plus valorisante du gisement : niobium, titane, terres rares... D'une façon

1. Remerciements à Gérard Baudet pour son aide concernant le traitement des phosphates.

générale, les teneurs en phosphore de ces gisements sont faibles à moyennes (4-15% environ) et on se limite souvent à exploiter la partie supérieure enrichie par altération (Canada, Brésil). Dans les gisements de la presqu'île de Kola, l'évolution de l'extraction a conduit progressivement à imposer le passage au souterrain, ce qui devient économiquement difficile compte tenu de la faiblesse des teneurs dans le minerai. Le passage du minerai au concentré ne soulève pas de problèmes particuliers et la flottation est d'usage courant dans ce type de minerai pour éliminer les carbonates, ce qui n'est pas le cas dans les minerais sédimentaires comme nous le verrons plus loin. Quelques indications sur les principaux gisements sont données dans le tableau 1.

On peut considérer que le **type continental** franc est constitué par les guanos qu'on trouve dans les grottes alors que dans les contextes insulaires tropicaux, une origine mixte continentale (guanos) et marine (phosphore du lagon) est probable. Les gisements karstiques, dans la plupart des cas, ne dépassent pas quelques centaines ou quelques milliers de tonnes. On les trouve notamment dans les îles Salomon, aux Philippines, en Thaïlande et au Mexique. Parmi les gisements de phosphates insulaires existent deux monstres, Nauru et Christmas, presque totalement exploités avec un impact environnemental et humain considérable. Les réserves de Nauru, avant exploitation, étaient estimées à 90 Mt à 39% P₂O₅ et celles de Christmas à plus de 100 Mt à 23-27% P₂O₅. À Nauru, le gisement correspond à une reconcentration sur calcaire corallien. Le gisement de Christmas est une latérite phosphatée d'âge Miocène supérieur. En Polynésie, le gisement d'âge Miocène supérieur - Pléistocène de l'atoll corallien de Mataïva (20 Mt à 37,5% P₂O₅) n'a jamais été exploité pour des raisons environnementales. D'autres petits gisements existent sur des îles au Brésil (Piracahua et Mandioré) et en Colombie (Malpelo).

Dans les **gisements sédimentaires marins**, le phosphore proviendrait essentiellement des eaux océaniques

profondes, chargées en phosphore, et remontant dans les environnements littoraux de la zone intertropicale (40° de part et d'autre de l'équateur) à la faveur des courants dits de « upwelling ». Le dépôt des phosphates se ferait ensuite dans des environnements plus ou moins confinés, à sédimentation détritique faible, avec présence fréquente de matière organique. L'altération météorique de ces gisements tend à éliminer leurs composantes matière organique et carbonates et favorise donc un enrichissement naturel de ces phosphates.

À l'échelle mondiale, il existe **deux grandes périodes** de phosphatisation, **Infracambrien - Cambrien** et **Crétacé supérieur - Tertiaire**. Les gisements de la **première période** sont répartis sur tous les continents et se trouvent principalement en Chine (1^{er} producteur mondial actuellement avec 50 Mt de phosphates en 2008), en Australie, au Kazakhstan, au Vietnam, en Mongolie, tous pays où ils sont exploités, ainsi qu'en Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Togo, Niger) et au Brésil (Bambui) où ils ne sont pas ou très peu exploités. Des indices sont connus en France dans le Cambrien de la Montagne Noire. Il convient de rappeler aussi que certains gisements de fer précambriens présentent une teneur en apatite significative qui est valorisée (ex. Kiruna Vaara en Suède). Le tableau 2 donne une liste des principaux gisements de cette période.

Il convient de noter qu'entre les deux grandes périodes de phosphatisation, il existe d'autres gisements de phosphates, dont l'importance est bien moindre. Dans les formations primaires, on notera d'abord les schistes à Obolus d'âge Ordovicien de la bordure de la mer Baltique : Estonie (Rakvere) et Russie (Kingisepkoi). Les tonnages sont élevés (n 100 Mt), mais les teneurs faibles (6-10% P₂O₅). Des indices sont connus dans le Dévonien (Chine, Chattanooga Shale - Tennessee², sans oublier les indices des Pyrénées). La principale formation phosphatée de cette période est la **Phosphoria Formation** du Permien moyen à supérieur dans les États de l'Ouest américain (Idaho, Utah et Wyoming). Dans l'Idaho, le Meade Peak Member,

Gisement/pays	Géologie	Réserves
Khibiny et Kovdor (Kola, Russie)	Complexes alcalins zoné, Dévonien-Carbonifère	4 000 Mt à 15% P ₂ O ₅
Gremyakh-Vyrmes (Kola, Russie)	Complexe alcalin	3 000 Mt à 3,5% P ₂ O ₅
Seblayvr (Kola, Russie)	Carbonatite	600 Mt à 4% P ₂ O ₅
Siilinjärvi (Finlande)	Dyke carbonatite 2 800 Ma	400 Mt à 4 % P ₂ O ₅
St-Honoré (Québec), Martison Lake et Cargill (Ontario)	Carbonatites	62-113 Mt à 20% P ₂ O ₅ (Martison Lake et Cargill)
Brésil : Araxa, Tapira, Catalo, Ipanema, Jacupiranga	Intrusions alcalines d'âge Crétacé à P et Nb.	Réserves de 2 500 Mt à de teneurs de 5 à 15% P ₂ O ₅
Afrique du Sud : Palabora	Complexe alcalin zoné, 2030 Ma	2 000 Mt à 5-7% P ₂ O ₅
Autres : Zimbabwe (Dorowa), Gabon (Mabounié), Chine, Sri Lanka (Eppawella), Australie		

Tableau 1. Principaux gisements de phosphates liés à des intrusions alcalines.

2. Mais les principaux gisements sont d'origine secondaire déposés dans des chenaux sur diverses formations de l'Ordovicien.

Gisement/Pays	Géologie	Réserves
Chine : Kaiyang, Nanmao-Mo Fang (Guizhou), Kunming ; Jinning, Haikou (Sichuan, Yunnan)	Formations carbonatées, phosphatées et siliceuses d'âge Infracambrien-Cambrien	Kaiyang : 320 Mt à 17,6% P ₂ O ₅ Lanmao - Mo Fang : 811 Mt dont 125 à 22-31% P ₂ O ₅ Kunming, Jinning, Haikou : 1100 Mt
Mongolie : Bourin-Khan, Khoubougoul, Tsagan-Nour	Plusieurs horizons phosphatés dans une série de dolomites et cherts	Bourin-Khan : 175 Mt à 21% P ₂ O ₅ Khoubougoul : 1 000 Mt à 20-22% P ₂ O ₅ Tsagan-Nour : 300 Mt à 25-27% P ₂ O ₅
Vietnam (Lao Cay = Cam Duong)	Calcschistes du Cambro-Ordovicien	811 Mt dont 125 à 22-31% P ₂ O ₅
Kazakhstan (Karatau)	Série dolomitique à horizons phosphatés du Cambrien inférieur	1 000 Mt à 23-30% P ₂ O ₅
Australie (Phosphate Hill, Georgina Basin)	Argiles et calcaires phosphatés dans contexte de siltites, cherts et calcaires. Cambrien moyen	1 000 Mt à 17,3% P ₂ O ₅ , dont 90 Mt à 24,3% P ₂ O ₅ à Phosphate Hill
Afrique de l'Ouest : Kodjari et Aloub Djouana (Burkina Faso), Bassar (Togo), Mékrou et Tapoa (Niger)	À la base des grès du Voltaïen moyen (Infracambrien-Cambrien), laminite argileuse avec couches de phosphates intercalées (formation Kodjari). Le Voltaïen moyen est séparé des grès du Voltaïen inférieur par une tillite	Diapega : 100 Mt à 27-33% P ₂ O ₅ Kodjari : 60 Mt à 25% P ₂ O ₅ Tapoa : 200 Mt à 23% P ₂ O ₅ et ressources de 1 200 Mt
Brésil	Indices dans la formation Bambui	

Tableau 2. Récapitulatif des principaux gisements de phosphates de l'Infracambrien-Cambrien (compilation).

formation productrice, comporte 4 niveaux phosphatés dans une série de shales. Les formations encaissantes sont constituées par des siltites, des calcaires, des marnes et des cherts. Les réserves sont considérables : 1 000 Mt à 24% P₂O₅ pour la surface et 17 000 Mt pour le souterrain dans l'Idaho SE, 854 Mt à 25% P₂O₅ et 640 Mt à 20% P₂O₅ dans l'Utah, près de 500 Mt dans le Wyoming. À ce jour, la Phosphoria Fm n'a donné lieu qu'à de petites exploitations dans la partie altérée des gisements, mais le développement de la flottation des carbonates dans des conditions économiques (rappelons l'existence de la petite usine de Vernal) pourrait changer la donne dans un contexte de réduction des capacités d'extraction de la côte est des États-Unis. Quelques gisements sont signalés dans le Jurassique supérieur à Crétacé inférieur au Mexique (Rocamente, Zacatecas), en Russie (Yegorevsk), au Kazakhstan (bassin d'Aktyoubinsk). Pour mémoire, rappelons les indices du Crétacé inférieur français (vallée du Rhône et nord de la France).

La **seconde grande période** est essentiellement péri-Méditerranée et péri-Atlantique, l'âge des gisements ayant une tendance globale à diminuer quand on passe de l'Est méditerranéen à la côte est des États-Unis :

- Crétacé supérieur³ pour les gisements d'Égypte, d'Israël et de Jordanie ;
- Paléocène pour les gisements du nord de l'Arabie Saoudite et d'Iraq ;
- Maestrichtien-Paléocène - Éocène pour les gisements de Tunisie (Paléocène), d'Algérie (Éocène inférieur), du Maroc (Maestrichtien à Éocène inférieur), de Mauritanie (Éocène inférieur), du Sénégal, de Guinée Bissau, du Mali et du Togo (Éocène moyen⁴) ;

- Miocène et Pliocène pour les gisements de la côte est des États-Unis (Floride et Caroline du Nord).

Des indications sur les principaux gisements sont données dans le tableau 3.

Traitement des minerais, fabrication des engrais et marché

Comme le montrent les tableaux 1 à 3 et la figure 1, on trouve des concentrations de phosphates sur tous les continents, dont la mise en valeur répond aux critères classiques de l'exploitation minière : adéquation aux besoins du marché et rentabilité économique de l'exploitation. Les réserves se chiffrent en dizaines de milliards de tonnes ou en siècles de consommation. Dans la plupart des cas, les minerais de phosphates ne peuvent pas être utilisés directement ; il convient de les solubiliser par une attaque acide. Néanmoins, une petite partie est utilisée en application directe. Préalablement, les minerais de phosphate doivent être enrichis.

L'objectif principal du traitement des minerais de phosphates est de produire des concentrés utilisables dans l'industrie des engrais pour la production d'acide phosphorique ou d'engrais phosphatés. Ces concentrés doivent avoir une teneur minimale en P₂O₅ (> 30% d'une façon générale), des teneurs maximales en chlorures, sulfures, matière organique, ainsi que dans les rapports Fe₂O₃ + Al₂O₃ + MgO/P₂O₅ (< 0,09 environ) et CaO/P₂O₅ (< 1,60 environ). Pour répondre à ces spécifications, on utilise en général des procédés simples d'enrichissement par voie physique sèche pour les minerais faiblement argileux (broyage sélectif et classifications granulométriques), humide pour les minerais argileux (débouillage et classifications granulométrique) ou flottation. Les minerais

3. D'autres gisements sont signalés en Turquie, au Kazakhstan (Aktyoubinsk) et en Amérique du Sud (Colombie, Équateur, Venezuela, Brésil). Au Brésil, le petit gisement maestrichtien d'Olinda (État de Pernambuco) est exploité. Mentionnons enfin les craies phosphatées du nord de la France (Oise, Somme) et de Belgique (Mons), exploitées depuis le XIXe siècle et qui le sont toujours, comme amendement phosphaté, à Beauval (Somme), par le groupe Roullier.

4. Oligocène pour le phosphate d'alumine sus-jacent au Sénégal (Thiès).

Gisement/Pays	Géologie	Réserves
Égypte (Idfu-Oena et Abu Tartur)	Contexte de marnes, calcaires, argiles et cherts. Abou Tartur est pénalisé par sa composante en pyrite	Idfu-Oena : 1 400 Mt à 21,6% P ₂ O ₅ Abou Tartour : 300 Mt à 26% P ₂ O ₅ + 0,2% terres rares
Israël (Zohar, Oron-Rotem, Arava)	Formation Mishah : marnes, calcaires, argiles et cherts	Zohar : 250 Mt ; Oron-Rotem : 150 Mt ; Arava : 150 Mt ; teneurs de 25-30% P ₂ O ₅
Jordanie (Deir Abu Said, El Abyad, Esh Shidiya)	Contexte géologique similaire à celui d'Israël	Deir Abu Said : 300 Mt à 19% P ₂ O ₅ El Abyad : 150 Mt à 28-32% P ₂ O ₅ Esh Shidiya : 838 Mt à 26,5% P ₂ O ₅
Iraq (Akashat, Sawab)	Niveaux phosphatés à gangue carbonatée dans un environnement carbonaté et siliceux	Akashat : 430 Mt à 22% P ₂ O ₅ Sawab : 3 500 Mt à 22% P ₂ O ₅
Arabie Saoudite (Al Jalamid, Al Kabrah)	Plusieurs niveaux phosphatés dans un environnement de carbonates et de cherts	Al Jalamid : 1 500 Mt à 16-21% P ₂ O ₅ Al Kabrah : projet
Syrie (Sawwaneh)	Contexte de marnes, calcaires, argiles et cherts	Sawwaneh : 573 Mt à 25% P ₂ O ₅
Maroc (Khouribga, Youssoufia, Benguerir, Bou Craa)	Dans le plateau des Oulal Abdoun (Khouribga), la 2 ^{ème} formation phosphatée (marnes, grès et calcaires yprésiens) fait 20-30 m de puissance. Dans le plateau de Ganntour (Youssoufia et Benguerir) les formations phosphatées font partie d'une séquence de marnes noires, grès et calcaires. À Bou Craa, 2 à 6 horizons phosphatés sont associés à des marnes noires, argiles calcaires et dolomies.	Khouribga : 4 700 Mt à 24,7% P ₂ O ₅ Youssoufia et Benguerir : 31 000 Mt à 22-28% P ₂ O ₅ + U Bou Craa : 600 Mt à 31% P ₂ O ₅
Tunisie (M'Rata, Redeyef, Kef Schfair, Metlaoui, M'Dilla et Sra Ouertane - El Kef)	Plusieurs horizons phosphatés dans une série de marnes et calcaires (formation de Metlaoui) entre l'île de Kasserine et la Plate-forme saharienne, sauf Sra Ouertane situé au nord de cette île	400 Mt Sra Ouertane : 3 000 Mt à 11-13% P ₂ O ₅
Algérie (Djebel Onk)	Niveaux phosphatés associés à marnes, calcaires et argiles	500 Mt à 25% P ₂ O ₅
Mauritanie (Bofal)	Horizon de phosphates siliceux dans série de calcaires, argiles et grès	70 Mt à 20% P ₂ O ₅ + 80 g/t U et 80 g/t Y
Sénégal (Taïba, Thiès, Matam)	Prolongation du gisement mauritanien	Taïba-Thiès : 300 Mt à 27-30% P ₂ O ₅ Matam : 80 Mt à 25-30% P ₂ O ₅
Guinée Bissau (Farim-Saliquinhe)	Unité phosphatée décarbonatée surmontant un membre phosphaté calcaire et surmonté par un calcaire dolomitique	105 Mt à 29,8% P ₂ O ₅ ou 450 Mt à 10-15% P ₂ O ₅
Mali (Tilemsi)	Couche phosphatée dans une formation de marnes et argiles	12 Mt à 18 - < 30% P ₂ O ₅
Togo	Plusieurs couches phosphatées sur niveaux argileux	91 Mt à 29,7% P ₂ O ₅
États-Unis - Caroline du Nord (districts Aurora, Onslow Bay et Frying Pan)	Horizons phosphatés dans une formation de sables et silts (Pongo River Formation) dont le dépôt a été guidé par un haut-fond (Mid Carolina Platform)	Aurora : 374 Mt à 30,7% P ₂ O ₅ (en concentrés). Minerai à 13-15% P ₂ O ₅ Onslow Bay : 780 Mt à 29-31% P ₂ O ₅ (en concentrés) Frying Pan : 3 750 Mt à 29,2% (en concentrés)
États-Unis – Floride (Florida Central, East, South, North-South Georgia districts)	Sédimentation conditionnée par un haut-fond (Ocala Arch) sur lequel se trouve le district de Florida Hard Rock Phosphate (phosphates secondaires). Horizon phosphaté sablo-argileux (Bone Valley Formation) qui surmonte la Hawthorn Fm (argiles, sables et lentilles dolomitiques surmontant une formation carbonatée)	Central : 1 200 Mt à 31% P ₂ O ₅ (en concentrés). Minerai à 6 à 22% P ₂ O ₅ Florida East : 1 000 Mt à 30% P ₂ O ₅ (en concentrés). Florida South : 1 000 Mt à 30% P ₂ O ₅ (en concentrés). North-South Georgia : 600-700 Mt à 30-32 P ₂ O ₅ (en concentrés) + U
Pérou (Bayovar – Sechura)	Gisement de Bayovar en cours de développement par CVRD ⁵	Sechura : 1 300 Mt à 30-31% (en concentrés) Bayovar : 238 Mt

Tableau 3. Principaux gisement de la période Crétacé supérieur- Tertiaire (compilation).

5. Companhia Valle di Rio Doce.

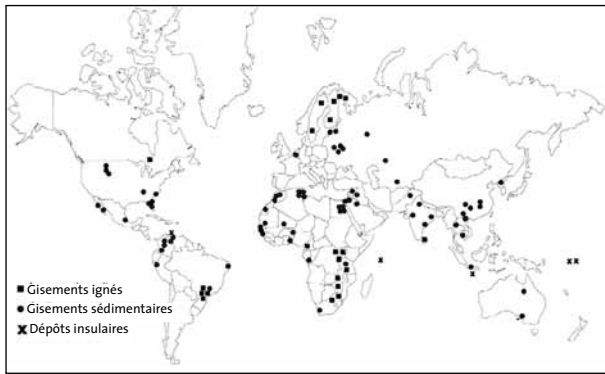


Figure 1. Répartition mondiale des gisements de phosphates.

d'origine magmatique ne posent en général pas de problèmes d'enrichissement, même pour des teneurs très basses en P_2O_5 (4-5%), ce qui n'est pas le cas pour les minerais sédimentaires pour des teneurs minimales de 7 à 15% P_2O_5 , notamment pour les minerais à gangue carbonatée.

Depuis des décennies, les exploitants de gisements sédimentaires ont bénéficié de minerais altérés, faiblement carbonatés ne nécessitant pas de **traitements** par calcination ou flottation. Mais cette situation évolue et il convient de rappeler que les trois quarts des réserves en phosphate mondiales sont des minerais carbonatés. Dans ce contexte, le traitement de ces minerais fait encore relativement figure d'exception. En dehors de la calcination à température moyenne qui vise à éliminer la matière organique et la pyrite par exemple à Youssoufia (Ganntour, Maroc) et en Caroline du Nord (États-Unis), la calcination sur carbonates existe notamment dans la petite usine de Vernal (Phosphoria Formation) aux États-Unis, au Djebel Onk (Algérie), en Égypte et au Maroc. L'usine d'Oron (Israël) a été fermée vers 1980 et celle d'Akashat (Irak) détruite par la guerre. La calcination est basée sur la dissociation des carbonates à une température comprise entre 700 et 1 000° suivie d'une hydratation de la chaux et de la magnésie libre contenues dans la décharge du four.

Par contre la flottation des carbonates est en développement. C'est assurément une voie d'avenir, même si elle a subi un échec sur le gisement de Karatau (Kazakhstan) où elle a été arrêtée à la fin des années 80. Diverses usines existent déjà au Moyen Orient et aux États-Unis. Une grosse usine a été installée en Chine et le projet d'Al Jalamid en Arabie Saoudite prévoit aussi un traitement dans une très grosse installation (5 Mt/an de concentrés). Au fil du temps, divers procédés ont été expérimentés : flottation inverse (flottation des carbonates et dépression des phosphates), flottation directe des phosphates, flottation combinée anionique des carbonates et cationique des phosphates⁶, etc. Un développement récent a porté sur l'utilisation d'un

nouveau collecteur (acides gras sulfonés).

La teneur en phosphate est exprimée soit en pentoxyde de phosphore (P_2O_5), soit en phosphate tricalcique (TCP ou BPL = Bone Phosphate of Lime = phosphate de chaux des os = $P_2O_5 \times 2,1853$). Ce terme rappelle l'époque où les os étaient la source principale de phosphate dans l'industrie des engrais. Les fabricants d'acide phosphorique et d'engrais phosphatés demandent normalement une teneur minimum de 28 pour cent de P_2O_5 et la plupart des catégories de phosphates commercialisées contiennent plus de 30 pour cent de P_2O_5 (65 pour cent de BPL). Pour répondre à cette exigence, la plupart des minerais de phosphate subissent un traitement comme nous l'avons vu plus haut.

En effet, le facteur CaO/P_2O_5 doit être aussi bas que possible pour réduire la consommation d'acide sulfurique lors de la fabrication de superphosphate ou d'acide phosphorique ; il varie de 1,32 à 1,61, chiffre au-delà duquel il n'est plus économiquement utilisable. Intervient aussi la teneur en Fe, Al et Mg. L'uranium des phosphates (n 100 ppm U) peut être récupéré lors de la fabrication de l'acide phosphorique (États-Unis, Maroc). Parfois, les phosphates contiennent aussi du cadmium (5-150 ppm), élément qui pose problème car il se retrouve dans le phosphogypse (résidu de la fabrication d'acide phosphorique) et dans les engrais. Selon les normes de l'Union européenne, la teneur limite en cadmium est de 0,75 mg par pour cent de P_2O_5 .

Le tableau 4 donne la répartition des productions de phosphates par pays, par ordre de tonnage de concentrés produit décroissant (référence 2008).

De plus en plus, les pays producteurs de minerai (sédimentaire ou magmatique), qu'il s'agisse des producteurs majeurs (Maroc, États-Unis, Chine) ou de producteurs moins importants (Tunisie, Afrique du Sud, Brésil...), se sont développés vers l'aval en investissant dans la fabrication de produits finis, acide phosphorique et engrais phosphatés. Par ailleurs, plus récemment, la croissance de la demande s'est fortement déplacée vers l'Asie du Sud-Est (Inde, Chine...), ce qui a entraîné une forte augmentation des prix en 2007 et 2008. Cette augmentation est aussi due à la position de la Chine qui, en 2008, a souhaité privilégier son marché intérieur en taxant ses exportations de phosphore. La Chine est aujourd'hui 1^{er} producteur de phosphates, d'acide phosphorique, de DAP et de MAP, une situation à comparer à celle de l'Inde qui, à population comparable, est un importateur massif de tous ces produits, sa production de phosphate se limitant à 1,2 Mt/an. À l'inverse, dans nos pays occidentaux, la consommation d'engrais phosphatés a tendance de diminuer de façon significative, la décroissance étant de l'ordre de 50%.

6. Voir notamment le procédé de flottation inverse mis au point il y a 20 ans par le BRGM et utilisant des esters phosphoriques comme collecteur.

Pays	Production minière 2003 (Mt)	Production minière 2008 (Mt)	Réserves prouvées (Mt)	Ressources potentielles ⁷ (Mt)
Chine	25,2	50	4 100	10 000
États-Unis	35	30,9	1 200	3 400
Maroc	23,3	28	5 700	21 000
Russie	11	11	200	1 000
Tunisie	7,9	7,8	100	600
Brésil	5,6	6	260	370
Jordanie	6,6	5,5	900	1 700
Syrie	2,4	3,7	100	800
Israël	3,7	3,1	180	800
Égypte	2,2	3	100	760
Afrique du Sud	2,6	2,4	1 500	2 500
Australie	2,1	2,3	82	1 200
Togo	1,5	0,8	30	60
Canada	1,0	0,8	25	200
Sénégal	1,7	0,6	50	160
Autres pays	6,2	10,8	890	2 200
Total	138	166,7	15 417	46 750

Tableau 4. Évolution 2003 – 2008 de la production de phosphates et des réserves (adapté de USGS, Minerals Yearbook 2007 et Mineral Commodity Summaries 2009). Tonnage produit décroissant (référence 2008).

Le panorama de l'approvisionnement asiatique risque d'être sensiblement modifié avec notamment l'émergence de l'Arabie comme producteur significatif au-delà de 2010-11. Parallèlement, les États-Unis enregistrent une décroissance de leur production, très majoritairement issue de Floride et de Caroline du Nord, depuis quelques années, ce qui les oblige à renforcer leurs importations. Les raisons de cette diminution relèvent à la fois des contraintes environnementales et de la diminution relative des réserves en minerais décarbonatés.

Potassium

Les gisements de potasse correspondent à des dépôts lagunaires, les sels de potasse précipitant après la halite (NaCl) lors de l'évaporation des saumures. C'est dire que dans beaucoup de cas la précipitation s'arrête au stade halite, la composante potassique étant modeste ou inexistante. Les gisements de potasse se composent pour l'essentiel d'une alternance de couches de halite et de minéraux potassiques, avec plus ou moins d'insolubles. Les principaux minéraux de potasse sont la sylvinite (KCl+NaCl ; 63,17% K₂O), la carnallite (KCl-MgCl₂·6H₂O ; 16,95% K₂O), et la kaïnite (4KCl-4MgSO₄·11H₂O ; 19,26% K₂O). Dans les minerais, en raison d'une teneur variable en NaCl, la teneur en K₂O varie entre environ 10 et 35% pour la sylvinite, 10 et 16% pour la carnallite, 13 et 18% pour la kaïnite. La sylvine (63,17% K₂O) est le principal composé commercial et il est issu de l'un ou l'autre de ces trois minéraux. S'il est vrai que la sylvinite est prioritairement recherchée, la carnallite ou la kaïnite peuvent constituer une composante importante

des gisements et être exploitées à ce titre, ce qui a aussi permis à certains exploitants de développer une production de composés magnésiens (chlorure ou sulfate) pour des usages de fertilisation ou industriels.

L'extraction des minerais se fait soit en mine souterraine, soit par dissolution *in situ*, soit par précipitation à partir de l'eau de mer hypersalée (Mer Morte). La fabrication du chlorure de potassium (KCl) consiste à le séparer des autres sels. Dans le cas de la sylvinite, deux procédés sont utilisés : le procédé thermique qui s'appuie sur la différence de solubilité entre le chlorure de potassium, plus soluble à chaud qu'à froid, et le chlorure de sodium dont la solubilité ne varie pas, et la flottation, par introduction d'un réactif se fixant seulement sur les cristaux de chlorure de potassium. L'attaque du chlorure de potassium par l'acide sulfurique permet de fabriquer du sulfate de potassium (K₂SO₄) fertilisant utilisé pour les cultures exigeantes en soufre ou sensibles à l'ion chlore (Cl⁻).

Le tableau 5 donne la répartition des productions et des réserves des principaux pays producteurs, par ordre de production décroissant (référence 2008) et la figure 2 la répartition mondiale des principaux gisements.

La production de potasse est dominée par les gisements du *Saskatchewan* (Canada), découverts en 1943 lors de forages pétroliers dans la formation Prairie (Dévonien moyen). C'est aussi le Canada qui dispose, de loin, des plus grosses réserves mondiales. Le gisement, situé au sommet de la formation, comporte 4 horizons potassiques⁸ de 2 à 3 mètres d'épaisseur à environ 1 000 m de profondeur et est exploité par 10 mines relevant de 3 sociétés, dont 8

7. Dont réserves prouvées.

8. De bas en haut : Esterhazy, White Bear, Belle Plaine et Lac Patience.

Pays	Production minière 2003 (Mt)	Production minière 2008 (Mt)	Réserves prouvées (Mt)	Ressources potentielles ⁹ (Mt)
Canada	9,1	11	4 400	11 000
Russie	5,5	6,9	1 800	2 200
Biélorussie	4,2	5,1	750	1 000
Allemagne	3,6	3,6	710	850
Israël	1,9	2,4	40	580
Chine	0,6	2,1	8	450
États-Unis	1,1	1,2	90	300
Jordanie	1,2	1,2	40	580
Chili	0,6	0,6	10	50
Espagne	0,6	0,6	20	35
Brésil	0,4	0,4	300	600
Royaume-Uni	1,0	0,5	22	30
Ukraine	0,01	0,01	25	30
Autres	-	-	50	140
Total	29,9	36	8 300	18 000

Tableau 5. Évolution 2003 - 2008 de la production de potasse et des réserves (adapté de USGS Minerals Yearbook, 2007 et Mineral Commodity Summaries, 2009).

mines en souterrain et 2 par dissolution *in situ*¹⁰. Les ressources sont évaluées à plus de 75 milliards de tonnes de KCl à une teneur de 21-27 % K₂O. Du Dévonien relèvent aussi les gisements de Starobin et Uktyabtsky (Soligorsk, Belaruskaly) en **Biélorussie** (Belarus), dans lesquels 4 niveaux importants de sylvinites-carnallites sont interstratifiés dans les marnes et argiles du Famennien. Deux niveaux de moins d'un mètre de puissance, à 40,5% KCl sont exploités à des profondeurs de 400 à 1 200 m. Les réserves prouvées seraient d'environ 153 Mt de K₂O.

Le Carbonifère est moins bien pourvu. On citera le gisement du Nouveau-Brunswick, d'âge mississipien (Carbonifère inférieur), situé à une profondeur de 400 à 700 m, avec une teneur comprise entre 24 à 28 % K₂O et le Paradox Basin (Pensylvanien moyen - Carbonifère supérieur) avec le petit gisement de Moab (Utah) exploité par dissolution puis évaporation de la saumure pompée.

Le Permien est aussi une grande période de dépôts potassiques. C'est le cas des gisements russes du bassin de la Kama (**Oural**) avec les mines de Solikamak et Berezniki (Uralkaly). Dans le bassin de la Kama, on distingue 13 horizons potassiques exploitables au sein des halites de



Figure 2. Répartition mondiale des principaux gisements de potasse (base 2005). Production exprimée en % du producteur n°1, le Canada (= 100).

la formation Kingur qui fait 450 m de puissance. Les réserves de la zone seraient de 9 800 Mt K₂O, dont 56 Mt de sylvinites et 76,5 de carnallites. Le faciès Zechstein du Permien est connu du Royaume-Uni à la Pologne. En **Allemagne**, les mines, exploitées par Kali und Salz, sont situées dans le centre du pays, principalement dans les lands de Hesse et Thuringe. Dans ces gisements, on exploite principalement deux couches de potasse et la composante carnallite est importante. C'est aussi le Zechstein qui est exploité à 1 100 m de profondeur par Cleveland Potash, filiale d'ICL Fertilizers, dans la mine de Boulby au Royaume-Uni.

Les gisements d'âge crétacé sont surtout connus en Amérique du Sud (Brésil, Argentine...) et en Afrique (République Démocratique du Congo - RDC, Angola, Maroc, Libye...). Au **Brésil**, le gisement aptien de Tauari-Vassouras (État de Serjipe) comporte deux niveaux de potasse dont seul le niveau supérieur est exploité (2,5-3 m de puissance à 28-33% KCl). Les réserves sont de quelques Mt. L'exploitation de RDC a été arrêtée dans les années 70 après inondation de la mine.

La période tertiaire est principalement représentée par les gisements oligocènes d'Alsace (production des MDPA arrêtée en 2002) et ceux de Catalogne (Éocène supérieur), repris par ICL Fertilizers. En **Catalogne**, 2 à 4 niveaux potassiques sont exploités au sein d'une formation de 40-80 m de halite¹¹. Le niveau inférieur fait 3 m de puissance et le niveau supérieur 6 à 8 m. Des gisements miocènes sont connus en Ukraine, en Iran et en Sicile.

Israël et la **Jordanie** exploitent par évaporation les eaux salées de la Mer Morte qui contiennent 340 g/l de sels, dont 1,2% de potasse. Les réserves totales seraient de 1 900 Mt de KCl et 47 000 Mt d'autres sels. Des lac sur-

9. Dont réserves prouvées.

10. Patience Lake, parmi les 5 mines exploitées par Potash Corp. et Belle Plaine, parmi les 4 mines exploitées par Mosaic ; la 10ème mine est exploitée par Agrium.

11. Voir aussi l'article « Potasse et sel gemme dans les Pyrénées et les bassins de sédimentation sub-pyrénéens. "Géologues" n°155, décembre 2007, 60-62.

salés existent notamment au Chili (Salar de Atacama) et en **Chine** (bassin de Qaidam, Qinghao), ce dernier est exploité et fournit l'essentiel de la production chinoise.

Six pays assurent 98 % des exportations mondiales : Canada (38 %), Russie (21 %), Biélorussie = Belarus (16 %), Allemagne (12 %), Israël (7 %) et Jordanie (4 %). Le Canada exporte 98 % de sa production, la Russie 87 %, la Biélorussie 86 %. Le marché est tiré par l'Asie, la Chine et l'Inde, qui sont de petits producteurs mais de grands consommateurs, et également par l'Indonésie et le Brésil. Les États-Unis sont approvisionnés à 87% par le Canada et la Chine, à 70% par la Russie et la Biélorussie. Les sociétés productrices sont en ordre décroissant de production : Belaruskali (Biélorussie), Potash Corp (Canada), Mosaic (Canada, États-Unis), ICL (Israël, Espagne, Royaume Uni), Silvinit (Russie), Uralkaly (Russie), K & S (Allemagne), Chine, APC (Jordanie), Agrium (Canada).

Perspectives du marché des engrais

La demande mondiale d'engrais a augmenté à un rythme soutenu jusqu'en septembre 2008, les prix ont fortement progressé suivant les cours du pétrole et du gaz pour l'azote et les phosphates, aboutissant à un brusque coup de frein à la consommation des engrais et conduisant à une régression de 4 à 5%, en particulier en Europe et en Amérique du Nord, et à l'arrêt des achats en Chine et en Inde. Ayant atteint un sommet, les prix redescendent de près de 60 % pour l'azote et le phosphate ce qui devrait favoriser la reprise ; seule la potasse reste stable à un niveau de prix élevé, ce qui bloque encore les achats des engrais composés. Une reprise progressive est espérée par ce secteur industriel mais prévue au mieux sur 2 ans, au pire sur 6 ans, avant de retrouver les niveaux de consommation antérieurs. Ces événements montrent l'extrême volatilité du marché des engrais.

Plusieurs facteurs sont avancés pour estimer l'évolution de ce secteur. Des coûts de production intimement liés aux cours du gaz et du pétrole, la poussée démographique, la demande asiatique ou indienne, les changements des habitudes alimentaires, la nature des cultures (par exemple le riz est très exigeant en apports phosphatés), la production des carburants « verts » qui mobilise des tonnages importants de fertilisants. Tous ces facteurs entraînent conjointement les cours des céréales à la hausse et poussent les productions. L'outil de production travaille en continu avec de faibles capacités de stockage, les stocks d'engrais sont très contrôlés et présentent des risques importants (stocks Seveso) et dépendent très fortement de la logistique. Il y a également une saisonnalité évidente des utilisations des engrais ; sous nos latitudes l'épandage se produit de janvier à avril.

Bibliographie sommaire

Phosphates

Une synthèse d'ensemble mondiale est présentée dans les 3 volumes publiés par Cambridge University Press (2005-2006 : voir détail dans les références). Ces volumes représentent une contribution majeure du PICG¹² 156 (1979-1988) consacré aux phosphorites et coordonné par S. R. Riggs et W. C. Burnett. Nous avons rajouté quelques références d'Afrique de l'Ouest et de France métropolitaine et mentionné deux mémoires BRGM sur le sujet.

- Baudet G., 1988 : le traitement des minerais de phosphates. Chron. Rech. Min. Édition spéciale. Contribution au PICG n°156, août 1988, 67-97.
- Béziat J.-C., 1974 : Contribution à l'étude du niveau de phosphates sédimentaires du Carbonifère inférieur des Pyrénées et du sud du Massif central (St-Nazaire-de-Ladarez, Hérault). Essais de valorisation du minerai. Thèse 3^e Cycle, Univ. Toulouse, 139 p.
- Boujo A. *et al.*, 1988 : Présentation générale des recherches de phosphate sédimentaire effectuées par le BRGM en Afrique. N° spécial Phosphates. Chronique de la Recherche Minière, août 1988, 3-50.
- Cayeux L., 1939-1950 : Les phosphates de chaux sédimentaires de France. Imp. Nationale, 3 vol. Vol. I France métropolitaine, 1939, 349 p.
- Coll., 1980 : Géologie comparée des gisements de phosphate et de pétrole. Mém. BRGM n°116.
- Coll., 1988 : Recherches de phosphate sédimentaire effectuées par le BRGM en Afrique. Chron. Rech. Min. Édition spéciale. Contribution au PICG n°156, août 1988, 3-50.
- Coll., 2005-2006 : Phosphate deposits of the World. Cambridge Earth Science Series, Cambridge Univ. Press.
 - Vol. 1. Proterozoic and Cambrian phosphorites. P.J. Cook & J.H. Shergold eds., 2005, 404 p.
 - Vol. 2. Phosphate rock resources. A.J. Notholt, R.P. Sheldon, D.F. Davidson eds., 2005, 596 p.
 - Vol. 3. Neogene to modern phosphorites. W.C. Burnett & S.R. Riggs eds, 2006, 382 p.
- Kilinc M., Cotillon P., 1977: Le gisement d'Hahotoé-Kpogamé (Tertiaire du Sud Togo), exemple de piège sédimentaire à sables phosphates. Bull. BRGM II n°1, 43-63.
- Pomerol B. *et al.*, 1980 : La craie de Picardie : ses phosphates et ses accidents magnésiens. Bull. Inf. Géol. Bassin Paris, n° h.s. Excursion B11 du 26^{ème} CGI, 11 p.
- Prian J.-P., 1980 : Caractérisation des paléoenvironnements des phosphorites cambriennes du versant septentrional de la Montagne Noire (sud du Massif central, France. *In*. Géologie comparée des gisements de phosphate et de pétrole. Mém. BRGM n°116.
- Slansky M., 1980 : Géologie des phosphates sédimentaires. Mém. BRGM n°114, 92 p.

Potasse

Deux ouvrages de référence :

- Garrett D. E., 1996 : Potash deposits, processing, properties and uses. Chapman & Hall, 734 p.
- Kogel J. E. *et al.*, eds, 2006 : Industrial Minerals and rocks. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 7th ed., 1568 p.

12. Programme International de Corrélation Géologique.