



Conseil économique et social

Distr. générale
15 février 2016
Français
Original : anglais

Commission économique pour l'Europe

Comité de l'énergie durable

Groupe d'experts de la classification des ressources

Septième session

Genève, 26-29 avril 2016

Point 16 de l'ordre du jour provisoire

**Études de cas et expérimentation de la Classification-cadre
des Nations Unies pour l'énergie fossile et les réserves
et ressources minérales 2009**

Application de la CCNU-2009 aux ressources en uranium dans les roches phosphatées : étude de cas concernant les projets d'El-Sebaeya, dans la vallée du Nil, en Égypte

**Document établi par M. Mohamed Montaser, Autorité égyptienne
des matières nucléaires**

Résumé

Le présent document présente une étude de cas portant sur l'application du cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile et les réserves et ressources minérales 2009 (CCNU-2009) aux ressources en uranium présentes dans les roches phosphatées exploitées à El-Sebaeya, dans la vallée du Nil, en Égypte. Les roches phosphatées constituent une source importante de substances nutritives pour les végétaux et représentent l'une des principales sources non conventionnelles d'uranium dans le monde. Les projets d'El-Sebaeya Est et Ouest sont parmi les sources les plus importantes de roches phosphatées en Égypte. On estime les quantités sur lesquelles portent ces projets à 2,1 milliards de tonnes de roches phosphatées et environ 107 000 tonnes d'uranium. Selon la CCNU-2009, les roches phosphatées sont classées comme « projet commercial » et comme « projet potentiellement commercial », alors que l'uranium qu'elles contiennent est classé séparément comme « projet potentiellement commercial ». La production de roches phosphatées est en cours dans le cadre de ces projets et il est prévu de mettre en place un vaste complexe industriel produisant de l'acide phosphorique et des engrais. L'extraction de l'uranium en tant que coproduit pourrait être possible en marge de la production d'engrais. Ces projets contribueront donc de manière importante à améliorer la sécurité

GE.16-02120 (F) 100316 160316



* 1 6 0 2 1 2 0 *

Merci de recycler



alimentaire et énergétique de l'Égypte et de la région. Le but de la présente étude de cas est de démontrer l'application de la CCNU-2009 en matière de classement et de notification des quantités dans un projet comme celui de la vallée du Nil où phosphates et uranium pourraient être coproduits.

I. Introduction

1. La présente étude de cas a été réalisée par M. Mohamed Montaser, de l'Autorité égyptienne des matières nucléaires, avec la contribution technique de M. Harikrishnan Tulsidas, de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

2. Le monde est confronté à un défi énergétique sans précédent. La demande mondiale en énergie devrait s'accroître de 50 % d'ici à 2040 [1]. L'urgente nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre exigera qu'une grande partie de cette croissance soit assurée par des sources d'énergie émettant peu de carbone. Des institutions mondiales indépendantes s'accordent à dire que ce sera extrêmement difficile sans un déploiement sensible accru de l'énergie nucléaire. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) souligne l'urgence de mettre à contribution toutes les technologies à faible émission de carbone pour éviter l'aggravation du changement climatique. L'énergie nucléaire et les énergies renouvelables constituent les éléments clés d'un système énergétique à faible émission de carbone, au même titre que le captage et le stockage du carbone (CSC) [2]. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) ont estimé que la capacité nucléaire devait doubler d'ici à 2050 [3]. Tout comme la croissance attendue de l'énergie nucléaire, les besoins en uranium vont également augmenter fortement à l'avenir [4]. Il faudra donc trouver de nouvelles sources d'approvisionnement aussi bien conventionnelles que non conventionnelles.

3. Globalement, les ressources en uranium sont classées en deux grandes catégories : conventionnelles et non conventionnelles, en fonction essentiellement du coût de leur extraction d'une mine donnée. Les ressources conventionnelles sont celles dont l'historique de production est bien établi et où l'uranium est soit le produit principal, soit un coproduit, soit un sous-produit important (par exemple d'une mine de cuivre ou d'or). Les ressources à très faible teneur ou celles d'où l'uranium ne peut être récupéré qu'en tant que sous-produit mineur sont considérées comme non conventionnelles [4]. Les ressources non-conventionnelles ont généralement des teneurs faibles à très faibles (entre 10 et 200 parties par million (ppm) d'uranium (U) en moyenne) et ne peuvent être exploitées uniquement pour l'uranium.

4. La récupération d'uranium à partir de ressources non conventionnelles doit tenir compte de facteurs économiques tels que le coût de production et les tendances sur le marché primaire de l'uranium. Dans certains cas, cela pourrait faire partie d'opérations de grande envergure dans lesquelles des économies d'échelle compensent partiellement la faible teneur du minerai. Les ressources non conventionnelles en uranium les plus abondantes sont l'eau de mer et les gisements de roches phosphatées [5, 6, 7].

5. En octobre 2007, le Président égyptien avait annoncé sa décision de lancer un programme nucléaire pacifique et de construire un certain nombre de réacteurs nucléaires pour diversifier et assurer les ressources énergétiques du pays. À la suite de cette décision, l'Autorité égyptienne des matières nucléaires avait entrepris de réévaluer les ressources en uranium du pays. Jusqu'à présent, les ressources les plus importantes en Égypte sont celles qui sont liées aux roches phosphatées.

II. Extraction de l'uranium des roches phosphatées

6. La sécurité énergétique, la sécurité alimentaire et celle de l'approvisionnement en eau sont, avec l'environnement, la sécurité de la population et la santé, des éléments

cruciaux du développement durable au XXI^e siècle. La possibilité de récupérer de l'uranium en tant que coproduit de l'acide phosphorique représente donc un cas particulièrement intéressant, aux conséquences multiples en termes de durabilité [8].

7. Les roches phosphatées constituent l'une des plus importantes ressources en uranium non conventionnelles dans le monde. La teneur en uranium des roches phosphatées peut varier entre 20 ppm et près de 500 ppm. Il ressort de plusieurs études que la concentration moyenne en uranium tourne autour de 100 ppm dans la plupart des roches phosphatées. En avril 2015, la liste des gisements d'uranium dans le monde (UDEPO) de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) estimait à 13,8 millions de tonnes (Mt) la quantité d'uranium présente dans les gisements de roches phosphatées [9]. Les gisements de phosphates sont classés en deux grandes catégories : les roches phosphatées ignées (13 %) que l'on trouve en Russie, en Afrique du Sud et au Brésil, et les roches phosphatées sédimentaires (87 %) que l'on trouve au Maroc, en Algérie, en Jordanie, en Égypte et aux États-Unis d'Amérique [10]. Les minéraux phosphatés des deux types de minerai font partie du groupe de l'apatite, dont les variétés les plus communes sont la fluorapatite et la francolite.

8. L'acide phosphorique est un produit intermédiaire de la production d'engrais chimiques phosphatés par voie humide. Au cours de ce processus, environ 80-90 % de l'uranium contenu dans la roche phosphatée migre vers l'acide phosphorique. La concentration d'uranium dans l'acide phosphorique humide peut varier entre 30 et 350 mg/l en fonction de sa concentration initiale dans la roche [11, 12]. La demande mondiale d'acide phosphorique devrait augmenter à un taux annuel de 2,4 % par rapport à son niveau de 2014 pour atteindre 48,3 millions de tonnes de P₂O₅ en 2019. Une analyse des conditions potentielles de la demande d'acide phosphorique par rapport à l'offre table sur un équilibre à court terme et une légère augmentation fin 2018 début 2019. Il est prévu de construire entre 2014 et 2019 près de 30 nouvelles unités de traitement des phosphates, la moitié d'entre elles rien qu'en Chine et au Maroc. D'autres seront construites en Arabie Saoudite, au Brésil et en Inde [13].

9. Plusieurs techniques permettent de récupérer l'uranium de l'acide phosphorique. On peut le faire par précipitation [14], à l'aide de membranes liquides [15], par extraction par solvant [16] et à l'aide de solides imprégnés [17]. Toutefois, l'extraction par solvant, qui était largement pratiquée durant les années 1970 et 1980, est la seule méthode commercialement éprouvée à grande échelle. Actuellement, 72 % des roches phosphatées exploitées dans le monde servent à produire de l'acide phosphorique par le processus par voie humide et la récupération de l'uranium est de 83,7 % [18]. D'une manière générale, la récupération de l'uranium à partir de l'acide phosphorique dihydraté par extraction par solvant est une technique bien établie [11].

10. Malgré l'accident survenu à la centrale nucléaire Daiichi de Fukushima, au Japon, en mars 2011, l'énergie nucléaire devrait continuer à jouer un rôle important dans le futur bouquet énergétique. Pour soutenir l'énergie nucléaire dans le cadre de la technologie actuelle, il sera nécessaire de rechercher de nouvelles ressources non conventionnelles car les ressources primaires d'uranium sont limitées [19]. Les roches phosphatées retiennent particulièrement l'attention à cet égard. Si elle est convenablement mise en œuvre, la récupération d'uranium à partir de la production actuelle d'acide phosphorique pourrait fournir jusqu'à 20 % de la consommation annuelle mondiale d'uranium [20].

11. En raison de la chute du prix de l'uranium, les opérations ont cessé d'être rentables au milieu des années 1990 et toute production à partir de l'acide phosphorique a cessé. Le cours de l'uranium est passé d'environ 10 dollars des États-Unis par lb d'U₃O₈ (26 dollars É.-U. par kg d'uranium) à un sommet de 138 dollars des États-Unis par lb (359 dollars É.-U. par kg d'uranium) en juin 2007 avant de retomber aux cours actuels à long terme et au comptant d'environ 45 dollars des États-Unis par lb d'U₃O₈ (117 dollars

É.-U. par kg d'uranium) et 35 dollars des États-Unis par lb d' U_3O_8 (91 dollars É.-U. par kg d'uranium) respectivement. La récupération de l'uranium à partir de l'acide phosphorique présente de nombreux avantages, car : a) il s'agit d'une technologie qui a fait ses preuves dans de nombreuses installations industrielles, b) elle n'implique aucun coût d'exploitation minière, c) elle est facilement autorisée, d) elle permet de préserver une ressource qui sinon aurait été perdue pour toujours, e) d'autres éléments de valeur (tels que le thorium et les terres rares) peuvent également être récupérés à partir du même liquide [21]. La récupération de l'uranium à partir de l'acide phosphorique se heurte cependant à plusieurs problèmes, qui sont par exemple : a) la fluctuation du cours de l'uranium, b) une perception défavorable par le public et un manque d'appui politique (en raison de l'accident survenu à la centrale nucléaire Daiichi de Fukushima, c) une certaine lassitude de l'industrie à l'égard des innovations et d) l'aversion croissante de l'industrie pour le risque.

III. Ressources en phosphate de l'Égypte

12. Les gisements de phosphate en Égypte font partie de la province phosphogénique du Crétacé tardif-Paléogène qui s'étend du Moyen-Orient à l'Afrique du Nord. Leur présence se divise en trois ceintures de faciès orientées est-ouest (fig.1) [22] :

a) La phosphorite de la ceinture de faciès nord, qui n'a pas de valeur économique, qui s'étend de l'oasis de Bahariya jusqu'au Sinaï sous forme de fines couches constituées essentiellement carbonate et de sable.

b) La phosphorite de la ceinture de faciès centrale, qui présente le plus d'intérêt sur le plan économique et qui est limitée aux régions suivantes :

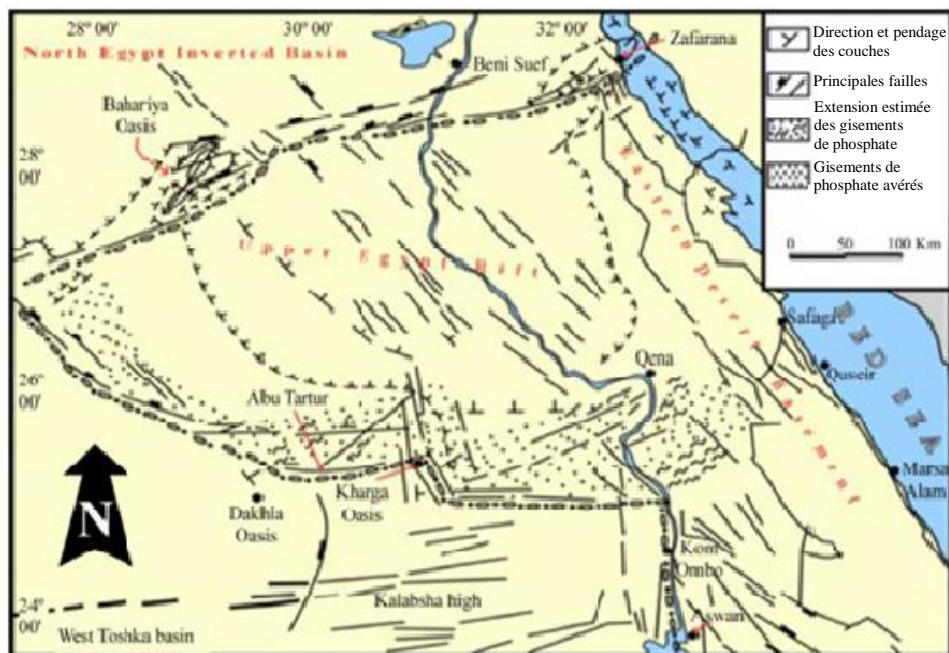
i) La côte de la mer Rouge entre Safaga et Quseir ;

ii) La vallée du Nil entre Idfu et Qena ;

iii) Le désert occidental sur le plateau d'Abu Tartur (zone de la Nouvelle vallée).

c) La phosphorite de la ceinture de faciès sud, dont les roches sont associées à des accumulations de minerai de fer parmi des sédiments en eau peu profonde.

Figure 1
Répartition des gisements de phosphate en Égypte

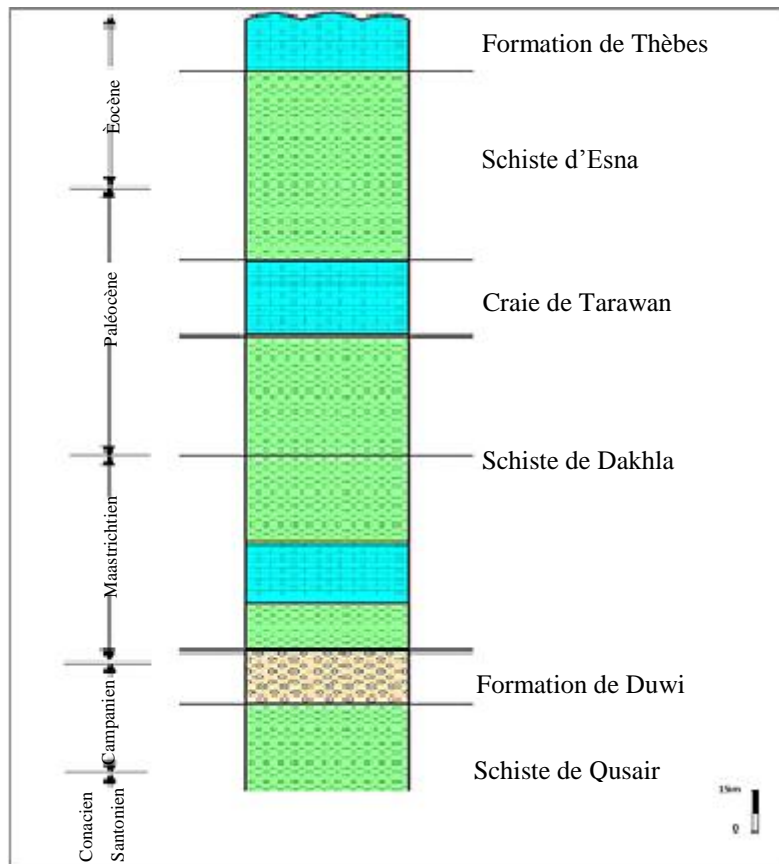


13. La francolite est le principal minéral de phosphate présent dans les gisements de la vallée du Nil, tandis que la fluorapatite prédomine dans le gisement de la Nouvelle vallée [23].

IV. Gisements de phosphate de la vallée du Nil

14. Les gisements de phosphate de la vallée du Nil s'étendent entre les latitudes $25^{\circ} 30'$ – $26^{\circ} 30'$ et les longitudes $32^{\circ} 30'$ – $33^{\circ} 30'$ des deux côtés de la vallée du Nil [24]. On a tenté à plusieurs reprises de classer la succession Éocène supérieur-Éocène inférieur dans la région de la vallée du Nil. La séquence sédimentaire générale de la région de la vallée du Nil a été classée dans les formations illustrées à la figure 2 (de bas en haut) [25].

Figure 2
Section stratigraphique générale de la vallée du Nil



15. La formation de Duwi dans la région de la vallée du Nil a été divisée en trois membres (de bas en haut) :

- a) Le membre de Mahamid : composé de schiste, d'argile, de grès et de schiste carbonneux avec quelques intercalations phosphatées ;
- b) Le membre de Sibaiya : composé de lits de phosphorites carbonatées-siliceuses intercalées de rubans et de lentilles de chert se muant vers le haut en schiste, calcaire et marne ;
- c) Le membre d'Adayma : composé de marne, de grès, d'un peu de calcaire d'huître et de lits de phosphate.

16. La partie inférieure de la formation de Duwi (membre de Mahamid) a été attribuée au Campanien. La partie moyenne a aussi été considérée comme datant du Maastrichtien et du Campanien-Maastrichtien. Le membre d'Adayma supérieur remonte au Danien et au Maastrichtien [26]. La formation de Duwi dans la région de la vallée du Nil a été subdivisée en trois membres en fonction de ses caractéristiques lithologiques [27] :

- a) Le membre inférieur est composé de grès quartzeux et de schiste siliceux ;
- b) Le membre moyen est constitué de schiste noir feuilleté friable et riche en matières organiques ;
- c) Le membre supérieur est fait essentiellement de grès phosphatique.

17. *Composition chimique et minéralogique* : la composition chimique des lits de phosphate de la région d'Idfu-Qena varie en fonction de la nature du matériau liant (tableau 1). Les composants phosphorites sont constitués de grains de phosphate (surtout) et de restes organiques phosphatisés. La taille des grains varie entre 0,1 et 2 mm, mais le plus souvent entre 0,2 et 0,4 mm. Le phosphate se trouve dans les grains sous forme de collophane, entre 49 et 60 % de la roche, avec de faibles quantités de matériaux organiques et de paillettes de pyrite finement dispersées [24].

18. Les os et restes phosphatisés contiennent, outre le phosphate, des quantités considérables d'impuretés organiques. On trouve parmi les grains non phosphatés du quartz (0,05-1 mm), de la pyrite et, plus rarement, des roches carbonatées. Le matériau liant des grains de phosphorite est constitué d'un mélange de carbonates, d'argile et de silice en proportions variables contenant sous forme d'impuretés de la dolomite et de la ferrodolomite. Carbonate, argile et argile carbonatée sont syngénétiques, alors que la silice a été formée au cours des derniers stades diagénetiques [24].

Tableau 1

Composition chimique (en %) du gisement de phosphate d'El-Sebaeya

Composé	Variété carbonatée	Variété carbonatée-siliceuse	Variété argileuse-carbonatée
P ₂ O ₅	22,7	21,24	20,28
CaO ₂	48,06	38,44	40,16
SiO ₂	4,80	13,05	12,07
Al ₂ O ₃	0,32	0,42	0,95
Fe ₂ O ₃	0,94	1,03	1,50
MgO	0,32	0,44	0,86
SO ₃	0,20	-	-
CO ₂	17,70	11,10	12,06
R.I.*	4,86	14,08	12,04

* R.I. – résidu insoluble.

IV. Résidu insoluble

19. La variété carbonatée des phosphorites caractérise les lits du membre moyen et sa composition minéralogique est la suivante : minéral contenant du phosphate (52,0 %), calcite, (38,3 %), dolomite (1,4 %), quartz (4,2 %), argile (2,0 %), gypse (1,2 %) et limonite (1,0 %). Les variétés carbonatée-siliceuse et siliceuse-carbonatée sont très communes dans les lits du membre moyen dans les zones de Serai, El Gir et Mashash et sont d'une manière générale les plus répandues dans toute la région. Les variétés carbonatée-argileuse et argileuse-carbonatée du minerai dominant généralement dans les lits du groupe supérieur [24].

20. Parmi les phosphorites qui se trouvent dans la zone d'altération superficielle, les plus affectées par l'altération chimique produisent des dépôts lessivés dans lesquels le P₂O₅ est enrichi à 25-28 %, ce qui est le plus intéressant sur le plan économique dans la zone d'El Mahamid. D'une manière générale, dans la zone d'altération superficielle, tous les types de matériaux liants contiennent des minéraux supergènes tels que limonite et gypse. Des essais récents portant sur le phosphate de la vallée du Nil ont montré l'importance de la

limonite et du gypse pour la production d'engrais améliorés, ce qui en fait des produits à valeur ajoutée susceptibles d'être plus intéressants du point de vue économique que l'exportation de roche phosphatée [24].

21. *Extraction et traitement* : L'extraction de minerai de phosphate des gisements de la vallée du Nil et d'El-Sebaeya Ouest se fait à ciel ouvert. Le mort-terrain est enlevé par raclage ou par forage et utilisation d'explosifs, selon la nature de la roche. Le lit de phosphate est foré et abattu à l'explosif avant d'être transporté par camion jusqu'à l'installation de broyage, où il est réduit en morceaux de moins de 5 cm et tamisé. L'épaisseur des roches de recouvrement est comprise entre 20 et 40 m. [24].

22. À El-Sebaeya Est, le minerai de phosphate était broyé puis lavé et soumis à attrition afin d'éliminer la fraction fine argileuse (environ 10-12 % en poids, titrant environ 12-18 % de P_2O_5) et la fraction siliceuse dure plus grossière (40-45 % en poids, 18-22 % de P_2O_5). Le minerai est actuellement broyé et tamisé à sec pour éliminer la fraction siliceuse grossière, le concentré commercialisable étant la fraction fine (titrant 28-30 % de P_2O_5). La lutte contre la pollution de l'air dans de telles circonstances constitue un véritable défi [24].

23. À El-Sebaeya Est Ouest, il y avait une installation de flottation où il était procédé à la flottation directe et à la flottation inverse pour améliorer le minerai. Cependant, pour des raisons techniques et économiques, l'installation de flottation a été remplacée par un dispositif de broyage, tamisage et déschlammage pour retirer la fraction argileuse (environ 20-25 % en poids, titrant 12-18 % de P_2O_5) et la fraction grossière est rejetée. L'essentiel de la production de cette zone est consommée localement pour la production d'engrais phosphatés [24].

V. Projets d'El-Sebaeya Est et Ouest, dans la vallée du Nil : classement des quantités à l'aide de la CCNU-2009

24. La classification-cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile et les réserves et ressources minérales (CCNU-2009) est un système fondé sur des projets qui s'applique à l'ensemble des ressources et réserves minérales ainsi que des gisements d'énergie fossile. Elle a été élaborée pour répondre, dans la mesure du possible, aux besoins des applications envisagées, qu'il s'agisse d'études sur l'énergie et les ressources minérales, de fonctions publiques de gestion des ressources, de procédures commerciales des entreprises ou de normes applicables en matière d'information financière [28].

25. En vertu de la CCNU-2009, les quantités sont classées d'après les trois critères fondamentaux que sont la viabilité économique et sociale (E), l'état d'avancement et la faisabilité des projets sur le terrain (F) et les connaissances géologiques (G), à l'aide d'un système de codage numérique. Les combinaisons de ces critères engendrent un système tridimensionnel. Les catégories et sous-catégories, qui sont les éléments constitutifs du système, sont associées sous forme de « classes ».

26. *Évaluation des quantités de roches phosphatées* : Les quantités de roches phosphatées qui se trouvent dans les projets d'El-Sebaeya Est et Ouest, dans la vallée du Nil, sont classées comme réserves avérées, ressources indiquées et ressources présumées. Il y a environ 49,0 millions de tonnes de réserves avérées de roches phosphatées (34 millions de tonnes à El-Sebaeya Est et 15 millions de tonnes à El-Sebaeya Ouest). Les ressources indiquées se montent en outre à environ 180 millions de tonnes (80 millions de tonnes à El-Sebaeya Est et 100 millions de tonnes à El-Sebaeya Ouest). Quant aux ressources présumées elles atteignent le total d'environ 2 384 millions de tonnes de roches phosphatées. En tablant sur 80 % de récupération de ces ressources, ce sont au total 2 100,2 millions de tonnes de roches phosphatées qui sont classées conformément à la

CCNU-2009 en tant que quantités G1, G2 et G3. Environ 512,8 millions de tonnes sont considérées comme des quantités additionnelles en place.

27. La société minière EI-Nasr exploite les roches phosphatées d'El-Sebaeya depuis de nombreuses années et en 2013 la production atteignait environ 3 millions de tonnes [24]. Les quantités de roches phosphatées extraites sont vendues directement sur le marché. Les quantités notifiées par la mine actuellement en exploitation, estimées en tant que réserves avérées, peuvent être considérées comme relevant de la catégorie F1, ce qui revient à dire que « l'extraction a commencé ». Les quantités estimées des ressources indiquées et présumées peuvent être considérées comme relevant de la catégorie F2.1, ce qui revient à dire que « des activités sont en cours dans le cadre du projet pour justifier une mise en exploitation dans un avenir prévisible. ».

28. La situation économique et financière actuelle devrait avoir des incidences diverses sur la demande d'engrais. La stabilisation du cours des matières de base doit permettre aux agriculteurs d'investir dans des engrais à moindre risque qu'il y a un an, ce qui va entraîner un rétablissement plus rapide que prévu de la demande d'engrais à base de phosphore (P) et de potassium (K). Soutenue par un cours des produits agricoles assez attractif dans la première moitié de 2014, la consommation mondiale d'engrais s'est accrue de 2,0 % entre 2014 et 2015 pour atteindre 185 millions de tonnes (total $N+P_2O_5+K_2O$).

29. On s'attend à un rebond de la consommation de phosphore qui devrait atteindre 41,3 millions de tonnes en 2014/15, ce qui représente une augmentation de 2,5 % sur un an. L'offre mondiale de roches phosphatées devrait atteindre 255 millions de tonnes en 2019, en augmentation de 16 % par rapport à 2014 [13]. Cela signifie que les quantités estimées des réserves avérées dans le cadre des projets d'El-Sebaeya peuvent être affectées à la catégorie E1.1, ce qui revient à dire que « l'extraction et la vente sont économiquement viables si l'on se réfère à la situation du marché et à des hypothèses réalistes quant à sa situation future ». Les quantités estimées des ressources indiquées et présumées peuvent être affectées à la catégorie E2, ce qui revient à dire que l'extraction et de la vente devraient devenir viables dans un avenir prévisible. Les axes E, F et G de la CCNU-2009 ont été dûment pris en compte et ces ressources ont été désignées comme projets commerciaux et projets potentiellement commerciaux, comme le montre le tableau 2.

30. **Évaluation des quantités d'uranium :** Les gisements de phosphate sont considérés comme des ressources en uranium non conventionnelles, car l'uranium est récupéré en tant que coproduit ou sous-produit en même temps que le produit principal qui est le phosphate. Cela signifie que les connaissances géologiques relatives à l'uranium dépendent dans une large mesure des connaissances géologiques relatives aux gisements de phosphate.

31. La société minière EI-Nasr exploite actuellement le gisement et sa production est d'environ 3 millions de tonnes de roches phosphatées par an. La totalité de la production actuelle est vendue sous forme de roches phosphatées. La société a réalisé en 2010 une étude de faisabilité concernant la production d'acide phosphorique en collaboration avec une société partenaire indienne et elle a obtenu le permis de construire un complexe de production d'engrais phosphaté sur le site d'El-Sebaeya.

32. En raison de l'instabilité du marché égyptien résultant de la situation politique en 2001, la société minière El Nasr a interrompu les travaux de construction de l'usine d'acide phosphorique. Au début de 2015, le Président de l'Égypte a appelé à reprendre la construction du complexe de production de phosphate à El-Sebaeya. Ce complexe, qui devrait produire environ 200 000 tonnes de P_2O_5 par an sous forme d'acide phosphorique, devrait être terminé d'ici à la fin de 2017 pour un coût en capital de 400 millions de dollars des États-Unis. Suite à la politique de valeur ajoutée maximale avant exportation de matières premières adoptée récemment par l'Égypte, on s'attend à une augmentation progressive de la production d'acide phosphorique à l'avenir.

Tableau 2

Quantités estimées de roches phosphatées dans les projets d'El-Sebaeya Est et d'El-Sebaeya Ouest, vallée du Nil, Égypte**Date d'effet : 31 décembre 2013**

Zone	Projet	Teneur moyenne en P ₂ O ₅ (En pourcentage)	Modèle du CRIRSCO	Classe de la CCNU- 2009	Sous-classe de la CCNU-2009	Catégories de la CCNU- 2009			Quantité de roches phosphatées (En millions de tonnes)	Quantité estimée de roches phosphatées récupérable (En millions de tonnes)
						E	F	G		
Gisement de la vallée du Nil	El-Sebaeya Est	29-30	Réserves avérées	Commercial Project	Production en cours	1.1	1.1	1	34,0	34,0
			Ressources indiquées	Projet potentiellement commercial	Réalisation en attente	2	2.1	2	80,0	64,0
			Ressources présumées					3	1 674,0	1 339,2
			Quantités additionnelles en place					3.3	4	1,2,3
	El-Sebaeya Ouest	27	Réserves avérées	Commercial Project	Production en cours	1.1	1.1	1	15,0	15,0
			Ressources indiquées	Projet potentiellement commercial	Réalisation en attente	2	2.1	2	100,0	80,0
			Ressources présumées					3	710,0	568,0
	Quantités additionnelles en place					3.3	4	1,2,3		162,0
	Quantités totales (excluant les quantités additionnelles en place)									2 100,2
	Quantités totales (incluant les quantités additionnelles en place)									2 613,0

33. La teneur moyenne en uranium dans les phosphates d'El-Sebaeya est d'environ 90 ppm [24, 29–31]. On estime que 70 % environ de cette production pourrait servir à produire de l'acide phosphorique sur le site. Cette estimation se fonde sur la moyenne actuelle mondiale de 72 % de roches phosphatées utilisés dans la production d'acide phosphorique. On estime également que 90 % de l'uranium présent dans les roches phosphatées passera dans l'acide phosphorique et que le reste demeurera dans le phosphogypse coproduit. On suppose enfin que 90 % de l'uranium pourrait être extrait de l'acide phosphorique au moyen de la technologie actuellement disponible. En appliquant les facteurs de récupération mentionnés ci-dessus, on en déduit qu'environ **107 173,20** tonnes d'uranium pourraient en fin de compte être récupérées des roches phosphatées. Cet uranium peut être classé dans les catégories G1, G2 et G3 selon le niveau de confiance géologique déterminé pour les roches phosphatées (tableau 3).

34. L'état d'avancement et la faisabilité sur le terrain des projets de récupération de l'uranium se trouvant dans l'acide phosphorique dépendent étroitement de la faisabilité de l'exploitation du gisement de phosphate. Les roches phosphatées sont utilisées dans la production d'acide phosphorique et l'uranium peut être extrait de l'acide phosphorique. D'une manière générale, dans le procédé humide, le minerai de phosphate doit avoir les caractéristiques suivantes : i) $P_2O_5 \geq 30\%$, ii) $CaO/P_2O_5 < 1.6$, iii) $MgO < 1\%$ et teneur en Fe_2O_3 et Al_2O_3 égale à maximum 2,5 %. Les minerais qui ne remplissent pas ces conditions ne peuvent pas être utilisés directement et nécessitent un certain enrichissement [32].

35. Une étude exploratoire concernant la possibilité d'extraire de l'uranium des roches phosphatées d'El-Sebaeya est en préparation. Il est également prévu de lancer une étude de faisabilité. Les quantités d'uranium tirées du projet d'exploitation des roches phosphatées d'El-Sebaeya sont donc classées en catégorie F2.1 : « des activités sont en cours dans le cadre du projet pour justifier une mise en exploitation dans un avenir prévisible. ».

36. Les dépenses de fonctionnement liées à la production d'uranium par ce procédé devraient être de l'ordre de 40-50 dollars des États-Unis par lb d' U_3O_8 (100 dollars É.-U. par kg d'uranium), en supposant que les coûts estimés sont les mêmes que ceux des opérations similaires menées ailleurs dans le monde [33], ce qui est proche des prix à long terme et au comptant de l'uranium en août 2015 (35-45 dollars É.-U. par lb d' U_3O_8 ou 90-117 dollars É.-U. par kg d'uranium). Cela signifie que la récupération de l'uranium des roches phosphatées d'El-Sebaeya peut être classée en catégorie E2 – « Viabilité économique probable de l'extraction et de la vente dans un avenir prévisible. ».

37. Outre les quantités totales susceptibles d'être récupérées par des techniques déjà éprouvées, environ **127 996,80** tonnes d'uranium ne le seront pas et peuvent donc être indiquées comme projet commercial potentiel. Il s'agit d'une quantité d'uranium considérable, qu'il pourrait être possible de récupérer ultérieurement en tout ou partie grâce à la mise au point de techniques nouvelles, ce qui améliorerait d'autant la productivité et la durabilité de ces opérations. Les quantités d'uranium disponibles dans le gisement de phosphate de la vallée du Nil sont représentées au tableau 3.

VI. Résumé et conclusions

38. Les projets d'El-Sebaeya Est et Ouest dans la vallée du Nil sont parmi les plus importantes sources de roches phosphatées en Égypte. La quantité de roches phosphatées y est estimée à 2,1 milliards de tonnes. Elle est classée à la fois, selon la CCNU-2009, comme projet commercial et comme projet potentiellement commercial. La production des roches phosphatées est en cours dans le cadre de ces projets et un complexe industriel de production d'engrais est prévu. Ces projets contribueront donc dans une grande mesure à assurer la sécurité alimentaire de l'Égypte et de toute la région.

Tableau 3
Ressources en uranium dans les projets d'El-Sebaeya Est et d'El-Sebaeya Ouest, vallée du Nil, Égypte
Date d'effet : 31 décembre 2015

Zone	Projet	Teneur moyenne en uranium, ppm	Modèle du CRIRSCO	Classe de la CCNU-2009	Sous-classe de la CCNU-2009	Catégories de la CCNU-2009			Quantité estimée d'uranium récupérable, (tU)		
						E	F	G			
Gisement de la vallée du Nil	El-Sebaeya Est	90	Ressources mesurées	Projet potentiellement commercial	Réalisation en attente	2	2.1	1	1 735,0		
			Ressources indiquées					2	3 265,9		
			Ressources présumées					3	68 339,4		
			Quantités additionnelles en place					3.3	4	1,2,3	87 579,7
	El-Sebaeya Ouest		Ressources mesurées	Projet potentiellement commercial	Réalisation en attente	2	2.1	1	765,5		
			Ressources indiquées					2	4 082,4		
			Ressources présumées					3	28 985,0		
	Quantités additionnelles en place			3.3	4	1,2,3	40 417,1				
	Quantités totales (excluant les quantités additionnelles en place)									107 173,2	
	Quantités totales (excluant les quantités additionnelles en place)									235 170,0	

39. Les roches phosphatées constituent l'une des principales ressources non conventionnelles en uranium. Comme cet uranium est récupéré à partir des phosphates en tant que coproduit ou sous-produit, son classement selon la CCNU-2009 est lié à celui des ressources en phosphates. La quantité totale d'uranium contenue dans le gisement de la vallée du Nil est estimée à 107 173 tonnes, ce qui en fait la principale source d'uranium en Égypte. Sur la base des activités en cours, comme l'étude préliminaire et l'étude de préfaisabilité, cet uranium peut être classé comme projet potentiellement commercial. On estime en outre à 127 996 tonnes la quantité additionnelle en place, dont au moins une partie est susceptible d'être récupérée par des techniques innovantes et grâce à l'amélioration des procédés d'exploitation et de traitement.

40. L'Égypte ayant fait part de son intention d'introduire des systèmes d'énergie nucléaire pour diversifier l'approvisionnement en énergie du pays, les projets d'exploitation des phosphates de la vallée du Nil dans lesquels l'uranium peut être un coproduit peuvent être considérés comme les projets les plus avancés du pays en matière de production d'uranium à des fins commerciales. Comme aucune autre source conventionnelle d'uranium susceptible d'être classée comme projet potentiellement commercial n'a été identifiée en Égypte, l'uranium de la vallée du Nil revêt une grande importance pour la sécurité énergétique de ce pays.

41. Le but de la présente étude de cas est de démontrer que l'application de la CCNU-2009 pour classer et notifier les quantités dans un projet portant sur plusieurs produits comme celui de la vallée du Nil, où le phosphate et l'uranium sont susceptibles d'être coproduits. Le recours à la CCNU-2009 introduit davantage de clarté et démontre que les projets concernant le phosphate et l'uranium ont une importance capitale pour la sécurité alimentaire et énergétique de l'Égypte. Il contribuera à améliorer considérablement la gestion des ressources naturelles et, partant, le développement socioéconomique de l'Égypte.

Références :

- [1] Administration de l'information sur l'énergie des États-Unis d'Amérique. Perspectives internationales en matière d'énergie 2013.
- [2] Pachauri, R. K., Edenhofer, O. et Minx, J. C. « Changement climatique 2014 : rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental sur le changement climatique ». (2014) : 151.
- [3] Agence internationale de l'énergie (AIE), Feuille de route pour l'énergie nucléaire, édition 2014.
- [4] OCDE/AEN AIEA, Uranium 2014 : Ressources, production et demande (2014).
- [5] Sophie G., Anne B., Gilles M., Tommy E., Florian F. « A critical assessment of global uranium resources, including uranium in phosphate rocks, and the possible impact of uranium shortages on nuclear power fleets ». *Annals of Nuclear Energy Journal* 58 (2013) 213-220.
- [6] Kim J., Tsouris C., Mayes R. T., Oyola Y., Saito T., Janke C. J., Dai S., Schneider E., Sachde D. « Recovery of uranium from seawater : a review of current status and future research needs ». *Separation Science and Technology* 48 (2013) 367-387.
- [7] Kratz S. et Schnug E. « Roches phosphatées et engrais phosphates comme source de contamination des sols agricoles par l'uranium ». Institut de nutrition des plantes et de sciences des sols, Centre fédéral de recherche agricole, Allemagne, l'uranium dans l'environnement (2006) 57-67. doi : 10.1007/3-540-28367-65.

- [8] Andrea E. U., Ewald S., Horst-Michael P. et Emmanuel F. « Uranium endowments in phosphate rock » 478 (2014) 226- 234.
- [9] Base de données de la distribution mondiale des gisements d'uranium (UDEPO) de l'AIEA2015 (<https://infcis.iaea.org/UDEPO/About.cshtml>).
- [10] Van Kauwenbergh S. J. « Cadmium and Other Minor Elements in World Resources of Phosphate Rock », Proceedings of the Fertiliser Society, 400 (1997) 40.
- [11] Bunus F. T., « Uranium and rare earth recovery from phosphate fertilizer industry by solvent extraction ». Miner. Process. Extr. Metall. Rev. Int. J. 21 (2000) 381-478.
- [12] Michel, P., « Récupération de l'uranium contenu dans l'acide phosphorique ». Les techniques de l'industrie minière 32 (2006) 95-102.
- [13] Heffer P. et M. Prud'homme, Engrais : perspectives 2015-2019. Quatre-vingt-troisième Conférence annuelle de l'Association internationale de l'industrie des engrais (IFA), Istanbul (2015).
- [14] Mousa M. A., Gado H. S., Abd-El Fattah M. M. G., Madi, A. E., Taha M. H. et Roshdy, O. E. « Removal of Uranium from Crude Phosphoric Acid by Precipitation Technique ». Arab Journal of Nuclear Science and Applications, 46 (2013) 38-47.
- [15] El-Hazek N. T. et El- Sayed M. S. « Direct uranium extraction from dihydrate and hemi-dihydrate wet process phosphoric acids by liquid emulsion membrane » The Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 257 (2003) 347-352.
- [16] Ali H. F., Ali M. M., Taha M. H. et Abdel-Magied, A. F. « Uranium Extraction Mechanism from Analytical Grade Phosphoric Acid Using D2EHPA and Synergistic D2EHPA-TOPO Mixture », International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering, 2 (2012) 57- 61.
- [17] Aly M. M., Mousa M. A., Taha M. H., Kandil K. M. et El-Zoghby A. A. « Kinetics and Thermodynamics of Uranium Adsorption from Commercial Di-hydrate Phosphoric Acid Using D2EHPA-Impregnated Charcoal ». Arab Journal of Nuclear Science and Applications, 46 (2013) 29-37.
- [18] Monnet A., Gabriel S., Baschwitz A. et Mathonniere G. « Unconventional uranium and feeding the future nuclear fleet ». Réunion technique sur la production d'uranium à partir des roches phosphatées, siège de l'AIEA, Vienne (Autriche) 4-7 novembre (2014).
- [19] Agence internationale de l'énergie (AIE), Perspectives énergétiques mondiales (2012).
- [20] Vance R. « Preliminary assessment of the impact of the Fukushima accident on uranium supply and demand and the role of unconventional resources ». Réunion technique sur la production d'uranium à partir des roches phosphatées, 26-29 septembre (2011), siège de l'AIEA, Vienne (Autriche).
- [21] Patrick Z. « Comprehensive Recovery and Sustainable Development of Phosphate Resources », Procedia Engineering, 83 (2014) 37-51.
- [22] Khalil M. et Denchi M. L., « Basins geometry and tectonic origin of the western Desert of Egypt, relevance to economic resources ». El Sayed A. A., Youssef Eds., Compte-rendu de la 5^e Conférence internationale sur la géologie du monde arabe, Université du Caire II, p. 523 à 542 (2000).
- [23] Abdel-Khalek N. A. « Beneficiation of some Egyptian Caltareous phosphate ». Thèse de maîtrise, faculté des sciences, département de chimie de l'Université Ain-Shams (1982).

- [24] Elmaadawy Kh. G., Ezz El Din M, Khalid A. M. et Abouzeid A. Z. « Mineral Industry in Egypt », Part II – Non-Metallic Commodities – Phosphate Rocks, *Journal of Mining World Express (MWE)* 4 (2015).
- [25] Soliman H. A., Ahmed E. A., Aref M. A. M. et Rushdy M. « Contribution à la stratigraphie et à la sédimentologie de la séquence Crétacé supérieur-Eocène inférieur à l'est d'Esna, vallée du Nil, Égypte ». *Bulletin de la faculté des sciences de l'Université d'Assiout*, v.9, p. 41 à 67 (1989).
- [26] Philobos E. R. « Géologie des phosphorites de la vallée du Nil ». Thèse de doctorat, Université d'Assiout, Égypte (1969).
- [27] Baioumy H. M., Preliminary data on cadmium and arsenic geochemistry for some phosphorites in Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, v.41, p. 266 à 274 (2005).
- [28] Classification-cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile et les réserves et ressources minérales, administrée par la Commission économique pour l'Europe (CEE), Genève, Suisse (CCNU-2009).
- [29] Steven J. Van Kauwenbergh « Réserves et ressources mondiale en roches phosphatées », Centre international de développement des engrais, boîte postale 2040 Muscle Shoals, Alabama 35662, États-Unis d'Amérique, septembre (2010).
- [30] Société minière El Nasr <http://www.elnasrmining.com/rock.htm> (2010).
- [31] El-Kammar, A. « Phosphorites : objectif visible dans une perspective optimiste de prospérité », atelier national sur le développement de l'industrie des phosphates en Égypte. Autorité des matières nucléaires, Le Caire, Égypte, 7 et 8 septembre 2014.
- [32] Sis H. et Chander S. « Reagents used in the flotation of phosphate ores : A critical review » *Minerals Engineering*, 16 (2003) 577-585.
- [33] Harikrishnan Tulsidas « Phosphate resources and production ». Réunion technique sur la production d'uranium à partir des roches phosphatées, siège de l'AIEA, Vienne (2013).
-