



*En collaboration avec :*

*Ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie*

*Ministère de l'Environnement*

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

# **LA VALORISATION DU PHOSPHOGYPSE : Opportunités pour le développement économique régional**

## **RAPPORT DU COMITE SCIENTIFIQUE**

Mai 2024

## ملخص

يُقدّم هذا التقرير الذي أعدته لجنة علمية تضمّ مختصّين جامعيين وخبراء في الميدان نتائج دراسة 170 وثيقة نُشرت خلال الفترة المُمتدّة من 1995 إلى 2023، والتي تتعلّق بالتوصيف الفيزيائي والكيميائي والإشعاعي وبالسميّة البيئية للفوسفوجبس، وكذلك اللوائح والأطر القانونية المتعلقة بالتصرّف وبتثمين مادّة الفوسفوجبس.

ويحتوي هذا التقرير أيضًا على قائمة شاملة للمراجع البيبليوغرافية المُتعلّقة بالتصنيف القانوني لمادّة الفوسفوجبس، وأمثلة لتثمينه في جميع أنحاء العالم في قطاعات مُتعدّدة مثل الإسمنت ومواد البناء والطرق وصناعة الأسمدة واستصلاح الأراضي الملحيّة.

كما يُعتبر هذا التقرير دليلًا مرجعيًا لمراجعة تصنيف الفوسفوجبس التونسي كمنتج يُوفّر فرصًا عديدة للتثمين.

### *Abstract*

This report was drafted by a scientific committee made up of academic and professional experts. It presents the analytical results of 170 documents, published during the period 1995-2023, and dealing with the physico-chemical, radiological, ecotoxic characterization, as well as the legal rules and standards for the management of phosphogypsum (PG.)

It is based on a careful synthesis of the literature on classification of PG, and on real examples of its recovery in various industrial sectors, throughout the world, such as: cement and other construction materials, highways, fertilizer production, as well as the rehabilitation of saline soils.

This report should serve as an important reference in the process of updating the classification of Tunisian phosphogypsum, in order to turn it into a useful ingredient in the waste recovery process.

### *Résumé*

Ce rapport rédigé par un Comité Scientifique regroupant des experts universitaires et professionnels présente les résultats d'analyse de 170 documents publiés durant la période 1995-2023, relatifs à la caractérisation physico-chimique, radiologique, écotoxique et à la réglementation pour la gestion et la valorisation du phosphogypse (PG).

On y trouve également une synthèse bibliographique dense sur la classification du PG et des exemples de sa valorisation à travers le monde dans plusieurs secteurs tels que : le ciment, les matériaux de construction, les routes, la fabrication des engrais et la réhabilitation des sols salins.

Ce rapport constitue un guide de référence pour la révision de la classification du phosphogypse tunisien comme co-produit offrant plusieurs opportunités de valorisation.

# SOMMAIRE

	<b>Page</b>
Remerciements	2
Comité Scientifique	3
Sigles et abréviations	4
Liste des encadrés, des tableaux et des figures	6
<b>Section 1</b> : Contexte et objectif de la mission, Méthodologie de travail du Comité Scientifique	9
<b>Section 2</b> : Caractérisation du PG dans le monde et en Tunisie	14
<b>Section 3</b> : Cadre légal et réglementaire régissant le PG dans le monde et en Tunisie	40
<b>Section 4</b> : Gestion & Valorisation du PG dans le monde et en Tunisie	50
<b>Section 5</b> : Conclusions & Recommandations	74
<b>Bibliographie</b>	89
<b>Annexes</b>	93
Annexe 1 : Comparaison de la radioactivité de différents PG	94
Annexe 2 : Liste des substances dangereuses éventuelles	97
Annexe 3 : Exposé des motifs du décret n° 2000-2339 du 10/10/2000	99
Annexe 4 : Déclarations de conformité au règlement « REACH » des engrais TSP, SSP et DAP du GCT	101
Annexe 5 : Exemple de Fiche de Données de Sécurité(FDS) du phosphogypse de l’Afrique du Sud	104

## **Remerciements**

Dès juillet 2023, le Pôle de compétitivité « **Pol.i.tech-Gabès** » a coordonné les travaux du Comité Scientifique regroupant des universitaires et des experts professionnels.

Le Comité Scientifique a été chargé de réaliser une synthèse bibliographique actualisée des travaux de recherche relatifs aux caractérisations physico-chimiques et radiologiques du phosphogypse (PG) et sur les dernières avancées scientifiques, techniques et réglementaires en Tunisie et dans le monde concernant la classification, la gestion et la valorisation du PG.

Durant la période juillet 2023 – février 2024, dix réunions coordonnées par « **Pol.i.tech-Gabès** » ont été tenues en présentiel et par visioconférence à Gabès, à Gafsa et à Tunis afin de suivre l'avancement des travaux du Comité Scientifique.

Une telle mission ne pouvait être conçue et atteindre ses objectifs sans le dévouement des membres du Comité Scientifique et le soutien financier des institutions.

« **Pol.i.tech-Gabès** » tient, tout d'abord, à exprimer ses vifs remerciements aux membres du Comité scientifique qui ont collecté, sélectionné et analysé avec professionnalisme plus de 170 documents en relation avec la caractérisation, le cadre réglementaire, la gestion et la valorisation du PG en Tunisie et dans le monde.

« **Pol.i.tech-Gabès** » voudrait remercier, aussi, l'ensemble des intervenants à la Journée Scientifique portant sur la valorisation du PG et ses opportunités pour le développement économique régional, organisée à Gafsa, le 14 décembre 2023.

Nous tenons à remercier, par ailleurs, tous les acteurs concernés par la gestion et la valorisation du PG ayant participé à cette Journée Scientifique pour leur précieuse contribution à l'enrichissement du débat autour du sujet traité.

Qu'ils soient, également, remerciés le Ministère de l'Environnement, le Ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Energie et le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette manifestation et le soutien qu'ils ont témoigné à la réussite de ses objectifs.

« **Pol.i.tech-Gabès** » exprime sa reconnaissance à la Banque Européenne de Reconstruction et de Développement « EBRD » et à l'Ambassade du Royaume Uni en Tunisie pour le soutien financier apporté pour réussir cette mission. Nous souhaitons, tout particulièrement, remercier nos interlocuteurs de « EBRD » à Tunis pour leur professionnalisme et leur engagement pour le bon déroulement de notre mission.

Enfin, la mission n'aurait pas pu se faire sans l'efficacité et l'engagement de l'équipe de « **Pol.i.tech-Gabès** ».

## *Comité Scientifique*

Les experts universitaires et professionnels, membres du Comité Scientifique sont tous nommés à titre personnel, et ne représentent pas leurs organismes d'appartenance.

**Membres** (par ordre alphabétique) :

- Monsieur **ABBES Noureddine**, Expert en Environnement.
- Monsieur **BEN JAMAA Néjib**, Professeur en Génie Civil à l'Université de Gabès, Membre de l'Unité de Recherche « Modélisation Mécanique, Energie et Matériaux ».
- Monsieur **BOUAZIZ Jamel**, Professeur en Sciences des Matériaux à l'Université de Sfax, Directeur du Laboratoire de Recherche « Matériaux avancés ».
- Monsieur **BOUKCHINA Rachid**, Professeur en Génie Rural et Environnement à l'Université de Gabès, Membre du Laboratoire de Recherche « Éréologie et Lutte Contre la Désertification » à l'Institut des Régions Arides.
- Monsieur **CHBILI Hédi**, Directeur Général de l'Environnement et de la Qualité de Vie, Ministère de l'Environnement, Vice-Président de la Commission Mixte sur le PhosphoGypse (CMPG).
- Madame **CHERIF Najeh**, Directrice Générale des Mines, Ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Energie, Présidente de la Commission Mixte sur le PhosphoGypse (CMPG).
- Monsieur **CHEKIR Hassen**, Expert en Environnement et Développement Durable.
- Madame **DJABLOUN Faiza**, Directrice des Conventions, Autorisations et des Contrats, Ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Energie, Membre de la Commission Mixte sur le PhosphoGypse (CMPG).
- Monsieur **ELALOUI Elimame**, Professeur en Chimie à l'Université de Gafsa, Directeur du Laboratoire de Recherche « Applications des Matériaux à l'Environnement, à l'Eau et à l'Energie ».
- Madame **HORCHANI-NAIFER Karima**, Professeure en Chimie, Directrice du Laboratoire de Recherche « Sciences des Matériaux » au Centre National des Recherches à Borj Cédria.
- Monsieur **JEDAY Mohamed-Razak**, Professeur en Génie Chimique à l'Université de Gabès, Membre du Laboratoire de Recherche « Procédés, Energétique, Environnement et Systèmes Electriques ».
- Monsieur **KHOAJA Tahar**, Expert en Environnement, Gestion des Sites Contaminés et Risques Sanitaires.
- Monsieur **KSIBI Hatem**, Professeur en Génie Chimique à l'Université de Sfax, Membre du Laboratoire de Recherche « Applications des Matériaux à l'Environnement, à l'Eau et à l'Energie ».
- Monsieur **TRABELSI Noureddine**, Expert en Environnement et Développement Durable.

**Secrétariat administratif** : « Pol.i.tech-Gabès »

## ***Sigles et abréviations***

**AASHTO** : American Association of State Highway and Transportation Officials.

**AERB** : Atomic Energy Regulatory Board.

**AIEA** : Agence Internationale de l'Energie Atomique.

**ANPE** : Agence Nationale pour la Protection de l'Environnement.

**CAT** : Ciments Artificiels Tunisiens.

**CEE - UN** : Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies.

**CE / UE** : Commission / Union Européenne.

**CLP** : Règlement (CE) n° 1272/2008 du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges.

**CMPG** : Commission Mixte chargée de réviser l'arrêté n° 2339 de l'année 2000 du 10 octobre 2000 relatif à l'établissement de la liste des déchets dangereux et à l'établissement du plan de gestion rationnelle du phosphogypse et de sa valorisation.

**CMR** : Conseil Ministériel Restreint.

**CNSTN** : Centre National des Sciences et des Technologies Nucléaires.

**CPCB** : Conseil Central de Contrôle de la Pollution.

**CPG** : Compagnie des Phosphates de Gafsa.

**CTPL** : Caractéristique de Toxicité Protocole de Lixiviation.

**D50** : Diamètre Médian.

**DAP** : Di-Ammonium Phosphate.

**ENIG** : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès.

**ENIS** : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax.

**ENIT** : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.

**EPA** : Environmental Protection Agency.

**ETR** : Eléments des Terres Rares.

**FCO** : Fertiliser Control Order.

**FFDU** : Fabrication, Formulation, Distribution, Utilisation.

**FSG** : Faculté des Sciences de Gabès.

**FIPR** : Institut de Recherche sur le Phosphate de Floride.

**FSGa** : Faculté des Sciences de Gafsa.

**FST** : Faculté des Sciences de Tunis.

**GCT** : Groupe Chimique Tunisien.

**HP** : Hazardous Property.

**IFA** : Association Internationale des Fertilisants.

**IN** : Instruction Normative.

**INERIS** : Institut national de l'environnement industriel et des risques.

**IRA** : Institut des Régions Arides.

**ISBN** : International Standard Book Number.

**ML** : Matériau Limoneux.

**NEPA** : National Environment Protection Act.

**NESHAP** : National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants.

**NORM** : Naturally Occuring Radioactive Material .

**Q** : Organisme.

**OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Économique.

**ODD** : Objectif de Développement Durable.

**ONU** : Organisation des Nations Unies.

**OUA** : Organisation de l'Unité Africaine.

**PG** : Phosphogypse.

**PNUE** : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

**Q<sub>i</sub>** : Question n° i dans les logigrammes du processus d'attribution « HP 14 » et « HP 6 ».

**RCRA** : Resource Conservation and Recovery Act.

**RDI** : Recherche – Développement – Innovation.

**REACH** : Registration, Evaluation, Autorisation and restriction of CHemicals.

**SCG** : Société des Ciments de Gabès.

**SR** : Structure de Recherche.

**SSP** : Simple Super Phosphate.

**TSP** : Triple Super Phosphate.

**UN** : Nations Unies.

**USC** : Classification Universelle des sols.

**USEPA** : United States Environmental Protection Agency.

**WPA** : Acide phosphorique obtenu par voie humide.

## Liste des encadrés

	<b>Page</b>
<b>Encadré 1</b> : Définition de la notion « co-produit »	10
<b>Encadré 2</b> : Extrait du Rapport de l'IFA 2020 « Phosphogypsum : Leadership-Innovation-Partnership »	10
<b>Encadré 3</b> : Définition de la notion « ressource anthropogénique »	10
<b>Encadré 4</b> : Définition de la propriété « HP 14 »	27
<b>Encadré 5</b> : Méthode d'évaluation de la propriété « HP 14 » selon le règlement (UE) 2017/997	28
<b>Encadré 4bis</b> : Définition de la propriété « HP 6 »	33
<b>Encadré 5bis</b> : Méthode d'évaluation de la propriété « HP 6 » selon la directive 2008/98/CE du parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives et les « Recommandations techniques concernant la classification des déchets » objets du document de la Commission européenne 2018/C 124/01	34
<b>Encadré 6</b> : Extrait du règlement 40 CFR Part 61 sous partie -R	43
<b>Encadré 7</b> : Extrait de la décision européenne n°2000/532/CE relative aux déchets	44
<b>Encadré 8</b> : Extrait de la décision européenne n°2001/118/CE	44
<b>Encadré 9</b> : Extrait de “Guidelines for Management and Handling of Phosphogypsum (CPCB, India) (2008)”	45
<b>Encadré 10</b> : AERB Directive No. 01/09 du 20 Mars 2009	45
<b>Encadré 11</b> : Extrait du décret n° 2000-2339 du 10/10/2000 fixant la liste des déchets dangereux	46
<b>Encadré 12</b> : Répartition de l'utilisation du PG – Enquête de l'IFA en 2015	51
<b>Encadré 13</b> : Les bonnes pratiques Brésiliennes « 4B » pour la gestion du PG dans le domaine agricole.	68

## Liste des tableaux

	<b>Page</b>
<b>Tableau 1</b> : Mode de stockage et quantités de PG en Tunisie.	16
<b>Tableau 2</b> : Teneurs en éléments majeurs du PG à l'étranger.	17
<b>Tableau 3</b> : Concentrations en éléments traces métalliques du PG à l'étranger.	18
<b>Tableau 4</b> : Concentrations en éléments de terres rares (ETR) du PG à l'étranger.	19
<b>Tableau 5</b> : Teneurs en éléments majeurs du PG Tunisien.	20
<b>Tableau 6</b> : Concentrations en éléments traces métalliques dans le PG Tunisien.	20
<b>Tableau 7</b> : Concentrations en éléments de terres rares (ETR) dans le PG Tunisien.	21
<b>Tableau 8</b> : Teneurs en éléments majeurs du PG Tunisien comparées au phosphate naturel et à quelques engrais phosphatés.	22
<b>Tableau 9</b> : Concentrations en éléments traces métalliques du PG Tunisien comparées au phosphate naturel et à des engrais phosphatés.	23
<b>Tableau 10</b> : Teneurs en éléments majeurs du PG Tunisien comparées avec d'autres PG étrangers.	23
<b>Tableau 11</b> : Concentrations en éléments traces métalliques du PG Tunisien comparées avec d'autres PG étrangers.	24
<b>Tableau 12</b> : Éléments radioactifs présents dans le minerai de phosphate, le PG et le gypse naturel.	25
<b>Tableau 13</b> : Comparaison de la radioactivité du PG Tunisien avec des PG étrangers.	25
<b>Tableau 14</b> : Tableau récapitulatif des résultats de l'évaluation de la propriété de danger HP 14.	32
<b>Tableau 14bis</b> : Tableau récapitulatif des résultats de l'évaluation de la propriété de danger HP 6.	38
<b>Tableau 15</b> : Spécifications en Inde pour l'utilisation du PG dans l'industrie du ciment.	55
<b>Tableau 16</b> : Aperçu sur l'utilisation du PG pour la fabrication du ciment dans quelques pays.	56
<b>Tableau 17</b> : Aperçu non exhaustif des travaux de recherche sur l'utilisation du PG en génie civil (1995-2023).	56
<b>Tableau 18</b> : Inventaire non exhaustif de l'utilisation du PG dans les matériaux de construction et les routes.	58
<b>Tableau 19</b> : Spécification indiennes du PG à utiliser dans les routes.	60

## Liste des figures

	<b>Page</b>
<b>Figure 1</b> : Répartition de la gestion du PG dans le monde.	15
<b>Figure 2</b> : Une photo d'un échantillon du PG Tunisien.	16
<b>Figure 3</b> : Une photo d'un échantillon de PG Tunisien par microscopie électronique à balayage ( $\times 1000$ ).	19
<b>Figure 4</b> : Comparaison de la radioactivité du PG Tunisien par rapport à des PG étrangers et à des valeurs standards.	26
<b>Figure 5</b> : Organigramme du processus d'attribution de « HP 14 ».	29
<b>Figure 5bis</b> : Organigramme du processus d'attribution de « HP 6 ».	35
<b>Figure 6</b> : Publications des travaux de recherche sur le PG.	52
<b>Figure 7</b> : Aperçu comparatif des travaux de recherche sur le PG dans quelques pays (Base de données Scopus).	52
<b>Figure 8</b> : «Graded Approach» pour la catégorisation du type d'utilisation du PG.	54
<b>Figures 9</b> : Quelques illustrations de l'utilisation du PG dans les matériaux de construction, le logement et les routes.	59
<b>Figures 10</b> : Quelques illustrations d'expériences pilotes de construction de logement et de routes à base de PG.	60
<b>Figures 11</b> : Deux expériences en Tunisie d'utilisation du PG dans les matériaux de construction.	62
<b>Figures 12</b> : Une expérience en Tunisie d'utilisation du PG dans la construction de logement.	62
<b>Figure 13</b> : Publications sur le PG classées par domaine de recherche (Base de données Scopus).	64
<b>Figure 14</b> : Les grandes orientations pour la valorisation du PG.	65
<b>Figures 15</b> : Application en Espagne du PG dans le secteur agricole.	66
<b>Figures 16</b> : Culture du maïs fourrage au Maroc avec différentes doses de PG.	67
<b>Figure 17</b> : PG granulé à usage agricole commercialisé par la société Indienne « Paradeep ».	69
<b>Figures 18</b> : Culture de la corète avec amendement par le fumier et le PG.	71
<b>Figures 19</b> : Culture du navet avec amendement par le PG et le fumier.	71
<b>Figure 20</b> : Perspectives d'emploi à l'échelle mondiale.	73

## **Section 1 :**

Contexte et objectif de la mission,  
Méthodologie de travail du Comité  
Scientifique

## 1.1 Contexte & Objectif de la mission

Au niveau des pays producteurs de l'acide phosphorique tels que la Chine, les Etats Unis d'Amérique, la Russie, la Belgique, la Jordanie, etc., la classification du phosphogypse (PG) a connu une évolution notable dans son classement de « déchet dangereux » à un « co-produit » et ce suite aux recommandations des instances spécialisées : l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) en 2013 [1] et l'International Fertilizer Association (IFA) en 2016 [2].

L'encadré 1 présente une définition du « co-produit » donnée par l'une des plus grandes base documentaire, scientifique et technique en l'occurrence « Les Techniques de l'Ingénieur » [3] :

### ***Encadré 1 : Définition de la notion « co-produit »***

*« Un co-produit est une matière générée de manière inévitable lors d'un processus de fabrication, simultanément à la production du produit principal. Comme ce dernier, le co-produit doit présenter des spécifications particulières pour être valorisé, généralement au sein de filières spécifiques. Les co-produits ne doivent pas être considérés comme des déchets ou des sous-produits, car leur utilisation fait partie intégrante de la valorisation de la matière première. »*

Par ailleurs l'IFA dans son rapport de 2020, mentionne que la Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-UN) classe depuis 2018 le PG en tant que « ressource anthropogénique » et encourage sa récupération et son utilisation [4]. Les deux encadrés 2 et 3 présentent respectivement la classification du PG par la CEE-UN et sa définition la plus couramment utilisée.

### ***Encadré 2 : Extrait du Rapport de l'IFA 2020 « Phosphogypsum : Leadership-Innovation-Partnership »***

*« En 2018, la Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies a formellement classé le PG comme “ressource anthropogénique” émettant des spécifications pour la réutilisation de cette ressource dans le cadre de la « Classification-cadre des Nations Unies pour les ressources » ».*

### ***Encadré 3 : Définition de la notion « ressource anthropogénique »***

*« Les ressources anthropiques sont définies comme des stocks et des flux de matériaux créés par l'homme ou provoqués par l'activité humaine (par exemple, d'anciennes décharges, des bâtiments ou différents flux de déchets). Le concept de « ressources anthropiques » va au-delà du concept de « matières premières secondaires », car il fait référence à l'ensemble des ressources, y compris les parts de matériaux qui ne sont pas encore économiquement viables ».*

Soucieux de suivre les évolutions dans le monde du cadre réglementaire régissant la classification et la valorisation des rejets issus notamment des activités industrielles, le Gouvernement Tunisien a accordé une attention particulière à la classification et à la valorisation du phosphogypse généré de la transformation du minerai de phosphate en acide phosphorique et engrais par la révision du décret n° 2000-2339 du 10 octobre 2000 fixant la liste des déchets dangereux et l'établissement d'un plan pour la gestion et la valorisation du phosphogypse considéré comme « déchet dangereux ». Deux Conseils Ministériels Restreints (CMR) tenus le 29/06/2017 et le 11/04/2023 ont été consacrés respectivement à « *Les solutions pratiques pour l'arrêt du déversement du phosphogypse dans le golfe de Gabès* » et à « *Le secteur du phosphate et dérivés : réalités et perspectives de développement* ».

Le CMR de 2017 a recommandé en particulier « d'appeler le Ministère de l'Environnement à réaliser les études scientifiques indispensables et nécessaires pour la reclassification du phosphogypse de produit dangereux à co-produit ».

Le CMR de 2023 a recommandé en particulier « de constituer une équipe de travail regroupant des représentants du Ministère de l'Environnement et du Ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Energie pour fixer un plan pour les décharges du phosphogypse et l'élaboration d'un programme de sa valorisation et de son utilisation dans les domaines de l'industrie et de l'équipement ».

En application de la recommandation du CMR du 11 avril 2023, le Ministère de l'Environnement a créé, en avril 2023, une Commission Mixte regroupant des représentants des Ministères de l'Environnement, de l'Industrie, des Mines et de l'Energie, Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, de l'Agriculture des Ressources Hydriques et de la Pêche, de la Santé, de l'Equipement, des Domaines de l'Etat et des Réserves Foncières, de l'Intérieur et des Affaires Sociales. Cette Commission Mixte a pour principales missions :

- de préparer un projet de révision du décret n° 2000-2339 du 10 octobre 2000 fixant la liste des déchets dangereux en s'orientant vers la reclassification du phosphogypse en tant que co-produit.
- de suivre et d'accélérer la réalisation des analyses et rapports techniques.
- de coordonner avec les parties concernées et les autorités régionales pour la gestion rationnelle du phosphogypse y compris sa valorisation et son utilisation dans les différents domaines possibles.

Cette Commission Mixte a fait appel à un Comité Scientifique regroupant des experts universitaires et professionnels pour réaliser une synthèse bibliographique actualisée sur les travaux de recherche relatifs aux caractérisations physico-chimiques et radiologiques du PG et sur les dernières avancées scientifiques, techniques et réglementaires en Tunisie et dans le monde concernant la gestion et la valorisation du PG.

Le Comité Scientifique est appelé à éclairer la Commission sur la révision du classement du PG tunisien parmi la liste des « déchets dangereux ».

## 1.2 Méthodologie de travail du Comité Scientifique

Pour atteindre les objectifs escomptés, le Comité Scientifique, a démarré ses travaux en juillet 2023 par le recensement et la collecte des documents les plus pertinents en relation avec les différents aspects de la mission.

L'ensemble des documents recueillis, environ 170 documents sous forme papier et numérique, répartis entre brevets, rapports techniques des instances internationales spécialisées, articles issus de travaux de recherche-développement, actes de colloques spécialisés, réglementations et normes, etc., a été examiné par les membres du Comité Scientifique et discuté lors d'une série de réunions, tenues durant la période : juillet 2023-février 2024.

Le Comité Scientifique a été également représenté respectivement, en présentiel et par visioconférence, aux deux réunions de suivi de ses travaux : la 1<sup>ère</sup> réunion de la Commission mixte, tenue au Ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Energie le 1<sup>er</sup> novembre 2023 et la 2<sup>ème</sup> réunion de la Commission permanente de l'environnement au Conseil National de Sécurité, tenue au Ministère de l'Environnement, le 26 janvier 2024.

Par ailleurs, le Comité Scientifique a conçu et a réalisé le programme de la Rencontre Scientifique portant sur « La valorisation du phosphogypse : Opportunités pour le développement économique régional », tenue à Gafsa, les 13 et 14 décembre 2023.

Cette Rencontre a réuni les principaux acteurs concernés par la gestion et la valorisation du PG : chercheurs, industriels et institutionnels. Les communications présentées ainsi que l'ensemble des recommandations adoptées ont été rassemblées dans un Recueil portant la référence ISBN : 487-01-20-12-2023, publié en janvier 2024.

Parmi les recommandations issues de cette Rencontre Scientifique, nous citons en particulier :

- **« la nécessité de réviser le cadre juridique tunisien réglementant le phosphogypse en le retirant de la liste des déchets dangereux » ;**
- **« la nécessité de considérer le phosphogypse comme « co-produit » à part entière » ;**
- **« la nécessité de sensibiliser davantage toutes les parties concernées à l'importance de la valorisation du phosphogypse ».**

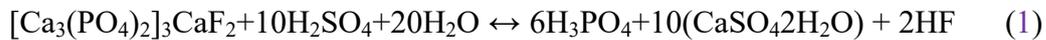
Les différents aspects relatifs à ces recommandations seront développés dans le présent rapport du Comité Scientifique structuré en cinq sections :

- **Section 1** : Contexte et objectif de la mission, Méthodologie de travail du Comité Scientifique.

- **Section 2** : Caractérisation du PG dans le monde et en Tunisie.
- **Section 3** : Cadre légal et réglementaire régissant le PG dans le monde et en Tunisie.
- **Section 4** : Gestion & Valorisation du PG dans le monde et en Tunisie.
- **Section 5** : Conclusions & Recommandations.

**Section 2 :**  
Caractérisation du PG  
dans le monde et en Tunisie

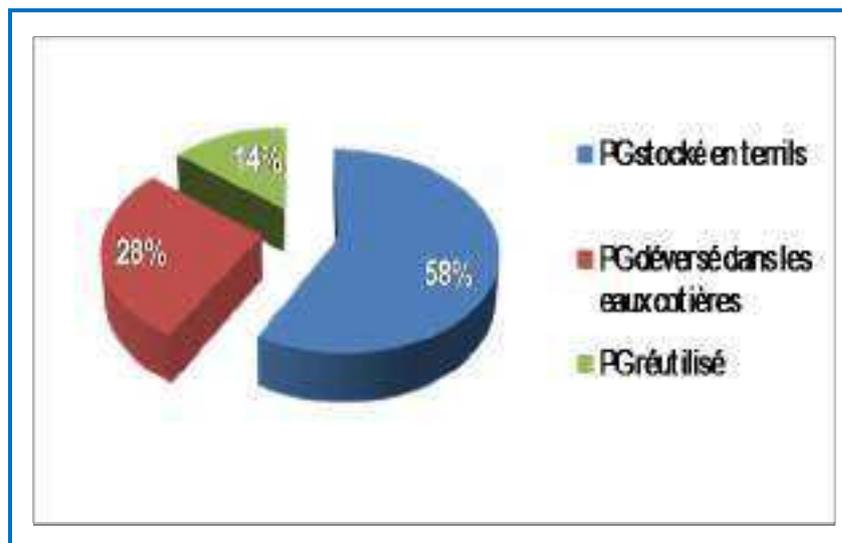
Le phosphogypse (PG) est le principal sous-produit généré lors de la production d'acide phosphorique, produit intermédiaire dans la production d'engrais phosphatés, à partir du minerai de phosphate de calcium (apatite). Le sous-produit PG est généré par le procédé de fabrication de l'acide phosphorique par voie humide (WPA), procédé le plus utilisé dans le monde, au cours duquel le minerai de phosphate réagit avec l'acide sulfurique à environ 80°C selon l'équation ci-après :



Le PG ainsi généré se présente sous forme de sulfate de calcium di-hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Il est à signaler que la réaction d'une (1) tonne de minerai de phosphate tunisien se fait généralement avec 0.8 tonne d'acide sulfurique concentré ce qui donne environ 1 tonne d'acide phosphorique (à 28%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) et 1.45 tonnes de PG.

Actuellement, dans le monde, près de 300 millions de tonnes de PG sont produites chaque année comme sous-produit de la production d'acide phosphorique. Environ 58 % du PG sont stockés en terrils, 28 % sont déversés dans les eaux côtières et 14 % sont traités ultérieurement (Figure 1) [10].



**Figure 1** : Répartition de la gestion du PG dans le monde.

Depuis la transformation du minerai de phosphate, environ 4 à 5 milliards de tonnes de PG sont ainsi stockés en terrils dans plus de 50 pays producteurs d'acide phosphorique.

En Tunisie, on transforme ces dernières années dans les différents sites de production du Groupe Chimique Tunisien (GCT) en moyenne 3 millions de tonnes par an de phosphate générant environ 4.5 millions de tonnes de PG qui sont stockés en terrils et déversés dans la mer comme le montre le tableau 1. Le stock global actuel de PG, exprimé sur base sèche, est estimé à 130 Millions de tonnes.

**Tableau 1** : Mode de stockage et quantités de PG en Tunisie<sup>(\*)</sup>.

Site de production	Mode actuel de stockage	Quantité annuelle (Mt/an)	
		enregistrée	nominale
Gabès	Déversé dans la mer	2.8	5.0
Skhira	Terril	1.6	3.7
Mdhilla	Terril	0.6	0.8
Sfax	Terril (1952-2016)	Arrêt de production depuis 2016	

(\*) : Données recueillies auprès du GCT.

(\*\*) : Période : 2011-2023.

## 2.1 Caractéristiques du PG

Cette partie du rapport est consacrée à la présentation des caractéristiques physico-chimiques et radiologiques du PG dans le monde et en Tunisie. L'objectif étant d'établir une base de comparaison du PG tunisien avec les PG d'autres pays d'une part et avec d'autres produits tels que le phosphate naturel et certains engrais d'autre part.

### 2.1.1 Caractéristiques physiques

Le PG est une substance minérale humide, poudreuse, de limon ou de sable-limoneux avec une gamme de taille maximale comprise entre environ 0.5 mm et 1.0 mm. La majorité des particules sont plus fines que 0.075 mm. Le PG est classé selon « Universal Soil Classification (USC) » en tant que matériau sable-limoneux (ML) A-4 sol, dans le système de classification des sols AASHTO [5,6].

Le PG se présente comme poudre fine dont la couleur dépend du minerai d'extraction du phosphate et surtout de sa concentration en matière organique (voir figure 2). Il présente un pourcentage de fines particules d'environ 60%. [5]



**Figure 2** : Une photo d'un échantillon du PG Tunisien.

Le PG est composé essentiellement de sulfate de calcium (75 à 78 % pour le procédé au dihydrate (WPA)) mélangé avec du phosphate de calcium sous différentes formes. La densité du PG sec varie entre 0.85 et 1.5. La granulométrie du PG est généralement comprise entre 0.01 et 0.5 mm, avec un diamètre moyen des grains  $D_{50}$  de l'ordre de 0.05 mm (50  $\mu\text{m}$ ), et plus de 80% du passant à 0.1 mm. Même après lavage, le PG reste imprégné de traces d'acides libres ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , HF,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), et son pH se situe entre 2 et 3 et garde un taux d'humidité variant de 20 à 35 % [7].

## 2.1.2 Caractéristiques chimiques

Le PG se compose essentiellement de sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) et d'eau de cristallisation avec la présence de quelques impuretés classées en deux catégories [8] :

### a) Impuretés solubles

Ce sont des sels ou acides non éliminés par le lavage durant le procédé : ils se présentent sous forme de  $\text{P}_2\text{O}_5$  et du Fluor. Ces acides attribuent au PG un pH compris entre 2 et 4.

### b) Impuretés insolubles

Les impuretés insolubles proviennent :

- des minéraux et composés non transformés pendant la réaction entre le minerai phosphate et l'acide sulfurique tels que: Silice, Phosphate non attaqué, Carbone organique etc.
- des résidus de décomposition des organismes fossiles ayant été à l'origine de la formation des phosphates, des réactions secondaires dans le milieu réactionnel :  $\text{P}_2\text{O}_5$  syncristallisé et éléments traces, principalement des métaux lourds tels que le Cadmium et le Strontium et des éléments radioactifs tels que l'Uranium.

#### 2.1.2.1. Le phosphogypse à l'étranger

D'après la littérature rassemblée [1, 7, 9, 10], les tableaux 2,3 et 4 présentent un aperçu sur la composition chimique du PG généré par différents producteurs d'acide phosphorique à travers le monde tels que : l'Afrique du Sud, l'Algérie, la Belgique, la Chine, l'Egypte, les Etats Unis d'Amérique, l'Inde, le Maroc et la Turquie. Ces tableaux peuvent constituer une base référentielle permettant de situer le PG Tunisien en termes de composition en éléments majeurs, métaux à l'état de traces et de terres rares.

**Tableau 2** : Teneurs en éléments majeurs du PG à l'étranger (\*).

Élément	Teneur minimum (%)				Teneur maximum (%)			
	[7]	[9]	[10]	[1]	[7]	[9]	[10]	[1]
$\text{SO}_3$	39.6	---	42.5	40	47.1	---	44.8	48
CaO	27.8	25	30.5	24	34.0	32	35.2	34
$\text{SiO}_2$	0.50	0.3	4.4	0.5	6.00	9.5	6.8	18
$\text{Na}_2\text{O}$	0.12	0.13	0.04	0.12	1.00	1.32	0.08	10
C. Organique	0.10	---	0.01	0.1	2.50	---	0.11	2.5
F	0.10	0.15	0.75	0.1	1.80	1.2	0.96	1.8
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.05	0.5	0.28	0.05	1.42	1.82	1.54	8
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.05	0.1	0.08	0.05	0.60	2.8	0.36	0.6
Cl	0.035	---	$0.910^{-3}$	0.035	0.045	---	$2.410^{-3}$	0.045
MgO	0.01	0.06	< 0.01	0.01	0.54	1.31	0.07	0.54
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.01	0.03	0.06	0.01	0.25	0.9	0.18	0.25

(\*) : Afrique du Sud, Algérie, Belgique, Chine, Egypte, Etats Unis d'Amérique, Inde, Maroc et Turquie

La variation des teneurs de chaque élément majeur dans les PG s'explique par la variation des teneurs dans les minerais de phosphate traités.

Le tableau 3 regroupe les teneurs minimales et maximales en éléments traces métalliques signalées dans la littérature. [1, 2, 7, 9 à 11]

**Tableau 3** : Concentrations en éléments traces métalliques du PG à l'étranger (\*).

Élément	Teneur minimum (mg/kg)			Teneur maximum (mg/kg)		
	[1,7,9]	[10]	[1,2,11]	[1,7,9]	[10]	[1,2,11]
Strontium (Sr)	205	402	10	1 118	801	670
Baryum (Ba)	32	53	7	236	150	140
Zirconium (Zr)	29	---	< 10	76	---	185
Titane (Ti)	26	---	---	470	---	---
Zinc (Zn)	4.0	34	6	107	49	112
Chrome (Cr)	1.6	4	< 10	75	14	70
Manganèse (Mn)	3.5	---	< 2	20	---	15
Cuivre (Cu)	2.0	1	8	195	60	103
Vanadium (V)	2.0	2	10	20	4	40
Nickel (Ni)	1.7	1	2	250	4	15
Arsenic (As)	1.3	2	< 1	42	2	40
Cadmium (Cd)	0.8	1	7	25	3	28
Sélénium (Se)	0.5	---	4	24	---	67
Plomb (Pb)	0.5	2	1	17	6	7
Uranium (U)	0.5	< 1	6	6,8	5	13
Argent (Ag)	0.4	---	< 1	5,0	---	11
Thorium (Th)	0.4	1	< 1	3,6	3	1

(\*) : Afrique du Sud, Algérie, Belgique, Chine, Egypte, Etats Unis d'Amérique, Inde, Maroc et Turquie.

D'après ce tableau, on remarque que le PG concentre de nombreux métaux provenant des impuretés du minerai de phosphate.

Les teneurs en éléments de terres rares les plus répandus dans le PG sont présentées dans le tableau 4 [1, 2, 9, 11 à 13].

**Tableau 4** : Concentrations en éléments de terres rares (ETR) du PG à l'étranger (\*).

Élément	Teneur (mg/kg)			
	[1,2,9]	[11]	[12]	[13]
Yttrium (Y)	2 – 156	69.1	69.7 ± 35.2	91.3
Lanthane (La)	42 – 90	54.7	43.8 ± 27.4	82.7
Cérium (Ce)	21 – 143	79.6	65.7 ± 72.6	132.7
Néodyme (Nd)	30 – 67	53.9	40.5 ± 29.4	75.5
Samarium (Sm)	5 – 13	9.83	7.7 ± 5.5	15
Europium (Eu)	1.1 – 3	2.37	1.7 ± 1.1	3.5
Ytterbium (Yb)	2.1 – 3.2	3.37	---	4.4
Lutécium (Lu)	0.3 – 0.4	0.41	0.45 ± 0.26	0.50

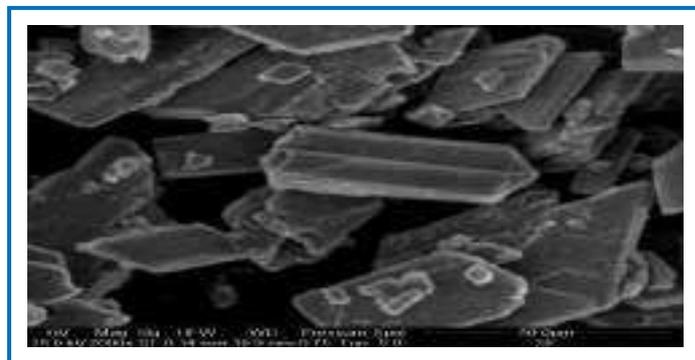
(\*) : Afrique du Sud, Algérie, Belgique, Chine, Egypte, Etats Unis d'Amérique, Inde, Maroc et Turquie.

Les teneurs en éléments de terres rares (ETR) dans les PG étrangers les plus élevées sont celles des ETR yttrium (Y), lanthane (La), cérium (Ce) et néodyme (Nd). Celle du Samarium (Sm) est plus faible, tandis que les teneurs en ETR : europium (Eu), ytterbium (Yb) et lutécium (Lu) sont à l'état de traces.

### 2.1.2.2. Le phosphogypse Tunisien

Le PG résultant des activités de transformation du minerai de phosphate dans les usines du GCT est constitué d'environ 94 % de gypse (sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )) et de certaines impuretés : silice, acide phosphorique (de 0.7 à 1.5 % exprimé en  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), matières organiques (de 0.2 à 0.3%) et d'éléments traces métalliques.

Le PG se présente sous forme de cristaux avec des dimensions variant de quelques microns à 250 microns avec environ 50 % inférieures à 45 microns (voir figure 3).



**Figure 3** : Une photo d'un échantillon de PG par microscopie électronique à balayage ( $\times 1000$ ).

Les tableaux 5, 6 et 7 regroupent les résultats d'analyse des principales caractéristiques chimiques du PG généré par les usines du GCT, réalisés dans les laboratoires des structures de recherche en Tunisie (ENIS, ENIT, INRAP, CNRSM, CNSTN, ENIG,

FSGafsa, etc.) et les laboratoires du GCT en utilisant les techniques les plus avancées et repris dans des rapports techniques nationaux (Guide ANPE 2015), et internationaux (FIPR, Journal of Environmental Science and Health, EPISciences-Environnement, ingénierie & développement, journal scientifique Genomics, etc.).

**Tableau 5** : Teneurs en éléments majeurs du PG Tunisien (\*).

Élément	Teneur (%)						
	[5]	[8]	[9]	[11]	[7]	[14]	[15]
SO <sub>3</sub>	37-40.8	44.3	46	44.6-44.8	43.9	45.3	---
CaO	32.5-32.8	30.6	31-32	31.9- 32.1	32.6	31.6	---
SiO <sub>2</sub>	1.4-2.6	1.7	---	1.7-2.3	3.07	2.99	---
Na <sub>2</sub> O	---	0.7	0.3	0.12-0.16	0.09	0.30	0.09
C. Organique (**)	0.20-0.31	0.45	---	0.3-0.6	---	0.64	0.54
F	0.6-1.4	1.3-1.8	1.2	0.6-1.2	0.53	1.20	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.74-1.58	1	1.2	0.75-1.7	1.71	1.00	0.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	0.11	0.1	0.13-0.16	0.10	0.12	0.27
Cl	---	0.045-0.087	---	---	---	0.040	---
MgO	---	0.02	0.4	0.01-0.02	0.009	0.11	0.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	0.05	0.1	0.09-0.10	0.03	0.13	0.06

(\*) : Analyses effectuées par les laboratoires de recherche en Tunisie.

(\*\*) : Les matières organiques sont composées d'acides humiques et d'acides fulviques.

**Tableau 6** : Concentrations en éléments traces métalliques dans le PG Tunisien (\*).

Élément	Concentration (mg/kg)			
	[11,16]	[8]	[15]	[17] (**)
Strontium (Sr)	1238 - 1375	1100	647	---
Baryum (Ba)	13.3 - 18.5	---	14.4	---
Zirconium (Zr)	6.15 - 7.98	---	1.59	---
Titanium (Ti)	---	50 - 60	---	---
Zinc (Zn)	20.7 - 182	50 - 100	113.7	50 - 100
Chrome total (Cr)	14.4 - 22.4	10 - 30	---	10 - 30
Manganèse (Mn)	---	5 - 7	2.69	5 - 7
Cuivre (Cu)	---	---	4.56	5 - 18
Vanadium (V)	2.44 - 4.16	< 5	2.14	< 5
Nickel (Ni)	---	3 - 5	5.20	3 - 5
Arsenic (As)	0.63 - 1.02	---	0.17	< 2
Cadmium (Cd)	3.1 - 22.9	5 - 20	20.19	5 - 15
Sélénium (Se)	---	---	2.38	---
Plomb (Pb)	1.76 - 2.01	< 5	4.22	< 2
Uranium (U)	2.26 - 3.3	2.26 - 3.3	---	---
Thorium (Th)	1.25 - 1.66	< 2	---	---

(\*) : Analyses effectuées par les laboratoires de recherche en Tunisie.

(\*\*) : Analyses effectuées par les laboratoires du GCT, accrédités ISO/CEI 17025 (2017) depuis 2008.

**Tableau 7** : Concentrations en éléments de terres rares (ETR) dans le PG Tunisien.

Élément	Concentration (mg/kg)		
	[18,19]		[8]
	PG récent (*)	PG ancien (**)	
Yttrium (Y)	44	81	55 – 69
Lanthane (La)	36	54	50 – 59
Cérium (Ce)	50	97	77 – 89
Néodyme (Nd)	53	59	46 – 55
Samarium (Sm)	7.1	9.6	8.6 – 10.3
Europium (Eu)	1.7	2.3	1.9 – 2.5
Ytterbium (Yb)	3.3	5.6	2.7 – 3.5
Lutécium (Lu)	0.3	0.6	0.4 – 0.5

(\*) PG prélevé du terril de l'usine du GCT à Sfax de fraîche production.

(\*\*) PG prélevé du terril de l'usine du GCT à Sfax de plus de 40 ans.

L'examen des tableaux 5, 6 et 7 nous permet de faire les remarques suivantes sur le PG tunisien :

- Le PG se compose essentiellement de sulfate de calcium dihydrate (gypse) avec présence d'impuretés solubles (fluorures et  $P_2O_5$ ), d'impuretés insolubles (minéraux et composés non transformés pendant la réaction entre le minerai phosphate et l'acide sulfurique) en l'occurrence Silice, Phosphate non attaqué et Carbone organique et  $P_2O_5$  syncristallisé et des éléments métalliques en faibles teneurs (tableau 5).
- La concentration en éléments traces métalliques la plus importante est celle du strontium (Sr) suivie de celle du baryum (Ba), du chrome total (Cr), du cadmium (Cd), du cuivre (Cu) et du manganèse (Mn). Les concentrations des autres éléments métalliques tels que le sélénium, l'arsenic, le plomb, etc. sont trop faibles (tableau 6).

**Les concentrations en éléments de terres rares (ETR) les plus importantes sont celles des ETR légers en l'occurrence l'yttrium (Y), le lanthane (La), le cérium (Ce) et le néodyme (Nd). Tandis que les concentrations en ETR Samarium (Sm), europium (Eu), ytterbium (Yb) et lutécium (Lu) sont à l'état de traces (tableau 7).**

### 2.1.2.3 Comparaison du PG Tunisien avec le minerai de phosphate et quelques dérivés

Le tableau 8 permet de comparer les teneurs en éléments majeurs du PG Tunisien avec le phosphate naturel et des engrais à base de phosphate les plus commercialisés dans le monde tels que triple super phosphate (TSP), simple super phosphate (SSP) et di-ammonium phosphate (DAP).

**Tableau 8** : Teneurs en éléments majeurs du PG Tunisien comparées au phosphate naturel et à quelques engrais phosphatés (\*).

Élément	Phosphate naturel	PG	TSP	SSP	DAP
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	28.5 – 29.5	<b>1.0 – 1.5</b>	46 – 47	20 – 22	46 – 47
CaO (%)	48.5 – 49.5	<b>30.6</b>	20 – 22	20.8 – 29.4	0.5 – 1.0
SO <sub>3</sub> (%)	3.05 – 3.45	<b>44.3</b>	---	22.4 – 27.5	5 – 7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.29 – 0.35	<b>0.05</b>	0.3 – 0.4	0.3 – 0.4	0.4 – 0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.54 – 0.60	<b>0.11</b>	0.6 – 1.0	0.5 – 0.6	0.6 – 0.8
MgO (%)	0.5 – 0.7	<b>0.02</b>	1.1 – 1.3	0.5 – 0.6	0.9 – 1.2
SiO <sub>2</sub> (%)	2.8 – 3.6	<b>1.7</b>	---	---	0.5 – 1.5
F (%)	3.2 – 0.3.4	<b>1.3-1.8</b>	2.0 – 2.2	1.0 – 1.2	0.6 – 1.0
Cl (%)	0.09 – 0.19	<b>0.045</b>	---	0.04 – 0.05	0.06 – 0.12
CO <sub>2</sub> (%)	6.6 – 7.4	---	0.2 – 0.4	--	---
C.org (%)	0.4 – 1.4	<b>0.45 – 0.85</b>	---	0.5 – 0.7	---
Na <sub>2</sub> O (%)	0.95 – 1.35	<b>0.7</b>	---	---	0.5 – 1.0
K <sub>2</sub> O (%)	0.06 – 0.08	<b>0.02</b>	---	---	0.1

(\*) Analyses fournies par les laboratoires du GCT, accrédités ISO/CEI 17025 (2017) depuis 2008.

Il ressort de l'examen de ce tableau les remarques suivantes :

- Le PG contient des concentrations en éléments majeurs nettement plus faibles que celles du minerai de phosphate à l'exception du calcium (Ca) et du sulfate (SO<sub>3</sub>). Ceci s'explique par le fait que ces éléments se sont répartis en majorité dans l'acide phosphorique et le reste dans le PG.
- Par rapport aux engrais TSP, SSP et DAP, le PG contient des concentrations en éléments majeurs, de même ordre de grandeur tels que la silice (SiO<sub>2</sub>) et le Fluor (F) ou encore plus faibles tels que les oxydes de fer, d'aluminium, de magnésium et de potassium.

Le tableau 9 permet de comparer les concentrations en éléments métalliques traces du PG Tunisien avec le phosphate naturel et quelques dérivés (engrais TSP, SSP et DAP).

**Tableau 9** : Concentrations en éléments traces métalliques du PG Tunisien comparées au phosphate naturel et à certains engrais<sup>(\*)</sup>.

Concentration des éléments (ppm)	Phosphate naturel	PG	TSP	SSP	DAP
Cadmium (Cd)	30 – 60	5 -15	15 – 25	15 – 25	15 – 25
Chrome total (Cr)	150	10-30	160 – 220	100 – 140	150 – 250
Manganèse (Mn)	25	5-7	50	15 – 20	15 – 30
Nickel (Ni)	25	3-5	10 – 16	---	10 – 20
Vanadium (V)	30 – 70	Inf à 5	---	---	60 – 70
Cuivre (Cu)	20	5-18	---	5 – 10	2 – 4
Zinc (Zn)	350 – 450	50-100	160 – 165	160 – 200	150 – 340
Plomb (Pb)	Inf à 5	Inf à 2	Inf à 1	Inf à 1	Inf à 5
Arsenic (As)	Inf à 4	Inf à 2	Inf à 1	Inf à 1	Inf à 4
Mercure (Hg)	Inf à 1	Inf à 1	Inf à 1	Inf à 1	Inf à 1

(\*) Analyses effectuées par les laboratoires du GCT, accrédités ISO/CEI 17025 (2017) depuis 2008.

En comparaison avec le phosphate naturel et les engrais (TSP, SSP, DAP), la concentration en éléments traces métalliques, dont des métaux lourds, présents dans le PG est largement inférieure à celle trouvée dans le minerai de phosphate et les engrais dérivés.

#### 2.1.2.4 Comparaison du PG Tunisien avec des PG étrangers

Les tableaux 10 et 11 regroupent les compositions de PG tunisien en comparaison avec des PG étrangers de pays producteurs d'acide phosphorique et d'engrais phosphatés.

**Tableau 10** : Teneurs en éléments majeurs du PG Tunisien comparées avec d'autres PG étrangers [9].

CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	F (%)	Pays
31.8	0.88	0.10	0.03	0.06	40.90	1.32	0.87	1.2	Algérie
30.79	1.88	2.10	---	0.8	42.56	---	---	---	Chine
32.13	8.78	0.29	0.35	0.09	37.60	---	1.82	0.80	Egypte
31.09	0.29	0.54	---	1.31	43.21	0.29	0.47	0.86	Inde
30.5	9.5	2.8	0.9	0.3	42.9	---	0.5	0.15	Maroc
<b>31 – 32</b>	---	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.4</b>	<b>45</b>	<b>0.3</b>	<b>1.2</b>	<b>1.2</b>	<b>Tunisie</b>
32.04	3.44	0.88	0.32	---	44.67	0.13	0.50	0.79	Turquie
25 – 31	3 - 18	0.1-0.3	0.2	---	55 - 58	---	0.5 - 4.0	---	USA

**Tableau 11** : Concentrations en éléments traces métalliques du PG Tunisien comparées avec d'autres PG étrangers (\*).

Eléments traces métalliques (ppm)	PG Tunisien	PG étrangers (*) [1,9]
<b>Cadmium (Cd)</b>	5 – 15	1 – 40
<b>Plomb (Pb)</b>	< 2	0.5 – 16
<b>Mercure (Hg)</b>	< 1	0.005 – 10
<b>Arsenic (As)</b>	< 1	1 – 42
<b>Zinc (Zn)</b>	50 – 100	4 – 315
<b>Chrome (Cr)</b>	10 – 30	1.6 – 75
<b>Vanadium (V)</b>	< 5	2 - 40
<b>Nickel (Ni)</b>	3 – 5	1.7 – 250
<b>Manganèse (Mn)</b>	5 – 7	3.5 – 20

(\*) : Valeurs reprises du rapport de l'AIEA de 2013 [1].

A la lumière de ces trois tableaux, on peut remarquer que :

- Les concentrations en éléments majeurs dans le PG Tunisien sont du même ordre de grandeur que celles des PG étrangers.
- Les concentrations en éléments traces métalliques en particulier les métaux lourds (cadmium (Cd), plomb (Pb) arsenic (As) et mercure (Hg), nickel (Ni), chrome (Cr) et zinc (Zn)) dans le PG Tunisien sont plus faibles que celles des PG étrangers.

Par ailleurs, à la base des tableaux 4 et 7, les concentrations en éléments de terres rares (ETR) dans le PG Tunisien sont du même ordre de grandeur que celles des PG étrangers précités.

### 2.1.3 Caractéristiques radiologiques

Les minerais de phosphate naturel exploités pour la fabrication de l'acide phosphorique contiennent des traces d'éléments radioactifs d'origine naturelle (Naturally Occuring Radioactive Material : NORM). Ces radio-éléments peuvent se retrouver en partie dans le PG, comme le montre le tableau 12 qui rassemble les valeurs de l'activité des radio-éléments dans le minerai de phosphate ainsi que dans le PG.

La radioactivité du PG est généralement évaluée en fonction des activités des éléments suivants :  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ .

**Tableau 12** : Eléments radioactifs présents dans le minerai de phosphate, le PG et le gypse naturel.

Radio-élément	Radioactivité du minerai de phosphate (Bq/kg) [7]	Radioactivité du PG (Bq/kg) [7]	Radioactivité du Gypse naturel (Bq/kg) [10]
Radium ( $^{226}\text{Ra}$ )	40 – 5022	52 – 3219	---
Plomb ( $^{210}\text{Pb}$ )	240 – 1835	250 – 1833	---
Polonium ( $^{210}\text{Po}$ )	238 – 1835	355 – 1765	---
Thorium ( $^{230}\text{Th}$ )	867 – 1957	90 – 513	---
Uranium ( $^{234}\text{U}$ )	985 – 2183	68 – 470	---
Uranium ( $^{238}\text{U}$ )	90 – 4800	23 – 468	---
Thorium ( $^{232}\text{Th}$ )	11 – 622	2 – 39	2 – 20
Protactinium ( $^{231}\text{Pa}$ )	46	14	---
Actinium ( $^{227}\text{Ac}$ )	46	14	---
Uranium ( $^{235}\text{U}$ )	46	7	---
Radium ( $^{228}\text{Ra}$ )	30	24	10 – 20
Thorium ( $^{228}\text{Th}$ )	30	9	---

Le tableau 13 présente une comparaison de la radioactivité du PG tunisien avec des PG étrangers.

**Tableau 13** : Comparaison de la radioactivité du PG Tunisien avec des PG étrangers.

Origine du PG	Origine du phosphate	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	Référence
Sfax, (Tunisie)	Mdhilla	40 – 70 47 (35–66) 39	200 – 220 275 (209 – 340) 200	10 – 20 15 (8– 20) 15	[1] [2,7] [11]
Gabès, (Tunisie)	Métlaoui	---	212, 217	---	(*)
Australie	---	510	451 – 500	10	[1,7]
Floride, (USA)	Floride Centrale	130 (93– 190)	1120 (836 – 1670)	3.7	[1,7]
Maroc	Khouribga	---	1090 – 1750	---	[1,7]
Egypte	Abu Tartour	134	411	19	[1,7]
Espagne	---	---	727 (430 – 1616)	---	[1,7]

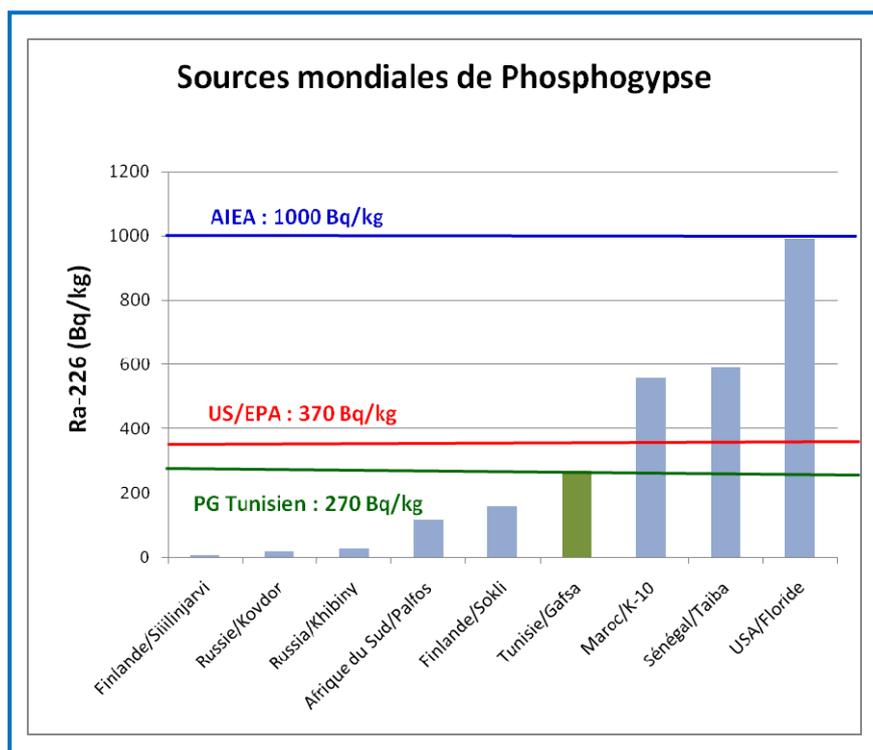
(\*) : Analyses effectuées en 2015 par le CNSTN.

D'après le tableau 13, la radioactivité du PG Tunisien est principalement due à la radioactivité du radium  $^{226}\text{Ra}$  qui représente environ 80% de l'activité totale présente. Par ailleurs, les radioactivités des éléments  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{238}\text{U}$  sont largement inférieures à celles des PG étrangers. En outre, la radioactivité du  $^{40}\text{K}$  dans le PG Tunisien est de l'ordre de 10 Bq/kg, elle est également largement inférieure aux valeurs de radioactivité  $^{40}\text{K}$  des PG étrangers (voir annexe 1).

A titre de comparaison, les valeurs de l'activité radioactive (exprimée en Becquerel par unité de masse (Bq/kg)  $^{226}\text{Ra}$  d'un terrain granitique naturel [7] et celle d'un sol tunisien [2,7,20] sont respectivement d'environ 8000 et 22 Bq/kg.

Il est à signaler que l'United States Environmental Protection Agency (USEPA), a fixé en 1992, un seuil maximal pour le niveau d'exposition au  $^{226}\text{Ra}$  de 370 Bq/kg [7]. En 2013 l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) a fixé ce seuil à 1000 Bq/kg [1].

La figure 4 permet aussi de situer la radioactivité du PG Tunisien (exprimée en Bq/g de  $^{226}\text{Ra}$ ) par rapport aux PG étrangers et aux valeurs standards (AIEA, USEPA). Il est à noter que les PG ayant une radioactivité naturelle inférieure à 0.2 Bq/g (soit 200Bq/kg) sont issus de phosphate volcanique. [21]



**Figure 4 :** Comparaison de la radioactivité du PG Tunisien par rapport à des PG étrangers et à des valeurs standards.

### *En guise de conclusion :*

En se référant aux standards de l'USEPA et de l'AIEA [1,7] et des études menées en Tunisie et à l'étranger [1, 2, 5, 7, 8, 10, 11], il est constaté que **le PG Tunisien présente une activité radioactive exprimée en  $^{226}\text{Ra}$  de 275 Bq/kg, qui est conforme au seuil standard international de 1000 Bq/kg et qui est également inférieure à l'ensemble des valeurs de radioactivités des PG étrangers issus de la transformation des phosphates sédimentaires.**

## **2.2 Evaluation de l'écotoxicité et de la toxicité aiguë du phosphogypse tunisien**

### **2.2.1 Evaluation de l'écotoxicité du phosphogypse « HP 14 »**

L'évaluation de l'écotoxicité du PG Tunisien a été menée en se basant sur l'application de la directive européenne 2008/98/CE, telle que révisée de 2014 à 2018, et en particulier du règlement (UE) 2017/997 modifiant l'annexe III de cette directive, et des « Recommandations techniques concernant la classification des déchets » objets du document 2018/C 124/01.

Le document 2018/C 124/01 fournit en particulier des précisions et des orientations à l'intention des autorités et des entreprises concernant l'interprétation et l'application correctes de la législation européenne en matière de classification des déchets, c'est-à-dire sur la mise en évidence des propriétés dangereuses, l'évaluation de la dangerosité d'un déchet et, enfin, la classification de ce déchet comme déchet dangereux ou non dangereux. Ce document comporte également des précisions sur la propriété de danger « HP 14 : Écotoxique » et la procédure de son évaluation (voir les deux encadrés 4 et 5).

#### **Encadré 4 : Définition de la propriété « HP 14 »**

*La propriété HP 14 est définie comme suit : « déchet qui présente ou peut présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement ». Elle décrit le potentiel écotoxique comme une propriété intrinsèque des déchets, en indiquant si ceux-ci comportent ou peuvent comporter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement.*

**Encadré 5 : Méthode d'évaluation de la propriété « HP 14 »  
selon le règlement (UE) 2017/997**

Un déchet qui satisfait à l'une des conditions suivantes est classé comme dangereux de type « HP 14 » :

- Le déchet contient une substance classée comme appauvrissant la couche d'ozone et portant le code de mention de danger « H420 » en application du règlement (CE) no 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil (\*), et la concentration de cette substance atteint ou dépasse la limite de concentration de 0,1 %.

$$[c(\text{H420}) \geq 0,1 \text{ \%}]$$

- Le déchet contient une ou plusieurs substances classées dans la catégorie de toxicité aquatique aiguë et portant le code de mention de danger « H400 » en application du règlement (CE) no 1272/2008, et la somme des concentrations de ces substances atteint ou dépasse la limite de concentration de 25 %. Une valeur seuil générique de 0,1 % est appliquée à ces substances.

$$[\Sigma c(\text{H400}) \geq 25 \text{ \%}]$$

- Le déchet contient une ou plusieurs substances classées dans la catégorie 1, 2 ou 3 de toxicité aquatique chronique et portant les codes des mentions de danger « H410 », « H411 » ou « H412 » en application du règlement (CE) no 1272/2008, et la somme des concentrations de toutes les substances classées dans la catégorie 1 de toxicité aquatique chronique « H410 » multipliée par 100, ajoutée à la somme des concentrations de toutes les substances classées dans la catégorie 2 de toxicité aquatique chronique « H411 » multipliée par 10, ajoutée à la somme des concentrations de toutes les substances classées dans la catégorie 3 de toxicité aquatique chronique « H412 » atteint ou dépasse la limite de concentration de 25 %. Des valeurs seuils de 0,1 % et de 1 % sont appliquées respectivement aux substances portant le code « H410 » et aux substances portant les codes « H411 » ou « H412 ».

$$[100 \times \Sigma c(\text{H410}) + 10 \times \Sigma c(\text{H411}) + \Sigma c(\text{H412}) \geq 25 \text{ \%}]$$

- Le déchet contient une ou plusieurs substances classées dans la catégorie 1, 2, 3 ou 4 de toxicité aquatique chronique et portant les codes des mentions de danger « H410 », « H411 », « H412 » ou « H413 » conformément au règlement (CE) no 1272/2008, et la somme des concentrations de toutes les substances classées dans la catégorie de toxicité aquatique chronique atteint ou dépasse la limite de concentration de 25 %. Des valeurs seuils génériques de 0,1 % et de 1 % sont appliquées respectivement aux substances portant le code « H410 » et aux substances portant les codes « H411 », « H412 » ou « H413 ».

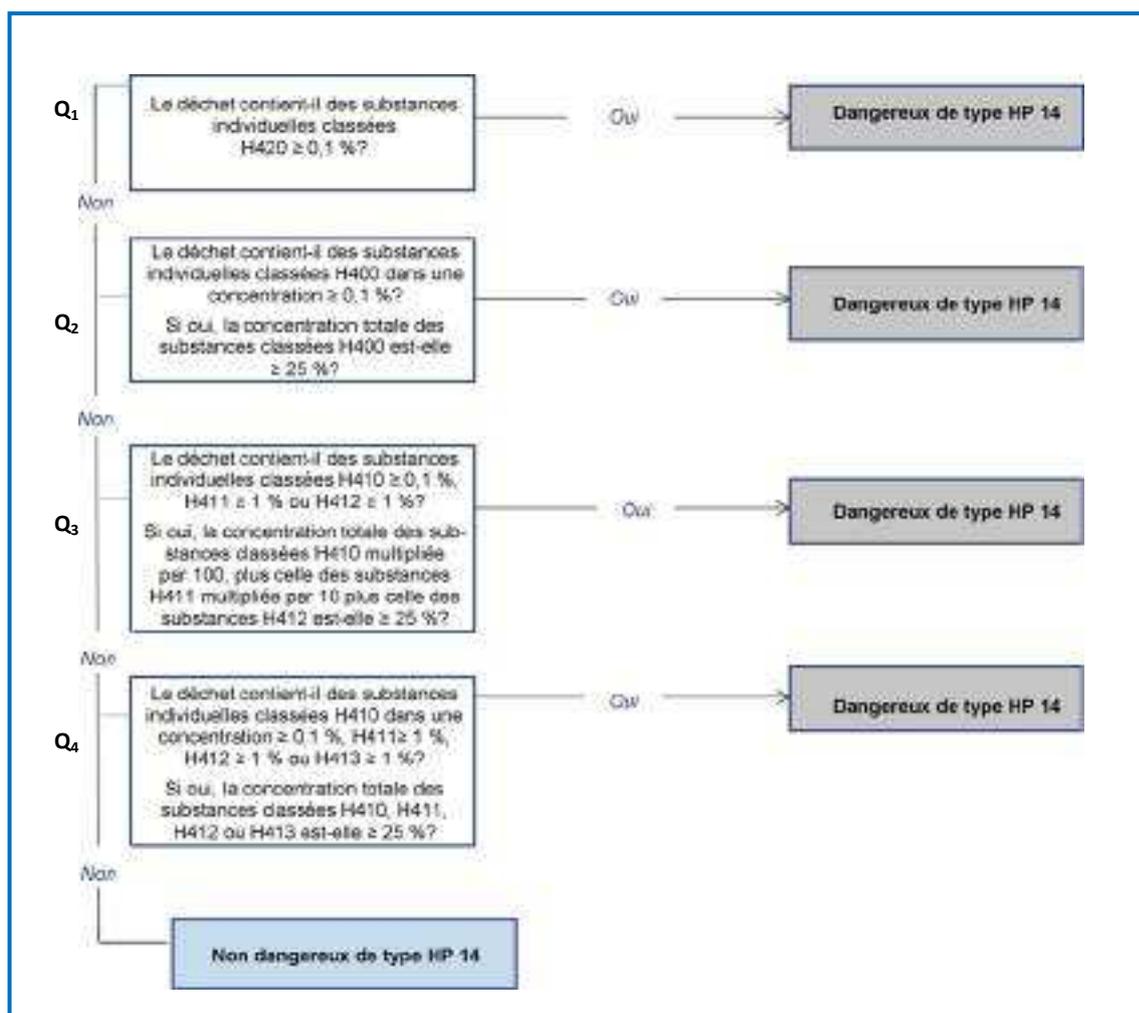
$$[\Sigma c\text{H410} + \Sigma c\text{H411} + \Sigma c\text{H412} + \Sigma c\text{H413} \geq 25 \text{ \%}]$$

Dans laquelle :

*c* : concentrations des substances

$\Sigma$  : somme.

A titre d'illustration, la figure 5 présente le processus d'évaluation de la propriété écotoxicité « HP 14 » (document 2018/C 124/01).



**Figure 5 :** Organigramme du processus d'attribution de « HP 14 ».

Pour appliquer ce processus d'attribution de la propriété « HP14 » au PG Tunisien, nous avons adopté la démarche suivante :

- L'utilisation des analyses des éléments chimiques du PG Tunisien listés dans le tableau « Entrées génériques d'éléments dans le règlement CLP » (voir document 2018/C 124/01).
- L'identification des substances « pire-cas » associées aux éléments chimiques présents en se basant sur la méthode du « *Scénario réaliste le plus défavorable* ».
- L'application des étapes du processus d'attribution de la propriété « HP 14 ».

**Remarques :**

- i) Le « scénario réaliste le plus défavorable » est à adopter dans le cas probable où le détenteur d'un déchet est relativement au fait des éléments, mais non des substances présentes dans celui-ci. Il est recommandé d'envisager les substances qui constitueraient le « scénario réaliste le plus défavorable » pour chaque élément identifié.

- ii) Les substances les plus défavorables sont identifiées sur la base des substances que l'on peut raisonnablement s'attendre à trouver dans le déchet.

Nous présentons dans ce qui suit et dans le tableau 14 une synthèse de l'application du processus d'attribution de la propriété de danger d'écotoxicité « HP 14 » au PG Tunisien.

Pour avoir les résultats, les données nécessaires pour l'application du dit processus consistent à l'établissement de :

- la liste des éléments traces métalliques et leurs concentrations ;
- la liste de l'ensemble des substances dangereuses éventuelles relatives aux éléments traces métalliques ;
- la liste des substances dangereuses défavorables retenues.

#### Données du processus d'évaluation de la propriété HP 14

- Liste des éléments traces métalliques considérés

La liste des éléments traces métalliques à considérer pour l'évaluation de la propriété de danger HP 14 correspond aux entrées génériques d'éléments dans le règlement CLP tel que indiqué dans le « tableau 26 : Entrées génériques d'éléments (11) dans le règlement CLP » du document européen 2018/C 124/01 : « Recommandations techniques concernant la classification des déchets ». Elle comprend : l'arsenic (As), le baryum (Ba), le béryllium (Be), le cadmium (Cd), le chrome VI (Cr (VI)), le mercure (Hg), le plomb (Pb), l'antimoine (Sb), le sélénium (Se), le thallium (Tl) et l'uranium (U).

D'après les résultats de la caractérisation du PG tunisien (chapitre 2..2) on note que les éléments béryllium (Be), antimoine (Sb) et sélénium (Se) ne sont pas détectés dans le PG. La liste retenue comprendra les éléments traces métalliques arsenic (As), baryum (Ba), cadmium (Cd), chrome VI (Cr (VI)), mercure (Hg), plomb (Pb), sélénium (Se), et uranium (U).

- Liste des substances dangereuses éventuelles

Cette liste a été établie en se basant sur les données fournies par l'annexe 4 « Spéciation des substances minérales dans les déchets : Proposition de substances « pire cas avec information » » du rapport publié par l'INERIS « RAPPORT INERIS-DRC-15-149793-06416A du 04/02/2016 intitulé « Classification réglementaire des déchets - Guide d'application pour la caractérisation en dangerosité ». La liste complète des substances dangereuses éventuelles est donnée en **annexe 2**.

La liste retenue comprendra les substances défavorables pour les éléments traces métalliques arsenic (As), baryum (Ba), cadmium (Cd), chrome VI (Cr (VI)), mercure (Hg), plomb (Pb), sélénium (Se), et uranium (U).

À titre d'exemple pour le cadmium (Cd) cette liste comprend les substances suivantes :  
« cadmium chloride.

cadmium compounds, with the exception of cadmium sulphoselenide (xCdS.yCdSe), reaction mass of cadmium sulphide with zinc sulphide (xCdS.yZnS), reaction mass of cadmium sulphide with mercury sulphide (xCdS.yHgS), and those specified elsewhere in this Annex.

cadmium iodide.  
cadmiumhexafluorosilicate(2-); cadmium fluorosilica.  
cadmium sulphate.  
cadmium diformate; cadmium formate.  
cadmium cyanide.  
cadmium fluoride.  
cadmium oxide (non-pyrophoric). »

**La substance la plus défavorable retenue pour le cadmium : « cadmium-hexa-fluoro-silicate(2-); cadmium fluorosilica » - N° CAS : 17010-21-8.**

**La concentration en cadmium dans le PG étant de 16 ppm soit 0.0016 %, la concentration de la substance défavorable retenue est alors de 36 ppm soit 0.0036%.**

### Résultats de l'évaluation

- Le PG contient-il des substances individuelles de classées H420 dans une concentration  $\geq 0.1$  % ? (Question « Q<sub>1</sub> »)

**Réponse : Non**

L'ensemble des substances défavorables retenues ne porte le code de mention de danger H420.

De plus la concentration de chaque substance défavorable retenue est très faible devant le seuil limite de concentration de 0.1 %.

- Le PG contient-il des substances individuelles classées H400 dans une concentration  $\geq 0,1$  % ? et si oui est-ce que  $\Sigma c(H400) \geq 25$  % ? (Question « Q<sub>2</sub> »)

**Réponse : Non**

En effet, les seules substances défavorables portant la mention de danger H400 sont celles des éléments As, Cd, Cr VI, Hg, Pb et Se. Leurs concentrations individuelles sont inférieures au seuil limite de 0.1%.

De plus la somme totale de leurs concentrations  $\Sigma c(H400) = 0.01\%$  est très inférieure à la valeur limite de 25%.

- Le PG contient-il des substances individuelles classées H410 dans une concentration  $\geq 0.1$  %,  $H411 \geq 1$  %,  $H412 \geq 1\%$  ? et si oui est-ce que  $(100 \times \Sigma c(H410) + 10 \times \Sigma c(H411) + \Sigma c(H412)) \geq 25$  % ? (Question « Q<sub>3</sub> »)

**Réponse : Non**

En effet, (a) les seules substances défavorables portant la mention de danger H410 sont celles des éléments As, Cd, Cr VI, Hg, Pb et Se et leurs concentrations individuelles sont inférieures au seuil de 0.1 % ; (b) la seule substance défavorable portant la mention de danger H411 est celle de l'uranium (U) et sa concentration est inférieure au seuil de 1 % et (c) l'ensemble des substances défavorables retenues ne porte pas le code de mention de danger H412.

De plus la somme totale ( $100 \times \Sigma c(H410) + 10 \times \Sigma c(H411) + \Sigma c(H412)$ ) = 0.583% est très inférieure à la valeur limite de 25%.

- Le PG contient-il des substances individuelles classées H410 dans une concentration  $\geq 0.1\%$ , H411  $\geq 1\%$ , H412  $\geq 1\%$ , H413  $\geq 1\%$  ? et si oui est-ce que  $(\Sigma c(H410) + \Sigma c(H411) + \Sigma c(H412) + \Sigma c(H413)) \geq 25\%$  ? (Question « Q<sub>4</sub> »)

**Réponse : Non**

En effet, (a) les seules substances défavorables portant la mention de danger H410 sont celles des éléments As, Cd, Cr VI, Hg, Pb et Se et leurs concentrations individuelles sont inférieures au seuil de 0.1 % ; (b) la seule substance défavorable portant la mention de danger H411 est celle de l'uranium (U) et sa concentration est inférieure au seuil de 1 % et (c) l'ensemble des substances défavorables retenues ne porte pas les codes de mention de danger H412 et H413.

De plus la somme totale ( $\Sigma c(H410) + \Sigma c(H411) + \Sigma c(H412) + \Sigma c(H413)$ ) = 0.006% est très inférieure à la valeur limite de 25%.

**Tableau 14 :** Tableau récapitulatif des résultats de l'évaluation de la propriété de danger HP 14.

Élément considéré		Substance dangereuse défavorable retenue		
désignation	Concentration (%)	Désignation	Concentration (%)	Code de mention de danger
Arsenic (As)	0.0001	trinickel bis(arsenate); nickel(II) arsenate	0.0003	H400, H410
Baryum (Ba)	0.0015	barium sulphide	0.0018	---
Cadmium (Cd)	0.0016	cadmium-hexafluoro-silicate(2-); cadmium fluoro-silica	0.0036	H400, H410
Chrome VI (Cr (VI))	0.0002	strontium chromate	0.0008	H400, H410
Mercure (Hg)	0.0001	mercury dichloride; mercuric chloride	0.00014	H400, H410
Plomb (Pb)	0.0002	lead hexa-fluoro-silicate	0.00034	H400, H410
Sélénium (Se)	0.00024	nickel selenate	0.0006	H400, H410
Uranium (U)	0.0005	uranium compounds with the exception of those specified elsewhere in this Annex (du règlement CLP)	0.0005	H411
Critère			Résultat du critère	
c(H420) $\geq 0.1\%$ ?			<b>Non</b>	0
$\Sigma c(H400) \geq 25\%$ ?			<b>Non</b>	0.01
$100 \times \Sigma c(H410) + 10 \times \Sigma c(H411) + \Sigma c(H412) \geq 25\%$ ?			<b>Non</b>	0.583
$\Sigma c(H410) + \Sigma c(H411) + \Sigma c(H412) + \Sigma c(H413) \geq 25\%$ ?			<b>Non</b>	0.006

À la lumière des résultats obtenus par l'application du processus d'attribution de « HP 14 », le PG tunisien ne présente pas de danger d'écotoxicité (il est non dangereux de type « HP 14 »).

### 2.2.2 Evaluation de la toxicité aiguë « HP 6 »

Pour évaluer propriété « toxicité aiguë » du PG tunisien, on a suivi la même démarche que celle appliquée à la propriété « écotoxicité (HP 14) » en se basant sur la directive européenne 2008/98/CE, telle que révisée de 2014 à 2018, et sur les « Recommandations techniques concernant la classification des déchets » objets du document 2018/C 124/01.

Les encadrés 4bis et 5bis donnent respectivement la définition de la propriété de danger « HP 6 » et la procédure de son évaluation.

**Encadré 4bis : Définition de la propriété « HP 6 »**

*La propriété HP 6 est définie comme suit : « déchet qui peut entraîner des effets toxiques aigus après administration par voie orale ou cutanée, ou suite à une exposition par inhalation ».*

***Encadré 5bis : Méthode d'évaluation de la propriété « HP 6 » selon la directive 2008/98/CE, du parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008, relative aux déchets et abrogeant certaines directives et selon les « Recommandations techniques concernant la classification des déchets » objets du document 2018/C 124/01***

*«Si la somme des concentrations de toutes les substances contenues dans un déchet, classées au moyen d'un code de classe et de catégorie de danger de toxicité aiguë et d'un code de mention de danger indiqué dans le tableau 5 [voir tableau 14 du présent document], est supérieure ou égale au seuil indiqué dans ce tableau, le déchet est classé comme déchet dangereux de type HP 6. Lorsqu'un déchet contient plusieurs substances classées comme toxiques aiguës, la somme des concentrations n'est requise que pour les substances relevant de la même catégorie de danger.»*

**Valeurs seuils :** Les valeurs seuils suivantes s'appliquent dans le cadre de l'évaluation:

- pour H300, H310, H330, H301, H311 et H331: 0,1 %
- pour H302, H312, H332: 1 %

*Une substance individuelle présente dans une concentration inférieure à la valeur seuil pour un code de mention de danger qui lui est attribué n'est pas prise en considération dans la somme des concentrations pour ce code de classe et de catégorie de danger.*

Tableau 14

**Code(s) des classes et catégories de danger et code(s) des mentions de danger relatif(s) aux constituants des déchets et limites de concentration correspondantes pour la classification des déchets comme déchets dangereux de type HP 6**

Code(s) des classes et catégories de danger	Code(s) des mentions de danger	Description	Limite de concentration (Somme des substances)
Acute Tox. 1 (Oral)	H300	Mortel en cas d'ingestion	≥ 0,1 %
Acute Tox. 2 (Oral)	H300	Mortel en cas d'ingestion	≥ 0,25 %
Acute Tox. 3 (Oral)	H301	Toxique en cas d'ingestion	≥ 5 %
Acute Tox. 4 (Oral)	H302	Nocif en cas d'ingestion	≥ 25 %
Acute Tox. 1 (Dermal)	H310	Mortel par contact cutané	≥ 0,25 %
Acute Tox. 2 (Dermal)	H310	Mortel par contact cutané	≥ 2,5 %
Acute Tox. 3 (Dermal)	H311	Toxique par contact cutané	≥ 15 %
Acute Tox. 4 (Dermal)	H312	Nocif par contact cutané	≥ 55 %
Acute Tox. 1 (Inhal.)	H330	Mortel par inhalation	≥ 0,1 %
Acute Tox. 2 (Inhal.)	H330	Mortel par inhalation	≥ 0,5 %
Acute Tox. 3 (Inhal.)	H331	Toxique par inhalation	≥ 3,5 %
Acute Tox. 4 (Inhal.)	H332	Nocif par inhalation	≥ 22,5 %

A titre d'illustration, la figure 5bis présente le processus d'évaluation de la propriété toxicité aiguë « HP 6 » (document 2018/C 124/01).

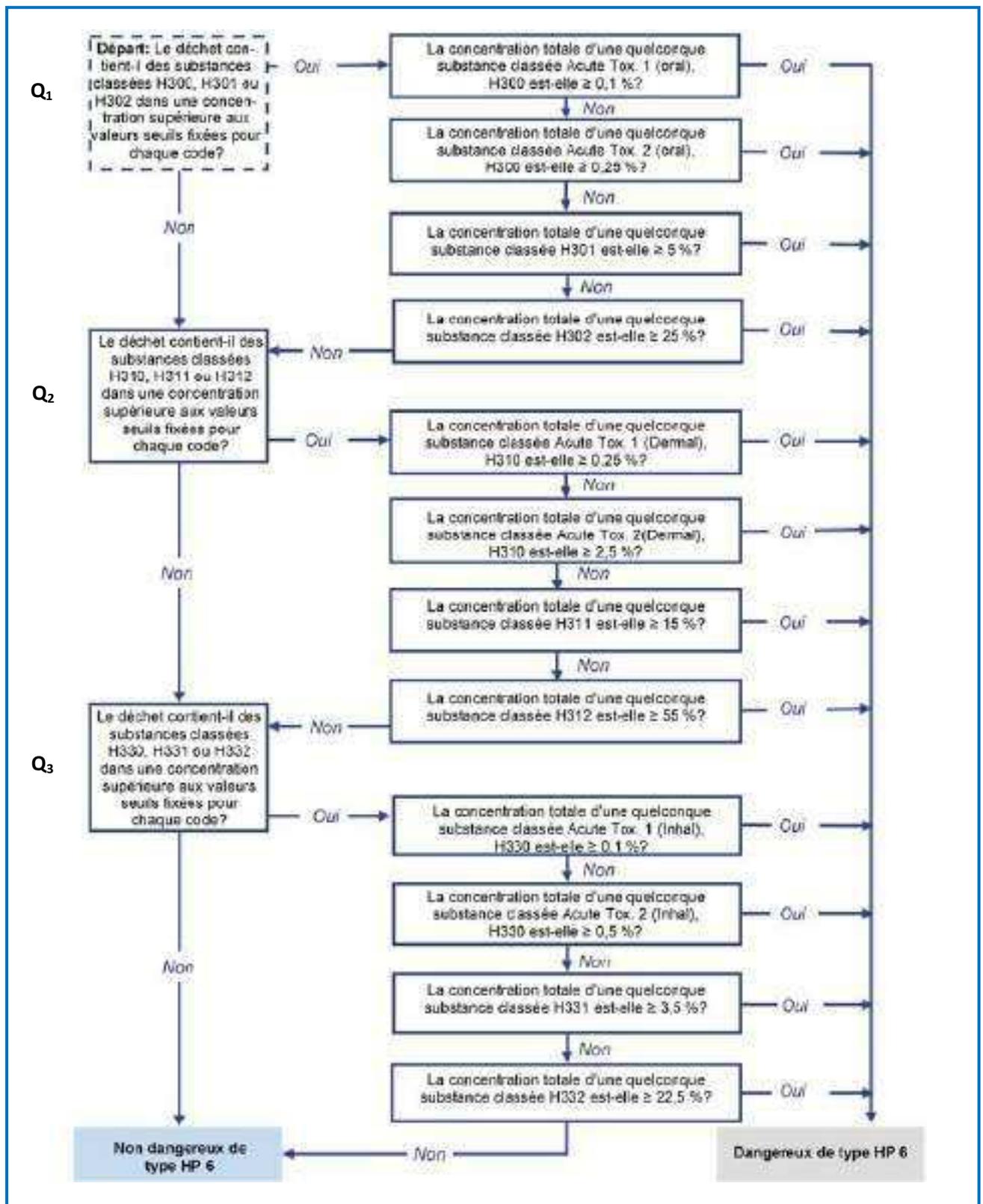


Figure 5bis : Organigramme du processus d'attribution de « HP 6 ».

Pour appliquer ce processus d'attribution de la propriété « HP 6 » au PG tunisien, nous avons adopté la démarche suivante :

- L'utilisation des analyses des éléments chimiques du PG tunisien listés dans le tableau « Entrées génériques d'éléments dans le règlement CLP » (voir document 2018/C 124/01).
- L'identification des substances « pire-cas » associées aux éléments chimiques présents en se basant sur la méthode du « *Scénario réaliste le plus défavorable* ».
- L'application des étapes du processus d'attribution de la propriété « HP 6 ».

**Remarques :**

- iii) Le « scénario réaliste le plus défavorable » est à adopter dans le cas probable où le détenteur d'un déchet est relativement au fait des éléments, mais non des substances présentes dans celui-ci. Il est recommandé d'envisager les substances qui constitueraient le « scénario réaliste le plus défavorable » pour chaque élément identifié.
- iv) Les substances les plus défavorables sont identifiées sur la base des substances que l'on peut raisonnablement s'attendre à trouver dans le phosphogypse.

Nous présentons dans ce qui suit et dans le tableau [14bis](#) une synthèse de l'application du processus d'attribution de la propriété de danger de la toxicité aiguë « HP 6 » au PG tunisien.

Les données nécessaires pour l'application du dit processus sont :

- la liste des éléments traces métalliques et leurs concentrations ;
- la liste de l'ensemble des substances dangereuses éventuelles relatives aux éléments traces métalliques ;
- la liste des substances dangereuses défavorables retenues.

[Données du processus d'évaluation de la propriété HP 6](#)

• *Liste des éléments traces métalliques considérés*

Cette liste a été définie lors du paragraphe précédent relatif à l'évaluation de la propriété de l'écotoxicité « HP 14 ». Elle comprend : l'arsenic (As), le baryum (Ba), le béryllium (Be), le cadmium (Cd), le chrome VI (Cr (VI)), le mercure (Hg), le plomb (Pb), l'antimoine (Sb), le sélénium (Se), le thallium (Tl) et l'uranium (U).

D'après les résultats de la caractérisation du PG tunisien (paragraphe 2.1) on note que les éléments béryllium (Be), antimoine (Sb) et sélénium (Se) ne sont pas détectés dans le PG tunisien.

- Liste des substances dangereuses éventuelles

La liste complète des substances dangereuses éventuelles est donnée en **annexe 2**.

La liste retenue comprend les substances défavorables pour les éléments traces métalliques retenus arsenic (As), baryum (Ba), cadmium (Cd), chrome VI (Cr (VI)), mercure (Hg), plomb (Pb), sélénium (Se), et uranium (U).

### Résultats de l'évaluation

- Le PG contient-il des substances individuelles classées H300, H301 dans une concentration  $\geq 0.1$  % ? ou classées H302 dans une concentration  $\geq 1$  % ?  
(Question « Q<sub>1</sub> »)

**Réponse : Non**

En effet, :

- les seules substances défavorables portant la mention de danger H300 sont celles des éléments Hg et U et leurs concentrations individuelles sont largement inférieures au seuil limite de 0.1% (soit 1000 mg/kg).
- la seule substance défavorable portant la mention de danger H301 est celle de l'élément Cd et sa concentration individuelle est largement inférieure au seuil limite de 0.1% (soit 1000 mg/kg).
- les seules substances défavorables portant la mention de danger H302 sont celles des éléments Hg et U et leurs concentrations individuelles sont largement inférieures au seuil limite de 1% (soit 10000 mg/kg).

- Le PG contient-il des substances individuelles classées H310, H311 dans une concentration  $\geq 0.1$  % ? ou classées H312 dans une concentration  $\geq 1$  % ?  
(Question « Q<sub>2</sub> »)

**Réponse : Non**

En effet, aucune des substances défavorables ne porte la mention de danger H310, H311 ou H312.

- Le PG contient-il des substances individuelles classées H330, H331 dans une concentration  $\geq 0.1$  % ? ou classées H332 dans une concentration  $\geq 1$  % ?  
(Question « Q<sub>3</sub> »)

**Réponse : Non**

En effet, :

- la seule substance défavorable portant la mention de danger H330 est celle de l'élément U et sa concentration individuelle est largement inférieure au seuil limite de 0.1%.
- la seule substance défavorable portant la mention de danger H331 est celle de l'élément Cd et sa concentration individuelle est largement inférieure au seuil limite de 0.1%.

- les seules substances défavorables portant la mention de danger H332 sont celles des éléments Ba et Pb et leurs concentrations individuelles sont largement inférieures au seuil limite de 1%.

Notons aussi que les substances dangereuses défavorables pour les éléments arsenic (As) et sélénium (Se) ne portent **aucune des mentions de dangers H300, H301, H302, H310, H311, H312, H330, H331 et H332.**

**Tableau 14bis** : Tableau récapitulatif des résultats de l'évaluation de la propriété de danger HP 6.

Elément considéré		Substance dangereuse défavorable retenue		
désignation	Concentration (%)	Désignation	Concentration (%)	Code de mention de danger
Arsenic (As)	0.0001	trinickel bis(arsenate); nickel(II) arsenate	0.0003	---
Baryum (Ba)	0.0015	barium sulphide	0.0018	H302, H332
Cadmium (Cd)	0.0016	cadmium-hexafluoro-silicate(2-); cadmium fluoro-silica	0.0036	H301, H331
Chrome VI (Cr(VI))	0.0002	strontium chromate	0.0008	H302
Mercuré (Hg)	0.0001	mercury dichloride; mercuric chloride	0.00014	H300
Plomb (Pb)	0.0002	lead hexa-fluoro-silicate	0.00034	H302, H332
Sélénium (Se)	0.00024	nickel selenate	0.0006	---
Uranium (U)	0.0005	uranium compounds with the exception of those specified elsewhere in this Annex (du règlement CLP)	0.0005	H300, H330
Critère			Résultat du critère	
c(H300) ≥ 0.1 % ?, c(H301) ≥ 0.1 % ?, c(H302) ≥ 1 % ?			<b>Non</b>	
c(H310) ≥ 0.1 % ?, c(H311) ≥ 0.1 % ?, c(H312) ≥ 1 % ?			<b>Non</b>	
c(H330) ≥ 0.1 % ?, c(H331) ≥ 0.1 % ?, c(H332) ≥ 1 % ?			<b>Non</b>	

**D'après ces résultats obtenus pour la propriété de danger toxicité aiguë « HP 6 », le PG Tunisien ne présente pas de danger de toxicité aiguë, c'est-à-dire il est non dangereux de type « HP 6 ».**

### **En guise de conclusion :**

Les résultats de l'évaluation des propriétés de danger « écotoxicité (HP 14) » et « toxicité aiguë (HP 6) » pour le phosphogypse tunisien tel qu'il se présente sont en accord avec les niveaux de concentrations des éléments traces métalliques. En effet, pour les éléments préoccupants arsenic, plomb, mercure et cadmium, il est à noter que :

- les concentrations en arsenic, plomb et mercure dans le phosphogypse tunisien sont très faibles voire insignifiantes étant donné que le phosphate tunisien est pratiquement exempt de ces métaux lourds.
- le cadmium contenu dans le PG tunisien dont la teneur varie de 5 à 15 ppm, se trouve majoritairement sous forme insoluble eau. La partie soluble eau est largement inférieure à 1 ppm. Par ailleurs les engrais commercialisés actuellement en Tunisie et en Europe (TSP, DAP, SSP) contiennent des teneurs en cadmium allant de 15 à 25 ppm et sont en conformité avec le règlement européen « REACH ».

**Ainsi le PG tunisien tel qu'il se présente ne possède pas des propriétés de dangers « écotoxicité (HP 14) » et « toxicité aiguë (HP 6) ».** Toutefois le déversement du PG dans la mer entraîne des effets négatifs sur l'écosystème marin, liés en particulier à l'accumulation des impuretés insolubles suite à la dissolution totale de sa composante principale le sulfate de calcium dihydrate (qui présente au moins 96% de la composition du PG).

Il en est de même que le stockage du PG en terrils sans respecter les normes d'usage les plus avancées engendre des effets négatifs sur l'environnement.

### **Section 3 :**

Cadre légal et réglementaire régissant le PG  
dans le monde et en Tunisie

Cette partie est réservée à la présentation des réglementations dans le monde et en Tunisie en matière de classification et de gestion du phosphogypse.

## **3.1 Cadre réglementaire international régissant le phosphogypse**

### **3.1.1 Convention de Bâle**

La Convention des Nations Unies sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination (Convention de Bâle) [22], adoptée le 22 mars 1989, constitue l'accord mondial le plus complet sur les déchets dangereux et d'autres déchets dans le domaine de l'environnement. Son but est de protéger la santé humaine et l'environnement contre les effets nocifs résultant de la production et des mouvements transfrontières de déchets, en particulier à destination des pays en développement qui manquent de moyens pour assurer une gestion écologiquement rationnelle de ces déchets. En 1995, la Tunisie a adhéré à la convention de Bâle (loi 95-63 du 10 juillet 1995) et a ratifié ladite convention (décret n°95-2680 du 25 décembre 1995).

Les « déchets dangereux » aux fins de cette convention sont les déchets qui :

- appartiennent à l'une des catégories figurant à l'annexe I, à moins qu'ils ne possèdent aucune des caractéristiques de danger indiquées à l'annexe III de cette convention ;
- sont définis ou considérés comme dangereux par la législation interne de Partie d'exportation, d'importation ou de transit.

Il est à constater que le phosphogypse ne figure pas sur la liste de l'annexe I de la Convention de Bâle.

Il est à signaler également qu'en 1991, en réponse à l'article 11 de la « Convention de Bâle », qui encourage les parties à conclure des accords bilatéraux, multilatéraux et régionaux relatifs aux déchets dangereux, l'Organisation de l'Unité Africaine (OUA) a établi une convention dite la « Convention de Bamako » relative à « l'interdiction d'importer en Afrique des déchets dangereux et sur le contrôle des mouvements transfrontières et la gestion des déchets dangereux produits en Afrique » [23]. En 1992, la Tunisie a ratifié cette convention (loi n° 92-11 du 03 février 1992) dont l'entrée en vigueur par les pays signataires date depuis 1998.

### **3.1.2 Convention de Barcelone**

La Convention de Barcelone pour la Protection de la Méditerranée contre la pollution a été adoptée le 16 février 1976 [24].

La Tunisie est également signataire de la Convention de Barcelone et ses protocoles en particulier le Protocole relatif à la prévention de la pollution de la mer Méditerranée par les mouvements transfrontières de déchets dangereux et leur élimination qui est ratifié par la Tunisie le 01/06/1998. Sa mise en vigueur date du 19/12/2007, adoptée le 16 février 1976 et ratifiée par la Tunisie par la loi n° 77-29 du 25 mai 1977 et amendée par la loi n° 98-15 du 23 février 1998.

Les « déchets dangereux » aux fins de cette convention sont les déchets qui :

- appartiennent à l'une des catégories figurant à l'annexe I du présent protocole ;
- possèdent l'une des caractéristiques de danger indiquées à l'annexe II du présent Protocole.

**Le phosphogypse ne figure pas dans la liste de l'annexe I du Protocole de la Convention de Barcelone relatif à la prévention de la pollution de la mer Méditerranée par les mouvements transfrontières de déchets dangereux et leur élimination.**

### 3.1.3 Recommandations de l'Agence Internationale d'Energie Atomique

Dans sa publication Safety Reports Series No. 78 (2013) [1], l'Agence Internationale d'Energie Atomique (AIEA) a remis en question la pratique de mise en terril du phosphogypse. En effet l'AIEA :

- note l'absence de motif radiologique qui interdit son utilisation,
- suggère de le considérer comme **co-produit** et **non un déchet**,
- recommande sa valorisation au lieu de son stockage permanent
- invite les décideurs à prendre en considération sa valorisation dans leurs politiques.

**L'AIEA a fixé un seuil maximum de radioactivité de 1 Bq/g dans le PG pour des utilisations sécurisées dans divers domaines tels que : matériaux de construction, agriculture, construction des routes, production d'engrais, etc.**

### 3.1.4 Cadre réglementaire aux Etats Unis d'Amérique

À partir de 1970, plusieurs réglementations relatives à la protection de l'environnement se sont succédées aux Etats Unis d'Amérique dont les plus importantes sont :

- la promulgation de la NEPA (National Environment Protection Act) en 1970 [25] ;
- la création en 1970 de l'EPA (Environmental Protection Agency) ;
- la promulgation en 1970 du « Clean Air Act » ;
- la promulgation en 1972 du « Clean Water Act »;

Il est à noter qu'en 1976 la promulgation de « Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) » relatif aux déchets [26].

Selon le RCRA, les déchets dangereux sont définis comme tout déchet solide qui, en raison de sa quantité, de sa concentration ou de ses propriétés physiques, chimiques ou infectieuses peut :

- causer ou contribuer de manière significative à une augmentation de la mortalité ou une augmentation des maladies graves irréversibles ou réversibles incapacitantes ; ou
- présenter un risque substantiel, actuel ou potentiel, pour la santé humaine ou l'environnement en cas de traitement inadéquat, stockés, transportés, éliminés ou gérés d'une autre manière (RCRA §1004 [25], 42 USC 6903 [25]).

**Avant la décision en 1989 du « National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP) », le phosphogypse était utilisé comme amendement agricole.**

En 1989, l'EPA a promulgué les normes nationales d'émission pour les émissions de radon provenant des terrils de phosphogypse (sous-partie R), qui ont été révisées le 3 juin 1992 pour permettre des utilisations dans le domaine agricole en plein air du phosphogypse contenant du  $^{226}\text{Ra}$  à moins de 10 pCi/g, soit 370 Bq/kg (voir l'extrait du règlement « 40 CFR Part 61 » relatif aux normes nationales d'émissions pour les polluants atmosphériques dangereux sous partie-R, relative aux normes nationales d'émissions pour les émissions de radon provenant des dépôts de phosphogypse, présenté dans l'encadré 6).

***Encadré 6 : Extrait du règlement 40 CFR Part 61 sous partie -R***

**§ 61.204 Distribution and use of phosphogypsum for outdoor agricultural purposes.**

Phosphogypsum may be lawfully removed from a stack and distributed in commerce for use in outdoor agricultural research and development and agricultural field use if each of the following requirements is satisfied:

(a) The owner or operator of the stack from which the phosphogypsum is removed shall determine annually the average radium-226 concentration at the location in the stack from which the phosphogypsum will be removed, as provided by § 61.207.

(b) The average radium-226 concentration at the location in the stack from which the phosphogypsum will be removed, as determined pursuant to § 61.207, shall not exceed 10 pCi/g (4500 pCi/lb).

### 3.1.5 Cadre réglementaire dans l'Union Européenne

La Décision de la Commission Européenne n°2000/532/CE du 30 Mai 2000 [27], établissant une liste de déchets, définit la nomenclature des déchets et la classification de leurs dangers.

Les déchets figurant sur la liste et marqués d'un **astérisque (\*)** sont considérés des déchets dangereux.

Les déchets qualifiés comme dangereux par une mention spécifique ou générale de substances dangereuses, présentent une ou plusieurs des caractéristiques de danger telles que :

- Les déchets contiennent une ou plusieurs substances classées comme très toxiques à une concentration totale  $\geq 0.1 \%$ ,
- Les déchets contiennent une ou plusieurs substances classées comme toxiques à une concentration totale  $\geq 3\%$ ,
- Les déchets contiennent une ou plusieurs substances irritantes à une concentration totale  $\geq 10\%$ ,

- Les déchets contiennent une ou plusieurs substances reconnues comme étant cancérogènes (des catégories 1 ou 2) à une concentration totale  $\geq 0.1\%$ ,

En l'an 2000, la Décision européenne n°2000/532/CE a classé le **phosphogypse** dans la rubrique [06 09 01] **sans astérisque (\*)**, ainsi il est considéré comme **déchet non dangereux** (voir encadré 7).

***Encadré 7 : Extrait de la décision européenne n°2000/532/CE relative aux déchets***

06 09	déchets provenant de la chimie du phosphore
06 09 01	phosphogypse
06 09 02	scories phosphoriques
06 09 99	déchets non spécifiés ailleurs

En 2001, la décision 2001/118/CE du 16 janvier 2001 modifiant la décision 2000/532/CE en ce qui concerne la liste des déchets, a supprimé la rubrique [06 09 01] attribué au phosphogypse de la liste des déchets et a introduit deux nouvelles rubriques de déchets pour « les déchets provenant de FFDU des produits chimiques contenant du phosphore et de la chimie du phosphore » (voir encadré 8).

***Encadré 8 : Extrait de la décision européenne n°2001/118/CE***

06 09	déchets provenant de la FFDU des produits chimiques contenant du phosphore et de la chimie du phosphore
06 09 02	scories phosphoriques
06 09 03*	déchets de réactions basées sur le calcium contenant des substances dangereuses ou contaminées par de telles substances
06 09 04	déchets de réactions basées sur le calcium autres que ceux visés à la rubrique 06 09 03

Ces rubriques demeurent encore inchangées dans la liste des déchets de la réglementation européenne en vigueur.

### 3.1.6 Cadre réglementaire en Inde

En Inde, les dispositions relatives aux déchets dangereux (gestion, manutention et mouvements transfrontières), adoptées en 2008 en application de la loi sur la protection de l'environnement de 1986 (The « Environment Protection Act » No. 29 du 23 mai 1986), n'ont pas intégré le **phosphogypse dans la catégorie des déchets dangereux de l'annexe I** et stipulent que la **gestion du phosphogypse provenant des usines d'engrais à base d'acide phosphorique sera effectuée conformément aux directives du « Conseil Central de Contrôle de la Pollution (CPCB) »** (voir extrait dans l'encadré 9).

**Encadré 9 : Extrait de “Guidelines for Management and Handling of Phosphogypsum (CPCB, India) (2008)”**

The Hazardous Waste (Management, Handling & Transboundary Movement) Rules, 2008 (HWM Rules, 2008) notified under the Environment (Protection) Act, 1986 has excluded phosphogypsum generated from 'Phosphoric Acid Plants' from the list of hazardous wastes under Schedule-I of the said rules. The said Rules categorizes phosphogypsum as 'High Volume Low Effect Waste' and stipulates that the management of phosphogypsum shall be carried out in accordance with the guidelines of Central Pollution Control Board (CPCB).

De même, l'Atomic Energy Regulatory Board (AERB) de l'Inde, dans sa directive No. 01/09 du 20 mars 2009, note l'absence de toute restriction pour l'utilisation du phosphogypse dans les applications agricoles du point de vue de la sécurité radiologique (voir encadré 10).

**Encadré 10 : AERB Directive No. 01/09 du 20 Mars 2009**



The image shows a scanned page of an AERB directive. At the top, there are logos for the Ministry of Environment and Forests, the Government of India, and the Atomic Energy Regulatory Board. The document is dated March 20, 2009, and is titled 'AERB Directive No. 01/09 (Jointed Rule 5 of the Atomic Energy (Radiation Protection) Rules, 2006)'. The subject is 'Use of Phosphogypsum in Building & Construction Materials & in Agriculture'. The text discusses the radiological safety of phosphogypsum, noting that it contains small concentrations of radioactive nuclides like Uranium-238 and Radium-226. It states that AERB approval is not required for the sale of phosphogypsum by fertilizer plants, for its use in building and construction materials, for manufacturing and use of phosphogypsum panels or blocks, or for use in agriculture. The document is signed by S. K. Sharma, Chairman of the Atomic Energy Regulatory Board, Competent Authority.

### 3.1.7 Cadre réglementaire en Chine

Avec une production d'environ 80 millions de tonnes par an, la Chine est le plus grand producteur de phosphogypse à l'échelle mondiale [4].

La Chine a été parmi les premiers signataires de la convention de Bâle qu'elle a ratifiée en 1991 [28].

Depuis 2020, dans le cadre de sa politique de promotion de l'économie circulaire et verte, la Chine oblige ses producteurs d'acide phosphorique à réaliser un équilibre entre la production d'acide phosphorique et la valorisation du PG généré par la transformation du minerai de phosphate.

### 3.2 Cadre légal et réglementaire tunisien relatif à la gestion des déchets dangereux

La loi n° 96-41 du 10 juin 1996, relative aux déchets et au contrôle de leur gestion et de leur élimination définit dans son article 2, les **déchets** comme « toutes substances et objets dont le détenteur se défait ou a l'intention de s'en débarrasser ou dont il a l'obligation de se débarrasser ou d'éliminer en vertu des dispositions de la présente loi » et les **déchets dangereux** comme « les déchets dont la liste est fixée par décret selon leur constituants et les caractéristiques des matières polluantes qu'ils contiennent ».

Le décret n° 2000-2339 du 10 octobre 2000, fixant la liste des déchets dangereux, considère comme déchets dangereux :

- (i) les déchets figurant à l'annexe I du décret précité ;
- (ii) tout autre déchet qui contient l'un des constituants énumérés à l'annexe II et qui présente l'une des caractéristiques de danger mentionnées à l'annexe III de ce décret.

L'annexe I du décret liste les déchets dangereux selon leur nature ou l'activité qui les a produits, l'annexe II spécifie la liste des constituants qui confèrent aux déchets un caractère de danger et l'annexe III donne la liste des caractéristiques de danger.

Selon l'annexe I du décret précité, le **phosphogypse** est classé en tant que **déchet dangereux** dans la **rubrique [080801] de la catégorie des déchets des procédés de la chimie minérale provenant de la chimie des phosphates** (voir encadré 11).

***Encadré 11 : Extrait du décret n° 2000-2339 du 10/10/2000 fixant la liste des déchets dangereux***

0808	Déchets provenant de la chimie des phosphates
080801	- phosphogypse

Notons que l'exposé des motifs de ce décret (voir **annexe 3**) a fait référence aux conventions de Bâle (1989) et de Bamako (1991) et aux modifications apportées dans la liste européenne des déchets (2000).

Le Comité Scientifique tient à noter que la décision de classer le PG en tant que déchet dangereux n'est pas basée sur des arguments solides. En effet, les listes des déchets dangereux dans les conventions de Bâle et de Bamako ne citent pas explicitement le phosphogypse en tant que déchet dangereux (annexes I des conventions de Bâle et de Bamako).

Il convient également de signaler que le PG tunisien ne contient pas des constituants cités dans les annexes I des conventions de Bâle et de Bamako, qui peuvent présenter les caractéristiques de danger mentionnées dans l'annexe III de la convention de Bâle et dans l'annexe II de la convention de Bamako.

Par ailleurs, il est à préciser que les constituants pouvant présenter une ou plusieurs caractéristiques de danger dans le PG tunisien sont soit absents ou présents à des concentrations trop faibles, inférieures ou comparables à celles dans le phosphate naturel et dans les engrais actuellement commercialisés par le GCT (TSP, SSP et DAP) (voir tableaux 5, 6 et 7). Notons aussi que ces engrais sont conformes au règlement européen « Registration, Evaluation, Autorisation and restriction of CHEMicals (REACH) » (Règlement (CE) n° 1907/2006 du 18 décembre 2006).

A titre d'exemple, l'**annexe 4** présente les déclarations de conformité au règlement « REACH » des engrais TSP, SSP et DAP produits et commercialisés par le GCT.

Il est à rappeler que l'Union Européenne dans sa **décision n°2000/532/CE** du **30/05/2000**, établissant une liste des déchets (voir encadré 7), **a classé le phosphogypse dans la rubrique [06 09 01] sans astérisque (\*)**, ainsi le **PG est considéré comme déchet non dangereux ne présentant aucune des caractéristiques de danger** énumérées à l'article 2 de la décision et reprises de l'annexe II de la « Directive 91/689/CEE ». **Cette classification européenne n'a pas été prise en compte par le décret tunisien n° 2000-2339 du 10 octobre 2000.**

### **3.3 Synthèse de la revue réglementaire relative au phosphogypse**

L'analyse approfondie des réglementations dans le monde et en Tunisie portant sur le phosphogypse nous a permis de faire les constatations suivantes :

- **Le phosphogypse ne figure pas dans la liste de l'annexe I de la Convention de Bâle** (Convention des Nations Unies sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination / 1989).
- En 1991, en réponse à la convention de Bâle, l'Organisation de l'Unité Africaine (OUA) a élaboré une convention dite la « Convention de Bamako » relative à « l'interdiction d'importer en Afrique des déchets dangereux et sur le contrôle des mouvements transfrontières et la gestion des déchets dangereux produits en Afrique » sachant que **le phosphogypse ne figure parmi la liste des catégories**

**de déchets dangereux.** Notons que la Tunisie a ratifié cette convention dont l'entrée en vigueur par les pays signataires date depuis 1998.

- **Le phosphogypse n'est pas inscrit sur la liste de l'annexe I du Protocole de la Convention de Barcelone** (Convention de Barcelone pour la Protection de la Méditerranée contre la pollution / 1976).
- En 2013, l'Agence Internationale d'Energie Atomique (AIEA) a fixé **un seuil maximum de radioactivité de 1Bq/g dans le PG** pour des utilisations sécurisées dans divers domaines tels que : matériaux de construction, agriculture, construction des routes, production d'engrais, etc.  
L'AIEA note l'absence de motif radiologique qui interdit son utilisation, suggère de le considérer comme **co-produit et non un déchet**, recommande sa valorisation au lieu de son stockage permanent et invite les décideurs à prendre en considération sa valorisation dans leurs politiques.
- Depuis 1989, aux états unis, l'USEPA autorise des utilisations du phosphogypse dans le domaine agricole en plein air sous condition que l'activité radiologique (exprimée en  $^{226}\text{Ra}$ ) ne dépasse pas le seuil de 370 Bq/kg.
- En l'an 2000, la Commission Européenne a classé le **PG** comme **déchet non dangereux**. Depuis 2001, la liste des déchets a été révisée. **La rubrique [06 09 01] attribuée au phosphogypse a été supprimée** et deux nouvelles rubriques de déchets pour « les déchets provenant de FFDU des produits chimiques contenant du phosphore et de la chimie du phosphore » ont été introduites.
- En Inde, le **PG a été exclu en 2008 de la catégorie des déchets dangereux**. La gestion du phosphogypse provenant des usines d'engrais à base d'acide phosphorique est effectuée conformément aux directives du Conseil Central de Contrôle de la Pollution (CPCB).

**De même, l'Atomic Energy Regulatory Board (AERB) de l'Inde, a fixé un seuil d'activité radiologique (exprimée en  $^{226}\text{Ra}$ ) de 1 Bq/g pour la commercialisation du PG par les usines d'engrais.**

- La Chine a été parmi les premiers signataires de la convention de Bâle qu'elle a ratifiée en 1991.

Depuis 2015 la Chine a exigé aux usines de transformation du minerai de phosphate pour la production d'acide phosphorique et des engrais l'utilisation de 20% du PG généré pour atteindre un taux de valorisation de 100% à l'horizon de 2025.

- En **Tunisie**, depuis l'année 2000, le **PG est classé nominativement** en tant que « **déchet dangereux** » bien que les **conventions internationales** (Bâle et Barcelone) et **régionales** (Bamako) **ne répertorient pas le PG en tant que déchet dangereux**.

- La réglementation tunisienne relative aux déchets dangereux qui a classé le PG en tant que déchet dangereux n'a pas été révisée depuis sa promulgation en 2000, sachant que des pays producteurs d'acide phosphorique générant du PG ont fait évoluer la réglementation y afférente tels que : le Brésil, les états Unis d'Amérique, l'Inde, la Russie, etc.

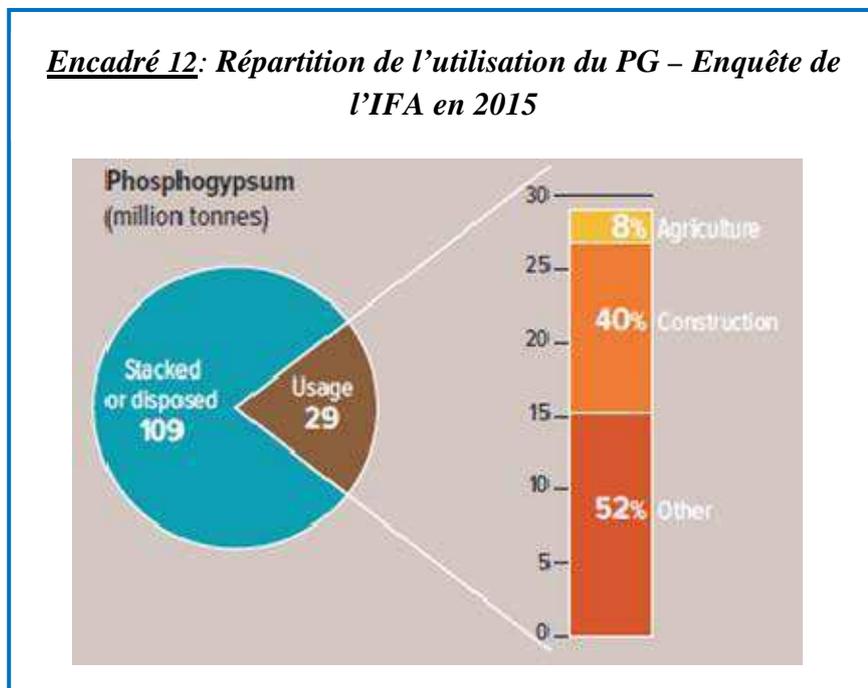
**Section 4 :**

**Gestion & Valorisation du PG  
dans le monde et en Tunisie**

Le stockage et la valorisation du phosphogypse sont d'actualité dans la majorité des pays producteurs d'acide phosphorique et d'engrais, pour des considérations environnementales et économiques.

A ce titre durant la période 2015-2020, les résultats des travaux de recherche correspondants ont fait l'objet d'environ 800 publications [29]. Par ailleurs en 2015, l'IFA a recensé auprès de 21 pays producteurs d'acide phosphorique, une quantité de 29 Mt de PG exploitées dans différents domaines comme le montre l'encadré 12 et dont la répartition est [2]:

- ❑ 8 % dans le secteur agricole.
- ❑ 40 % dans les secteurs des matériaux de construction et des routes.
- ❑ 52 % dans d'autres applications (par exemple : engrais et sels, production d'acide sulfurique, barrières marines, remblayage des mines, peinture et enduit, plastique et verre, isolant thermique, etc.).



Cette section est consacrée d'une part à la présentation des résultats des travaux de recherche scientifique publiés au cours de la période 1980-2024 et à l'analyse des orientations de recyclage et des alternatives possibles de valorisation du PG, d'autre part à description des expériences pilotes et à grande échelle de la valorisation du PG dans le monde et en Tunisie.

#### **4.1 Aperçu sur les travaux de recherche**

Comme présenté dans la section 2 du présent rapport, les procédés de transformation du minerai de phosphate génèrent des quantités énormes de PG qui contient de nombreux éléments utiles. En effet, le PG est considéré comme une source de calcium, de soufre, de phosphore, de terres rares et d'oligoéléments. Ainsi la récupération de ces éléments et les possibilités de valorisation du PG sont de plus en plus étudiées par des structures de recherche spécialisées à travers le monde. A titre d'illustration, la figure 6 montre

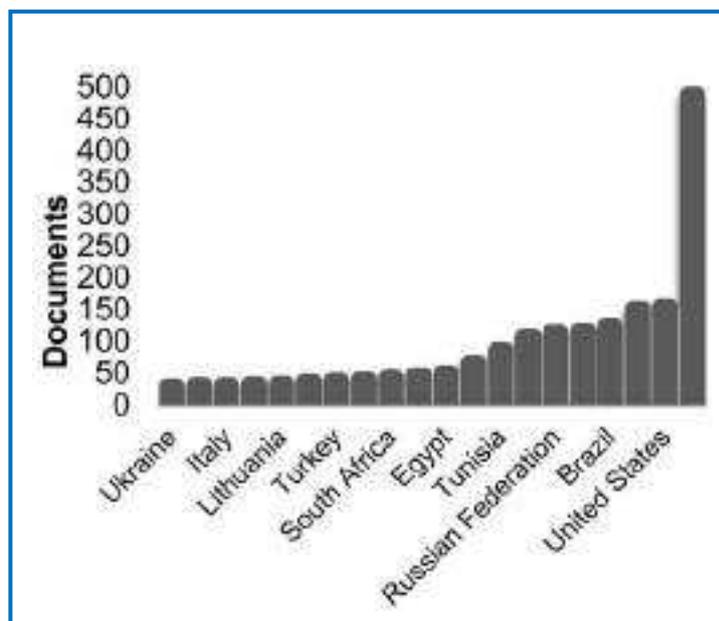
l'évolution du nombre des publications des résultats des travaux de recherche consacrés au PG au cours de la période 1980 – 2020 [29].



**Figure 6.** Publications des travaux de recherche sur le PG.

L'évolution du nombre des travaux de recherche dénote l'intérêt pour le PG en tant que ressource anthropogénique. Cet intérêt a été largement consolidé au cours de la dernière décennie, marquée par l'impact de l'étude sur le PG menée par l'AIEA dont les résultats ont été publiés dans son rapport de 2013 [1].

Le développement de la recherche sur les propriétés et les applications du PG a lieu dans de nombreux pays ayant différents niveaux de développement économique, comme en Europe occidentale, en Russie, en Inde, en Afrique et surtout en Chine (Figure 7) [29].



**Figure 7.** Aperçu comparatif des travaux de recherche sur le PG dans quelques pays. (Base de données Scopus).

Le leadership en termes d'articles publiés est la Chine, en tant que pays où l'économie prend de l'ampleur et où l'utilisation de ressources secondaires bon marché est une question très pertinente. Elle est suivie par les États Unis d'Amérique, le Brésil et la Russie.

Il est à noter que les différents aspects du PG sont de plus en plus traités ces dernières années par les structures de recherche en Tunisie. À titre d'indication, on dénombre, selon la « Base de données Scopus », 40 articles publiés durant la période 2000-2023 [30].

## 4.2 Valorisation du PG dans le monde et en Tunisie

En 2013, l'AIEA a élaboré une approche réglementaire pour l'utilisation du PG dite « **Graded Approach** », définie comme « une méthode structurée par laquelle la rigueur du contrôle à appliquer à un produit ou à un processus est proportionnelle au risque associé à une perte de contrôle » [1].

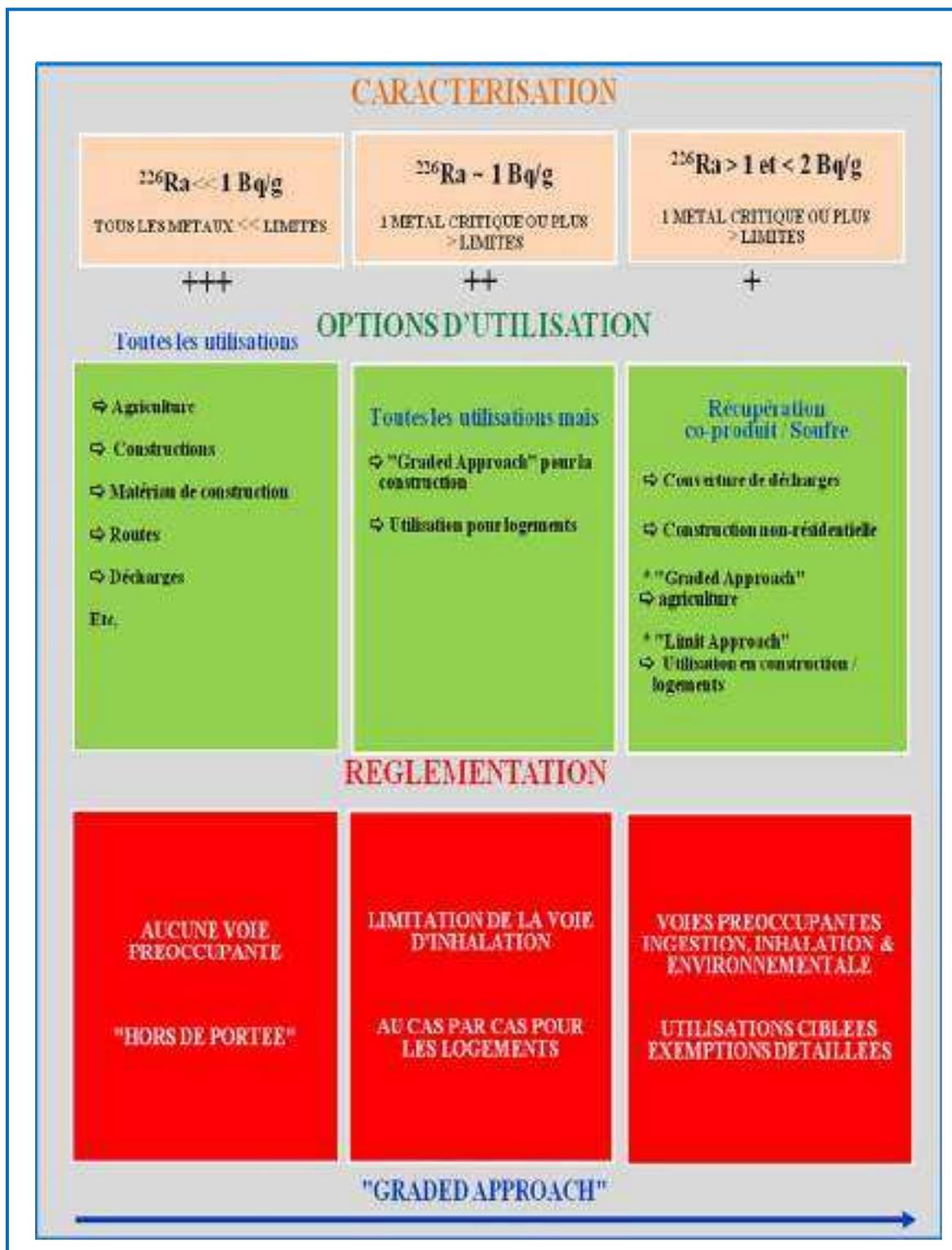
Cette approche fondée principalement sur la caractérisation du PG en radionucléides et métaux lourds (bande marquée en jaune) permet de répertorier les domaines d'application du PG (bande marquée en vert) et la réglementation afférente à ces applications (bande marquée en rouge) comme le montre la figure 8.

Selon la caractérisation du PG (bande jaune de la figure 8), trois scénarios peuvent se présenter :

- **Scénario 1** (+++) : *Radioactivité < 1 Bq/g et métaux lourds << limites.*
- **Scénario 2** (++) : *Radioactivité  $\approx$  1 Bq/g et 1 métal critique ou plus > limite(s).*
- **Scénario 3** (+) : *Radioactivité > 1 Bq/g et <2 Bq/g et 1 métal critique ou plus > limite(s).*

A titre d'exemple d'après le **scénario 1** (+++), le PG peut être utilisé sans contraintes sécuritaires et réglementaires dans plusieurs domaines d'application tels que l'agriculture, la construction, les matériaux de construction, les routes, les décharges, etc.

Bien entendu, le PG doit être soigneusement caractérisé avant toute décision sur la manière dont il sera utilisé en se référant à la fiche des données de sécurité (FDS). Un exemple de FDS est donné à l'**annexe 5**.



**Figure 8** : « Graded Approach » pour la catégorisation du type d'utilisation du PG.

Dans ce qui suit nous présentons des exemples de valorisation industrielle et pilote de PG dans le monde et en Tunisie. Ces exemples concernent en particulier les domaines suivants : ciment, matériaux de construction, routes, logement et agriculture.

### 4.2.1 Valorisation du PG dans l'industrie du ciment

Rappelons que dans l'industrie du ciment environ 5 % de gypse/anhydrite est ajouté au clinker pour fabriquer du ciment Portland. Le gypse agit comme un retardateur de prise du ciment lorsqu'il est mélangé à l'eau.

Pour l'utilisation du PG comme substitut au gypse naturel dans la fabrication du ciment et du plâtre, les travaux de recherche recommandent en moyenne une teneur en  $P_2O_5$  inférieure à 1% [31]. Certains cimentiers utilisent une teneur en  $P_2O_5$  inférieure à 0,5% ce qui contraint certains producteurs de PG à ajouter de la chaux avant son expédition vers les cimenteries et autres pour le laver en vue de réduire la teneur en phosphore (P) jusqu'au niveau souhaité [32].

Dans ce qui suit, nous présentons quelques exemples d'utilisation du PG dans l'industrie du ciment dans le monde et en Tunisie.

#### 4.2.1.1 Dans le monde

L'utilisation en grandes quantités du PG dans la fabrication du ciment est bien implantée dans plusieurs pays tels que la Chine, l'Inde, le Brésil, l'Indonésie et les Philippines.

Pour l'utilisation du PG dans la fabrication du ciment, les pays concernés ont établi des spécifications du PG à utiliser. A titre d'exemple nous présentons dans le tableau 15 les spécifications requises par les autorités indiennes [4] :

**Tableau 15** : Spécifications en Inde pour l'utilisation du PG dans l'industrie du ciment.

Désignation	Limite suggérée (%)
$P_2O_5$ insoluble	0.50 à 1.00
Fluorure insoluble	0.40 à 0.65
$P_2O_5$ soluble	0.02 à 0.10
Fluorure soluble	Au maximum 0.02
Humidité	Inférieure à 15

Le tableau 16, donne un aperçu sur les quantités annuelles de PG utilisées pour la fabrication du ciment dans quelques pays [2, 4].

L'examen de ce tableau permet de formuler les remarques suivantes :

- En Inde au cours de l'année 2020, la consommation annuelle de PG est de 5,13 Mt, soit une augmentation d'environ 90% par rapport à la période 2017-2018.
- Au Brésil, durant la période 2017 - 2019, un taux d'accroissement de la consommation de PG de 8,6% est également observé.
- En Belgique et aux Philippines (pays importateurs de minerai de phosphate), la consommation de PG pour la fabrication du ciment est assez conséquente et reste moins importante qu'en Inde et au Brésil.

**Tableau 16** : Aperçu sur l'utilisation du PG pour la fabrication du ciment dans quelques pays.

<i>Pays</i>	<i>Année de référence</i>	<i>Quantité de PG consommée (Mt)</i>
Inde	2017-2018	2.69
	2018-2019	3.96
	2020	5.13
Brésil	2017	0.884
	2018	0.951
	2019	0.960*
Belgique	2018	0.708 (ciment + plâtre)
Philippines	2020	0.500

\* Valeur estimée à partir de la consommation enregistrée à fin octobre 2019.

#### 4.2.1.2 En Tunisie

Vu le cadre réglementaire actuel relatif à la classification du PG en Tunisie, son utilisation à grande échelle dans différents domaines notamment, le ciment, les matériaux de construction et les routes n'est pas développée.

Toutefois, les différents aspects de l'utilisation du PG dans ces domaines sont traités par quelques structures de recherche [33, 34, 35]. Le tableau 17 présente un aperçu non exhaustif des travaux de recherche menés ou en cours et ce à partir de 1995.

**Tableau 17** : Aperçu non exhaustif des travaux de recherche sur l'utilisation du PG en génie civil (1995-2023).

<i>Année / Période</i>	<i>Thème / Structure de Recherche (SR) / Organisme (O)</i>
1995	« Production de 1000 tonnes du ciment spécial avec le PG pour l'exportation » - Société les « Ciments Artificiels Tunisiens (CAT) » (O) en collaboration avec « Ultimax » / (O)

2004-2009	<p>« Etude du phosphogypse de Sfax en vue d'une valorisation en technique routière » / « Formulation d'un nouveau matériau routier à base d'un déchet industriel : le phosphogypse » / « Caractérisation du phosphogypse Tunisien et sa valorisation dans la fabrication des briques en argile »</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) - Université de Tunis El Manar (<u>SR</u>)</li> </ul>
2013	<p>« Etude expérimentale relative à l'utilisation du PG pour la fabrication des briques et leur utilisation dans la construction d'une maisonnette pilote »</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Centre National des Sciences et des Technologies Nucléaires (CNSTN) (<u>SR</u>) en collaboration avec le « Groupe Chimique Tunisien (GCT) » (<u>O</u>), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) - Université de Tunis El Manar (<u>SR</u>).</li> </ul>
2015	<p>« Guide de bonnes pratiques pour la gestion et la valorisation durable du phosphogypse : le phosphogypse du problème aux solutions »</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agence Nationale pour la Protection de l'Environnement (ANPE) - Ministère de l'Environnement (<u>O</u>) / Projet « MedPartnership », financé par le « Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) » (<u>O</u>).</li> </ul>
2016 - 2021	<p>« Le Phosphogypse dans la matière crue du ciment » / « Etude de la fabrication du ciment à partir du phosphogypse » / « Utilisation du phosphogypse dans la fabrication des pavés en béton » / « Valorisation du Phosphogypse de Tunisie en vue de son utilisation comme substituant au gypse naturel dans la fabrication du ciment »</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès (ENIG) - Université de Gabès (<u>SR</u>) / Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS) - Université de Sfax (<u>SR</u>) / Faculté des Sciences de Tunis (FST) - Université de Tunis El Manar (<u>SR</u>) en collaboration avec la « Société des Ciments de Gabès (SCG)» (<u>O</u>) et le « Groupe Chimique Tunisien (GCT) » (<u>O</u>)</li> </ul>
2015 - 2023	<p>« Effets des constituants inorganiques sur les propriétés thermiques et mécaniques dans différents types de phosphogypse : étude du cas du site de Gafsa » / « Développement d'un nouveau matériau de construction à base de phosphogypse : Etude des caractéristiques physicochimiques, mécaniques et thermiques »</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faculté des Sciences de Gafsa (FSGa) - Université de Gafsa (<u>SR</u>) / Faculté des Sciences de Gabès (FSG) - Université de Gabès (<u>SR</u>) / Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS) - Université de Sfax (<u>SR</u>) en collaboration avec la « Compagnie des Phosphates de Gafsa (CPG)» (<u>O</u>) et le « Groupe Chimique Tunisien (GCT) » (<u>O</u>)</li> </ul>

## 4.2.2 Valorisation du PG dans le domaine des matériaux de construction et des routes

Pour des considérations économiques et environnementales, les « ressources anthropogéniques » retiennent de plus en plus l'attention des industriels opérant dans les secteurs des matériaux de construction, du bâtiment et des routes.

Le recours au PG en tant que ressource anthropogénique en substitution partielle du gypse naturel, matière première indispensable pour la fabrication du ciment, est devenu d'usage dans plusieurs pays tels que la Chine, l'Inde, le Brésil, la Belgique et les Philippines.

Rappelons le que dans ces applications de valorisation, le PG doit être soigneusement caractérisé avant toute décision sur la manière dont il doit être utilisé conformément à la réglementation nationale et aux recommandations des instances internationales spécialisées.

Dans ce qui suit nous présentons quelques exemples d'utilisation du PG dans les secteurs du bâtiment et des routes.

### 4.2.2.1 Dans le monde

L'évolution du cadre réglementaire sur la gestion du phosphogypse, enregistrée ces dernières années, a largement boosté les travaux de recherche-développement-innovation (RDI) dans certains pays notamment en matière d'utilisation du PG dans les domaines des matériaux de construction et des routes.

Le tableau 18 présente un inventaire non exhaustif des pays qui utilisent le PG à grande échelle dans les matériaux de construction et la construction des routes. [4].

**Tableau 18** : Inventaire non exhaustif de l'utilisation du PG dans les matériaux de construction et les routes.

Pays	Domaines d'utilisation	
	Matériaux de construction	Construction des routes
Belgique	✓	---
Chine	✓	---
Russie	---	✓
Brésil	✓	---
Inde	✓	✓

Les figures 9 rassemblent trois illustrations de l'utilisation du PG dans la fabrication du plâtre/pavés/briques, la construction des bâtiments et des routes.



**Fig. 9a** : Gamme de produits céramiques, revêtement de sol, carrelages et panneaux et briques à base de PG / Chine [4].



**Fig. 9b** : Vue d'un tronçon de route construit à base de PG / Russie [4].



**Fig. 9c** : Bâtiment résidentiel construit avec des matériaux à base de PG / Groupe « Wengfu – Chine » [2,10].

**Figures 9** : Quelques illustrations de l'utilisation du PG dans les matériaux de construction, le logement et les routes.

Par ailleurs des expériences pilotes sont réalisées et suscitent encore l'intérêt de certains pays tels que l'Afrique du sud, la Finlande et le Maroc pour la construction des routes et au Brésil pour la construction de logements (Figures 10) [2, 4, 10].



**Fig. 10a** : Logement expérimental construit en 2009 au Brésil avec des panneaux à base de PG.



**Fig. 10b** : Tronçon expérimental de route au Maroc construit en 2019 (longueur 200 m avec 65% de PG).

**Figures 10** : Quelques illustrations d'expériences pilotes de construction de logement et de routes à base de PG.

Il est à signaler que selon leurs caractéristiques climatiques (températures, humidité) et géotechniques des sols, certains pays ont fixé des spécifications pour le PG à utiliser dans la construction des routes. A titre indicatif le tableau 19 donne les spécifications indiennes du PG à utiliser dans les routes [4].

**Tableau 19** : Spécifications indiennes du PG à utiliser dans les routes.

Désignation	Méthode d'essai	Limite recommandée (à ne pas dépasser)
Fluorures (F <sup>-</sup> )	Caractéristique de Toxicité Protocole de Lixiviation (CTPL)	150 mg/L
Cadmium (Cd)	(CTPL)	1 mg/L
Plomb (Pb)	(CTPL)	5 mg/L
Arsenic (As)	(CTPL)	5 mg/L
Mercure (Hg)	(CTPL)	0.2 mg/L
Humidité	Détermination de l'humidité libre	15 %

Ces spécifications sont intégrées dans un cahier des charges à respecter par les industriels qui sont appelés à surveiller régulièrement l'utilisation du PG en effectuant des analyses du sol pour contrôler en particulier les niveaux des métaux lourds et des radionucléides.

Il est à noter également que pour certains matériaux produits par des procédés de compactage statique, l'utilisation du PG non purifié est possible dans la fabrication des briques et des panneaux [2].

#### **4.2.2.2 En Tunisie**

Il est à rappeler que le cadre réglementaire actuel en Tunisie concernant la classification du PG, ne permet pas son utilisation dans différents domaines notamment, les matériaux de construction, le logement et les routes.

Cependant, depuis les années 90 les centres et les structures de recherche se sont intéressés aux différents aspects de caractérisation et de valorisation du PG généré par les activités de transformation du minerai de phosphate (voir tableau 17)

En effet, plusieurs travaux de recherche dédiés à l'utilisation du PG ont été réalisés dont nous présentons ci-après quelques exemples (Figures 11 et 12):

##### Matériaux de construction

- Pavés de chaussées

Les pavés obtenus lors des essais industriels à base de phosphogypse avec un taux de substitution de 25% possèdent des résistances mécaniques acceptables vis-à-vis la norme européenne « EN1338 : Pavés en béton – Prescriptions et méthodes d'essai » (Figure 11a). [33]

- Briques non cuites

Les briques fabriquées à base de 100 % phosphogypse (Figure 11b) possèdent des propriétés mécaniques permettant leur utilisation comme matériaux de construction pour des structures non porteuses ou comme matériaux de décoration. Les propriétés thermiques correspondantes montrent qu'elles pourraient être adaptées à l'isolation dans la construction de bâtiments. [33]

Notons qu'il ressort d'autres études, comme celles menées en Chine et en Inde [2], que des économies d'énergie significatives peuvent être réalisées en utilisant le PG dans divers matériaux de construction, notamment les briques et les panneaux muraux.



**Fig. 11a** : Pavés avec 25% de PG  
(essais industriels).



**Fig. 11b** : Briques non cuites avec 100 % de PG  
(essais de laboratoire).

**Figures 11** : Deux expériences en Tunisie d'utilisation du PG dans les matériaux de construction.

### Logement

En 2013, le Centre National des Sciences et des Technologies Nucléaires (CNSTN) en collaboration avec le Groupe Chimique Tunisien a construit à Sidi Thabet deux chambres : une chambre témoin avec des briques cuites conventionnelles (70% argile et 30% sable) et une chambre de démonstration avec des briques cuites à base de PG (Figure 12a).

Pour la chambre de démonstration de dimensions 4 m x 4 m, les briques utilisées contenaient 65% d'argile, 25% de PG et 10% de sable. Cette chambre a été équipée de capteurs pour un suivi spatiotemporel des niveaux du radon pour une période de six mois (Figure 12b).



**Fig. 12a** : Chambres construites avec matériaux conventionnels (à droite) et avec des briques contenant 25% de PG (à gauche).



**Fig 12b** : Capteurs installés pour le suivi des émissions du radon.

**Figures 12** : Une expérience en Tunisie d'utilisation du PG dans la construction de logement.

Cette étude a conclu que :

- Les concentrations du gaz radon dans la chambre de démonstration construite avec des briques à base de PG et la chambre témoin construite avec des matériaux conventionnels étaient comparables : entre  $24 \pm 8$  et  $48 \pm 11$  Bq/m<sup>3</sup> pour la chambre témoin et entre  $21 \pm 7$  et  $69 \pm 12$  Bq/m<sup>3</sup> pour la chambre de démonstration. Ces valeurs de concentration en radon enregistrées sont largement inférieures aux valeurs limites standards de 200 Bq/m<sup>3</sup> [2, 5, 36, 37].
- L'utilisation du PG comme matériau alternatif pour la fabrication de briques présente des avantages tels que :
  - la conservation des ressources primaires : l'utilisation du PG a permis respectivement une réduction d'environ 66% pour le sable et 7% pour l'argile par rapport aux quantités requises pour la fabrication des briques conventionnelles ;
  - une économie d'énergie et la réduction des coûts de fabrication : la substitution du sable par le PG entraîne d'importantes économies d'énergie et d'argent sans aucun risque pour la santé de l'utilisateur ;
  - des gains environnementaux : l'utilisation accrue de PG dans la construction entraînera une réduction conséquente des quantités de PG stockées en terrils ou rejetées dans la mer avec un impact très appréciable sur la qualité de l'environnement ;
  - une durabilité et un bénéfice social : le recours à l'utilisation du PG comme ressource anthropogénique permettra de bien gérer les ressources naturelles et de réduire le coût leur utilisation notamment dans le logement ce qui offre des avantages socio-économiques importants.

## 4.3 Valorisation du PG dans le secteur agricole

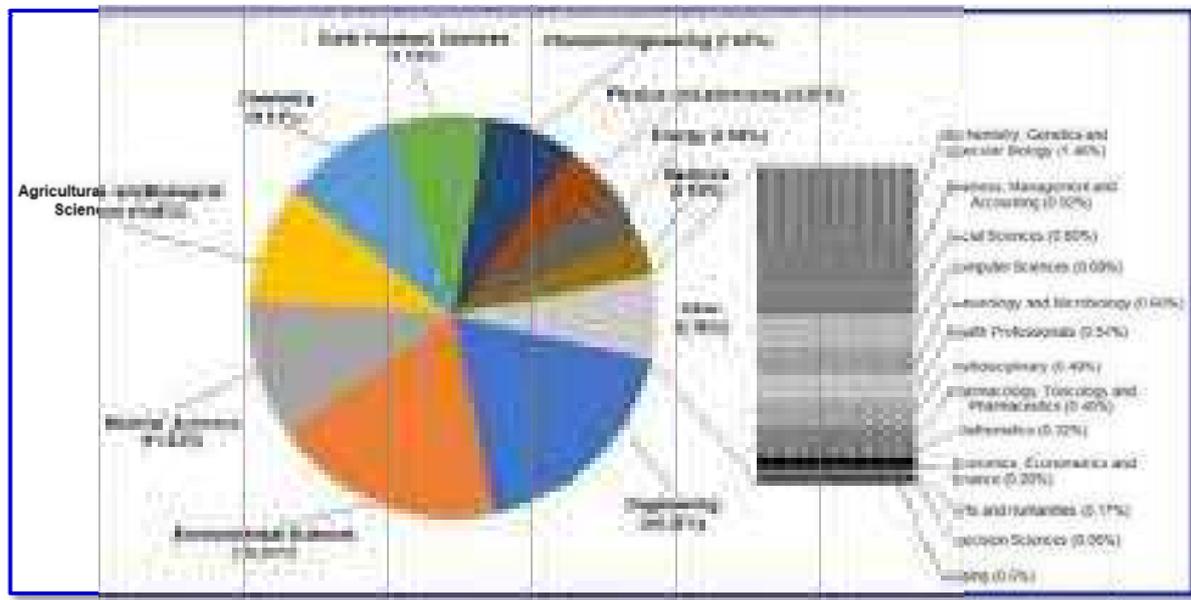
### 4.3.1 Valorisation dans le monde

Face à la demande sans cesse croissante en matières premières naturelles, le recours aux ressources anthropogéniques (voir encadré 3 de la section 1) est devenu une solution incontournable pour satisfaire les besoins des différentes activités économiques.

Le PG généré par la transformation du minerai de phosphate, considéré par les Nations Unies et l'AIEA comme ressource anthropogénique, de par sa composition et compte tenu des avancées technologiques, il est à utiliser dans plusieurs domaines d'activité.

Le PG était initialement considéré comme un composant pour les industries de la construction, du ciment, des routes et de l'agriculture. Au cours des dernières années, l'accent a changé et de nouvelles voies de valorisation ont émergé telles que l'extraction des éléments de terre rares présents dans le minerai de phosphate et dans le phosphogypse et de plus en plus convoités par les industriels de l'électronique, des énergies renouvelables et des voitures électriques, etc.

Les figures 13 et 14 [29] présentent respectivement les orientations et les domaines de recherche ainsi que les champs d'application pour l'utilisation directe du PG et sa transformation en d'autres produits.

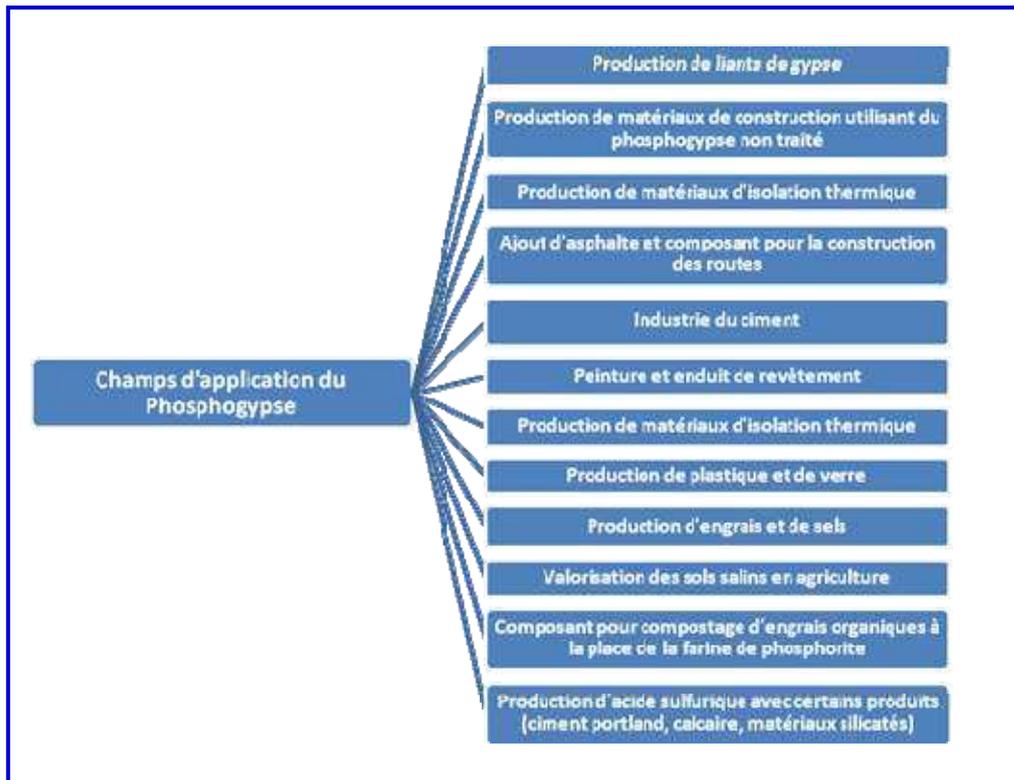


**Figure 13 :** Publications sur le PG classées par domaine de recherche (Base de données Scopus).

Selon les propriétés du PG, les travaux de recherche s'orientent actuellement davantage vers les sciences de l'environnement, mais en même temps la recherche en ingénierie se développe activement. La recherche en science des matériaux se développe également (Figure 13).

La figure 14 présente les champs d'application du PG tels que l'agriculture pour la fertilisation et la régénération des sols, en particulier des sols salins, la biotechnologie et la protection de l'environnement.

Dans les domaines de la biotechnologie et de la protection de l'environnement, le PG n'est pas seulement appliqué comme substrat (support de bio-culture) mais il est en même temps utilisé comme substrat ayant une valeur nutritive lorsqu'il s'agit de son application dans des technologies basées sur les micro-organismes (par exemple : l'épuration des gaz, le traitement des eaux usées, la remise en état des sols contaminés par des produits à base de pétrole / produits pétroliers et les déblais de forage). Ces domaines deviennent pertinents et de plus en plus appliqués.



**Figure 14 :** Les grandes orientations pour la valorisation du PG.

### Exemples de valorisation du PG dans le monde

Nous présentons dans ce paragraphe une série non exhaustive d'expériences de valorisation du PG en particulier dans le domaine de l'agriculture. Dans ce domaine, le PG est utilisé comme amendement minéral pour les sols dégradés (sols salins, sodiques, magnésiques et acides), et aussi comme engrais car il contient de nombreux nutriments (le calcium, le soufre, et le phosphore) essentiels à la croissance et au développement des plantes.

Dans ce qui suit nous donnons quelques exemples d'utilisation du PG dans le monde.

- **En Espagne**

Dans l'objectif de réhabiliter les sols à forte salinité la législation espagnole autorise, depuis les années 70, les agriculteurs à utiliser le phosphogypse, provenant de l'industrie d'engrais chimiques générant environ 3 Mt/an de PG, comme source d'amendement minéral [38] (Figures 15).

Le PG, affichant une teneur typique de  $710 \pm 40$  Bq/kg de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $165 \pm 15$  Bq/kg de  $^{238}\text{U}$  et  $2.8 \pm 0.4$  mg/kg en Cd, a été appliqué de façon directe, avec des doses de 20 à 25 t/ha chaque 2 à 3 ans, dans la région de Lebrija couvrant environ 140 km<sup>2</sup> (Figures 15a et 15b). Des études sur l'effet cumulatif de l'application du PG sur la qualité des sols et des plantes (tomates) ont été menées durant une période de 30 ans (Figure 15c) [38]. Les résultats obtenus montrent que sur le plan environnemental, la surveillance des teneurs de

$^{226}\text{Ra}$ , ( $^{214}\text{Pb}$ ) et de  $^{238}\text{U}$  ( $^{234}\text{Th}$ ) dans les sols traités par le PG et les sols sans traitement de PG, qu'il n'y a pas de différences significatives entre les concentrations mesurées des radionucléides. Toutefois, les études indiquent qu'il y a eu un enrichissement relatif en  $^{226}\text{Ra}$  de l'horizon superficiel (0-30 cm) des sols traités par rapport aux horizons profonds (30-60 cm) des sols traités et aux sols non traités.

Par ailleurs, les concentrations en cadmium (Cd) dans les tomates étaient plus élevées ( $0.035 \pm 0.005$  mg/kg) que celles trouvées dans les tomates provenant d'autres régions du pays, ce qui peut être considéré comme un indice précis du taux cumulé de PG dans les sols. Toutefois, les concentrations en Cd dans les tomates restent inférieures à la norme européenne EC 1881/2006 fixée à 0.050 mg/kg. Ces études soulignent également que l'ajout du PG a permis d'améliorer le rendement des cultures et de récupérer des sols marginaux.



Fig. 15a : Champs agricoles réhabilités par l'utilisation du PG.



Fig. 15b : Mode d'application directe du PG.



Fig. 15c : Etudes en serre pour le contrôle des cultures.

**Figures 15** : Application en Espagne du PG dans le secteur agricole.

Il est à préciser que la valorisation agricole du PG en Espagne a été interrompue en 2001 en raison de l'inquiétude du public sur la sécurité alimentaire. Toutefois, la réglementation espagnole récente (R.D. 824/2005) autorise explicitement l'utilisation du PG comme amendement du sol (sans mention de son contenu radioactif). Par ailleurs, la réglementation européenne (CE1881/2006) fixe des limites supérieures pour les concentrations de certains métaux lourds (Hg, Cd et Pb) dans les aliments indépendamment de la source. L'USEPA adopte des recommandations spécifiques à

l'usage agricole du PG (64 Federal Register 5574), et autorise son utilisation à condition que la concentration de  $^{226}\text{Ra}$  soit inférieure à 370 Bq/kg.

- **Au Maroc**

L'industrie de l'acide et des engrais phosphatés génère environ 20 Mt/an de PG dont la totalité est rejetée dans l'océan. Face à l'ampleur de la salinisation des terres irriguées au Maroc, des études ont été dédiées à l'effet de l'utilisation du PG pour l'amendement des sols salins dans quatre régions du pays [4, 39].

Dans ce cadre, des essais d'amendement ont été menés conformément à un protocole qui repose sur l'amendement du sol par le PG à des doses variant 15 à 45 t/ha et sur l'amendement d'un sol par le gypse naturel à une dose de 15 t/ha, en se référant à un sol témoin sans amendement (PG, gypse : 0 t/ha) (Figures 16). Les résultats enregistrés ont révélé que l'application du PG améliorait la structure du sol en favorisant l'action floculante (stabilité des agrégats d'eau (WAS)) apportée par le calcium.



**Figures 16 :** Culture du maïs fourrage au Maroc avec différentes doses de PG (0 : 0 t/ha, 1 : 20 t/ha et 2 : 40 t/ha).

L'application du PG a présenté un effet positif sur les propriétés hydrauliques du sol, porosité totale et densité apparente. Les résultats obtenus soutiennent l'utilisation du PG comme amendement pour la récupération des sols affectés par le sel en s'appuyant sur la surveillance des impacts agronomiques et environnementaux.

- **Au Brésil**

Au Brésil, l'industrie de transformation du minerai de phosphate génère environ 5 Mt/an de PG. En 2016, environ 40% est utilisé en agriculture pour l'amendement des sols.

En 2007, le Ministère Brésilien de l'Agriculture a statué que le PG destiné à être utilisé en agriculture doit contenir au moins 16 % de calcium (Ca) et 13% de soufre (S), selon l'Instruction Normative (IN 5). Les concentrations en métaux lourds sont déterminées selon les Instructions Normatives (IN 27 & IN 28) et ne doivent pas dépasser les valeurs limites suivantes exprimées en mg/kg en l'occurrence : arsenic, 10 ; cadmium, 20 ; plomb, 100 ; chrome, 200 ; mercure, 0.2.

Dans des travaux de recherche publiés en 2013[40, 41] et repris par l'IFA dans son rapport de 2016 [2], ont montré que l'application du PG en agriculture ne présente pas de risques en ce qui concerne la contamination par les métaux et les radionucléides.

Par ailleurs, les travaux de recherche menés au Brésil sur la valorisation du PG dans le domaine agricole sont abondantes [42] et ont permis d'établir en 2022 les règles de bonnes pratiques de gestion (4B) décrites dans l'encadré 13 :

***Encadré 13 : Les bonnes pratiques Brésiliennes « 4B » pour la gestion du PG dans le domaine agricole.***

- ***Bonne source***

Le PG doit être utilisé conformément aux réglementations du pays, notamment liée aux concentrations des radioéléments qui doivent être faibles sachant que la radioactivité moyenne du PG Brésilien est de 252 Bq/kg PG.

En moyenne, le PG devrait contenir 20 % de  $\text{Ca}^{2+}$  et 15 % de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Le coût du transport constitue le principal facteur qui peut restreindre l'utilisation du PG. Au Brésil, l'utilisation des PG est considérée comme rentable dans un rayon de 800 km de son origine.

- ***Bon dosage***

Un bon dosage de PG est fondamental pour améliorer l'acidité du sous-sol. Des taux inférieurs à ceux nécessaires aux cultures risquent de ne pas produire l'effet souhaité.

Appliquer trop de PG peut transporter du  $\text{Mg}^{2+}$  et parfois du  $\text{K}^{2+}$  vers les couches profondes du sol que les racines des plantes ne peuvent pas atteindre.

- ***Bon moment***

Le PG doit être appliqué avant le semis des cultures céréalières. Pour les cultures vivaces, le PG peut être appliqué avant l'établissement de la culture ou à tout moment pendant la durée de vie de la culture, si nécessaire.

- ***Bon endroit***

L'application de PG n'est recommandée que lorsque l'analyse du sol (20 à 40 ou 40 à 60 cm) présente une teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  échangeable  $< 5 \text{ mmol/dm}^3$ , une teneur en  $\text{Al}^{3+}$  échangeable  $> 5 \text{ mmol/dm}^3$ , et/ou la saturation en  $\text{Al}^{3+} > 20 \%$ .

Le PG doit être appliqué sur la surface du sol.

- **En Inde**

En Inde, les 11 sociétés de production d'engrais phosphatés génèrent plus de 5,5 MT/an de PG. L'utilisation du PG comme engrais est une pratique courante et en particulier dans plus de 200 districts du pays où les sols présentent une carence en soufre (Indian Council of Agricultural Research, 2012). Legality Simplified (2023) a indiqué que le Ministère de l'Agriculture et du Bien être des Agriculteurs (2023) a amendé l'article 20 A portant sur le contrôle des engrais (inorganiques, organiques ou mélangés) et a fixé les caractéristiques du PG (granulé) fabriqué en Inde et destiné à l'usage agricole pour une période de trois ans à compter de la date de publication au Journal officiel soit jusqu' à 2026 (Figure 17).

A titre indicatif les caractéristiques du PG granulé commercial sont [43]:

- (i) Teneur en eau : Maximum 15.0 % en poids.
- (ii) Teneur en sodium (sous forme de  $\text{Na}^+$ ) : Maximum 0,75 % en poids
- (iii) Couleur : Vert clair.
- (iv) Granulométrie : Au moins 90 % du matériau doit passer à travers un tamis de 4 mm et être retenu sur un tamis de 1 mm. Pas plus de 5 % ne doivent passer à travers un tamis de 1 mm.
- (v) Soufre: Minimum 13.0 % en poids.
- (vi) Teneur en sulfate de calcium déshydraté : Minimum 70,0 % en poids.
- (vii) Fluorure (en F) : Maximum 1,0 % en poids (sur une base sèche).
- (viii) Teneur maximale en métaux lourds (mg/kg) :  
 plomb (Pb) : 100,0 ; cadmium (Cd) : 5.0 ; chrome total (Cr) : 50.0 ; nickel (Ni) : 50.0 ; arsenic (As) : 10.0 et mercure (Hg) : 0.15.



**Figure 17** : PG granulé à usage agricole commercialisé par la société Indienne « Paradeep ».

Il est à noter également qu'en Inde, deux agences étatiques sont en charge, entre autres, de l'industrie de transformation du minerai de phosphate et de ses différentes applications, en l'occurrence :

- Le « Central Pollution Control Board (CPCB) », créé en 1974, ayant pour mission la réglementation et la surveillance des risques liés aux contaminations et émissions physiques et chimiques conventionnelles.
- L'« Atomic Energy Regulatory Board (AERB) », créé en 1983, ayant pour mission la réglementation et la surveillance des risques liés à la contamination radioactive et à la radioprotection.

Pour l'utilisation du PG dans le domaine agricole :

- L'AERB déclare qu'il n'y a aucune restriction pour l'utilisation du phosphogypse en agriculture en ce qui concerne des considérations de sécurité radiologique (voir encadré 10 au paragraphe 3.1.6).
- Pour la CPCB, le PG peut être utilisé pour réhabiliter les sols alcalins et les sols salins-alcalins à haute concentration en ions sodium. La « Fertilizer Control Order » (FCO), un comité de la CPCB, a également approuvé l'utilisation du PG comme engrais en raison de ses valeurs nutritionnelles tout en respectant les spécifications des normes indiennes IS 10170-1982 & IS 6046-1982 qui ont été révisées et réaffirmées respectivement en 1999 et en 2008.

#### 4.3.2 Valorisation du PG en Tunisie

La recherche sur la valorisation du PG en agriculture se limite à des essais de laboratoire. En 2019, l'Institut des Régions Arides (IRA) a présenté les résultats d'une étude expérimentale sur l'utilisation du PG pour la restauration d'un sol oasien dégradé [44]. Ces travaux avaient pour principaux objectifs :

1. déterminer le taux d'amendement des sols par le PG (t/ha/an) ;
2. évaluer l'impact de l'amendement des sols par le PG sur les propriétés physico-chimiques et radioactives des sols et la qualité des cultures.

A cette fin, une parcelle expérimentale, répartie en 24 unités, de dimension 2m x 12m chacune, a été aménagée dans la station de l'IRA à Chott El Ferik-Gabès selon un bloc aléatoire complet incluant 4 traitements : PG, sable de carrière, fumier et un témoin. Les doses de PG appliquées pour l'amendement du sol ont été de 12.5, 25 et 50 t/ha.

Ces unités expérimentales ont été exploitées durant deux saisons agricoles pour produire du navet, de l'avoine et de la corète potagère (Figures 18 & 19).



Fig. 18a : Sol témoin (T)  
(sans amendement).



Fig. 18b : Sol amendé avec du  
fumier (F).



Fig. 18c : Sol amendé avec du PG  
(PG3).

**Figures 18** : Culture de la corète avec amendement par le fumier et le PG.



Fig. 19a : Sol amendé avec du PG (PG3).



Fig. 19b : Sol témoin (T)  
(sans amendement).



Fig. 19c : Sol amendé avec du  
fumier (F).

**Figures 19** : Culture du navet avec amendement par le PG et le fumier.

Les résultats enregistrés révèlent que l'amendement par le PG améliore d'une façon significative l'aération et la conductivité hydraulique du sol étudié. Sur le plan agronomique, les meilleurs rendements des cultures testées ont été enregistrés pour les unités traitées par le PG. La corète recevant 50 t/ha du PG a donné un rendement supplémentaire respectivement de 40 % et 62 % par rapport aux traitements par le sable de carrière et le témoin.

En ce qui concerne les caractéristiques chimiques du sol, le traitement par le PG a révélé une augmentation relative de la concentration des métaux lourds, en particulier le cadmium ( $Cd^{2+}$ ). Toutefois, les concentrations observées restent inférieures aux seuils de toxicité pour de la plupart des cultures (7 ppm) [38]. La radioactivité au niveau des parcelles recevant du PG exprimée en concentration de  $^{226}Ra$  montre un maximum de  $13.4 \pm 1.5$  Bq/kg dans les premiers 20 cm du sol contre  $10,5 \pm 1.4$  Bq/kg au niveau du témoin (valeur naturelle). Ces valeurs restent largement plus faibles que celle du PG.

En récapitulation des expériences précitées en matière d'utilisation du PG dans le secteur agricole dans certains pays, les remarques suivantes peuvent être formulées :

- La réglementation espagnole autorise depuis les années 70, les agriculteurs à utiliser le phosphogypse comme source d'amendement minéral pour réhabiliter les sols à forte salinité. Cette pratique s'est fortement développée ces dernières années.
- Au Brésil, outre sa réglementation favorable depuis 2007 à l'application du PG dans le secteur agricole, des « Règles de bonnes pratiques de gestion du PG dans l'agriculture 4B » (Bonne source, Bon dosage, Bon moment et Bon endroit), ont été instaurées en 2022.  
A titre d'indication, en 2016, environ 40% est du PG généré est utilisé en agriculture pour l'amendement des sols.
- En Inde, le « Central Pollution Control Board (CPCB) » et l'« Atomic Energy Regulatory Board (AERB) », deux agences étatiques sont en charge, entre autres, de l'industrie de transformation du minerai de phosphate et de ses différentes applications, ont autorisé depuis 2008 l'utilisation du PG dans le domaine agricole et veillent sur le respect des normes d'usage.  
Actuellement des industriels commercialisent le PG sous forme de granulés aussi bien pour le marché local que pour l'export (Bangladesh & Népal).
- Bien qu'en Tunisie près de 71% des sols sont classés fortement sensibles à la salinité, l'utilisation du PG en agriculture est encore au stade expérimental.  
C'est également le cas du Maroc, considéré comme l'un des grands producteurs d'acide phosphorique et d'engrais.

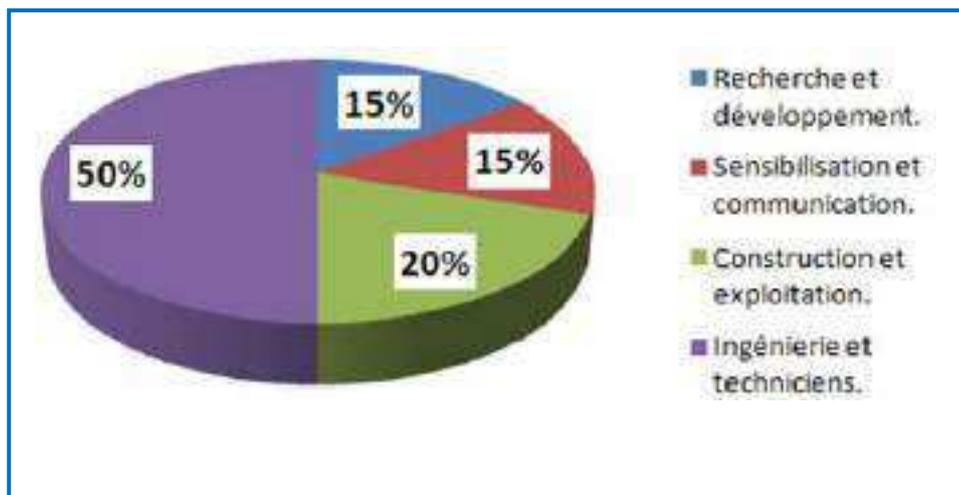
## 4.4 Impact économique de la valorisation du PG

La valorisation du phosphogypse présente un potentiel pour diverses applications, notamment dans les matériaux de construction, les routes, le logement, l'agriculture, et même dans l'industrie chimique (engrais et sels, production d'acide sulfurique, peinture et enduit, plastique et verre, etc.).

D'après une étude réalisée en 2019 par l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) [45], la valorisation du phosphogypse offre des perspectives d'emplois directs et indirects à l'échelle mondiale dans les secteurs suivants :

- Ingénierie et techniciens.
- Construction et exploitation.
- Recherche et développement.
- Sensibilisation et communication.

La figure 20 donne un aperçu sur la répartition de création d'emplois selon les secteurs d'activité précités.



**Figure 20** : Perspectives de nouveaux emplois avec la filière PG [45].

Notons qu'à l'échelle mondiale, les activités de valorisation du PG pourraient créer jusqu'à 400 000 emplois d'ici 2030 [45].

**Section 5 :**

**Conclusions & Recommendations**

## 5.1 Conclusions

Toutes les activités industrielles utilisant le plus souvent des ressources naturelles dont les réserves sont de plus en plus affaiblies, génèrent des produits utiles et des sous-produits. Une partie des sous-produits est recyclée dans les chaînes de production et l'autre partie souvent non négligeable couramment appelée « déchets » est stockée et/ou rejetée dans l'environnement.

Classés par les instances internationales spécialisées en « déchets non dangereux » et « déchets dangereux », la valorisation des « déchets non dangereux » retient de plus en plus l'intérêt des structures de recherche-développement, des autorités et des acteurs socio-économiques à travers le monde pour des raisons économiques et environnementales et pour contribuer :

- d'une part à la concrétisation des mesures définies dans la stratégie nationale de la transition écologique 2023/35-2050 visant en particulier le développement de l'économie circulaire verte, la préservation du capital naturel du pays et ses écosystèmes et la réduction des inégalités sociales et la disparité des activités économiques territoriales notamment la mesure n°42 de l'axe 4 « Production et consommation durables et lutte contre la pollution »,
- et d'autre part à la concrétisation d'ici 2030 des Objectifs de Développement Durable (ODD) fixés par l'Organisation des Nations Unies (ONU), visant notamment à assurer l'alimentation pour tous, à soutenir la prospérité économique, à lutter contre les changements climatiques et à protéger l'environnement. Ces objectifs sont en particulier l'ODD N° 9 et l'ODD N° 12 consacrés respectivement à « Industrie, Innovation & Infrastructure » et à « Consommation & Production durables ».

Dans ce contexte, le recours à la valorisation des « déchets non dangereux » considérés comme des « ressources anthropogéniques » est d'actualité à travers le monde et d'usage dans plusieurs pays industriels.

En Tunisie, depuis son démarrage en 1952, l'industrie de transformation du minerai du phosphate, a généré d'énormes quantités de phosphogypse (PG) évaluée en 2023 à environ 300 Mt, dont la majorité, soit environ 170 Mt est rejetée dans le golfe de Gabès. Malheureusement à ce jour, la valorisation de ce gisement est entravée par la contrainte réglementaire nationale qui classe cette substance comme « déchet dangereux ».

Soucieux de suivre les évolutions réglementaires dans le monde et de pouvoir valoriser, à grande échelle, le gisement de PG, le Ministère de l'Environnement et le Ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Energie ont créé en avril 2023 une Commission mixte chargée de réviser le décret n° : 2000-2339 du 10 octobre 2000 fixant la liste des déchets dangereux et de fixer un plan pour la gestion du PG et sa valorisation. Cette Commission a fait appel à un Comité Scientifique indépendant, composé d'experts universitaires et professionnels pour effectuer une synthèse bibliographique actualisée sur les travaux de recherche relatifs aux caractérisations physico-chimiques et radiologiques

du PG et sur les dernières avancées scientifiques, techniques et réglementaires concernant la gestion et la valorisation du PG.

Le Comité Scientifique est appelé également à éclairer la Commission mixte sur la révision du classement du PG tunisien parmi la liste des « déchets dangereux ».

Pour atteindre les objectifs escomptés, le Comité Scientifique a procédé à la collecte des études, des articles, des thèses de doctorat, des rapports techniques et des actes des rencontres scientifiques en relation avec la caractérisation, la gestion et la valorisation et la classification réglementaire dans le monde et en Tunisie du PG.

Notons également que le Comité Scientifique a conçu et a réalisé le programme de la *Rencontre scientifique* portant sur « *La valorisation du phosphogypse : Opportunités pour le développement économique régional* », tenue à Gafsa, les 13 et 14 décembre 2023.

Cette Rencontre a réuni les principaux acteurs concernés par la gestion et la valorisation du PG : chercheurs, industriels et institutionnels. Les communications présentées ainsi que l'ensemble des recommandations adoptées ont été rassemblées dans un Recueil portant la référence ISBN : 487-01-20-12-2023, publié en janvier 2024.

L'analyse attentive de la dense bibliographie rassemblée, environ 170 documents (articles, brevets, études et rapports, etc.), publiés durant la période 1995 - 2023, le Comité Scientifique a pu faire les remarques regroupées ci-après selon le thème de cette étude.

#### ❑ **Caractérisation du PG tunisien**

- Le PG se compose en général de sulfate de calcium dihydrate (gypse) avec présence d'impuretés solubles (fluorures et  $P_2O_5$ ), d'impuretés insolubles (minéraux et composés non transformés pendant la réaction entre le minerai phosphate et l'acide sulfurique) en l'occurrence silice, phosphate non attaqué et carbone organique et  $P_2O_5$  syncristallisé et des éléments métalliques en faibles teneur.
- En général, la concentration en éléments traces métalliques la plus importante est celle du strontium (Sr) suivie de celle du baryum (Ba), du chrome total (Cr), du cadmium (Cd), du cuivre (Cu) et du manganèse (Mn). Les concentrations des autres éléments métalliques tels que le sélénium, l'arsenic, le plomb, etc. sont trop faibles. Les concentrations en éléments de terres rares (ETR) les plus importantes sont celles des ETR légers en l'occurrence l'yttrium (Y), le lanthane (La), le cérium (Ce) et le néodyme (Nd). Tandis que les concentrations en ETR samarium (Sm), europium (Eu), ytterbium (Yb) et lutécium (Lu) sont à l'état de traces.

### Comparaison du PG tunisien avec le minerai de phosphate et quelques dérivés

- Le PG tunisien contient des concentrations en éléments majeurs nettement plus faibles que celles du minerai de phosphate à l'exception du calcium (Ca) et du sulfate (SO<sub>4</sub>). Ceci s'explique par le fait que ces éléments se sont répartis en majorité dans l'acide phosphorique et le reste dans le PG.

Par rapport aux engrais TSP, SSP et DAP, le PG contient des concentrations en éléments majeurs, de même ordre de grandeur tels que la silice (SiO<sub>2</sub>) et le fluor (F) ou encore plus faibles tels que les oxydes de fer, d'aluminium, de magnésium et de potassium.

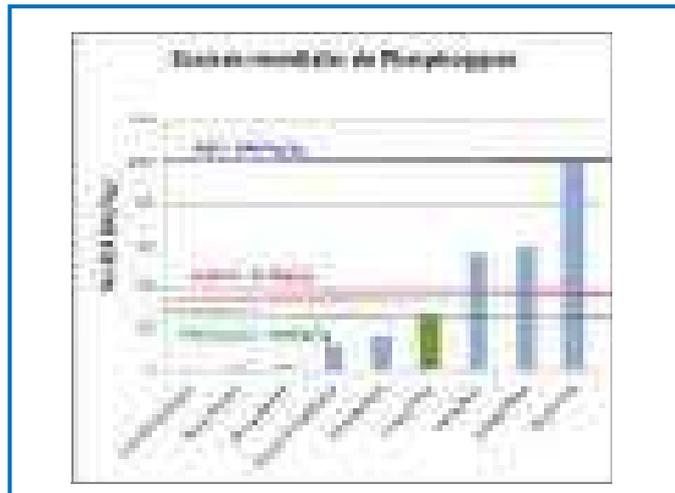
- En comparaison avec le phosphate naturel et les engrais TSP, SSP, DAP, la concentration du PG en éléments traces métalliques, dont des métaux lourds, est largement inférieure à ce qui se trouve dans le minerai de phosphate et les engrais dérivés.

### Comparaison du PG tunisien avec des PG étrangers

- Les concentrations en éléments majeurs dans le PG tunisien sont du même ordre de grandeur que celles des PG étrangers.
- Les concentrations en éléments traces métalliques en particulier les métaux lourds (cadmium (Cd), plomb (Pb) arsenic (As) et mercure (Hg), nickel (Ni), chrome (Cr) et zinc (Zn)) dans le PG tunisien sont plus faibles que celles des PG étrangers.
- Les concentrations en éléments de terres rares (ETR) dans le PG tunisien sont du même ordre de grandeur que celles des PG étrangers précités.
- La radioactivité du PG tunisien est principalement due à la radioactivité du radium <sup>226</sup>Ra qui représente environ 80% de l'activité totale présente. En effet, les radioactivités des éléments <sup>226</sup>Ra et <sup>238</sup>U sont largement inférieures aux valeurs des PG étrangers. En outre, la radioactivité du <sup>40</sup>K dans le PG tunisien est de l'ordre de 10 Bq/kg, elle est également largement inférieure aux valeurs de radioactivité <sup>40</sup>K des PG étrangers.

**Il est à signaler que l'United States Environmental Protection Agency (USEPA), a fixé en 1992, un seuil maximal pour le niveau d'exposition au <sup>226</sup>Ra de 370 Bq/kg. En 2013 l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) a fixé ce seuil à 1000 Bq/kg.**

L'encadré suivant permet aussi de situer la radioactivité du PG tunisien (exprimée en Bq/g de <sup>226</sup>Ra) par rapport à des PG étrangers et à des valeurs standards (AIEA, US/EPA). Il est à noter que les PG ayant une radioactivité naturelle inférieure à 0.2 Bq/g (soit 200Bq/kg) sont issus de phosphate volcanique.



Ainsi en se référant aux standards de l'USEPA et de l'AIEA et aux études menées en Tunisie et à l'étranger, il est constaté que le **PG tunisien présente une activité radioactive exprimée en  $^{226}\text{Ra}$  de 275 Bq/kg, qui est conforme au seuil standard international de 1000 Bq/kg et qui est également inférieure à l'ensemble des valeurs de radioactivités des PG étrangers issus de la transformation des phosphates sédimentaires.**

#### □ **Evaluation de l'écotoxicité et de la toxicité aiguë du PG tunisien**

L'évaluation de l'écotoxicité « **HP 14** » et de la toxicité aiguë « **HP 6** » du PG tunisien ont été menées en se basant sur l'application de la directive européenne 2008/98/CE, telle que révisée de 2014 à 2018, et en particulier du règlement (UE) 2017/997 modifiant l'annexe III de cette directive, et des « Recommandations techniques concernant la classification des déchets » objets du document 2018/C 124/01 et tenant compte de la caractérisation du PG tunisien.

**À la lumière des résultats de l'évaluation de ces deux propriétés de danger, le PG tunisien tel qu'il se présente ne possède pas des propriétés de danger d'écotoxicité (non dangereux de type « HP 14 ») et de toxicité aiguë (non dangereux de type « HP 6 »).**

Ces résultats sont en accord avec les niveaux de concentrations des éléments traces métalliques présents dans le PG. Toutefois le déversement du PG dans la mer entraîne des effets négatifs sur l'écosystème marin, liés en particulier à l'accumulation des impuretés insolubles suite à la dissolution totale de sa composante principale le sulfate de calcium dihydrate «  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  » (qui présente au moins 96% de la composition du PG). Il en est de même que le stockage du PG en terrils sans respecter les normes d'usage les plus avancées engendre des effets négatifs sur l'environnement.

## ❑ Réglementation relative au PG dans le monde et en Tunisie

### Cadre réglementaire international

- Le phosphogypse ne figure pas dans la liste de l'annexe I de la **Convention de Bâle** (Convention de l'Organisation des Nations Unies sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination / 1989). Il est à noter que par **la loi 95-63**, la Tunisie a adhéré à cette convention.
- En 1991, en réponse à la convention de Bâle, l'Organisation de l'Unité Africaine (OUA) a élaboré une convention dite la « **Convention de Bamako** » relative à « l'interdiction d'importer en Afrique des déchets dangereux et sur le contrôle des mouvements transfrontières et la gestion des déchets dangereux produits en Afrique » sachant que le phosphogypse ne figure parmi la liste des catégories de déchets dangereux. Notons que **la Tunisie a ratifié cette convention dont l'entrée en vigueur par les pays signataires date depuis 1998.**
- Le phosphogypse n'est pas inscrit sur la liste de l'annexe I du Protocole de la **Convention de Barcelone** (Convention de Barcelone pour la Protection de la Méditerranée contre la pollution / 1976). La Tunisie est également signataire de la Convention de Barcelone et ses protocoles en particulier le Protocole relatif à la prévention de la pollution de la mer Méditerranée par les mouvements transfrontières de déchets dangereux et leur élimination qui est ratifié par la Tunisie le 01/06/1998. Sa mise en vigueur date du 19/12/2007.
- En 2013, l'Agence Internationale d'Energie Atomique (**AIEA**) a fixé **un seuil maximum de radioactivité de 1Bq/g dans le PG** pour des utilisations sécurisées dans divers domaines tels que : matériaux de construction, agriculture, construction des routes, production d'engrais, etc.

L'AIEA note l'absence de motif radiologique qui interdit son utilisation, suggère de le considérer comme **co-produit et non un déchet**, recommande sa valorisation au lieu de son stockage permanent et invite les décideurs à prendre en considération sa valorisation dans leurs politiques.

- Depuis 1989, aux Etats Unis d'Amérique, l'**USEPA** autorise des utilisations du phosphogypse dans le domaine agricole en plein air sous condition que l'activité radiologique (exprimée en  $^{226}\text{Ra}$ ) ne dépasse pas le seuil de 370 Bq/kg.
- En l'an 2000, la **Commission Européenne** a classé le PG comme déchet **non dangereux**. Depuis 2001, la liste des déchets a été révisée. La rubrique [06 09 01] attribuée au phosphogypse a été supprimée et deux nouvelles rubriques de déchets pour « les déchets provenant de FFDU des produits chimiques contenant du phosphore et de la chimie du phosphore » ont été introduites.
- En Inde, le phosphogypse a été **exclu** en 2008 **de la catégorie des déchets dangereux**. La gestion du phosphogypse provenant des usines d'engrais à base

d'acide phosphorique est effectuée conformément aux directives du Conseil Central de Contrôle de la Pollution (CPCB).

De même, l'Atomic Energy Regulatory Board (AERB) de l'Inde, fixe un seuil d'activité radiologique (exprimée en  $^{226}\text{Ra}$ ) 1 Bq/g pour la commercialisation du PG par les usines d'engrais.

### **Cadre réglementaire tunisien**

En Tunisie, depuis l'année 2000, le **phosphogypse** est **classé nominativement** en tant que **déchet dangereux** par le décret n° 2000-2339 du 10/10/2000 sachant que l'exposé des motifs de ce décret a fait référence aux conventions de Bâle (1989) et de Bamako (1991) et aux modifications apportées dans la liste européenne des déchets (2000).

Le Comité Scientifique tient à préciser que la décision de classer le PG en tant que déchet dangereux n'est pas basée sur des arguments solides. En effet, les listes des déchets dangereux dans les conventions de Bâle et de Bamako ne citent pas explicitement le phosphogypse en tant que déchet dangereux. Il est à signaler que le PG tunisien ne contient pas des constituants dont les concentrations sont soit trop faibles, inférieures ou comparables à celles enregistrées dans le phosphate naturel et les engrais actuellement commercialisés (TSP, SSP et DAP), qui peuvent présenter les caractéristiques de danger mentionnées respectivement dans les annexes II et III des conventions de Bâle et de Bamako.

Il est à préciser également que les constituants pouvant présenter une ou plusieurs caractéristiques de danger dans le PG tunisien sont soit absents ou présents à des concentrations trop faibles, inférieures ou comparables à celles dans le phosphate naturel et dans les engrais actuellement commercialisés par le GCT (TSP, SSP et DAP) et qui sont conformes au règlement européen « Registration, Evaluation, Autorisation and restriction of CHEMicals (REACH) » (Règlement (CE) n° 1907/2006 du 18 décembre 2006).

Le Comité Scientifique retient que l'Union Européenne dans sa **décision n°2000/532/CE** du 30/05/2000, **établissant une liste des déchets**, a classé le phosphogypse dans la rubrique [06 09 01] **sans astérisque (\*)**. Ainsi le **PG est considéré comme déchet non dangereux ne présentant aucune des caractéristiques de danger énumérées à l'article 2 de la décision et reprises de l'annexe II de la « Directive 91/689/CEE »**. Cette classification européenne n'a pas été prise en compte par le décret tunisien n° 2000-2339 du 10 octobre 2000.

## □ Gestion et valorisation du PG dans le monde et en Tunisie

### • Recherche

- Le développement des travaux de recherche sur le PG dans de nombreux pays a connu une importante évolution ces dernières années marquées par les résultats de par l'impact de l'étude menée par l'AIEA publiés en 2013.



- Pour la Tunisie, les différents aspects du PG sont de plus en plus traités ces dernières années par les structures de recherche. À titre d'indication, on dénombre, selon la « Base de données Scopus », 40 articles publiés durant la période 2020-2023.

### Utilisation du PG dans le ciment, les matériaux de construction et les routes

- En 2013, l'AIEA a élaboré une approche réglementaire pour l'utilisation du PG dite « **Graded Approach** », définie comme « une méthode structurée par laquelle la rigueur du contrôle à appliquer à un produit ou à un processus est proportionnelle au risque associé à une perte de contrôle ». Cette approche fondée principalement sur la caractérisation du PG en radionucléides et métaux lourds permet de répertorier les domaines d'application du PG et la réglementation afférente à ces applications comme le montre l'encadré qui suit :

## CARACTERISATION

$^{226}\text{Ra} \ll 1 \text{ Bq/g}$

TOUS LES METAUX  $\ll$  LIMITES

+++

$^{226}\text{Ra} \sim 1 \text{ Bq/g}$

1 METAL CRITIQUE OU PLUS  
> LIMITES

++

$^{226}\text{Ra} > 1 \text{ et } < 2 \text{ Bq/g}$

1 METAL CRITIQUE OU PLUS  
> LIMITES

+

## OPTIONS D'UTILISATION

Toutes les utilisations

⇒ Agriculture  
⇒ Constructions  
⇒ Matériau de construction  
⇒ Routes  
⇒ Décharges  
Etc,

Toutes les utilisations mais

⇒ "Graded Approach" pour la construction  
⇒ Utilisation pour logements

Récupération  
co-produit / Soufre

⇒ Couverture de décharges  
⇒ Construction non-résidentielle  
\* "Graded Approach"  
⇒ agriculture  
\* "Limit Approach"  
⇒ Utilisation en construction /  
logements

## REGLEMENTATION

AUCUNE VOIE  
PREOCCUPANTE

"HORS DE PORTEE"

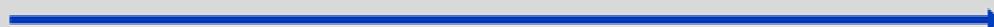
LIMITATION DE LA VOIE  
D'INHALATION

AU CAS PAR CAS POUR  
LES LOGEMENTS

VOIES PREOCCUPANTES  
INGESTION, INHALATION &  
ENVIRONNEMENTALE

UTILISATIONS CIBLEES  
EXEMPTIONS DETAILLEES

"GRADED APPROACH"



- En 2015, l'IFA a recensé auprès de 21 pays producteurs d'acide phosphorique, une quantité de 29 Mt de PG exploitées dans différents domaines dont 11 Mt dans l'industrie des matériaux de construction. L'utilisation en grandes quantités du PG dans la fabrication du ciment est bien implantée dans plusieurs pays tels que la Chine, l'Inde, le Brésil, l'Indonésie et les Philippines en respectant des spécifications établies à cet effet.
- En Inde au cours de l'année 2020, la consommation annuelle de PG est de 5.13 Mt, soit une augmentation d'environ 90% par rapport à la période 2017-2018. Au Brésil, durant la période 2017 - 2019, un taux d'accroissement de la consommation de PG de 8.6% est également observé. En Belgique et aux Philippines (pays importateurs de minerai de phosphate), la consommation de PG pour la fabrication du ciment est assez conséquente et reste moins importante qu'en Inde et au Brésil
- En Tunisie, vu le cadre réglementaire actuel relatif à la classification du PG, son utilisation à grande échelle dans différents domaines notamment, le ciment, les matériaux de construction et les routes n'est pas développée. Toutefois, les différents aspects de l'utilisation du PG dans ces domaines sont traités par quelques structures de recherche.
- L'utilisation du PG dans les domaines des matériaux de construction et des routes a été fortement boostée par l'évolution du cadre réglementaire international sur la gestion du phosphogypse notamment en Belgique, en Chine, en Russie, au Brésil et en Inde. Par ailleurs des expériences pilotes sont réalisées et suscitent encore l'intérêt de certains pays tels que l'Afrique du sud, la Finlande et le Maroc pour la construction des routes.
- En Chine le « Groupe Wengfu » construit des bâtiments résidentiels à base de PG. Le Brésil a réalisé des expériences pilotes pour la construction de logements.
- Pour certains matériaux produits par des procédés de compactage statique, l'utilisation du PG non purifié est possible dans la fabrication des briques et des panneaux.
- En Tunisie les expériences réalisées et en cours sont au stade pilote. Elles sont présentées ci-après par domaine d'application : ciment, matériaux de construction et logement.

### Ciment

- En 1995, la Société les « Ciments Artificiels Tunisiens (CAT) » en collaboration avec la société « Ultimax » a produit 1000 tonnes du ciment spécial avec le PG pour l'exportation. Cette expérience ne s'est pas poursuivie essentiellement pour des raisons de compétitivité économique.  
Par ailleurs des travaux de recherche ont été menés par des structures de recherche en collaboration avec la Société des Ciments de Gabès et le Groupe Chimique Tunisien sur des sujets tels que : utilisations du PG dans la matière crue du ciment, comme

substituant au gypse naturel dans la fabrication du ciment et dans la fabrication des pavés en béton.

### **Matériaux de construction**

- Pavés de chaussées : les pavés obtenus lors des essais industriels à base de phosphogypse avec un taux de substitution de 20% possèdent des résistances mécaniques acceptables vis-à-vis de la norme européenne « EN1338 (Pavés en béton – Prescriptions et méthodes d'essai)»
- Briques non cuites : les briques fabriquées à base de 100 % phosphogypse possèdent des propriétés mécaniques permettant leur utilisation comme matériaux de construction pour des structures non porteuses ou comme matériaux de décoration. Les propriétés thermiques correspondantes montrent qu'elles pourraient être adaptées à l'isolation dans la construction de bâtiments.

Il ressort d'autres études, comme celles menées en Chine et en Inde, des économies d'énergie significatives peuvent être réalisées grâce à certains mélanges utilisant des PG dans divers matériaux de construction, notamment les briques et les panneaux muraux.

### **Logement**

- En 2013, le Centre National des Sciences et des Technologies Nucléaires (CNSTN) en collaboration avec le Groupe Chimique Tunisien (GCT) a construit à Sidi Thabet deux chambres : une chambre témoin avec des briques cuites conventionnelles (70% argile et 30% sable) et une chambre de démonstration avec des briques cuites à base de PG.

Pour la chambre de démonstration de dimensions 4 m x 4 m, les briques utilisées contenaient 65% d'argile, 25% de PG et 10% de sable. Cette chambre a été équipée de capteurs pour un suivi spatiotemporel des niveaux du radon pour une période de six mois. Les principaux résultats enregistrés sont :

- Les concentrations du gaz radon dans la chambre de démonstration construite avec des briques à base de PG et la chambre témoin construite avec les matériaux conventionnels étaient comparables : entre  $24 \pm 8$  et  $48 \pm 11$  Bq/m<sup>3</sup> pour la chambre témoin et entre  $21 \pm 7$  et  $69 \pm 12$  Bq/m<sup>3</sup> pour la chambre de démonstration. Ces valeurs de concentration en radon enregistrées sont largement inférieures aux valeurs limites standards de 200 Bq/m<sup>3</sup>.
- L'utilisation du PG comme matériau alternatif pour la fabrication de briques présente des avantages tels que :
  - la conservation des ressources primaires : l'utilisation du PG a permis respectivement une réduction d'environ 66% pour le sable et 7% pour l'argile ;
  - une économie d'énergie et la réduction des coûts de fabrication : la substitution du sable par le PG entraîne d'importantes économies d'énergie et d'argent sans aucun risque pour la santé de l'utilisateur ;

- des gains environnementaux : l'utilisation accrue de PG dans la construction entraînera une réduction conséquente des quantités de PG stockées en terrils ou rejetées dans la mer avec un impact très appréciable sur la qualité de l'environnement ;
- une durabilité et un bénéfice social : le recours à l'utilisation du PG comme ressource anthropogénique permettra de bien gérer les ressources naturelles et de réduire le coût leur utilisation notamment dans le logement ce qui offre des avantages socio-économiques importants.

### Utilisation du PG dans l'agriculture

#### Dans le monde

- En **Espagne**, la réglementation autorise depuis les années 70, les agriculteurs à utiliser le PG comme source d'amendement minéral pour réhabiliter les sols à forte salinité.
- Au **Brésil**, outre sa réglementation favorable depuis 2007 à l'application du PG dans le secteur agricole, des « Règles de bonnes pratiques de gestion du PG dans l'agriculture 4B » (Bonne source, Bon dosage, Bon moment et Bon endroit), ont été instaurées en 2022. A titre d'indication, en 2016, environ 40% est du PG généré est utilisé en agriculture pour l'amendement des sols.
- En **Inde**, le « Central Pollution Control Board (CPCB) » et l'« Atomic Energy Regulatory Board (AERB) », ont autorisé depuis 2008 l'utilisation du PG dans le secteur agricole et veillent sur le respect des normes d'usage. Actuellement des industriels commercialisent le PG sous forme de produit granulé aussi bien pour le marché local que pour l'export (Bengladesh & Népal).
- En **Russie** et au **Maroc** l'utilisation du PG en agriculture est encore au stade expérimental.

#### En Tunisie

Bien que près de **71% des sols sont classés fortement sensibles à la salinité**, l'utilisation du PG en agriculture est encore au stade expérimental. La recherche sur la valorisation du PG en agriculture se limite à des essais de laboratoire.

- En 2019, l'Institut des Régions Arides (IRA) a présenté les résultats d'une étude expérimentale sur l'utilisation du PG pour la restauration d'un sol oasien dégradé dont les principaux objectifs étaient de déterminer le taux d'amendement des sols par le PG (t/ha/an) et d'évaluer l'impact de l'amendement des sols par le PG sur les propriétés physico-chimiques et radioactives des sols et la qualité des cultures. A cette fin, une parcelle expérimentale, répartie en 24 unités, de dimension 2m x 12m chacune, a été aménagée dans la station de l'IRA à Chott El Ferik-Gabès selon

un bloc aléatoire complet incluant 4 traitements : PG, sable de carrière, fumier et un témoin. Les doses de PG appliquées pour l'amendement du sol ont été de 12.5, 25 et 50 t/ha.

Ces unités expérimentales ont été exploitées durant deux saisons agricoles pour produire du navet, de l'avoine et de la corète potagère.

Les résultats enregistrés révèlent que l'amendement par le PG améliore d'une façon significative l'aération et la conductivité hydraulique du sol étudié. Sur le plan agronomique, les meilleurs rendements des cultures testées ont été enregistrés pour les unités traitées par le PG. La corète recevant 50 t/ha du PG a donné un rendement supplémentaire respectivement de 40 % et 62 % par rapport aux traitements par le sable de carrière et le témoin.

En ce qui concerne les caractéristiques chimiques du sol, le traitement par le PG a révélé une augmentation relative de la concentration des métaux lourds, en particulier le cadmium ( $Cd^{2+}$ ). Toutefois, les concentrations observées restent inférieures aux seuils de toxicité pour de la plupart des cultures (7 ppm). La radioactivité au niveau des parcelles recevant du PG exprimée en concentration de  $^{226}Ra$  montre un maximum de  $13.4 \pm 1.5$  Bq/kg dans les premiers 20 cm du sol contre  $10.5 \pm 1.4$  Bq/kg au niveau du témoin (valeur naturelle). Ces valeurs restent largement plus faibles que celle du PG.

Par ailleurs il est important de signaler que l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) dans son étude réalisée en 2019, estime que la valorisation du phosphogypse pourraient créer jusqu'à 400 000 emplois directs et indirects d'ici 2030 à l'échelle mondiale dans les secteurs suivants : ingénierie et techniciens, construction et exploitation, recherche et développement, sensibilisation et communication, etc.

## 5.2 Recommandations

À la lumière :

- des résultats des travaux présentés et discutés lors de la Rencontre Scientifique portant sur « La valorisation du phosphogypse : Opportunités pour le développement économique régional », tenue à Gafsa, les 13 et 14 décembre 2023,
- de l'ensemble des documents examinés et synthétisés dans ce rapport en relation avec les différents aspects du phosphogypse dans le monde et en Tunisie qui concernent sa caractérisation, la réglementation correspondante, sa gestion et sa valorisation,
- des caractéristiques physico-chimiques et radiologiques du phosphogypse tunisien,
- de l'absence des propriétés de danger écotoxicité « HP14 » et toxicité aiguë « HP6 » du phosphogypse tunisien tel qu'il se présente,

Et en se référant en particulier :

- à la stratégie nationale de transition écologique 2023/35-2050 notamment la mesure n°42 de l'axe 4 « Production et consommation durables et lutte contre la pollution »,
- et aux Objectifs de Développement Durable des Nations Unies à l'horizon 2030 notamment les ODD n°9 et n°12 consacrés respectivement à « Industrie, Innovation & Infrastructure » et à « Consommation & Production durables »,

qui visent la promotion de l'économie circulaire, la bonne gouvernance des ressources naturelles et la réduction de l'impact des rejets, autant que possible, sur l'environnement par le développement de leur valorisation dans différents secteurs,

le Comité Scientifique **note que le phosphogypse tunisien ne représente pas des caractéristiques de danger** et recommande ce qui suit :

1. L'urgence de **mettre en place une solution appropriée pour l'arrêt du déversement de PG dans le golfe de Gabès pour protéger l'environnement marin et préserver cette ressource** qui offre des **opportunités** diverses de **valorisation**.
2. La nécessité de considérer le phosphogypse comme un « **co-produit** » à part entière offrant des opportunités de valorisation dans divers secteurs économiques et non pas comme « **déchet** ». Un co-produit étant défini comme :

*« Un co-produit est une matière générée de manière inévitable lors d'un processus de fabrication, simultanément à la production du produit principal. Comme ce dernier, le co-produit doit présenter des spécifications particulières pour être valorisé, généralement au sein de filières spécifiques. Les co-produits ne doivent pas être considérés comme des déchets ou des sous-produits, car leur utilisation fait partie intégrante de la valorisation de la matière première. »*

Ceci à l'instar de la révision des réglementations effectuée par des instances internationales spécialisées (AIEA, IFA, etc.) et dans plusieurs pays tels que : les Etats Unis d'Amérique, l'Union Européenne, l'Inde, le Brésil, la Chine, l'Espagne, la Belgique, la France, les Philippines, etc.

3. L'urgence de **réviser le cadre juridique tunisien réglementant le phosphogypse** en le **retirant de la liste des déchets dangereux** (annexe 1 du décret 2000-2339 du 10 octobre 2000 fixant la liste des déchets dangereux).
4. L'élaboration d'un **nouveau cadre légal régissant le phosphogypse en tant que co-produit** pour son application dans divers domaines.
5. L'**incitation des acteurs socio-économiques pour l'utilisation du phosphogypse** dans leurs domaines d'activités : chimie, ciment, matériaux de construction, routes, logements, amendement et fertilisation des sols, etc.
6. La **création par l'Etat d'un fonds ou d'une ligne spécifique de financement « Recherche – Développement – Innovation (RDI) »** pour les projets de recherche portant sur la gestion et la valorisation du PG, notamment dans les nouvelles voies de valorisation.
7. La **création d'une structure indépendante**, à l'instar des structures publiques installées dans plusieurs pays tels que les Etats Unis d'Amérique, l'Inde et le Brésil. Elle aura pour **principales missions** :
  - d'établir la **stratégie nationale** pour la **gestion** et la **valorisation** du **phosphogypse** ;
  - d'assurer la **veille scientifique, technique et réglementaire** relative au **phosphogypse** ;
  - de **gérer le fonds/ligne spécifique de financement** alloué(e) aux travaux de (RDI) portant sur les aspects et les applications du PG en Tunisie et d'assurer le suivi de leur exécution ;
  - de **définir les spécifications et les conditions d'utilisation du phosphogypse pour chaque type de sa valorisation et de veiller à leur respect** par les opérateurs concernés.

## Bibliographie

## ***Bibliographie***

- [1] : « Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry - Safety Reports Series No. 78 », AIEA, (2013).
- [2] : IFA (2016), « PHOSPHOGYPSUM Sustainable Management and Use », International Fertilizer Association (IFA), (2016).
- [3] : Les éditions Techniques de l'Ingénieur,  
<https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/co-produit>, site web consulté le 01/12/2023.
- [4] : « PHOSPHOGYPSUM : Leadership, Innovation, Partnership », International Fertilizer Association (IFA), (2020).
- [5] : « Guide de bonnes pratiques pour la gestion et la valorisation durable du phosphogypse », édité par l'ANPE dans le cadre du projet du MedPartnership « Renforcement des Capacités des Pays pour la Bonne Gestion du PG Provenant de l'Industrie des Engrais Chimiques », (2015).
- [6] : « American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) », « Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes », (2004).
- [7] : « Rapport final sur l'arrêt du déversement du phosphogypse dans le Golfe de Gabès », « Commission Technique de l'Etude de la Situation Environnementale à Gabès : cas du phosphogypse », (2016).
- [8] : « Etude sur la gestion et la valorisation durable du phosphogypse-cas de la Tunisie », éditée par l'ANPE dans le cadre du projet du MedPartnership « Renforcement des Capacités des Pays pour la Bonne Gestion du PG Provenant de l'Industrie des Engrais Chimiques », (2016).
- [9] : Maria Pliaka & Georgios Gaidajis, « Potential uses of phosphogypsum: A review », Journal of Environmental Science and Health, Part A, (2022).
- [10] : Essaid Bilal et al., « Phosphogypsum circular economy considerations: A critical review from more than 65 storage sites worldwide », Journal of Cleaner Production, (2023).
- [11] : Lassâad AJAM, « Valorisation du phosphogypse dans la brique cuite Cas des terrils de Sfax (Tunisie) », Thèse de doctorat en Génie Civil, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Janvier 2010.
- [12] : Jennyvi D. Ramirez, Reymar R. Diwa, Botvinnik L. Palattao, Nils H. Haneklaus, Estrellita U. Tabora, Angel T. Bautista VII, Rolando Y. Reyes, « Rare earths in Philippine phosphogypsum: Use them or lose them », Journal of Environmental Science and Health, Part A, (2022).
- [13] : Reymar R. Diwa, Estrellita U. Tabora, Nils H. Haneklaus, Jennyvi D. Ramirez, « Rare earths leaching from Philippine phosphogypsum using Taguchi method, regression, and artificial neural network analysis », Journal of Material Cycles and Waste Management, (2023).
- [14] : Faouzia Charfi Fourati, Jamel Bouaziz, Habib Belayouni, « Valorisation du phosphogypse de Tunisie en vue de son utilisation comme substituant au gypse naturel dans la fabrication du ciment », Environnement, Ingénierie & Développement, 2000, N°20 - 4ème trimestre 2000, pp.24-32. « 10.4267/dechetsciences-techniques.1550 ». « Hal-03181449 », (2021).
- [15] : Houda TRIFI, « Diversité bactérienne du phosphogypse tunisien et valorisation des bactéries indigènes favorisant la croissance des plantes », Thèse de doctorat en microbiologie, Centre National des Sciences et Technologies Nucléaires (CNSTN) – Tunisie, (2018).
- [16] : SFAR FELFOUL H., BEN OUEZDOU M., CLASTRES P., CARLES GIBERGUES A., « Caractéristiques et propriétés du phosphogypse des terrils de Sfax (Tunisie): influence de la durée de stockage », Annales du Bâtiment et des Travaux Publics n°6, ISSN : 1270-9840, (2004).
- [17] : BEN. ABDALLAH H. « Témoignage du GCT : Expérience du GCT dans la valorisation du phosphogypse » Conférence dans le cadre du Colloque : « Le phosphogypse facteur de développement durable », 24-25 Mai 2017 – Gabès – Tunisie.
- [18] : HAMMAS I., « Valorisation et étude des terres rares dans le phosphogypse tunisien », Thèse de doctorat en chimie appliquée, Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT) de Tunis - Tunisie, Juin 2014.

- [19] : MASMOUDI-SOUSSI A., « Etude et valorisation du phosphogypse tunisien : procédés d'extraction des éléments de terres rares », Thèse de doctorat en chimie, Faculté des Sciences de Bizerte (FSB) - Tunisie, Juillet 2021.
- [20] : REGUIGUI N, BEN KRAIEM H., « Monitoring and measurements of radioactivity in Sidi Thabet: Future site of the National Center for Nuclear Science and Technology of Tunisia. In: Proceeding of the Arab Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy », Tunis, Tunisia (November 1998).
- [21] : Julian Hilton, « Phosphogypsum Net Zero – The practice, Time for a Consistent Industry- wide response to the Management and Uses of Phosphogypsum ? », 26<sup>th</sup> AFA International Fertilize Technology Conference & Exhibition best Practices in Fertilizer Industry/Tunis-Tunisia, June 2013.
- [22] Convention de Bâle : <https://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-f.pdf>
- [23] : Convention de Bamako : [https://au.int/sites/default/files/treaties/7774-treaty-0015 -  
bamako\\_convention\\_on\\_hazardous\\_wastes\\_f.pdf](https://au.int/sites/default/files/treaties/7774-treaty-0015_-_bamako_convention_on_hazardous_wastes_f.pdf)
- [24] Convention de Barcelone : [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/31970/bcp2019\\_web\\_fre.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/31970/bcp2019_web_fre.pdf)
- [25] NEPA Act : <https://faolex.fao.org/docs/pdf/vic45854.pdf>
- [26] RCRA Act : <https://www.govinfo.gov/content/pkg/STATUTE-90/pdf/STATUTE-90-Pg2795.pdf>
- [27] Directive de la Commission Européenne n°2000/532/CE du 30 Mai 2000 : [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000D0532-  
20150601&qid=1443770560597&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000D0532-20150601&qid=1443770560597&from=EN)
- [28] : Site web de l'Organisation des Nations Unies relatif à la Collection des Traités : [https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg\\_no=XXVII-3&chapter=27&clang=fr](https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-3&chapter=27&clang=fr)
- [29] : Yelizaveta Chernysh & al., « Phosphogypsum Recycling: A Review of Environmental Issues, Current Trends, and Prospects », Applied Sciences (2021).
- [30] : Recueil des communications à la Rencontre Scientifique « La valorisation du phosphogypse : opportunités pour le développement économique régional », Gafsa (Tunisie) – 13 & 14 décembre 2023 / ISBN : 487-01-20-12-2023.
- [31] : BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, Cement Raw Materials, Mineral Profile, (2005).
- [32] : DIOP, M.B., *et al.*, « Phosphogypsum based cement formulation in agreement with standard Portland cement in the framework of a concrete code policy for thermal and energetic efficiency of the building », African Concrete Code (Proc. Symp. place, 2005) publisher (2005) 306-322.
- [33] : Garbaya, H.; Jraba, A.; Khadimallah, M.A.; Elaloui, E., « The Development of a New Phosphogypsum-Based Construction Material: A Study of the Physicochemical, Mechanical and Thermal Characteristics », Materials 2021, 14, 7369.
- [34] : Abdessattar Hamdi, Néjib Ben Jamaa, Imen Kallel Kammoun, « Potential use of phosphogypsum in paving blocks », Green Materials, Institute of civil Engineering ICE publishing, (2020).
- [35] : M. Krichen, abderraouf Jarba, Hatem Ksibi, Elimame Elaloui, « Effects of inorganic constituents on thermal and mechanical properties in several types of phosphogypsum : a case study of Gafsa-site », Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, december 2022.
- [36] : Reguigui, N., « Valorisation du phosphogypse pour la fabrication des briques et évaluation de la radioactivités. Journée d'étude sur la valorisation du phosphogypse et les rejets thermiques », organisée par APEG, UGTT, UTAP et UTICA. Gabes, le 31 Mai 2014.
- [37] : Ajam, L., N. Reguigui, M. Ben Ali, Z. Chekir and M. Ben Ouezdoua (2013): « Phosphogypsum utilization in fired bricks and Radioactivity Assessment », 26<sup>th</sup> International Fertilizer and technology Conference & Exhibition/ Tunis-Tunisia, June 24-26, 2013.
- [38] : Abril, J., R G Tenoriob, S M. Enamorado, M. D Hurtado, L Andreu et A Delgado. « The cumulative effect of three decades of phosphogypsum amendments in reclaimed marsh soils from SW Spain: <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U and Cd contents in soils and tomato fruit », SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 403 (2008) 80 – 88.

- [39] : OutbakatM. Barka, RedouaneChoukr-Allah, MoussaBouray, Mohamed EL Gharous et Khalil EL Mejahed. « Phosphogypsum: Properties and Potential Use in Agriculture », Biosaline Agriculture as a Climate Change Adaptation for Food Security, (2023) pp 229–255.
- [40] : SAUEIA, C.H.R., BOURLEGAT, F.M., MAZZILLI, B.P., FAVARO, D.I.T., « Availability of metals and radionuclides present in phosphogypsum and phosphate fertilizers used in Brazil », J Radioanal Nucl Chem, v.297, 189-195, (2013).
- [41] : SAUEIA, C.H.R., MAZZILLI, B.P., BOURLEGAT, F.M., COSTA, G.J.L., « Distribution of potentially toxic elements in the Brazilian phosphogypsum and phosphate fertilizers », E3S Web Conferences 1, 04005, 2013.
- [42] : Caires E F & al., « Crop nutrition and grain yield as affected by phosphorus fertilization and continued use of phosphogypsum in an Oxisol under no-till management », Archives of Agronomy and Soil Science Volume 69, 2023 - Issue 12, Pages 2370-2385.
- [43] : <https://legalitysimplified.com/2023/07/26/specifications-for-phospho-gypsum-granular-manufactured-in-india/>, site consulté le 15 janvier 2024.
- [44] : Gabsi H., « Application of Phosphogypsum and Organic Amendment for Bioremediation of Degraded Soil in Tunisia Oasis: Targeting Circular Economy », Journal « Sustainability », (2023)/15/4769.
- [45] : ODCE, « Perspectives économiques de l'environnement », (2019) : <https://oecd.org>.

# Annexes

### Annexe 1 : Comparaison de la radioactivité de différents PG.

Extrait du « Rapport final sur l'arrêt du déversement du phosphogypse dans le Golfe de Gabès », « Commission Technique de l'Etude de la Situation Environnementale à Gabès : cas du phosphogypse », (2016) page 7 [7].

**Tableau 6** : Comparaison de la teneur en éléments radioactifs de différents PG.

Origine du PG	Origine du phosphate	<sup>238</sup> U	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	Référence
Sfax	Tunisie	47.3 (35 ± 1.9 - 66 ± 3.6)	215 (209 - 223)	14.7 (8-20)	Reguigui & Sfar (2005)
Sfax	Tunisie		200		Reguigui & Ajam (2009)
Sfax	Tunisie		200		Porcher et al (1996)
Sfax	Tunisie	*	350 ± 70	*	Mahjoubi et al 2000
Grèce	Taiba	-	429 ± 21	-	Papastefanou 2001
Grèce	Togo	*	261 ± 13	*	Papastefanou 2001
Grèce		181 (150 ± 68 - 211 ± 77)	380 (261 ± 13 - 473 ± 46)	-	Papastefanou 2001
Alberta	Idaho	-	890	-	Rutherford 1994
Australie		510	451 - 500	10	Rutherford 1994
Floride*	Floride Centrale	130 (93 - 190)	1120 (836-1670)	3,7	Rutherford 1994
Hongrie	Syrie	-	1093	-	Rutherford 1994
Louisiane	*	-	1100 (700-1700)	-	Rutherford 1994
Mississippi	*	-	780	-	Rutherford 1994
Yougoslavie	*	-	390	-	Rutherford 1994
Maroc	Maroc		1420 ± 330		Azouazi et al 2001
Espagne	*		727 (470 ± 40 - 1536 ± 80)		Aguado et al 1999
Boucrâa	*		1280 ± 130		Alami et al. 1997
Bangladesh	-		234.0 ± 12.8		Alami et al. 1997
Egypte	Egypte	134	411	19	Bigu et al 2000
Bresil	A	42 ± 6	695 ± 47	175 ± 23	Mazzilli et al 2000
	B	17 ± 5	100 ± 7	156 ± 38	
	C	41 ± 24	266 ± 21	174 ± 17	

**Annexe 1 : Comparaison de la radioactivité de différents PG.**

Extrait du rapport « Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry - Safety Reports Series No. 78 », AIEA, (2013) page 238 [1].

**TABLE 56. RADIOACTIVITY IN PHOSPHOGYPSUM (BY COUNTRY)**

Location of phosphogypsum	Phosphate rock source		Activity concentration (Bq/g)								Reference	
	Origin	Type	<sup>238</sup> U	<sup>230</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Pb	<sup>210</sup> Po	<sup>232</sup> Th	<sup>228</sup> Ra	<sup>228</sup> Th		
Australia		Sedimentary	0.5		0.5			0.01				[333]
Belgium					0.44			<0.01				
Brazil	Brazil	Igneous			<0.004-0.67	0.05-0.89	0.05-0.68	0.01-0.18				[75]
Canada (Alberta)	Idaho	Sedimentary			0.9					0.01		[334]
Egypt	Egypt	Sedimentary	0.13		0.41			0.019				[50]
Finland					0.18			0.012				[50]
France			0.015		0.44			0.003				[50]
Germany		Sedimentary	—		0.60			<0.005				[50]
Hungary	Syrian Arab Republic	Sedimentary	—		1.1				0.07			[335]
India	Morocco	Sedimentary	0.17 (0.14-0.21)		0.82 (0.45-0.94)							[74]
Italy (Geba) <sup>a</sup>		Sedimentary			0.41-0.42							[323]
Netherlands		Sedimentary	0.05		0.9-1.25							[48, 87]
Nordic countries		Sedimentary			0.15-0.6	≤0.2	≤0.2	0.06				[48]
South Africa	South Africa	Igneous	0.07 (0.05-0.07)		0.11 (0.09-0.12)	<LLD <sup>b</sup>	<LLD	0.33 (0.13-0.59)	0.41 (0.35-0.5)	0.50 (0.24-0.63)		[48]
South Africa	Togo and South Africa	25% sedimentary 75% igneous	0.01-0.08		0.08-0.33	0.08-0.33	0.01-0.17	0.01-0.21	0.01-0.21	0.01-0.21		[48]

**Annexe 1 : Comparaison de la radioactivité de différents PG.**

Extrait du rapport « Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry - Safety Reports Series No. 78 », AIEA, (2013) page 239 [1].

**TABLE 56. RADIOACTIVITY IN PHOSPHOGYPSUM (BY COUNTRY) (cont.)**

Location of phosphate-gypsum	Phosphate rock source		Activity concentration (Bq/g)										Reference
	Origin	Type	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> Th	<sup>232</sup> Ra	<sup>210</sup> Pb	<sup>210</sup> Bi	<sup>210</sup> Po	<sup>214</sup> Pb	<sup>214</sup> Bi	<sup>214</sup> Th	<sup>214</sup> Pa	
Spain		Sedimentary	0.02-0.2		0.17-0.6	0.86-0.8	0.17-0.8	0.00-0.02					[48, 165]
Sweden	Russian Federation (Kola)	Igneous			0.02			0.06					[3-36]
United Republic of Tanzania	United Republic of Tanzania	Sedimentary	0.09	1.05	3.2					0.1			[49]
Tunisia (Sfax)	Tunisia (Sfax)		0.04-0.07		0.20-0.22					0.00-0.02			[219]
UK			0.17		0.63-0.78					0.01-0.02			[50]
USA (Florida)	Central Florida	Sedimentary	0.08-0.2	0.1-2.9	0.3-2.1	1.3-1.4	1-1.5			0.004-0.05			[16, 317-340]
USA (Florida)	Northern Florida	Sedimentary	0.005		0.50-0.55								[47]
USA			0.20		1.23-1.48					0.01			[50]
Former Yugoslavia		Sedimentary			0.4								[12]

\* <sup>214</sup>Pb-234m: <0.01-0.025; <sup>214</sup>Pb-214: 0.29-0.31; <sup>214</sup>Bi-214: 0.25-0.27; <sup>214</sup>Pb-212, <sup>214</sup>Bi-212: 0.02.

† L.L.D.: lower limit of detection.

## Annexe 2 : Liste des substances dangereuses éventuelles

*Liste établie en se basant sur les données fournies par l'annexe 4 « Spéciation des substances minérales dans les déchets : Proposition de substances « pire cas avec information » » du rapport publié par l'INERIS « RAPPORT INERIS-DRC-15-149793-06416A du 04/02/2016 intitulé « Classification réglementaire des déchets - Guide d'application pour la caractérisation en dangerosité » pour les éléments du « tableau 26 : Entrées génériques d'éléments (11) dans le règlement CLP » du document européen 2018/C 124/01 : « Recommandations techniques concernant la classification des déchets »*

Elément considéré	Substances dangereuses éventuelles
arsenic (As)	arsenic compounds, with the exception of those specified elsewhere in this Annex trinickel bis(arsenate); nickel(II) arsenate trinickel bis(arsenite) triethyl arsenate lead hydrogen arsenate gallium arsenide arsenic acid and its salts with the exception of those specified elsewhere in this Annex tert-butylarsine nickel diarsenide diarsenic pentaoxide; arsenic pentoxide; arsenic oxide nickel arsenide diarsenic trioxide; arsenic trioxide arsine
baryum (Ba)	barium polysulphides barium sulphide barium chlorate
béryllium (Be)	beryllium oxide beryllium compounds with the exception of aluminium beryllium silicates, and with those specified elsewhere in this Annex
cadmium (Cd)	cadmium chloride cadmium compounds, with the exception of cadmium sulphoselenide (xCdS.yCdSe), reaction mass of cadmium sulphide with zinc sulphide (xCdS.yZnS), reaction mass of cadmium sulphide with mercury sulphide (xCdS.yHgS), and those specified elsewhere in this Annex cadmium iodide cadmiumhexafluorosilicate(2-); cadmium fluorosilica cadmium sulphate cadmium diformate; cadmiumformate cadmium cyanide cadmium fluoride cadmium oxide (non-pyrophoric)
chrome VI (Cr (VI))	potassium dichromate ammonium bis(1-(3,5-dinitro-2-oxidophenylazo)-3-(N-phenylcarbamoyl)-2-naphtholato)chromate(1-) Chromium (VI) compounds, with the exception of barium chromate and of compounds specified elsewhere in this Annex lead chromate lead sulfochromate yellow; C.I. Pigment Yellow 34; [This substance is identified in the Colour Index by Colour Index Constitution Number, C.I. 77603.] lead chromate molybdate sulfate red; C.I. Pigment Red 104; [This substance is identified in the Colour Index by Colour Index Constitution Number, C.I. 77605.] strontium chromate potassium chromate zinc chromates including zinc potassium chromate nickel chromate sodium chromate calcium chromate chromyl dichloride; chromic oxychloride

	<p>nickel dichromate sodium dichromate ammonium dichromate dichromium tris(chromate); chromium III chromate; chromic chromate</p>
mercure (Hg)	<p>inorganic compounds of mercury with the exception of mercuric sulphide and those specified elsewhere in this Annex organic compounds of mercury with the exception of those specified elsewhere in this Annex phenylmercury nitrate phenylmercury acetate basic phenylmercury nitrate 2-methoxyethylmercury chloride phenylmercury hydroxide mercury difulminate; mercuric fulminate; fulminate of mercury mercury difulminate; mercuric fulminate; fulminate of mercury [<math>&gt; 20\%</math> phlegmatiser] mercury dichloride; mercuric chloride dimercury dichloride; mercurous chloride; calomel dimercury dicyanide oxide; mercuric oxycyanide mercury dimethylmercury</p>
plomb (Pb)	<p>lead compounds with the exception of those specified elsewhere in this Annex silicic acid, lead nickel salt lead hexafluorosilicate lead alkyls lead diazide; lead azide lead diazide; lead azide [<math>&gt; 20\%</math> phlegmatiser] lead chromate lead di(acetate) trilead bis(orthophosphate) lead acetate, basic lead sulfochromate yellow; C.I. Pigment Yellow 34; [This substance is identified in the Colour Index by Colour Index Constitution Number, C.I. 77603.] lead chromate molybdate sulfate red; C.I. Pigment Red 104; [This substance is identified in the Colour Index by Colour Index Constitution Number, C.I. 77605.] lead hydrogen arsenate lead 2,4,6-trinitro-m-phenylene dioxide; lead 2,4,6-trinitroresorcinoxide; lead styphnate lead 2,4,6-trinitro-m-phenylene dioxide; lead 2,4,6-trinitroresorcinoxide; lead styphnate (<math>\geq 20\%</math> phlegmatiser)</p>
antimoine (Sb)	<p>bis(4-dodecylphenyl)iodonium hexafluoroantimonate dibenzylphenylsulfonium hexafluoroantimonate antimony pentachloride antimony trichloride antimony trifluoride antimony compounds, with the exception of the tetroxide (<math>Sb_2O_4</math>), pentoxide (<math>Sb_2O_5</math>), trisulphide (<math>Sb_2S_3</math>), pentasulphide (<math>Sb_2S_5</math>) and those specified elsewhere in this Annex</p>
sélénium (Se)	<p>nickel selenate nickel(II) selenite nickel selenide selenium compounds with the exception of cadmium sulphoselenide and those specified elsewhere in this Annex</p>
thallium (Tl)	<p>thallium thiocyanate dithallium sulphate; thallic sulphate thallium compounds, with the exception of those specified elsewhere in this Annex</p>
uranium (U)	<p>uranium compounds with the exception of those specified elsewhere in this Annex</p>

## مشروع الأمر المتعلق بضبط قائمة النفايات الخطرة

الأرشيف الوطني التونسي

### شرح الأسباب

يندرج إعداد هذا الأمر ضمن الإطار التشريعي الذي رسمه القانون عدد 41 لسنة 1996 المؤرخ في 10 جوان 1996 المتعلق بالنفايات و بمراقبة التصرف فيها وإزالتها و بالخصوص العنوان الخامس منه الذي وضع أحكاما خاصة بالنفايات الخطرة، و تعتبر قائمة النفايات الخطرة العمود الفقري الذي ستعتمده بلادنا في التعامل مع بعض أصناف النفايات الاصطناعية .

و لقد تم ضبط قائمة النفايات التي ستدرج ضمن هذا الصنف بالاعتماد على الفئات الواردة باتفاقية باماكو المتعلقة بحظر استيراد النفايات الخطرة بإفريقيا ومراقبة و إدارة تحركها عبر الحدود الإفريقية و اتفاقية بازل المتعلقة بالتحكم في نقل النفايات و التخلص منها عبر الحدود اللتين انضمت بلادنا إليهما مع إدراج بعض التعديلات استنادا بالقائمة الأوروبية و مع أخذ الواقع المعيش في بلادنا بعين الاعتبار.

و تضم القائمة كل أصناف النفايات الخطرة ذات المنشأ الصناعي التي تم تحديدها في بلادنا سواء عن طريق الدراسات التي أعدت إلى حد الآن أو عن طريق المعايير و عمليات المراقبة التي قامت بها مختلف مصالح المراقبة التابعة لوزارة البيئة و التهيئة الترابية أو هيكلها المختصة.

و تعد هذه القائمة القاعدة المرجعية لتنفيذ بقية محاور البرنامج الوطني للتصريف في الفضلات الصلبة المتعلقة بالنفايات الخطرة و من أوكدها :

### الأرشيف الوطني التونسي

\*إحداث مركز وطني لمعالجة بعض الأصناف الواردة بمشروع القائمة تمهيدا

لثمينها أو إزالتها أو حجزها سواء داخل البلاد أو خارجها .

\*إحداث مركز تخزين الفوسفوجيبيس بسخنة المالح من ولاية قابس لفائدة المجتمع

الكيميائي التونسي .

\*تجميع أكياس الفوسفوجيبيس الملقى على شواطئ مدينة صفاقس من طرف

شركة NPK التي تم غلقها في إطار البرنامج الوطني لمقاومة التلوث الصناعي

تمهيدا لانطلاق مشروع "تايرورة"

و لا يخفى أن صدور مشروع الأمر سوف يساهم في وقاية بلادنا من الآثار

السلبية المعالجة و الأجلة للتصرف العشوائي و اللامسئول في النفايات الخطرة

و سوف يدفع المعنيين مباشرة بهذه النفايات والرأي العام بصفة عامة إلى تغيير

سلوكهم عند التعامل معها و إبلاء مسألة خطورتها المكانة التي تستحق حفاظا

على سلامتهم و سلامة غيرهم من جهة أولى و حماية للبيئة التي يعيشون بها

و محافظة على مواردها الطبيعية من ناحية ثانية كضمان لاستدامة التنمية .

و في هذا الإطار ستقوم وزارة البيئة و النهضة الترابية تحت القطاع الخاص على

الاستثمار في مختلف الاختصاصات التي سيتيحها صدور هذا الأمر و المتعلقة

بنقل النفايات الخطرة و تكييفها و الحد من سميتها و رسكلتها أو إزالتها و خاصة

عبر التشاركة مع أهل الذكر في الدول المتقدمة.

هذه هي الأسباب التي دعت إلى إحداث هذا المشروع.

**Annexe 4 : Déclarations de conformité au règlement « REACH »**  
**des engrais TSP, SSP et DAP du GCT.**

**Engrais : TSP**



On the safe side.

26330,0469263,2762462,0287-190249703,11-12082,2148282

Aux Clients du  
Groupe Chimique Tunisien

DEKRA Assurance Services GmbH  
Händelsplatz 15  
D-70562 Stuttgart  
Tel. : +49 711 7861-3596  
Fax : +49 711 7861-2000

Contact:  
Jochen Deifke  
Tel. INT : +49 711 7861-2700  
Tel. EXT : +49 35112 02497  
E-Mail : jochen.deifke@dekra.com  
Date : 26.01.2024

Règlement REACH EC 1907/2006 – Déclaration sur la Conformité  
Règlement CLP EC 1272/2008 – Notification de Classification

DEKRA Assurance Services est le représentant exclusif du Groupe Chimique Tunisien (GCT), conformément à l'article 8 du règlement REACH. Ainsi, DEKRA a effectué les actions nécessaires pour assurer la conformité au REACH pour le produit suivant comme mis sur le marché (y compris additifs, le cas échéant) :

**TSP – Superphosphate, concé.**  
CAS N° : 65996-95-4  
EINECS N° : 200-038-3  
N° d'enregistrement REACH : 01-2119483167-33-0008  
Bande de tonnage enregistré : >1000 t/a

DEKRA a enregistré les substances concernées par REACH en se basant sur les informations sur les constituants et les volumes mises à disposition par le GCT.

Dans le cadre du processus d'enregistrement, la classification de la substance a été notifiée à l'inventaire des classifications et des étiquetages selon l'article 40 du règlement CE 1272/2008.

Les importateurs européens sont par conséquent considérés comme des utilisateurs en final aux fins des règlements REACH et CLP.

Si vous avez des questions ou si vous souhaitez d'autres informations sur la REACH-conformité du produit du GCT mentionné ci-dessus, n'hésitez pas à nous contacter, le représentant exclusif du Groupe Chimique Tunisien (E-mail : REACH@dekra.com, Tel. : +49 711 7861-3596).

Nous vous remercions de votre coopération.  
Meilleures Salutations,

  
Jochen Deifke  
Product Manager

DEKRA Assurance Services GmbH  
Händelsplatz 15  
D-70562 Stuttgart  
www.dekra.com/dekra/0287190249703

DEKRA Assurance Services GmbH  
Händelsplatz 15  
D-70562 Stuttgart  
www.dekra.com/dekra/0287190249703

DEKRA Assurance Services GmbH  
Händelsplatz 15  
D-70562 Stuttgart  
www.dekra.com/dekra/0287190249703

## Engrais : SSP



DEKRA Assurance Services GmbH - Handelsregister-Nr. 15090 Stuttgart

Aux Clients du  
Groupe Chimique Tunisien

DEKRA Assurance Services GmbH  
Hördenberg 13  
D-70569 Stuttgart  
Tel. : +49 711 7061-3556  
Fax : +49 711 7061-3222

Contact:  
Jochem Deike  
Tel direct +49 711 7061-3753  
Tel port +49 151 13192687  
E-Mail : jochem.deike@dekra.com  
Date : 26.01.2024

### Règlement REACH EC 1907/2006 – Déclaration sur la Conformité Règlement CLP EC 1272/2008 – Notification de Classification

DEKRA Assurance Services est le représentant exclusif du Groupe Chimique Tunisien (GCT) conformément à l'article 6 du règlement REACH. Ainsi, DEKRA a effectué les actions nécessaires pour assurer la conformité au REACH pour le produit suivant comme mis sur le marché (y compris édifié, le cas échéant) :

**SSP – Superphosphates**  
CAS N° : 8041-76-5  
EINECS N° : 232-379-5  
N° d'enregistrement REACH : 01-2119488967-11-0032  
Bande de tonnage enregistré : >1000 t/a

DEKRA a enregistré les substances concernées par REACH en se basant sur les informations sur les constituants et les volumes mis à disposition par le GCT.

Dans le cadre du processus d'enregistrement, la classification de la substance a été notifiée à l'inventaire des classifications et des étiquetages selon l'article 40 du règlement CE 1272/2008.

Les importateurs européens sont par conséquent considérés comme des utilisateurs en aval aux fins des règlements REACH et CLP.

Si vous avez des questions ou si vous souhaitez d'autres informations sur la REACH-conformité du produit du GCT mentionnée ci-dessus, n'hésitez pas à nous contacter, le représentant exclusif du Groupe Chimique Tunisien (E-mail : REACH@dekra.com, Tel. : +49 711 7061-3556).

Nous vous remercions de votre coopération.  
Meilleures Salutations,

  
Jochem Deike  
Product Manager

100 301030 20013

DEKRA Assurance Services GmbH  
Hördenberg 13  
D-70569 Stuttgart  
www.dekra-assurance-services.com

DEKRA AG  
Hördenberg 13  
D-70569 Stuttgart  
www.dekra.com  
REG-REG-00001-196-A1-01184128

Qualifikation  
Prüfung Office

## Engrais : DAP



DEKRA Assurance Services GmbH - Rindfleisch-Str. 10 - 70569 Stuttgart

DEKRA Assurance Services GmbH  
Hohenstraße 10  
D-70569 Stuttgart  
Tel. : +49 711 7661-3586  
Fax : +49 711 7661-3222

Aux Clients du  
Groupe Chimique Tunisien

CONTACT  
Jochem Deike  
Tel direct +49 711 7661-2723  
Tel ext : +49 151 1210297  
E-mail : jochem.deike@dekra.com  
Cofin : 25 01 3224

### Règlement REACH EC 1907/2006 – Déclaration sur la Conformité Règlement CLP EC 1272/2008 – Notification de Classification

DEKRA Assurance Services est le représentant exclusif du Groupe Chimique Tunisien (GCT), conformément à l'article 8 du règlement REACH. Ainsi, DEKRA a effectué les actions nécessaires pour assurer la conformité au REACH pour le produit suivant comme mis sur le marché (y compris additifs, le cas échéant) :

DAP – Diammonium hydrogenorthophosphate  
CAS N° : 7783-28-0  
EINECS N° : 231-987-8  
N° d'enregistrement REACH : 01-2119498974-22-0035  
Bande de tonnage enregistré : >1000 t/a

DEKRA a enregistré les substances concernées par REACH en se basant sur les informations sur les constituants et les volumes mises à disposition par le GCT.

Dans le cadre du processus d'enregistrement, la classification de la substance a été notifiée à l'inventaire des classifications et des étiquetages selon l'article 40 du règlement CE 1272/2008.

Les importateurs européens sont par conséquent considérés comme des utilisateurs en aval aux fins des règlements REACH et CLP.

Si vous avez des questions ou si vous souhaitez d'autres informations sur la REACH-conformité du produit du GCT mentionnée ci-dessus, n'hésitez pas à nous contacter, le représentant exclusif du Groupe Chimique Tunisien (E-mail : REACH@dekra.com, Tel. : +49 711 7661-3586).

Nous vous remercions de votre coopération.

Meilleures Salutations,

  
Jochem Deike  
Product Manager

DEKRA Assurance Services GmbH

Hohenstraße 10  
D-70569 Stuttgart  
www.dekra.com/dekraassuranceservices

DEKRA Assurance Services GmbH  
Rindfleisch-Str. 10 - 70569 Stuttgart  
Tel. : +49 711 7661-3586  
Fax : +49 711 7661-3222

Jochem Deike  
Product Manager

**Annexe 5 : Exemple de Fiche de Données de Sécurité(FDS)**  
**du phosphogypse de l'Afrique du Sud.**



OMV (Pty) Ltd  
N12 Highway Stillfontein  
PO Box 823 Stillfontein, 2550  
t: +27 (0) 18 464 1312  
f: +27 (0) 18 464 5011  
[www.omv.co.za](http://www.omv.co.za)

SAFETY DATA SHEET: CEMENT GRADE GYPSUM

**1. IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE / COMPANY**

**1.1. Product identifier**

Product name: **PHOSPHOGYPSUM**- Calcium Sulphate Dihydrate

Synonyms: Brown gypsum, air dried gypsum

**1.2. Details of the supplier**

Company: OMV Gypsum Potchefstroom

P.O. Box 823

Stillfontein, South Africa

Telephone: +27 18 296 0380

Website: [www.omv.co.za](http://www.omv.co.za)

**2. HAZARDS IDENTIFICATION**

**2.1. Classification of the substance or mixture**

Product is not classified as hazardous substances under GHS EC regulation 1272, SANS 10228, SANS 10234

**2.2. Other Hazards**

H335: Dust from the product may cause irritation of the respiratory system, eyes and skin

**3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS**

Chemical Formula:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

C.A.S No 10101-41-1

**4. FIRST AID MEASURES**

**4.1. Description of first aid measures**

INHALATION:	P264: P304 & P330:	Avoid breathing dust Move to fresh air and keep comfortable.
SKIN CONTACT:	P264:	Wash hands thoroughly after handling
EYE CONTACT:	P305 & P313: P337 & P351:	If in eyes, get medical advice If eye irritation persists, rinse cautiously with water
INGESTION:	P301 & P330:	If swallowed, rinse mouth with water
GENERAL:	P312:	Get medical attention if any symptoms persist

Revision: 3  
Revision Date: 24<sup>th</sup> October 2022



## 5. FIRE FIGHTING MEASURES

The products do not pose a fire hazard: In case of fire use suitable extinguishing media, water, CO<sub>2</sub>, foam or dry powder.

## 6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

### 6.1. Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

- P261: Avoid breathing dust
- P262: Do not get in eyes
- P270: Do not eat, drink or smoke when using products
- P280: Wear eye protection when using products
- P284: In case of inadequate ventilation wear respiratory protection

### 6.2. Environmental precautions

- P273: Avoid release to the environment  
Prevent product from entering drains.

### 6.3. Methods and material for containment and cleaning up

- P391: Collect spillage in suitable container for disposal.
- P501: Dispose of container according to local regulations

## 7. HANDLING AND STORAGE

### 7.1. Precautions for safe handling

- P264: Wash hands thoroughly after handling products
- P271: Use only outdoors or in a well ventilated area

### 7.2. Conditions for safe storage, including any incompatibilities

- P402: Store in a dry place

## 8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

### 8.1. Recommended Exposure Limits

- Total dust: ACGIH TLV 10 mg/m<sup>3</sup>
- Total air contaminants: OSHA TWA 15 mg/m<sup>3</sup>
- Respirable fraction: OSHA TWA 5 mg/m<sup>3</sup>

### 8.2. Exposure controls

- Ensure adequate ventilation, especially in confined areas.



## 9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

### 9.1. Information on basic physical and chemical properties

Physical state	Powder (Solid)
Appearance	White or off white
Odour	None
Vapour pressure, mmHg	N/A
Density	Approx. 74lbs/ft <sup>3</sup>
pH	>8.00
Free moisture	< 20%
Flashpoint	Non-flammable
Solubility in Water	Negligible
Evaporation	N/A
Purity	>90%

## 10. STABILITY AND REACTIVITY

**hazardous reactions:** None under normal conditions of use

**Stability:** Product stable under recommended handling and storage conditions

**Conditions to avoid:** Temperatures above 90°C

**Incompatible materials:** Gypsum is incompatible with acids. Gypsum contains silicates which may react with powerful oxidizers such as fluorine, boron trifluoride, chlorine.

**Hazardous decomposition products:** Sulphur oxides, Calcium oxides

## 11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

Product is Non Toxic

Product is not Mutagenic or Carcinogenic

Product is not toxic to the Reproductive cycle

May cause irritation to eyes and respiratory system, with no known long term effect

## 12. ECOLOGICAL INFORMATION

Not Listed

## 13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

Do not dispose of in drains or waterways

Do not dispose of together with municipal waste

P501: Dispose at an authorised landfill site according to regulations

## 14. TRANSPORT INFORMATION

Revision: 3

Revision Date: 24<sup>th</sup> October 2022



**OMV (Pty) Ltd**  
N12 Highway Stoffberg  
PO Box 823 Stoffberg, 2560  
t: +27 (0) 18 484 5212  
f: +27 (0) 18 484 5011  
[www.omv.co.za](http://www.omv.co.za)

Not classified as hazardous for transport  
Spillage causes slippery conditions when wet

#### **15. REGULATORY INFORMATION**

Observe waste disposal and control of substances hazardous to health regulations

#### **16. OTHER INFORMATION**

Use and handle in accordance with supplier recommendations

Revision: 3  
Revision Date: 24<sup>th</sup> October 2022



Avec l'appui de :



British Embassy  
Tunis