

Sommaire

<u>Introduction générale</u>	1
Chapitre 1 : Présentation des ICS et du site minier de Taïba : cadres géographique et géologique et méthodologie d'étude	3
I Présentation et structuration des ICS	3
II Le gisement de Taïba.....	5
<u>Chapitre 2 : Caractérisation litho-géochimique de quelques sondages des panneaux d'exploitation 2020 et 2021</u>	14
I Problématique et objectifs	14
II Répartition verticale des éléments chimiques dans quelques sondages	14
III Cartographie comparée de la couche phosphatée exploitable et des anomalies de couche.....	34
IV Synthèse litho-géochimique.....	40
<u>Conclusion partielle</u>	45
<u>Chapitre 3 : Etude géochimique comparative des oxydes majeurs de la couche phosphatée au niveau des panneaux d'exploitation 2020 et 2021 : cartographie géochimique comparée, corrélations des éléments chimiques et synthèse des résultats des analyses chimiques.</u>	
I Cartographie géochimique comparée.....	46
II Corrélations des oxydes majeurs.....	52
III Synthèse sur les teneurs moyennes en oxydes des anomalies de couche.....	54
<u>Conclusion partielle</u>	57
<u>Conclusion générale</u>	58
<u>Références bibliographiques</u>	60
<u>Annexes</u>	A

Introduction générale

La géologie du gisement de phosphate de Taïba datant de l'Eocene moyen se rattache à celle du bassin sédimentaire sénégalais auquel il appartient. Ce Bassin sédimentaire constitue un segment du bassin sénégal-mauritanien, vaste bassin côtier ouest-africain, de marge continentale passive. Les dépôts de ce bassin sont d'âge Meso-Cénozoïque.

L'exploitation des phosphates de Taïba a débuté en 1960 par les réserves des secteurs Ouest (Ndomor Diop), puis celles au Nord (Keur Mor Fall), actuellement épuisées. Le gisement phosphaté de Taïba est localisé sous une trentaine de mètres de recouvrement sableux (Sylla, 1986) et montre un troisième gisement localisé au Sud-Est, celui de Tobène dont l'exploitation a débuté en 2004 et se poursuit jusqu'à nos jours. Des études géologiques réalisées montrent que le minerai est principalement constitué de faciès argilo-phosphatés d'âge Yprésien à Éocène moyen (Diop, 2002 ; Ly *et al.*, 2003). Ce minerai de phosphate est situé entre des argiles bariolées phosphatées qui lui servent de toit et aussi de repère aux mineurs lors de l'extraction, et des attapulgitites à son mur correspondant aux argiles feuilletées de Lam-Lam.

Le gisement de phosphate est défini par la quantité et la qualité du minerai. La quantité désigne les estimations des réserves en phosphate marchand, tandis que la qualité désigne les taux d'enrichissement en P_2O_5 qui est l'élément chimique principal. La qualité du minerai phosphaté dépend donc des teneurs moyennes en P_2O_5 . Cependant, du point de vue lithologique, la couche phosphatée n'est pas homogène. En effet, on note la présence au sein du gisement d'anomalies de couche représentées par du sable, l'oxyde de fer et d'aluminium ou le « feral » et la calcite qui influent négativement sur la qualité du minerai. En effet, ces anomalies sus nommées constituent un réel problème pour la valorisation du minerai. Dès lors il devient nécessaire de les caractériser.

Ce présent mémoire consiste à étudier et comparer d'un point de vue géochimique les panneaux d'exploitation des années 2020 et 2021 de Tobène. De façon spécifique, il s'agira d'une caractérisation comparative des concentrations en éléments chimiques des faciès phosphatés en oxydes majeurs tels que le phosphore (P_2O_5), la silice (SiO_2), le feral ($Fe_2O_3+Al_2O_3$) et la calcite (CaO), ainsi que leur répartition spatiale et verticale dans la couche phosphatée des deux panneaux.

Ce document est subdivisé en 3 chapitres :

- D'abord, le chapitre 1 concerne la présentation des ICS et du site minier de Taïba ;

- Ensuite, le deuxième chapitre porte sur la caractérisation litho géochimique de quelques sondages des panneaux d'exploitation ;
- Puis le chapitre 3 qui traite sur l'étude géochimique comparative des oxydes majeurs

Et enfin terminer par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Présentation des ICS et du site minier de Taïba : cadres géographique et géologique, et méthodologie d'étude

I Présentation et structuration des ICS

Le gisement de phosphate de Taïba a fait l'objet de plusieurs études géologiques. La découverte du gisement de phosphate de chaux actuel remonte à 1948, avec les travaux du Bureau Minier de la France d'Outre-Mer. La Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba (CSPT) créée en 1957, ne débutera l'exploitation du phosphate qu'en 1960, avec le gisement de Ndomor Diop, suivi de celui de Keur Mor Fall. Quant au panneau de Tobène, son exploitation n'a démarré qu'en 2004 et se poursuit à nos jours. Les activités des Industries Chimiques du Sénégal sont orientées vers l'extraction du phosphate, depuis 1984 elles transforment le phosphate en acide phosphorique. La fusion des ICS avec la Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba en 1996 a consacré la redynamisation de la filière phosphate par l'exploitation du gisement de Tobène et le doublement de la production d'acide phosphorique essentiellement exporté vers l'Inde. Les opérations industrielles sont réalisées au niveau de trois sites :

- Le site minier de Taïba : qui comprend la mine de phosphate qui s'étend sur une quarantaine de kilomètres et se situe à 90km au NE de Dakar. Son activité principale consiste à extraire le minerai et à procéder ensuite à son traitement marchand destiné à l'exportation ;
- Le site usine de Darou Khoudoss : contigu aux installations de l'usine de traitement du minerai de phosphate, il a pour rôle la production d'acide phosphorique, par l'attaque du phosphate par de l'acide sulfurique ;
- Le site de Mbao : abrite le siège de la direction générale, il est situé à 18km de Dakar, dans la zone franche industrielle en bordure de la mer, sur une surface de 2,7 ha ; il est aussi destiné à la production d'engrais chimique en granulés.

Les Industries Chimiques du Sénégal comptent également des filiales :

- La Société d'exploitation ferroviaire des ICS (SEFICS), chargée du transport du soufre, de l'acide phosphorique et de l'engrais ;
- La Société des engrais chimiques (SENCHEM) chargée de la commercialisation des produits.

Le site mine de Taïba occupe une vaste zone rectangulaire de 25km de long sur 10km de large. Il est subdivisé en trois secteurs (figure 1) :

- Le panneau de Ndomor Diop : déjà exploité, avec une superficie de 6,3 km², subdivisée en Ndomor Diop (1960-1974) et Ndomor Diop (1974-1980) ;
- Le panneau de Keur Mor Fall : au Nord du panneau de Ndomor Diop, subdivisé en panneau I-III (1980-1991) et le panneau II-IV (1991-2003) ;
- Le panneau de Tobène : en exploitation depuis 2004

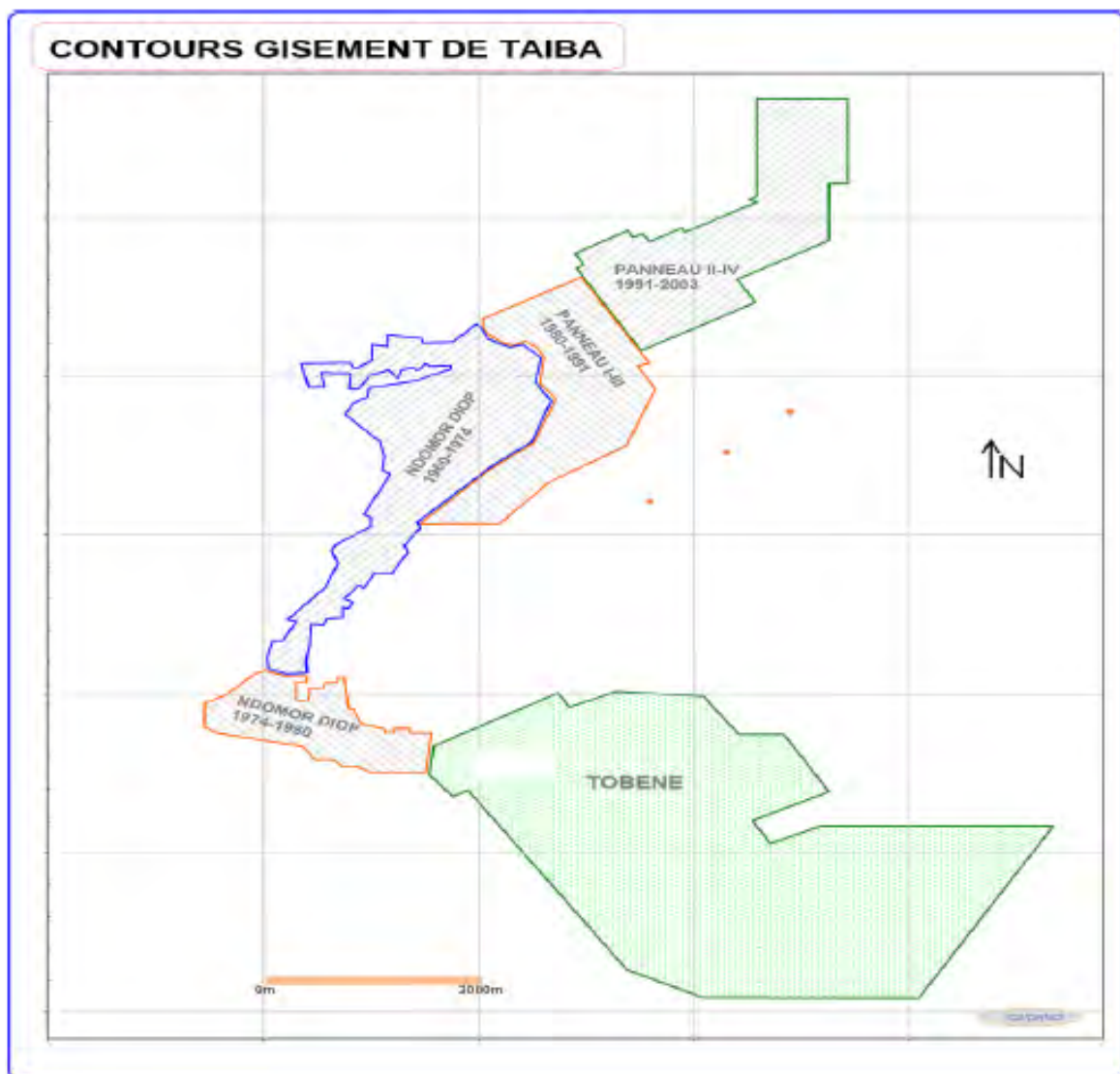


Figure 1: Carte de localisation des panneaux d'exploitation Taïba (Service de Géologie d'exploitation et d'exploration des ICS).

II Le gisement de Taïba

II.1 Cadre géographique

Le site mine des ICS est localisé à environ 100km au Nord-Est de Dakar, dans la commune de Darou Khoudoss (entre Mboro et Tivaouane) dans la région de Thiès. Il occupe une vaste zone triangulaire longue de 22km et large de 10km, situé entre 15° et 15° 10' de latitude Nord et entre 16°43' et 16°51' de longitude Ouest (figure 2).

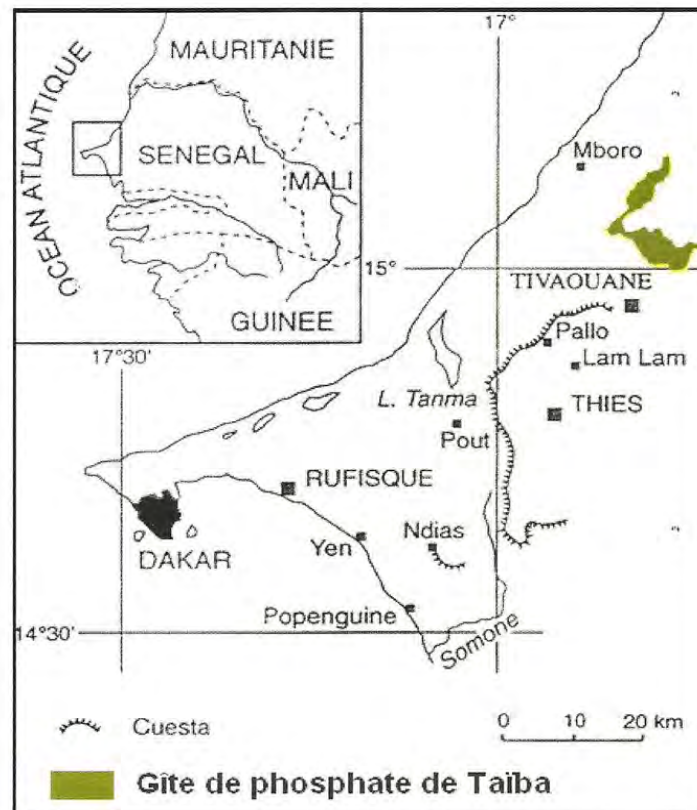


Figure 2 : Carte de localisation du gisement de phosphate de Taïba (Flicoteaux, 1982)

Le secteur de Taïba présente une morphologie dunaire, à dépressions boisées, de plus en plus accidentée en direction du littoral. Le climat est de type soudano-sahélien semi-aride avec une alternance de deux saisons : sèche (Novembre à Juin) et humide (Juillet à Octobre). Les dépressions inter-dunaires appelées Niayes sont verdoyantes et favorables à la culture maraîchère, car étant inondées quasiment toute l'année par les émergences de la nappe phréatique. La pluviométrie annuelle avoisine les 400mm, cependant la région subit l'influence maritime qui adoucit les excès de température (19°-35°) (Sagna, 2005).

La végétation est de type savane arborée.

II.2 Cadre géologique

II.2.1 Géologie régionale

L'ouverture de l'Atlantique au Jurassique a entraîné la formation de nombreux bassins côtiers sur les marges ouest-africaines et américaines. Le bassin sénégalo-mauritanien résulte de la séparation de l'Afrique et de l'Amérique du Nord ; c'est le plus vaste des bassins de marge passive de la côte atlantique africaine (340 000km²). Il s'étend sur près de 1400km entre le Cap Barbas en Mauritanie et le Cap Roxo en Guinée Bissau, à travers la Sénégalie. Il couvre les $\frac{2}{3}$ du territoire sénégalais. Il est limité au Nord par la dorsale Réguibat d'âge Précambrien, au Sud par le bassin paléozoïque de Bové, à l'Est par la Chaîne panafricaine des Mauritanides et à l'Ouest sur l'océan atlantique.

Une synthèse des données géologiques de la partie occidentale du bassin sédimentaire sénégalais a permis d'établir une carte de localisation des différents affleurements qui sont d'âge Crétacé terminal (campano-maastrichtien) à Paléogène, limités à l'Est par la Chaîne des Mauritanides et la boutonnière de Kédougou (Figure 3). Par endroit, ces sédiments sont recouverts par le Mio-Pliocène détritique altéré (Flicoteaux et Medus, 1974 ; Tessier et al, 1975) ou par le Quaternaire marin et par les ergs sableux. L'histoire géologique des formations du gisement de phosphate de Taïba se rattache donc à celle du bassin méso-cénozoïque sénégalo-mauritanien.

Ce bassin fut le siège d'une sédimentation marine dans la partie moyenne de l'Eocène jusqu'à l'Oligo-Miocène inférieur. La série phosphatée de Taïba est datée de l'Eocène moyen. Les argiles et attapulgites sont précisément d'âge Eocène (Yprésien-Lutétien).

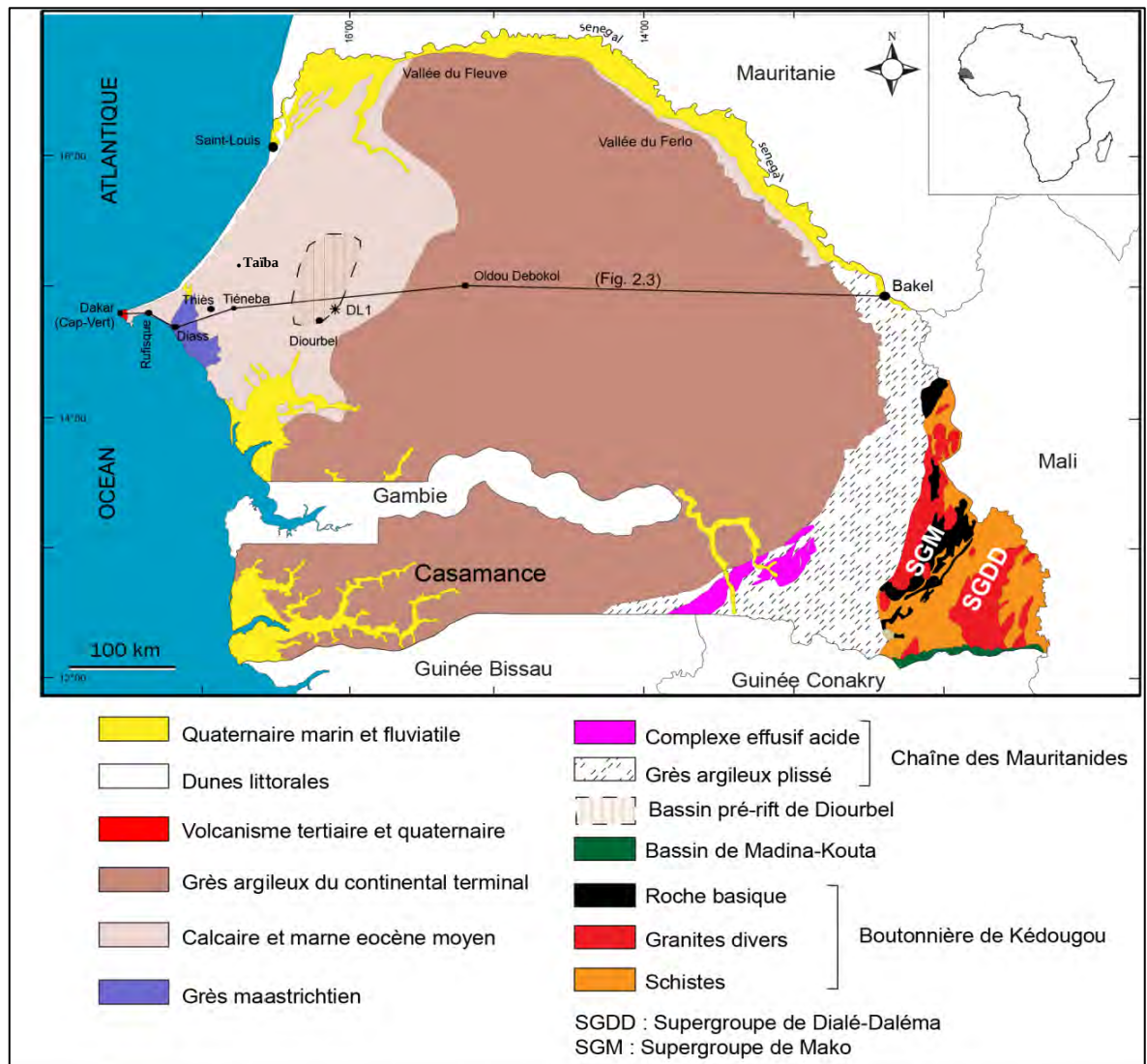


Figure 3 : Carte géologique du bassin sénégalo-mauritanien (d'après Roger et al., 2009, modifiée).

II.2.2 Géologie locale

➤ Genèse des phosphates

Les processus qui ont abouti à la formation des phosphates se sont déroulés dans une mer peu profonde, agitée et riche en organismes vivants. Parallèlement à la phosphatogenèse, il y a eu un dépôt de calcaire, marne et sable argileux. Selon les auteurs (Atger, 1970 ; Menor, 1975 ; Flicoteaux et al, 1977 ; Lucas et al, 1979 ; Flicoteaux, 1982), le dépôt a subi des transformations telles que les processus de lessivage des calcaires phosphatés, les phénomènes de dissolution/recristallisation et d'altération qui ont conduit respectivement à la formation d'une apatite décarbonatée, de faciès argilo-phosphatés et d'altérites sablo-argileux. Dans la partie

supérieure de la série phosphatée, la dernière phase de ces transformations a donné naissance à des roches telles que les phosphates d'alumine et les phosphates alumino-calciques. La structure de la couche phosphatée est profondément affectée par le poids des fortes accumulations de sables quaternaires.

➤ Lithostratigraphie de la série phosphatée de Taïba

La lithostratigraphie du gisement de Taïba a fait l'objet d'études par plusieurs auteurs (Atger, 1970 ; Slansky, 1980 ; Flicoteaux, 1982 ; Samb, 1993 etc). Ces études ont permis d'établir une succession lithologique de la formation phosphatée (figure 4).

Nous avons de la base vers le sommet :

- Les argiles finement feuilletées à attapulgites datées de l'Eocène inférieur correspondent aux marnes de Lam-Lam, qui constituent le mur du gisement. Elles passent à des bancs de calcaires en certains endroits.
- La formation phosphatée avec une épaisseur moyenne de 7m constituée de :
 - ☛ Un niveau inférieur de phosphate hétérogène, renfermant de nombreux silex, des lentilles de sables phosphatés par endroit, des niveaux argileux plus ou moins phosphatés.
 - ☛ Un niveau supérieur formé de phosphate homogène à rare silex, renfermant dans sa partie supérieure des niveaux d'argiles phosphatées. Il est possible d'y rencontrer des sables quartzeux dits « sables de couche ».
- Les argiles bariolées sont grasses, épaisses d'environ 1,5m et de couleurs très variables, généralement brunes, rouges ou verdâtres. Elles sont souvent associées à des sables gris et à des plaquettes de silex. Elles représentent le toit de la couche phosphatée.
- La formation silico-ferallitique épaisse de 0 à 5m, correspond à du phosphate de chaux altéré, alternant avec des niveaux de sable argilo-phosphaté très oxydé vers le sommet. Elle montre des lits centi à décimétriques de phosphates alumino-calciques. Elle peut aussi constituer le « phosphate hors-couche ».
- La formation gréseuse d'une épaisseur de 2 à 4m, est une formation gréso-argileuse altérée très irrégulière, renfermant du phosphate alumino-calcique. Elle est silicifiée et très ferrugineuse par endroit.
- Les sables dunaires recouvrent l'ensemble du gisement avec une épaisseur de 10 à 30m. Ils peuvent être rougeâtres ou jaunâtres et sont d'âge quaternaire.

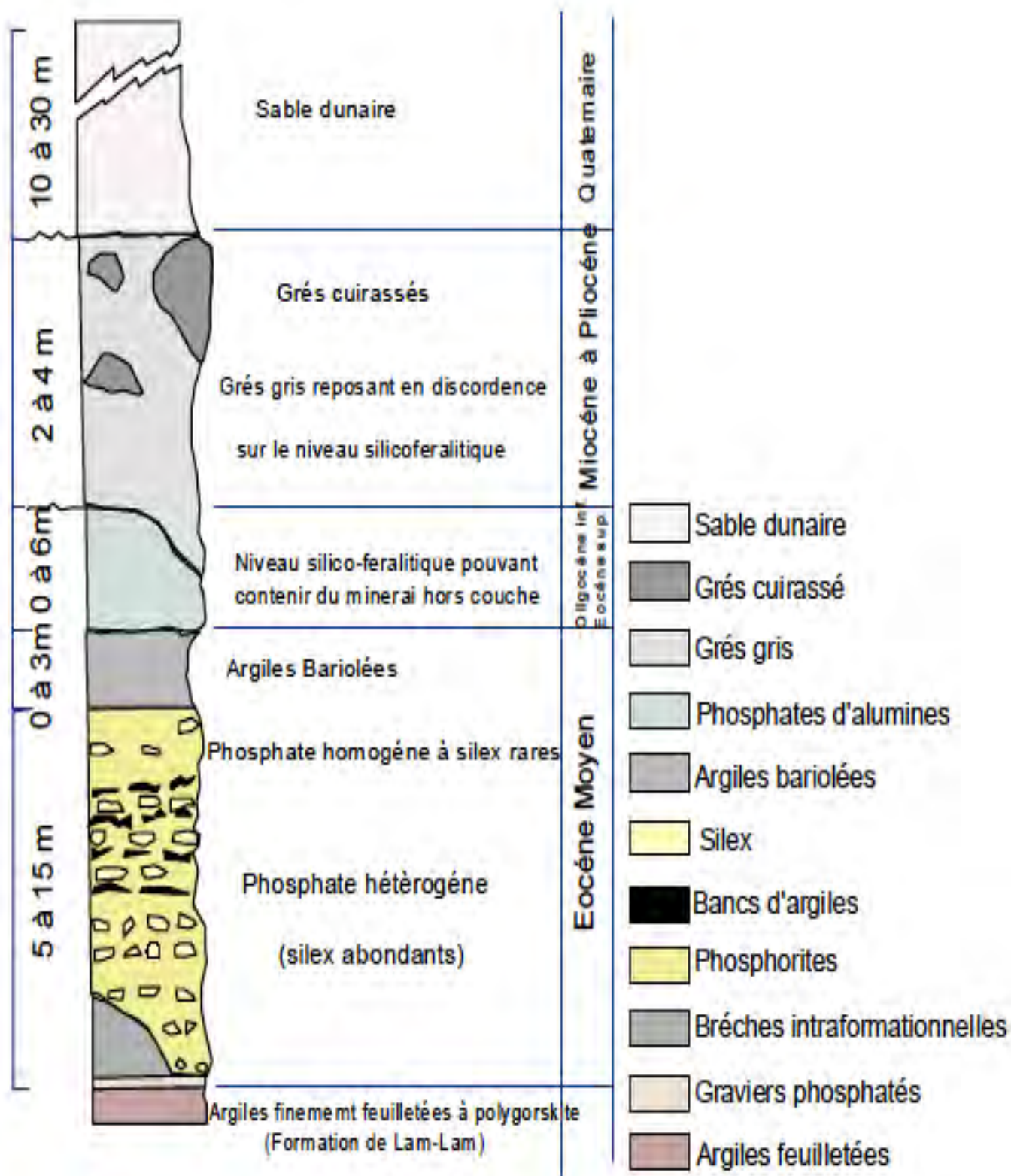


Figure 4: Log synthétique du gisement phosphaté de Tobène, Taïba (Samb, 1993), modifié

II.3 Le gisement de Tobène

II.3.1 Description et activités minières

Le panneau de Tobène, situé au Sud-Est de celui de Ndomor Diop (figure 5), est le troisième panneau d'exploitation du gisement de phosphate de Taïba. Son exploitation a démarré depuis 2004. Il couvre une superficie de 22,9 km², et est divisé en cinq secteurs : les secteurs Ouest, centre Nord, centre Sud, centre Est et Est. Il compte une superficie utile de 27 731 090m² avec un volume de minerais de 163 763 300m³. Du point de vue géochimique, les pourcentages moyens de P₂O₅, Fe₂O₃ et Al₂O₃ sont respectivement 29,01%, 1,81% et 1,14%. Le rapport K (%CaO/%P₂O₅) s'élève jusqu'à 1,43 ; les réserves sont estimées à 63 millions de tonnes en moyenne (figure 5). L'exploitation des phosphates se fait à ciel ouvert.

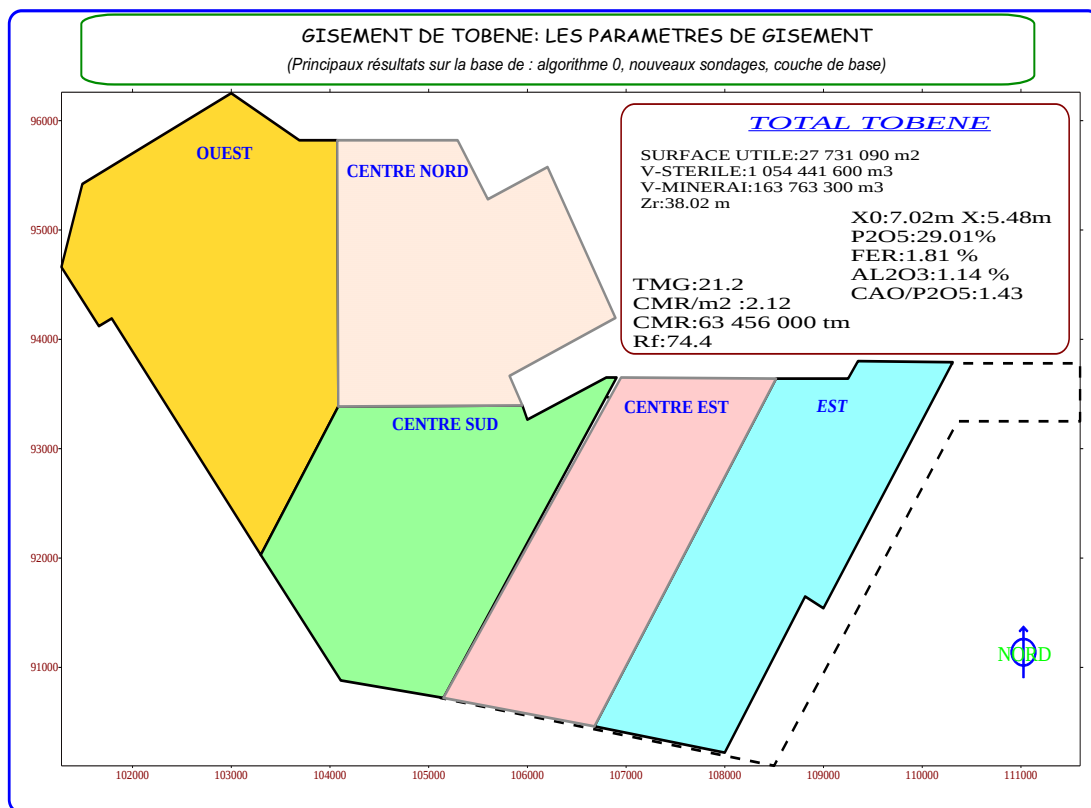


Figure 5 : Tobène : subdivisions et paramètres du panneau (Service de la géologie/ICS)

Les activités minières se résument en quatre phases présentées en annexes. Il s'agit de :

- l'étude géologique ou prospection ;
- l'exploitation ;
- le prétraitement ;
- et le traitement.

II.3.2 Localisation des panneaux d'étude

Notre étude porte sur les deux panneaux d'exploitation des années 2020 et 2021 (figure 6). Ils se situent dans le secteur centre Sud du panneau de Tobène. Au niveau des panneaux, on a une subdivision annuelle appelée budget ou passe annuelle et chaque passe annuelle est découpée en passes mensuelles de 30m de largeur et de 2km de longueur orientée perpendiculairement à l'avancement du chantier d'extraction, et en profils perpendiculaires aux passes, équidistants de 250m. Le panneau 2020 est couvert par 78 sondages, tandis que le panneau 2021 compte 100 sondages. Chaque sondage est défini par des coordonnées (X,Y) dans un plan choisi préférentiellement (figure 7).

Chaque sondage est étudié puis les données sont recueillies et établies dans une base de données par le Service géologique de la Mine des ICS. L'essentiel des informations concernant la couche phosphatée est connu grâce aux différentes analyses effectuées sur chaque carotte de sondage. Ces analyses portent sur la lithologie et la composition chimique.

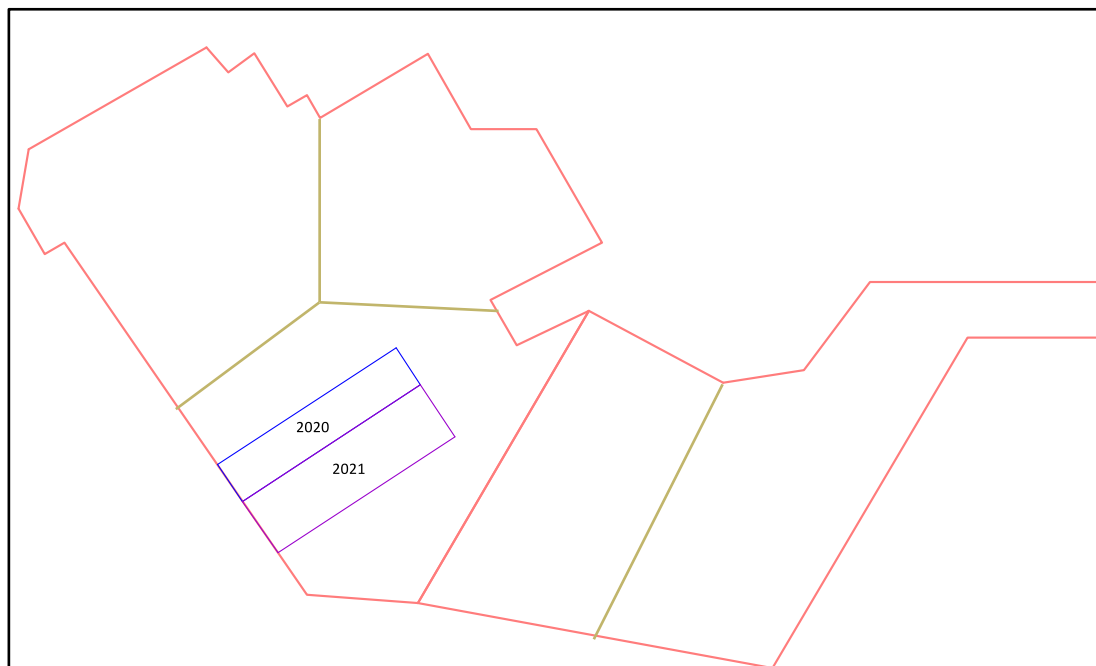


Figure 6 : Plan de positionnement des budgets d'exploitation des années 2020 et 2021 dans le panneau de Tobène

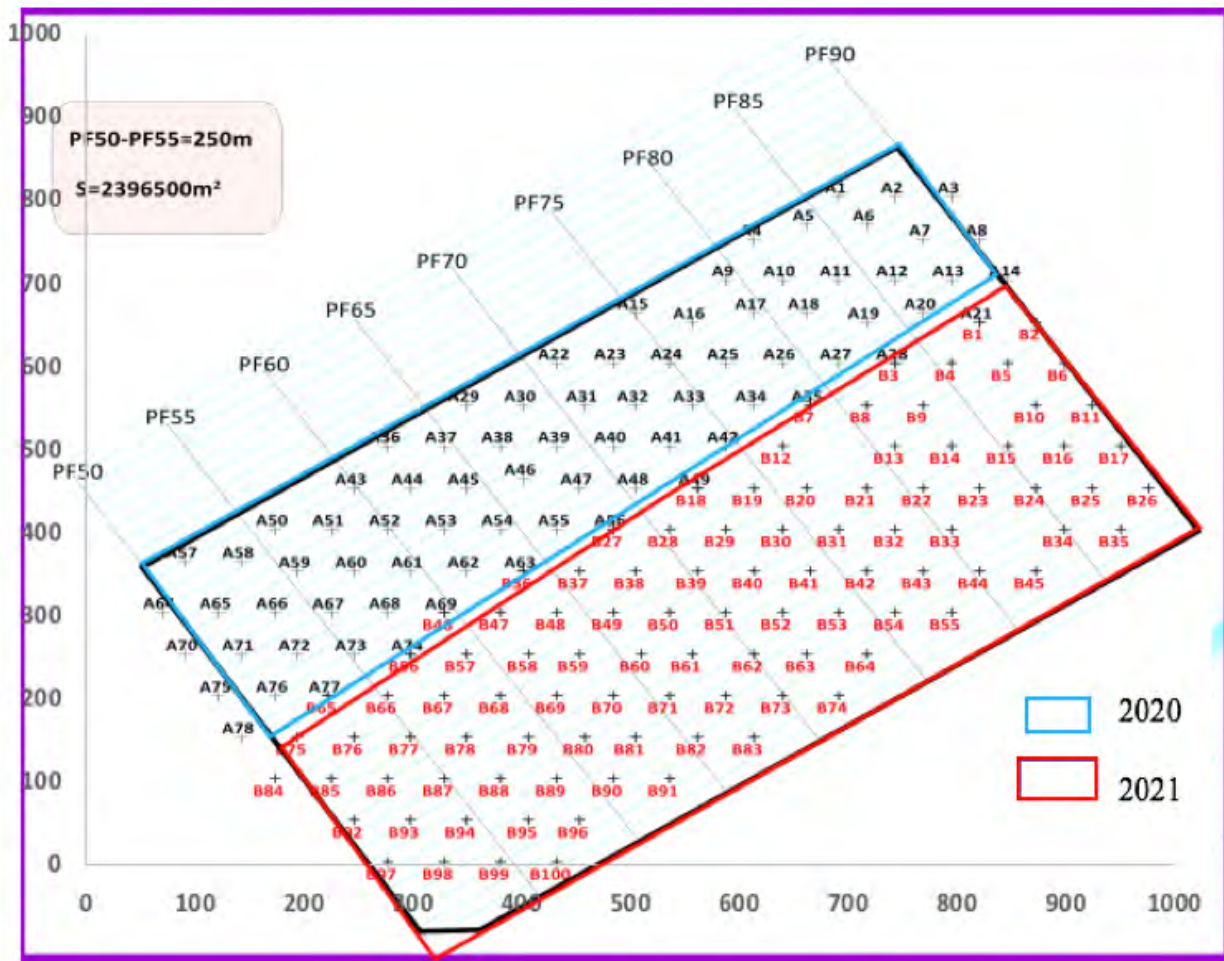


Figure 7 : Positionnement des sondages dans les secteurs d'étude

II.3.3 Techniques d'étude des sondages

La méthodologie d'étude utilisée au niveau du Service géologique de la Mine des ICS concerne :

- ❖ L'analyse lithologique : elle consiste à couper les carottes, puis à faire une description lithologique détaillée des différents faciès prélevés. Les caractéristiques pétrographiques sont en même temps dégagées. La description lithologique est faite de manière macroscopique à l'aide d'une loupe, de l'eau et d'acide chlorhydrique. Elle permet de déterminer certains caractères tels que la nature et l'épaisseur des couches, leur couleur, leurs éléments constitutifs, ainsi que leur degré d'altération.
- ❖ L'analyse chimique : elle est effectuée sur les particules de taille comprise entre 25 et 25 000 μm au laboratoire des ICS. Cependant les schlamms et les rejets peuvent faire l'objet d'analyses chimiques. Des échantillons sont prélevés sur chaque sondage du

panneau, puis envoyés au laboratoire pour l'analyse chimique. Les sédiments sont portés à une température de 800°C (Bickoundou, 2000) pour éliminer la matière organique. L'analyse consiste à donner les teneurs des oxydes majeurs tels que le phosphore (P_2O_5), la calcite (CaO), l'oxyde de fer (Fe_2O_3), l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et la silice (SiO_2) des sédiments phosphatés. L'échantillon ainsi prélevé est pesé puis traité aux réactifs spécifiques. Les teneurs en éléments chimiques connues, elles permettront de caractériser la qualité du minerai en établissant une relation entre oxydes et lithofaciès. Ainsi pour chaque faciès d'un sondage donné sont connues les teneurs en P_2O_5 , en CaO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , et SiO_2 .

Chapitre 2 : Caractérisation litho-géochimique de quelques sondages des panneaux d'exploitation 2020 et 2021

I Problématique et objectifs

Les estimations de la qualité du minerai phosphaté dépendent des teneurs moyennes en P_2O_5 . Ainsi, pour des teneurs élevées en P_2O_5 , la qualité du minerai est dite bonne, pour des teneurs faibles elle est dite mauvaise. Cependant, le gisement de phosphate renferme en son sein des zones à anomalies de couches représentées par le sable (SiO_2), l'oxyde de fer et d'aluminium (Fe_2O_3 et Al_2O_3) appelé « feral » et la calcite (CaO) qui influent sur la qualité du minerai. Par définition, une anomalie désigne l'état de ce qui est anormal. Ces anomalies de couches présentes sous forme de poches, de lentilles, de bancs ou de lits au niveau du gisement phosphaté constituent un problème pour l'enrichissement du minerai en phosphore et perturbent son exploitation. Compte tenu de leur répartition inégale et irrégulière au sein de la couche de phosphate, il est nécessaire d'associer ces anomalies à cette présente étude, afin d'établir une estimation qualitative du minerai et également d'éviter des problèmes aussi bien à l'extraction qu'à l'exploitation.

Cette étude litho-géochimique a pour but de déterminer la distribution verticale des teneurs en élément chimique majeur au niveau des unités lithologiques. Un calage faciès-oxydes majeurs sera ainsi mis en exergue permettant de connaître d'une part la relation entre la lithologie et les oxydes majeurs, et d'autre part les faciès où sont rencontrées les plus fortes teneurs en P_2O_5 . Des cartes isopaques de la couche exploitable et des anomalies seront également établies afin de connaître leur variation d'épaisseur au niveau des panneaux.

II Répartition verticale des éléments chimiques dans quelques sondages

Elle porte sur 18 sondages carottés au total dont 9 dans chaque budget, choisis préférentiellement sur l'ensemble des secteurs d'étude. Un log stratigraphique est réalisé pour chaque sondage, et à côté un graphique de distribution verticale des teneurs en pourcentages des oxydes majeurs obtenues pour chaque unité lithologique. La description lithologique détaillée pour chaque sondage est présentée en annexe. Le recouvrement sableux n'est pas pris en compte.

❖ Rappels sur les paramètres géochimiques :

Ils sont indispensables pour une caractérisation géochimique du minerai. En effet, à chaque élément chimique il lui est attribué une valeur de référence établie par les ICS telle que :

- %P₂O₅ (Θ) : indique le taux de phosphore, élément de base des phosphates. C'est un paramètre utile pour l'estimation de la qualité du minerai. En effet, plus le taux est élevé (Θ>22%), plus le gisement est exploitable.
- %feral (ρ) : représente le taux de feral (Fe₂O₃ et Al₂O₃). Il peut être exprimé de deux manières :

$$1) F = \frac{100(\%Fe_2O_3 + \%Al_2O_3)}{\%P_2O_5}$$

Il met en relation les pourcentages en fer d'alumine et de phosphore. Ce rapport indique la teneur en feral ou le degré d'altération du phosphate.

F < 5 = très bon minerai, car pauvre en minéraux d'altération ;

20 > F > 5 = bon minerai, car peu altéré ;

F > 20 = minerai riche en minéraux d'altération.

- 2) F = %Fe₂O₃ + %Al₂O₃ est la deuxième formule la plus employée de nos jours. Elle utilise simplement la somme du taux de fer et d'alumine présent dans la couche de gisement. Le minerai est dit feraléux lorsque F ≥ 4.

- Le rapport $K = \frac{\%CaO}{\%P_2O_5}$: permet d'estimer l'abondance du carbonate par rapport au phosphore et par conséquent permet de distinguer les phosphates de chaux des phosphates alumineux ou alumino-calciques.

Si 1,45 < K < 1,55 le minerai est dit calciteux ;

Si K > 1,55 il y a présence de calcaire.

- La silice %SiO₂ : permet de caractériser la teneur de silice dans le minerai.

Si SiO₂ < 20%, le minerai est pauvre en minéraux siliceux ;

Si 40% > SiO₂ > 20%, présence moyenne de la silice dans le minerai ;

Si SiO₂ > 40%, le faciès est très siliceux.

II.1 Répartition verticale de la teneur des oxydes majeurs le long de quelques sondages du panneau 2020

II.1.1 Sondage A9

La calcite est bien représentée dans ce sondage, avec à la base du phosphate homogène calciteux (K= 2,71%) et à silex, résultant de la forte présence au-dessus de bancs de calcaires massifs à niveaux phosphatés (K= 2,885%). Plus les pourcentages en K augmentent, plus ceux en P₂O₅, feral et SiO₂ sont faibles. La teneur la plus élevée en P₂O₅ (34%) est notée au niveau du phosphate homogène à phosphalutite qui est légèrement calciteux (K= 1,495%). Les argiles du toit sont très phosphatées (30,07%), du fait des intercalations de phosphates argileux à ce niveau. Les teneurs en silice et de feral sont surtout élevées dans le « hors-couche » (67,63 et 15,53% respectivement). Ce dernier est représenté par du phosphate hétérogène à silex qui, inversement est pauvre en phosphore et K (7,45 et 0,562% en moyenne).

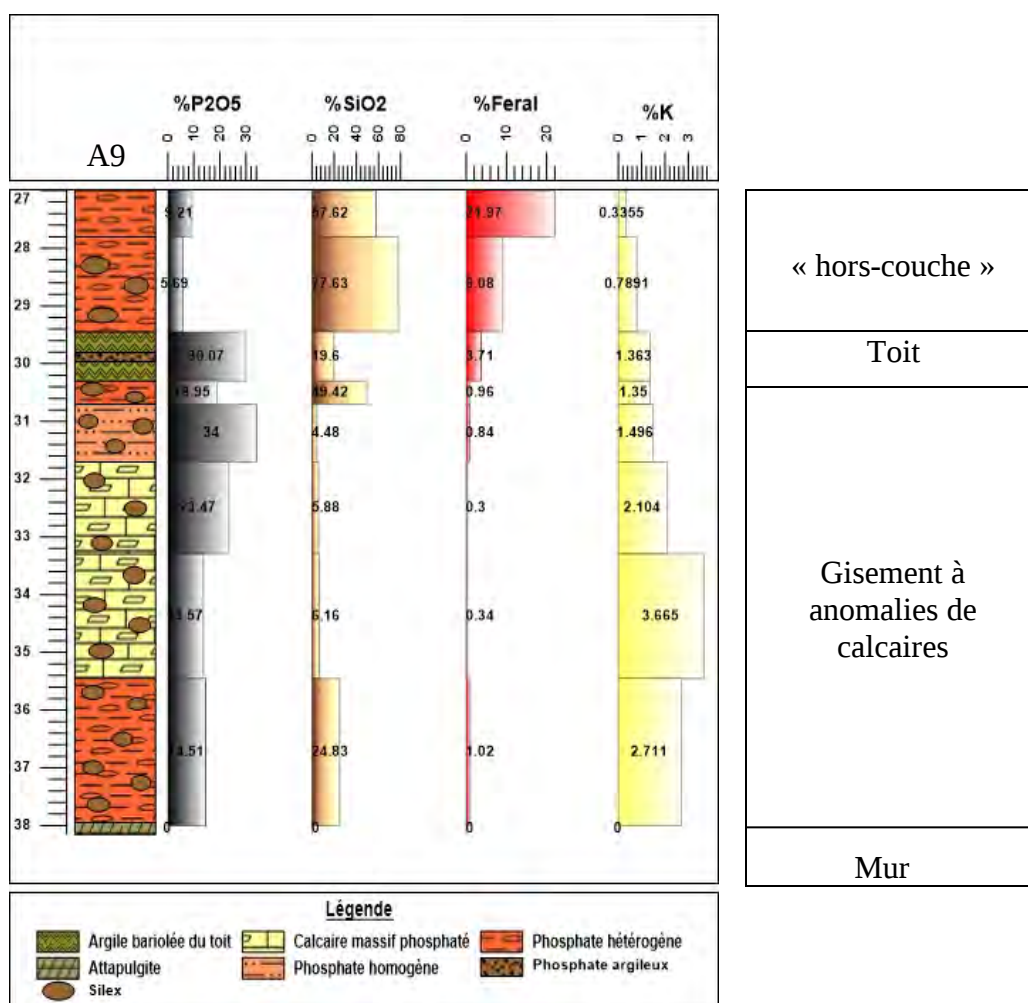


Figure 8 : Répartition verticale des oxydes majeurs dans le sondage A9

II.1.2 Sondage A10

La silice est l'oxyde dominant dans ce sondage. Son abondance au sein des minerais homogène et hétérogène est soit due à la présence de silex en bancs ou à une pollution sableuse provenant des poches de sable sus-jacentes ($\text{SiO}_2 = 53,15\%$ en moyenne). Les silex ne constituent pas des anomalies du fait qu'ils sont facilement séparés des particules phosphatées collées aux blocs, contrairement aux grains de sable qui, lorsqu'ils sont mélangés au phosphate, entravent son exploitation. Les analyses montrent que plus la silice est élevée, plus le minerai est pauvre en phosphore et inversement. Les argiles brunes du toit sont très ferrugineuses, ($\text{Feral} = 9,2\%$), moyennement siliceuses et par conséquent peu phosphatées.

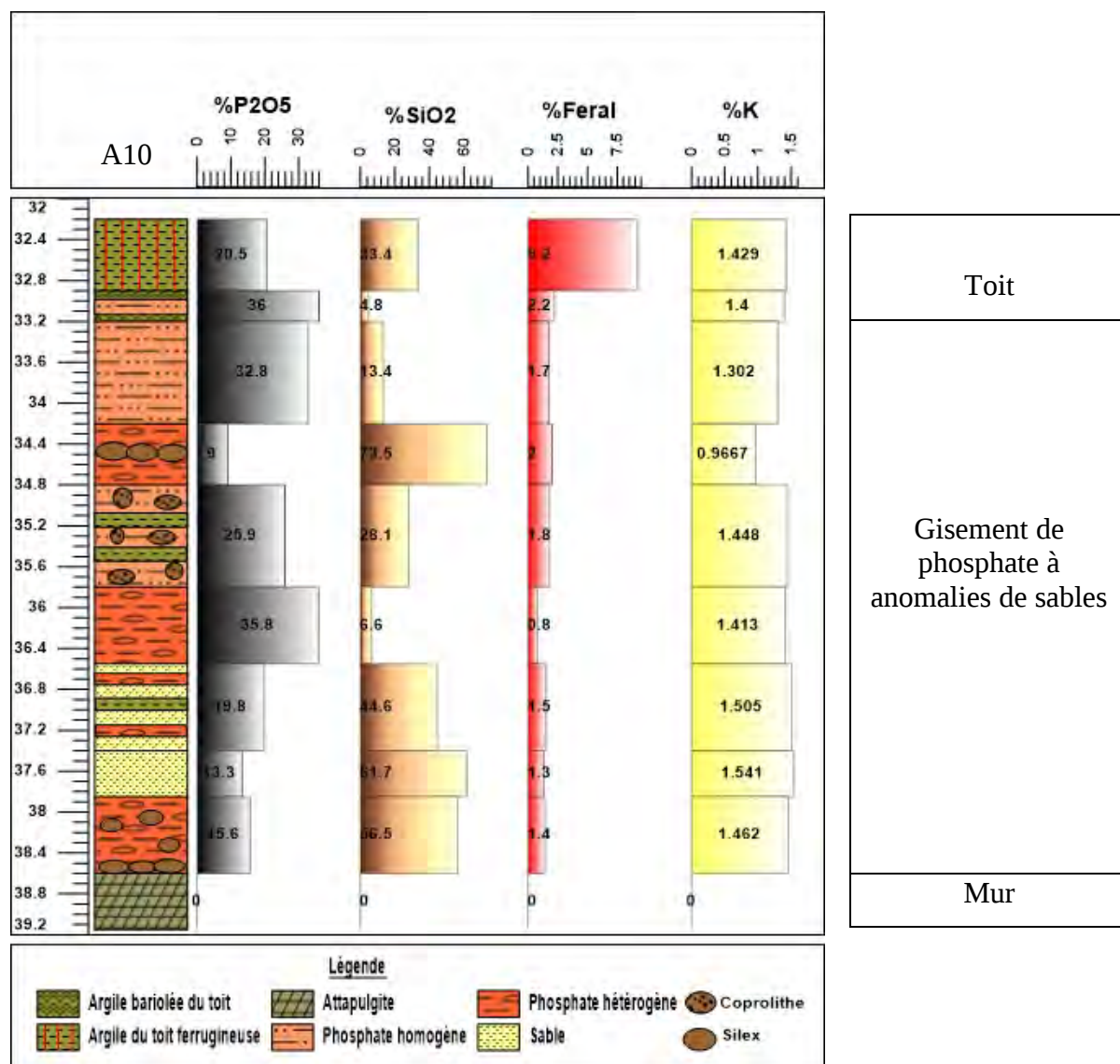


Figure 9 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A10

II.1.3 Le sondage A66

Les plus forts pourcentages en P_2O_5 sont présents au niveau du minerai homogène (36,6%), qui est moins feraléux que le minerai hétérogène. Ces deux unités sont intercalées d'un banc de phosphate argileux induré très riche en feral (22,7%), ce qui explique son caractère ferrugineux. Les teneurs en SiO_2 sont faibles à moyennes (de 2,5 à 24,8%) tout au long du log. Au niveau des argiles du toit, les pourcentages en P_2O_5 sont d'autant plus faibles que les % en SiO_2 et en feral sont élevés. Les teneurs en K sont faibles le long du sondage (maximum 1,375).

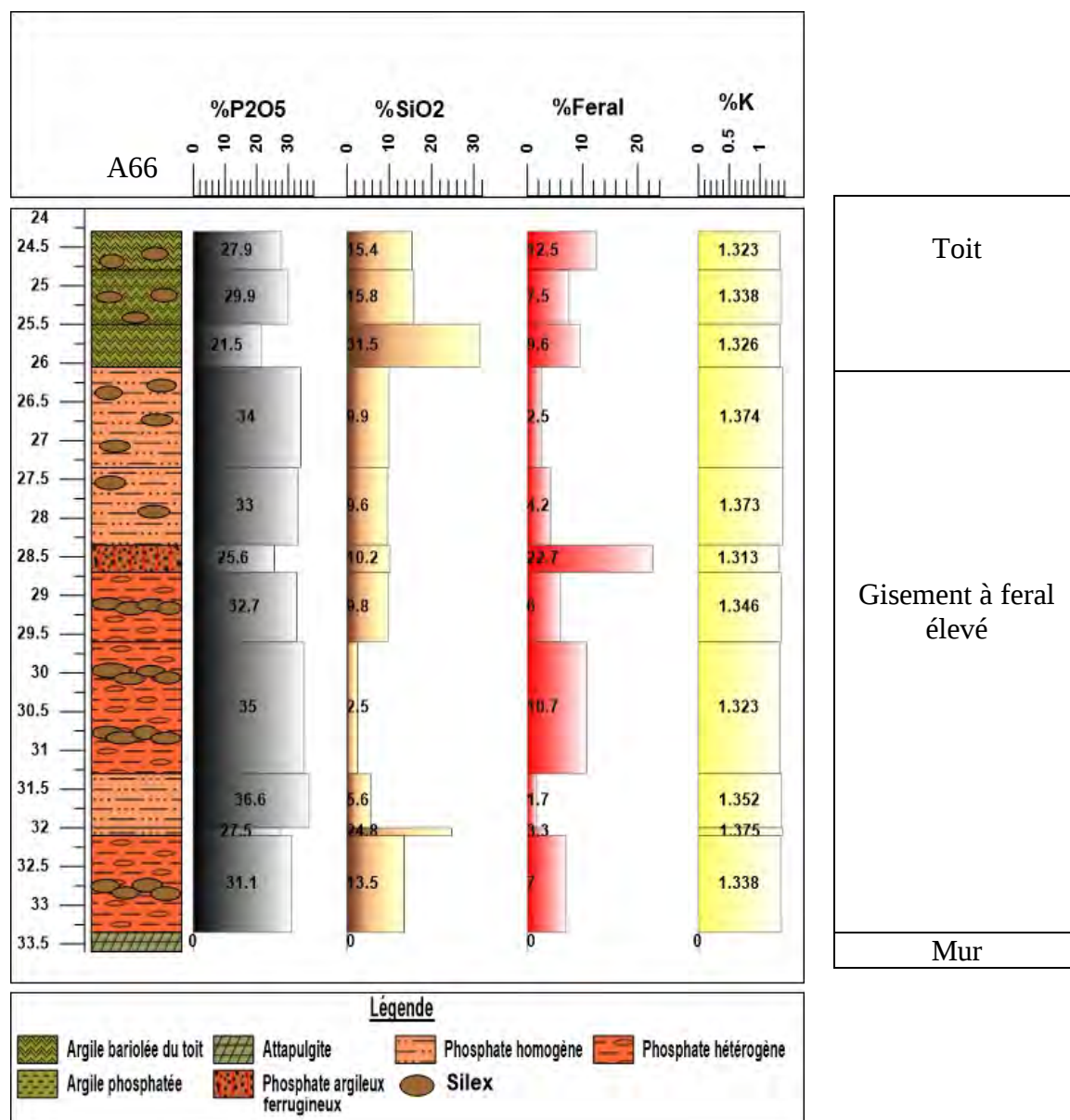


Figure 10 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A66

II.1.4 Sondage A16

Une épaisseur importante (4,75m) de faciès carbonatés est notée à la base du gisement avec des %K élevés (3,702 à 13,44%), accompagnées de teneurs très faibles en P_2O_5 (3,9 à 11,4%) en feral et en silice. La plus forte teneur en phosphore (34,1%) est notée au niveau du phosphate homogène très peu argileux alors que les autres oxydes y sont faibles (9,1% de silice, 2,5% de feral et 1,405% de K). Au niveau des argiles du toit et du phosphate « hors-couche », les pourcentages en P_2O_5 sont d'autant plus faibles que ceux en SiO_2 et feral sont élevés.

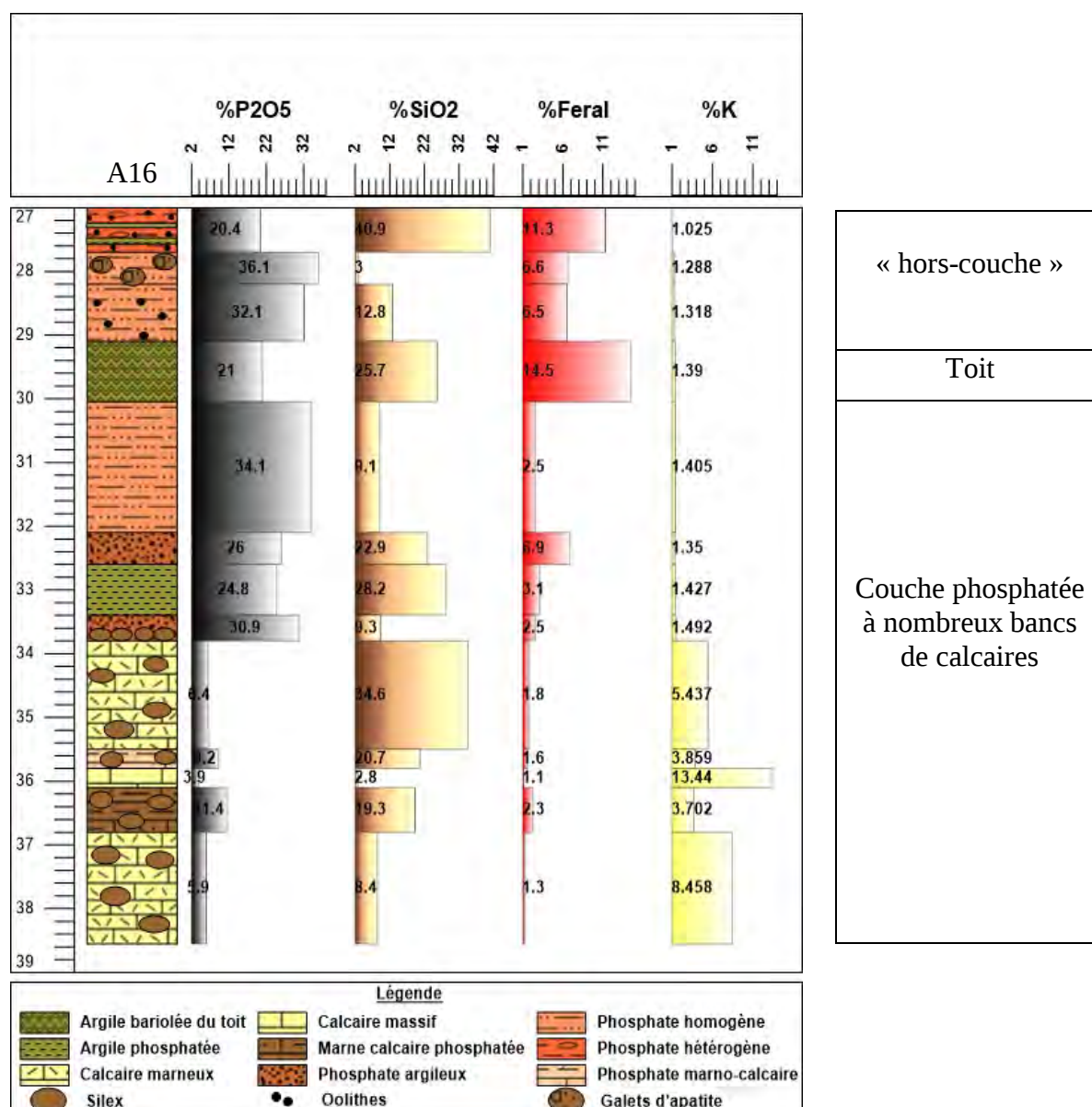


Figure 11 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A16

II.1.5 Sondage A18

Au niveau du phosphate hétérogène à la base, les pourcentages en P_2O_5 sont influencés par la silice et le feral : plus les teneurs en SiO_2 et feral sont élevées, plus le minerai est appauvri en phosphore, et inversement les niveaux très phosphatés sont faiblement siliceux et feraux. Le phosphate homogène renferme la plus forte teneur en P_2O_5 (36,89%). Les argiles du toit sont phosphatées (28,95%) et à la fois « ferales » (6,69%). Le phosphate « hors-couche » au toit est par contre très peu phosphaté (8,54% en moyenne), très siliceux et feraux au sommet (49,19 et 21,98% respectivement). Les teneurs en K y sont très faibles.

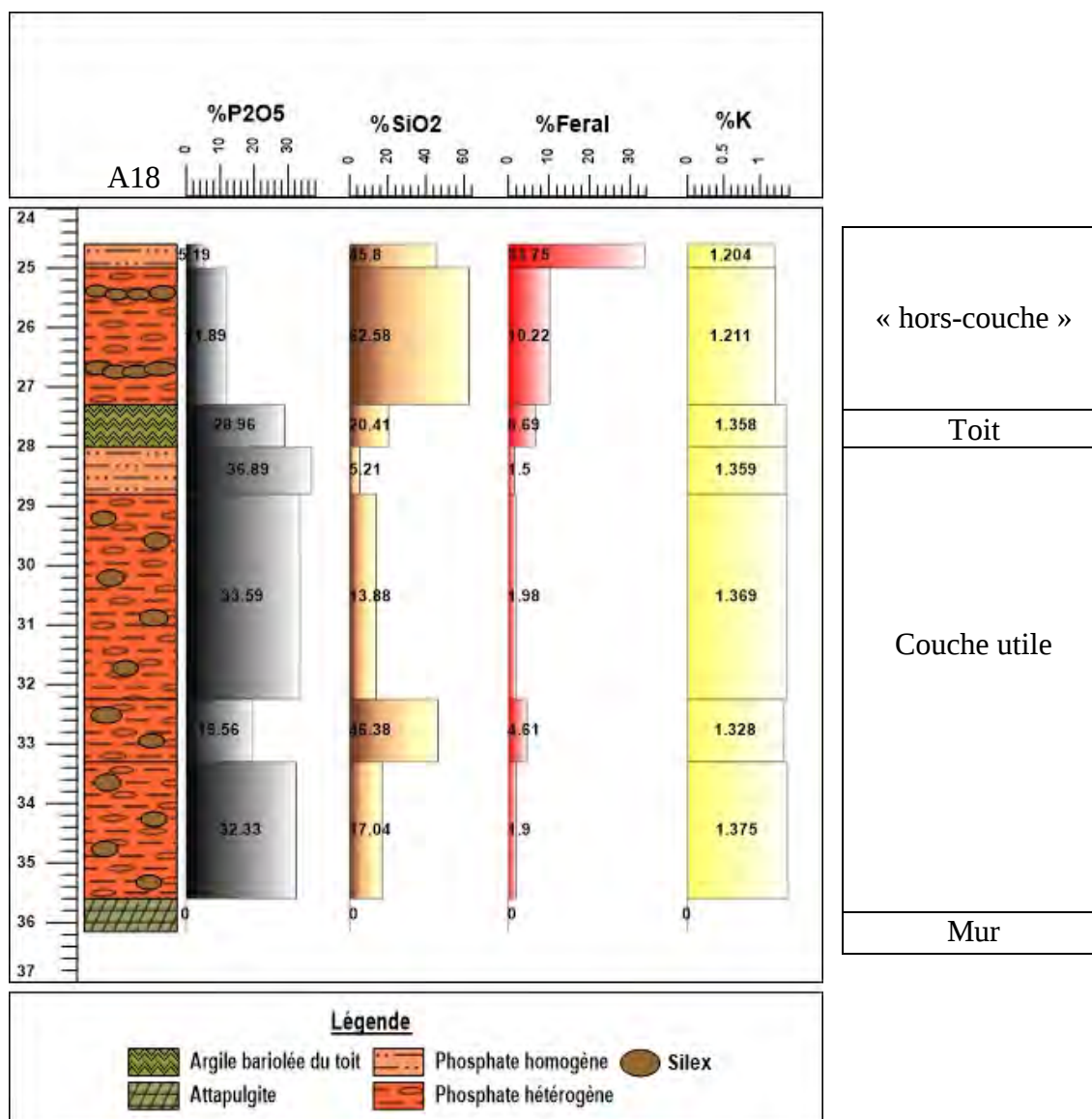


Figure 12 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A18

II.1.6 Sondage A36

Les argiles phosphatées qui séparent les phosphates hétérogène et homogène, renferment la plus forte teneur en P_2O_5 (30,49%) et sont également « feraluses » (5,15%). La couche utile est constituée de phosphates homogène et hétérogène, avec des teneurs en P_2O_5 moyennes à élevées (24,01 à 28,18%). Le phosphate « hors couche » constitué de phosphate homogène, renferme des taux importants en silice et surtout en feral (41,8 et 30,04% respectivement), ce qui entraîne une diminution nette du P_2O_5 (15,26% en moyenne), le rapport K y est également très faible (0,45). D'une manière générale, le feral est ascendant de la base vers le sommet et plus les pourcentages en SiO_2 et feral sont élevés plus ceux en P_2O_5 et K diminuent.

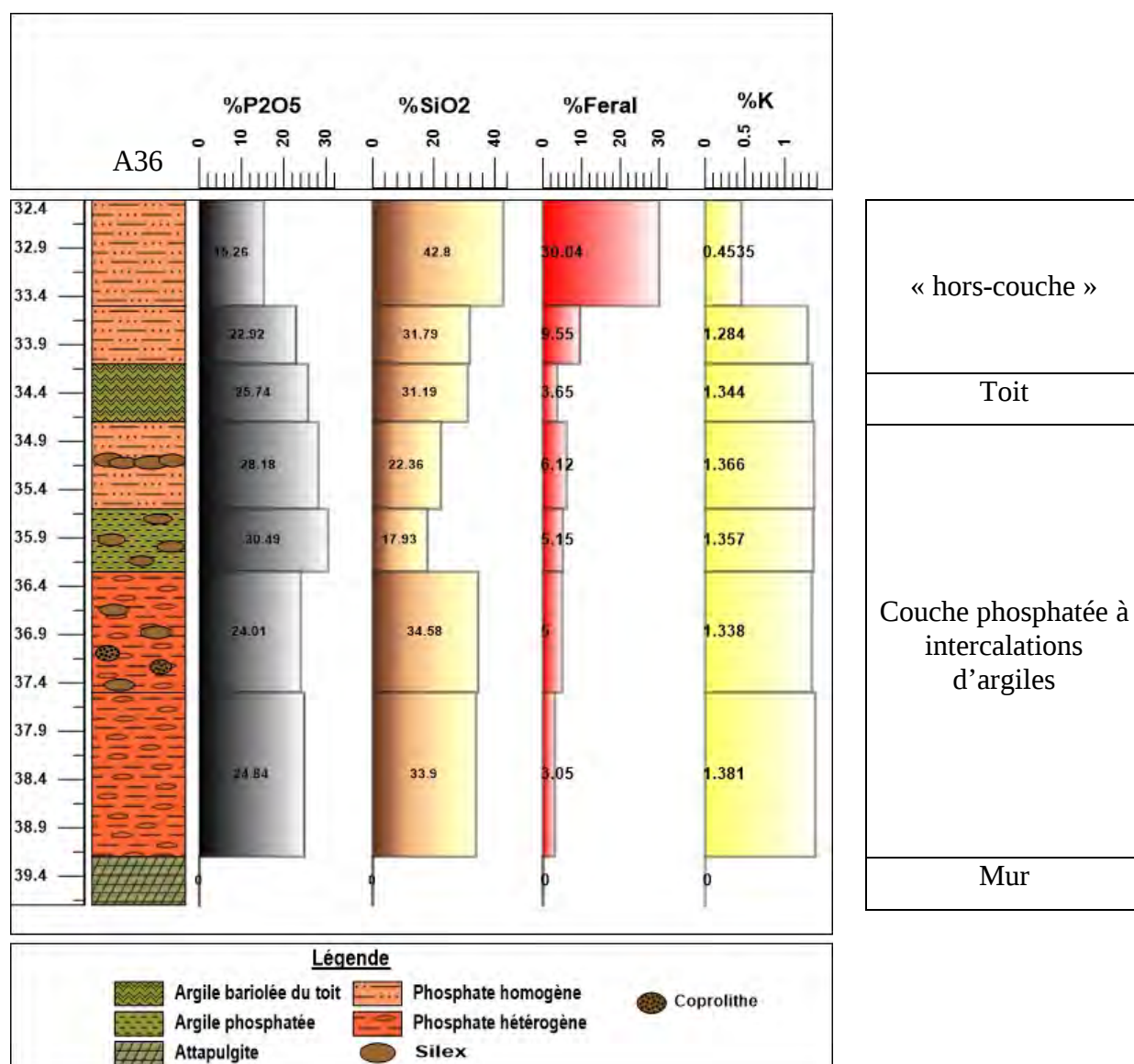


Figure 13 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A36

II.1.7 Sondage A37

A la base, le log débute par du sable phosphaté très riche en silice et en même temps feraleux (81,2 et 5,8% respectivement), contrairement aux teneurs en P_2O_5 et K qui y sont très faibles (6,1 et 0,853%). Le phosphate hétérogène s'intercale entre ce sable feraleux susmentionné et du sable fin non analysé au-dessus, ce qui explique son caractère très siliceux (45,1%) dû probablement à une « contamination » de ces sables, qui le rend ainsi pauvre en phosphore (21%). Le feral et le rapport K y sont également faibles (2,2 et 1,338%). Du phosphate homogène termine la série phosphatée au sommet, qui contrairement au phosphate hétérogène, est riche en P_2O_5 (31,4%) et faible en silice (19%), en feral (1,9%) et K (1,373%). Les argiles du toit et le phosphate « hors-couche » n'ont pas été recoupés dans ce sondage.

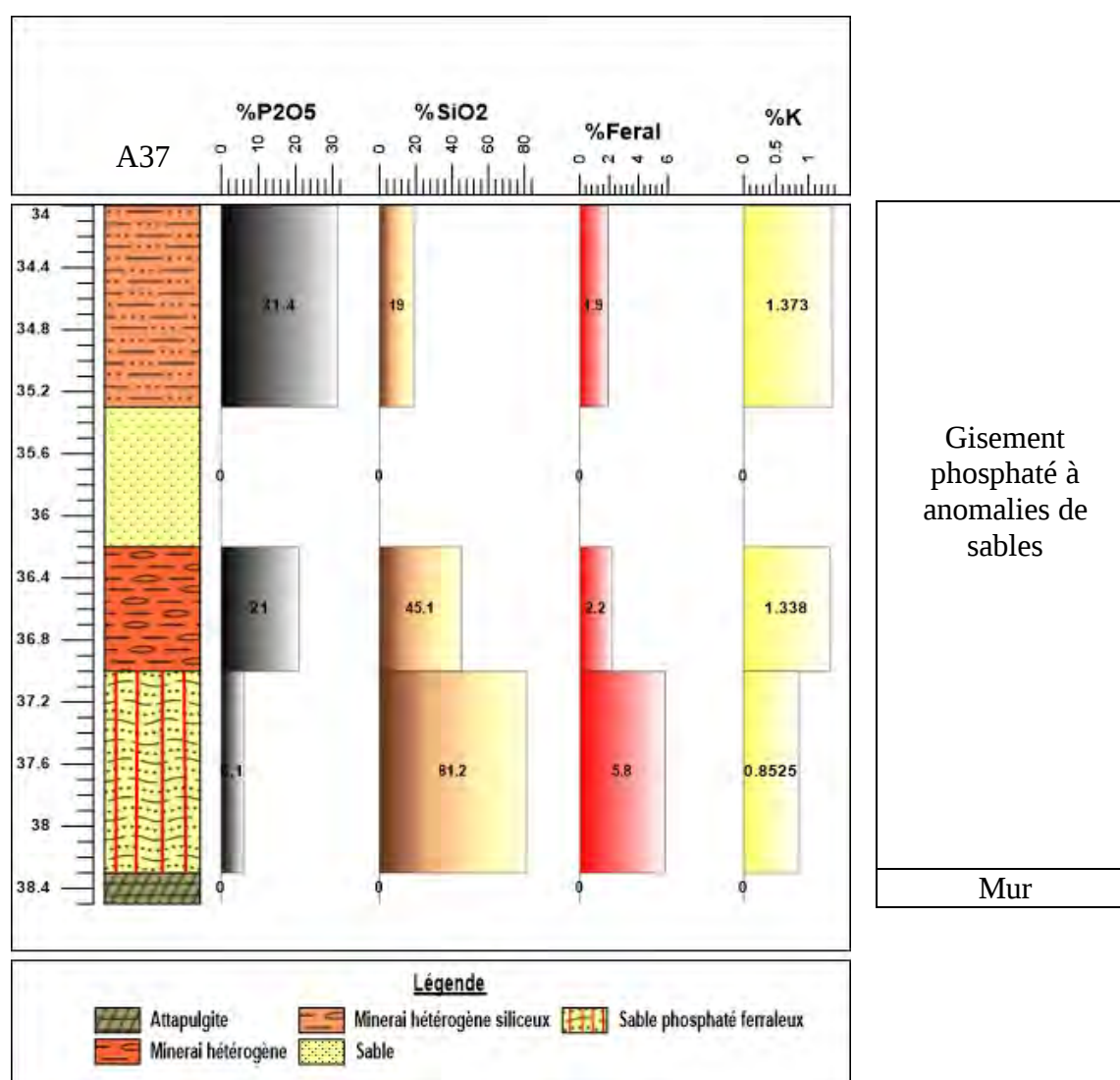


Figure 14 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A37

II.1.8 Sondage A19

Le phosphate hétérogène à la base est séparé du phosphate homogène par des couches de marnes calcaires à lits d'argiles, à K élevé (4,74% en moyenne), très faiblement phosphatées (13,35%) et du phosphate argileux moyennement phosphaté (25,7%). Le phosphate hétérogène à coprolithes est argilo-marneux, ce qui montre que la sédimentation argileuse domine à ce niveau. Il renferme avec le phosphate homogène les pourcentages les plus élevés en P_2O_5 (31,4 et 32,3%). Les argiles bariolées du toit ont des teneurs quasi semblables aux argiles phosphatées intercalées au minéral. Le niveau « hors-couche » est représenté par du phosphate hétérogène altéré, avec des teneurs élevées en fer (9,45%), moyennes en SiO_2 (29%) et assez faibles en P_2O_5 et K (23,15 et 1,19%).

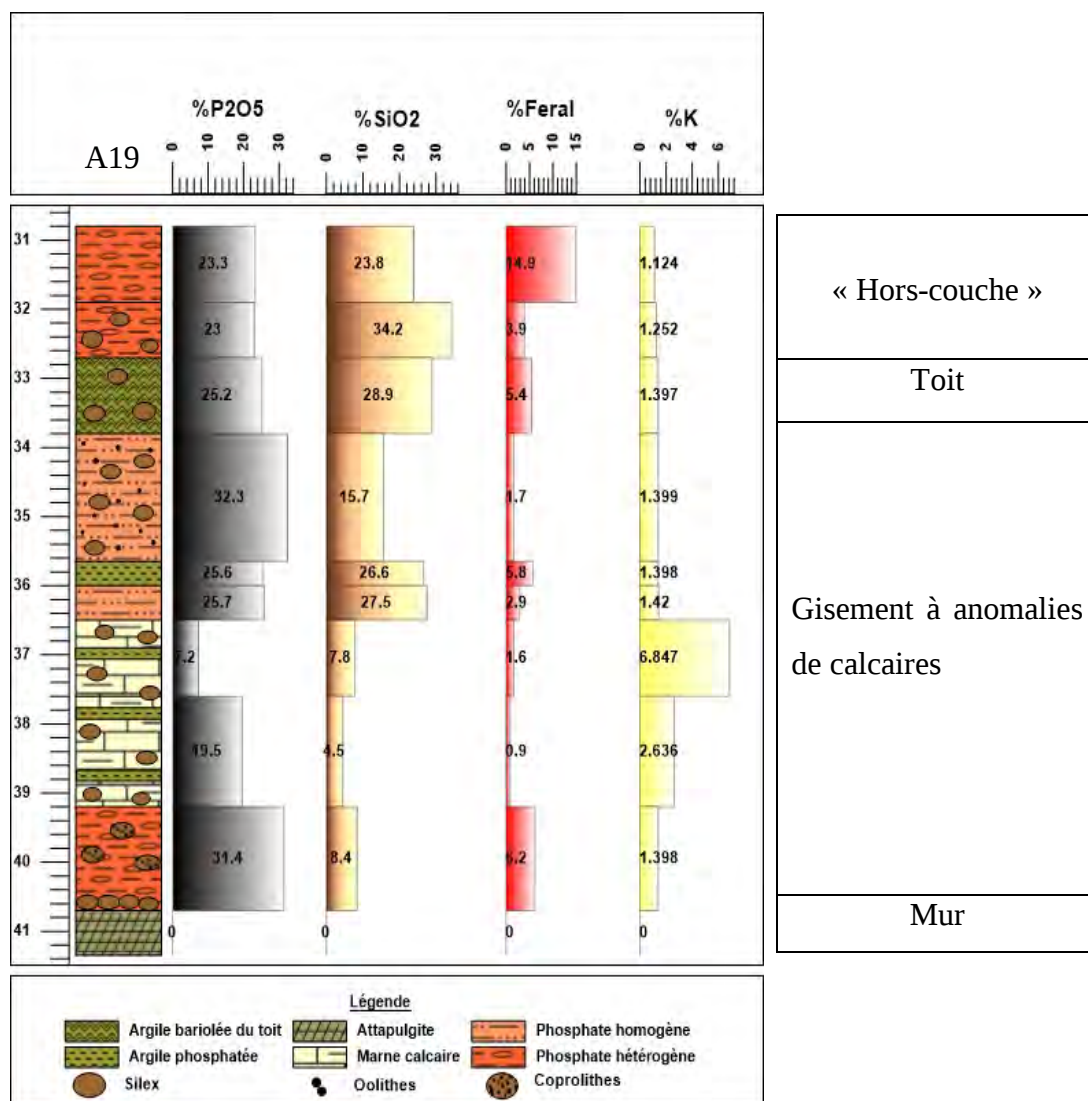


Figure 15 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A19

II.1.9 Le sondage A76

Ce log à deux unités lithologiques seulement avec : un phosphate hétérogène argileux et du sable à silex très feraléux également d'épaisseur importante (2,9m). Le phosphate hétérogène renferme une teneur moyenne en phosphore de 23,9% mais un fort pourcentage en feral (7,6%), ce qui rendra son exploitation difficile, tandis que le sable renferme des teneurs importantes en silice (72,1%) et en feral (8,7%), ce qui réduit nettement le P_2O_5 (8,1%). Les pourcentages en K sont faibles dans les deux faciès (1,193 en moyenne).

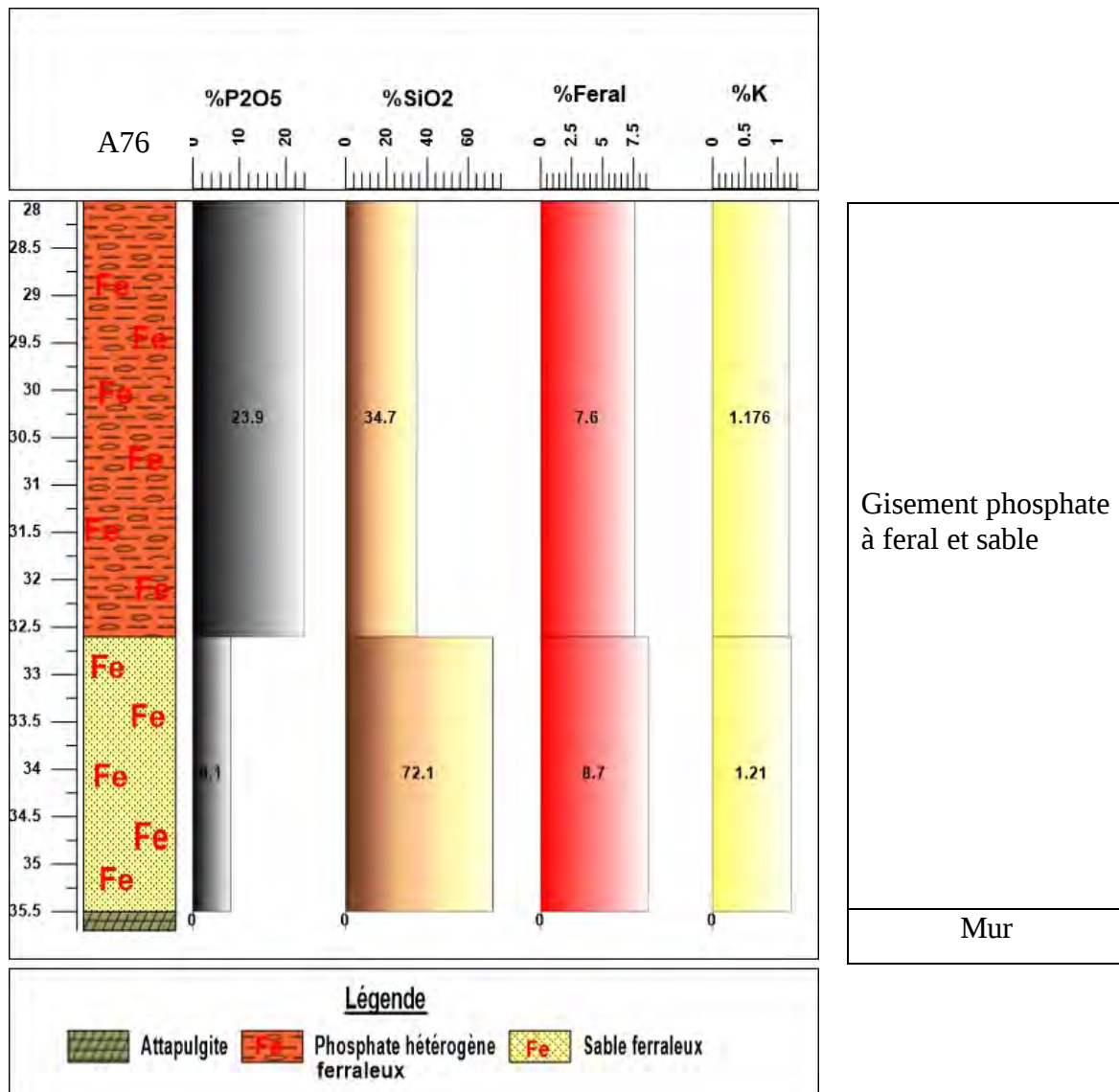


Figure 16 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A76

II.2 Répartition verticale de la teneur des oxydes majeurs le long de quelques sondages du panneau 2021

II.2.1 Sondage B15

Au niveau de ce sondage, la silice est l'oxyde le plus représenté dans les faciès. Le phosphate hétérogène à la base est moyennement siliceux (28,2%), mais plus riche en P_2O_5 que le phosphate homogène au-dessus qui contrairement à ce dernier est très siliceux, ce qui réduit son taux de phosphore (19,4%). Les autres oxydes notamment le feral et le rapport K y sont faibles (1,6 et 1,367 respectivement). Le sable à silex au-dessus des argiles du toit est faiblement phosphaté (10,2%), feraléux (4,7%) et très siliceux (69,4%).

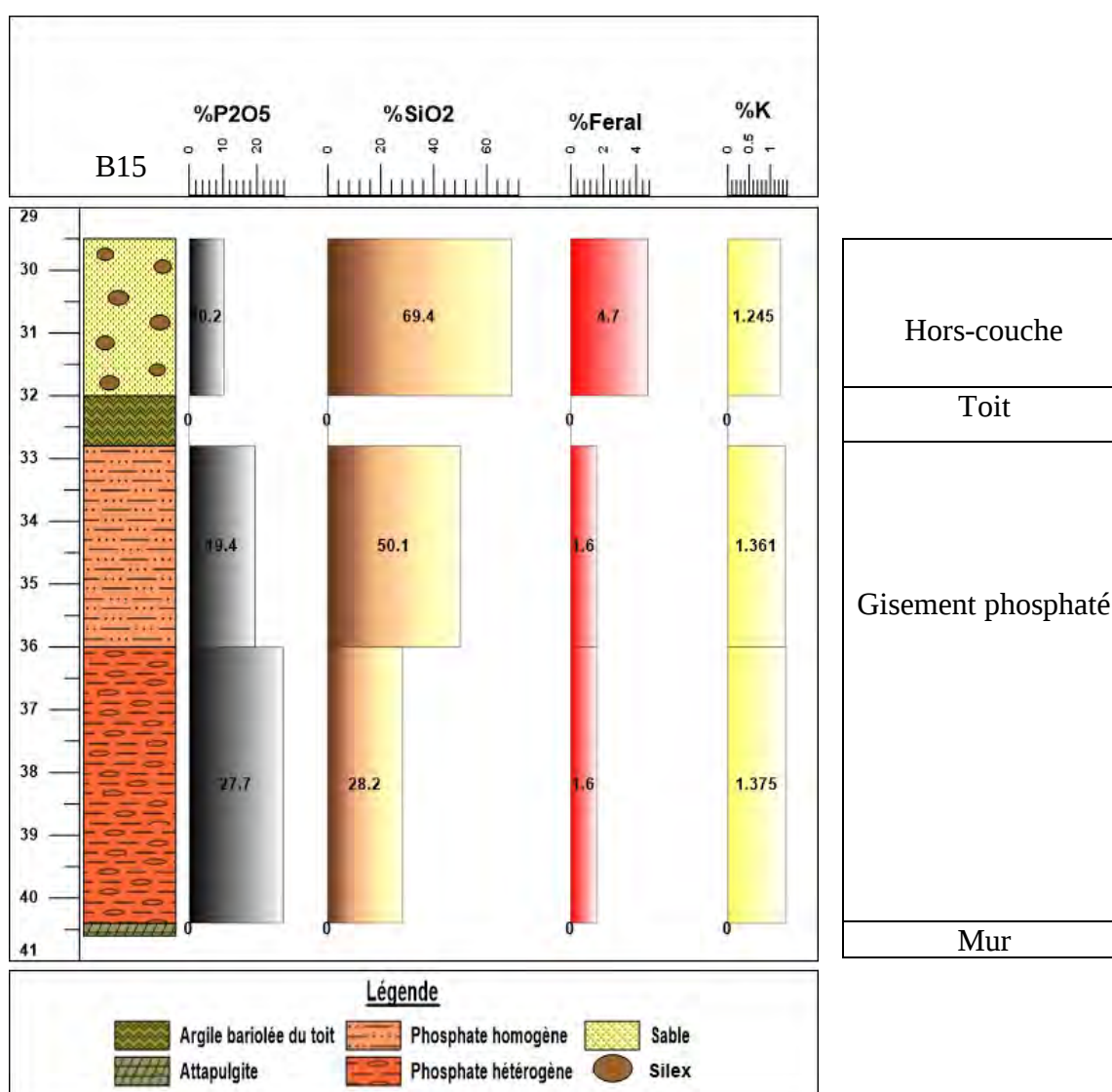


Figure 17 : Répartition verticale des oxydes majeurs dans le sondage B15

II.2.2 Sondage B61

Du sable peu phosphaté (16,96%) est noté à la base à pourcentage en SiO_2 très élevé (55,61%). Les forts taux en silice enregistrés dans les niveaux à phosphate traduisent la présence de niveaux argileux et/ou de silex. Les teneurs élevées en feral dans ce minerai seraient dues à l'absence des argiles du toit qui servent de barrière au minerai phosphaté contre les oxydes issus de l'altération du phosphate « hors couche ». Ce dernier, représenté par du phosphate hétérogène à grès ferrugineux et du sable phosphaté au sommet, est peu phosphaté (15,32%) et est par contre à la fois très feraleux et siliceux, avec un K faible.

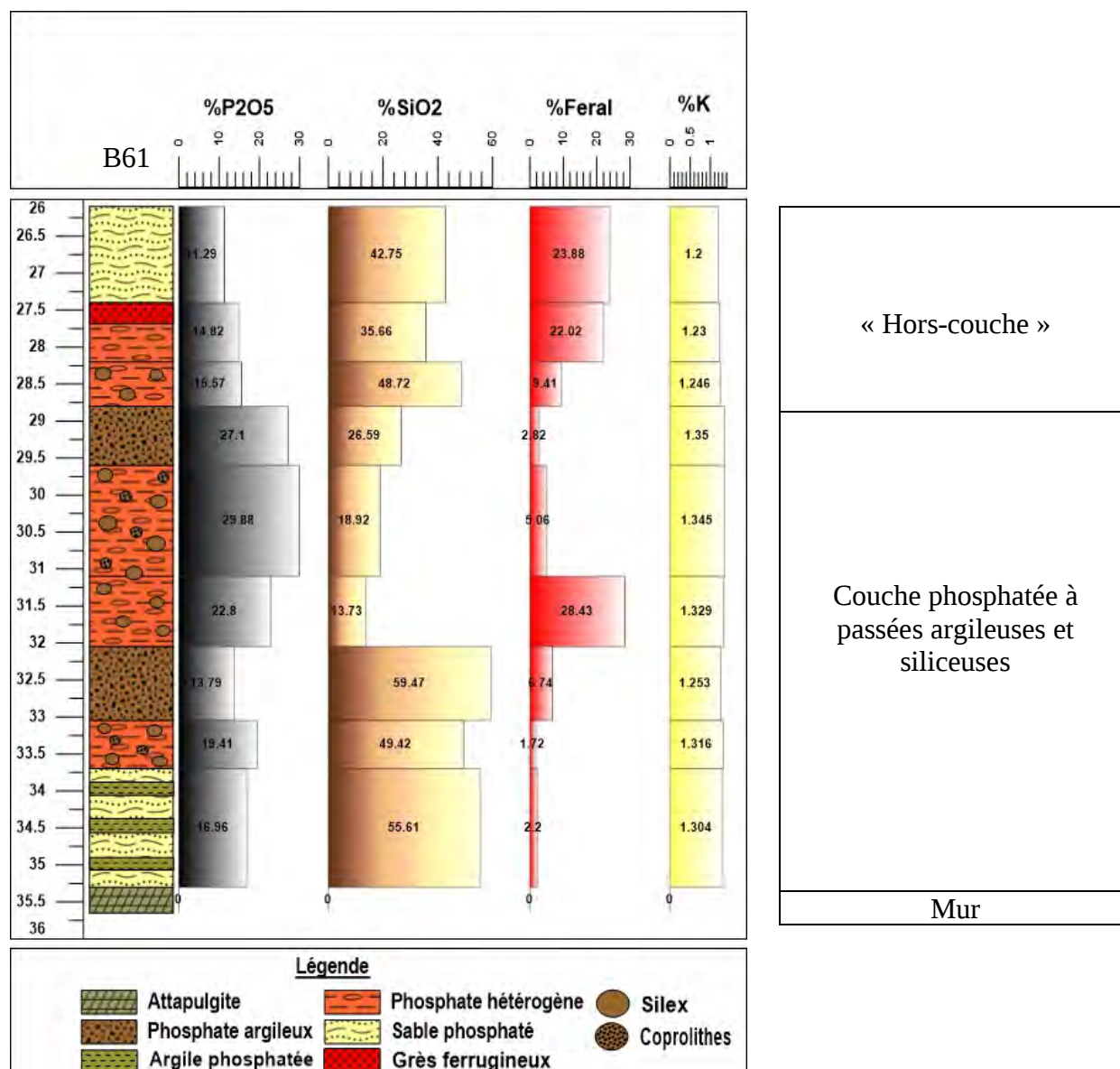


Figure 18 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B61

II.2.3 Sondage B89

Les fortes teneurs en silice enregistrées à la base du sondage sont dues à la présence de bancs de silex à coprolithes et nummulites. Cependant leur présence au sein du gisement ne peut être considérée comme une anomalie parce qu'ils sont facilement séparés des particules phosphatées colmatées sur les blocs stériles, lors du prétraitement. Au-dessus, ces silex sont surmontés par du phosphate homogène riche en P_2O_5 (jusqu'à 33,8%), légèrement feraléux au sommet qui est dû à l'absence des argiles du toit. Le phosphate « hors couche » est constitué de phosphate hétérogène feraléux et de phosphate alumineux pauvre en phosphore et K du fait de leurs teneurs élevées en feral (13,6 et 32,3%).

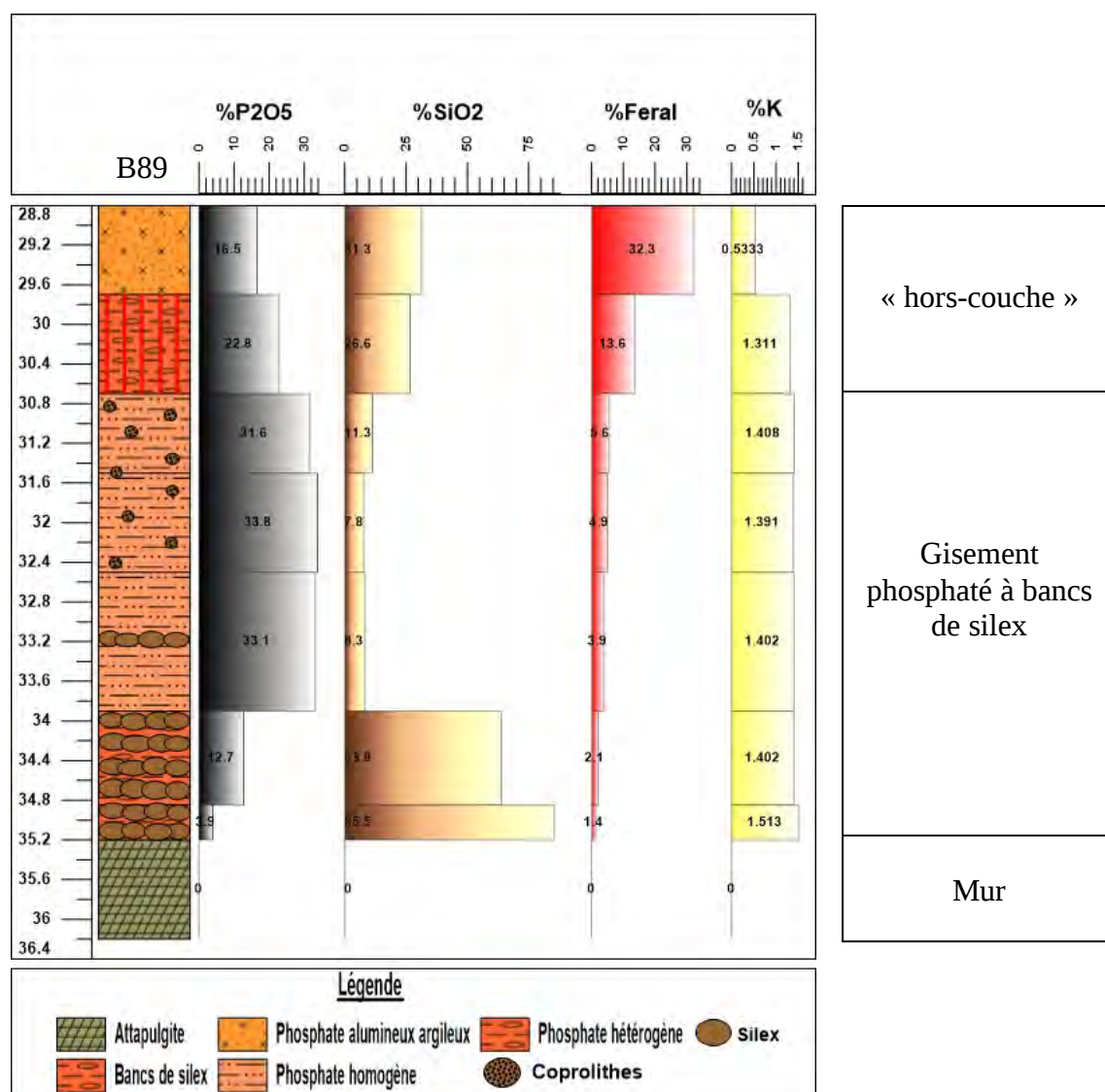


Figure 19 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B89

II.2.4 Sondage B67

Nous notons la forte présence de faciès carbonatés avec : des bancs de calcaire au sein du gisement et de la calcite diffuse dans les niveaux à phosphate hétérogène, calciteux à la base et au sommet ($K = 1,79$ et $3,08$). Les analyses des faciès montrent que plus les teneurs en K sont élevées, plus ces faciès sont pauvres en phosphore ainsi qu'en silice et fer. Au-dessus de ces formations carbonatées, se dépose du phosphate hétérogène à silex à P_2O_5 élevé (29,5%) et faible pour les autres oxydes. Les argiles du toit sont feraleux (7,67%) et moyennement phosphatées (24,54%) et à K faible (1,349).

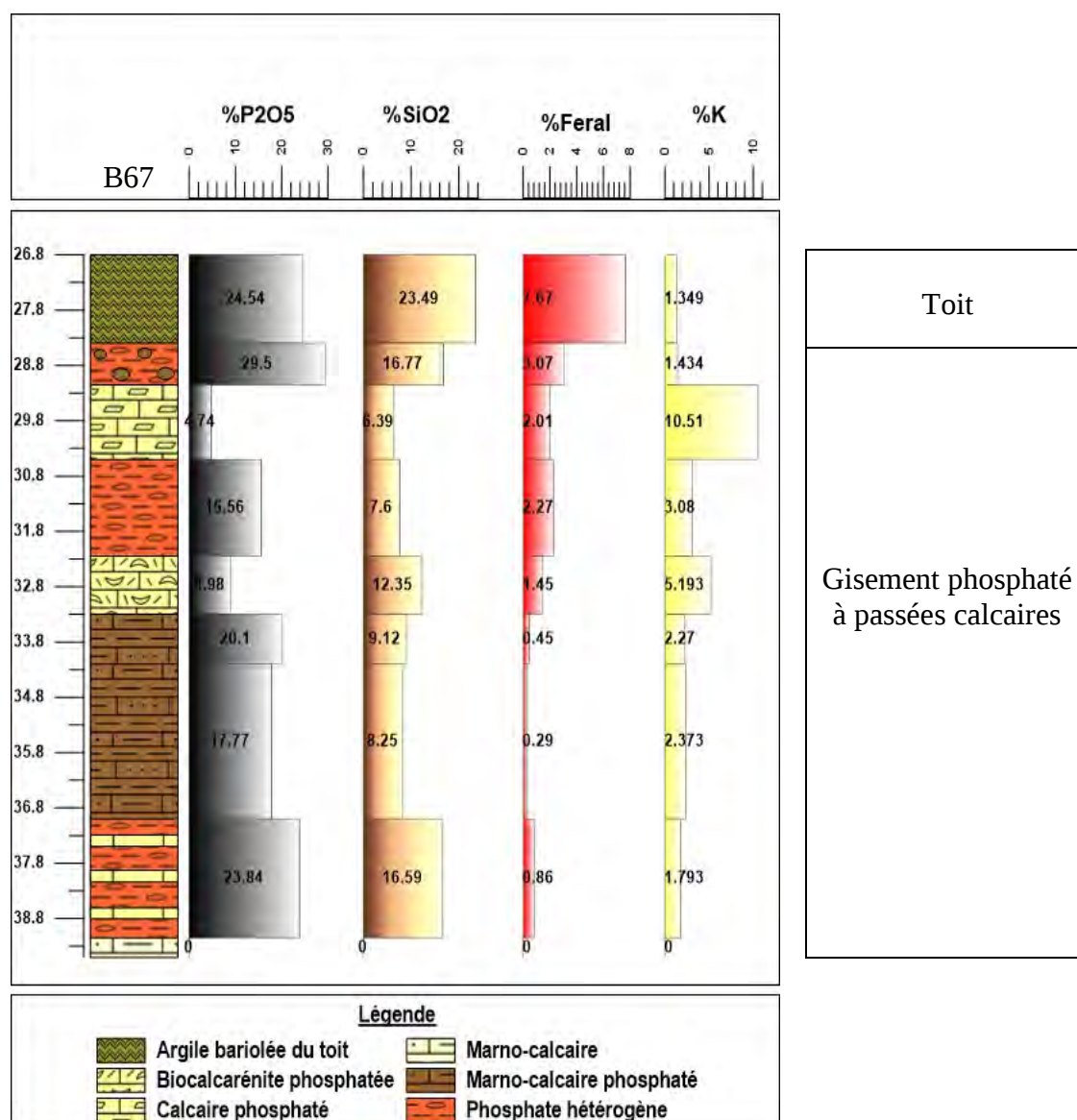


Figure 20 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B67

II.2.5 Sondage B99

La silice est bien représentée à la base (teneur moyenne de 71,15%), témoignant la présence de sable à nombreux silex, très peu phosphaté (9,5% en moyenne). Le phosphate homogène au-dessus est à la fois moyennement siliceux et feraleux (31,9 et 5,1% respectivement) avec une teneur moyenne de 26,8% de P_2O_5 . Les argiles du toit occupent une épaisseur très faible. Le phosphate d'alumine, riche en feral (20,4%) et silice (46,2%) ce qui le rend pauvre en phosphore (17,9%), représente le phosphate « hors-couche ». Il résulte d'une altération continentale du phosphate de chaux. Les pourcentages en K sont faibles le long du sondage.

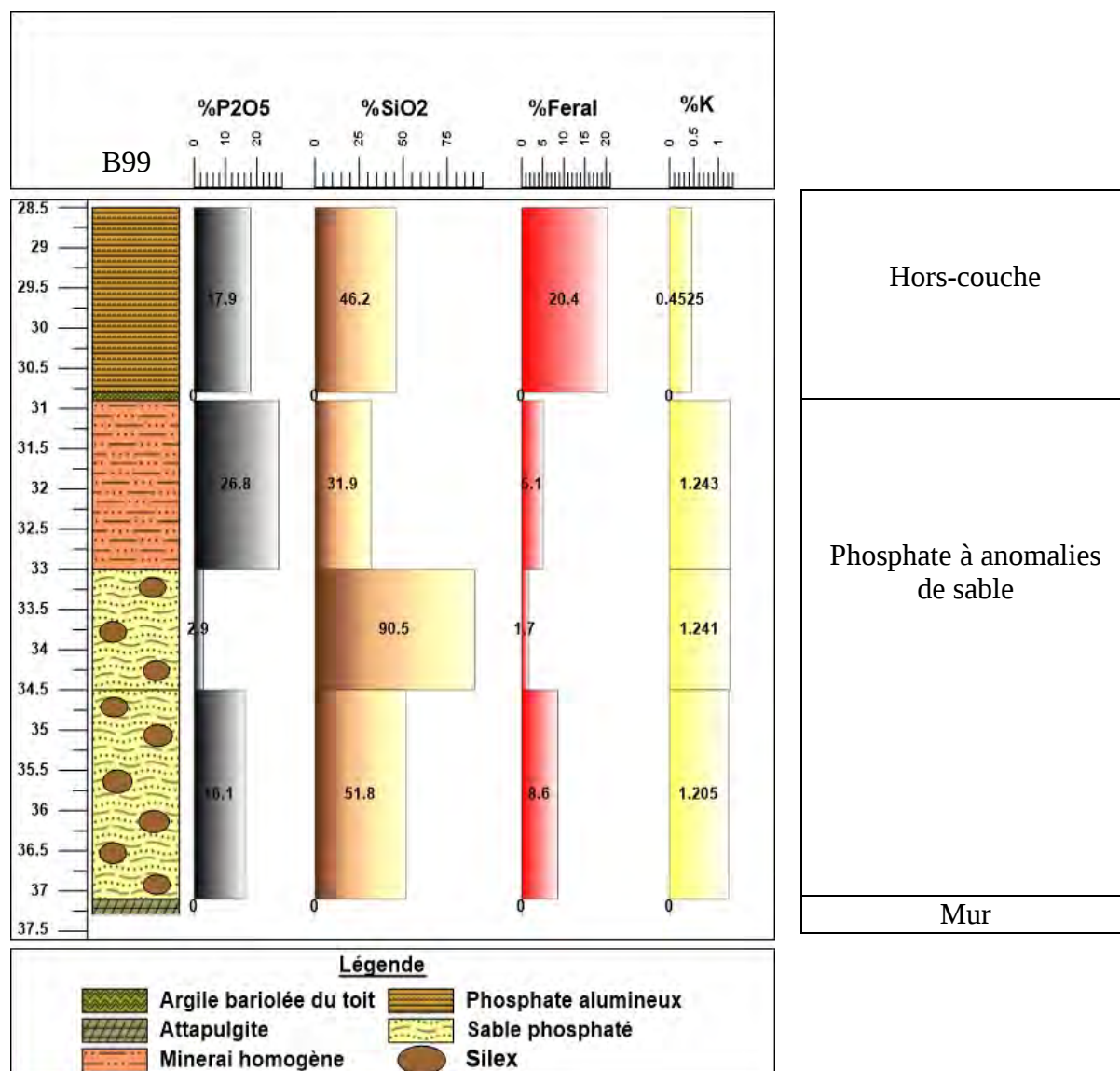


Figure 21 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B99

II.2.6 Sondage B10

A la base, la forte teneur en SiO_2 correspond à des bancs de silex sains qui ne sont pas considérés comme des anomalies. Les niveaux phosphatés sus-jacents ont des teneurs variables en P_2O_5 , influencées surtout par le feral : plus le minerai est riche en feral, plus il est appauvri en phosphore et inversement. Le minerai homogène est très phosphaté (36,5%) et pauvre pour les autres oxydes. Le plus fort pourcentage en feral (33,2%) au niveau du phosphate argileux est dû à la présence d'une cuirasse ferrugineuse, riche surtout en oxyde de fer pour un P_2O_5 faible (13,4%). Elle est surmontée d'un phosphate argileux moins feral que le niveau inférieur (feral = 5,7 et P_2O_5 = 30,9%). Les argiles du toit et le hors-couche n'ont pas été recoupés.

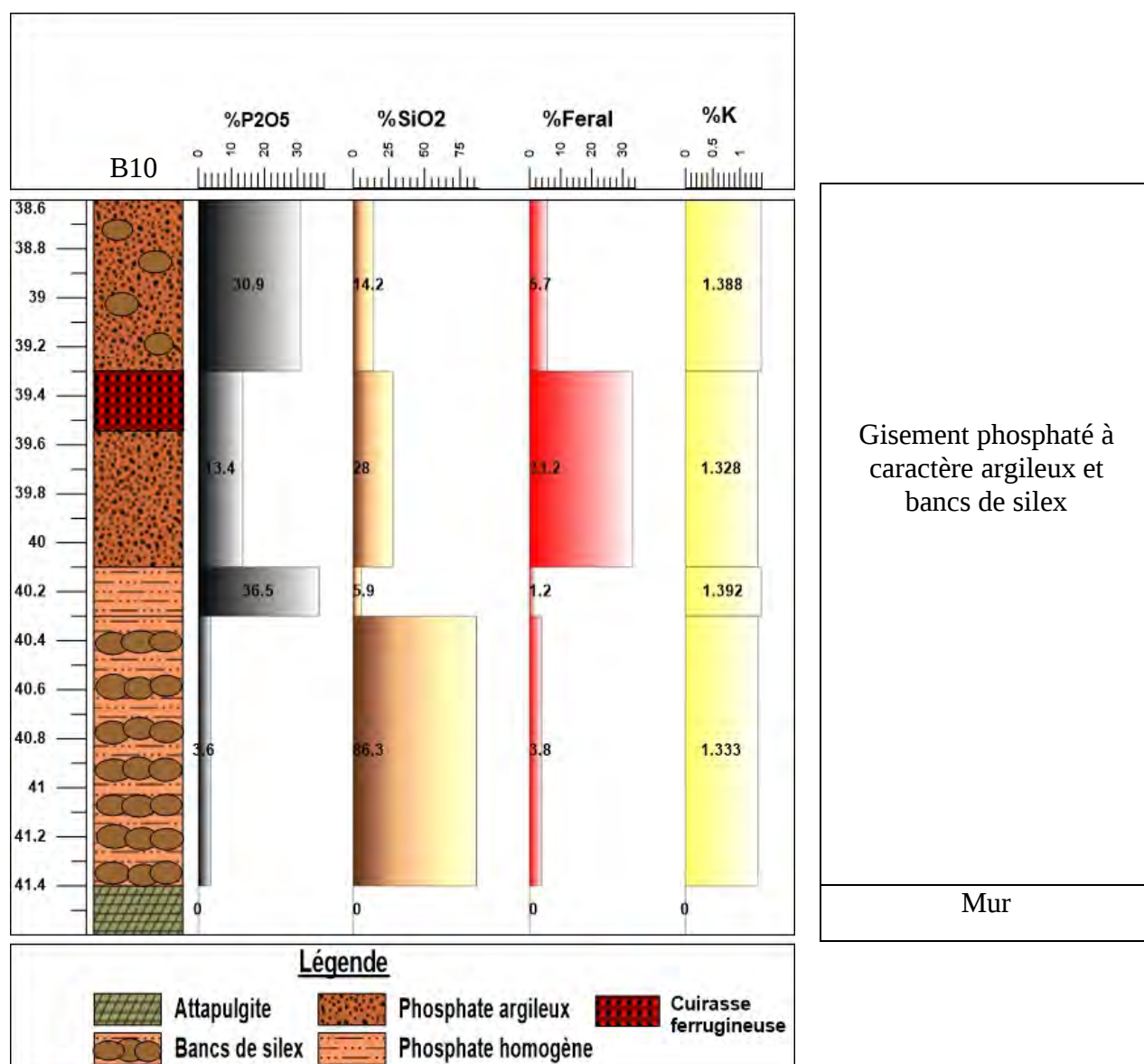


Figure 22 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B10

II.2.7 Sondage B100

Les oxydes les plus présents dans les faciès sont le feral et la silice. Leur teneur élevée entraîne une réduction du phosphore et du K au niveau des faciès : au niveau des poches de sable à la base très peu phosphaté (% moyens : 76,65% en SiO_2 et 7,3% en P_2O_5) et du phosphate hétérogène à caractères argilo-siliceux et feral (en moyenne 41,1% de SiO_2 , 25,05% de P_2O_5 et 20,9% de feral). Les teneurs en K sont faibles et varient de 0,859 à 1,404%. Le phosphate homogène termine la série phosphatée au sommet avec une teneur moyenne en P_2O_5 de 32,15% et faible pour les autres oxydes. Le phosphate « hors-couche » représentée par de la latéritoïde phosphatée est très feral (20,3%).

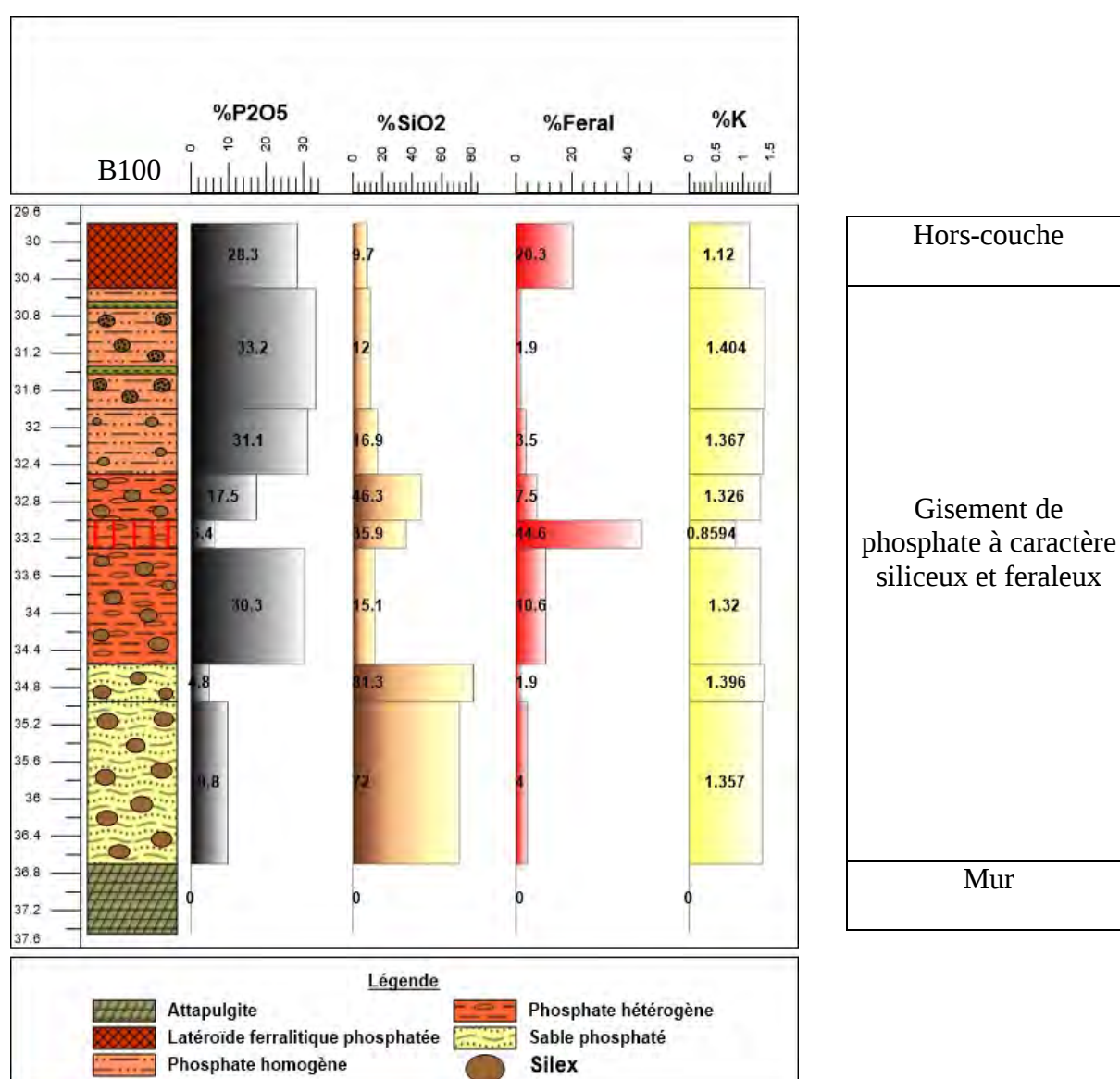


Figure 23 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B100

II.2.8 Sondage B62

La silice est l'oxyde le mieux représenté dans les faciès. La constance de cet oxyde est due à la présence de faciès siliceux, notamment un banc de quartzarénite phosphatée et du sable intercalé dans du phosphate argileux. Ces deux niveaux susmentionnés ont des teneurs très élevées en SiO_2 (88,6%), ce qui les appauvrit en P_2O_5 (3,06% en moyenne). Au-dessus, du phosphate hétérogène représente la couche exploitable et est moyennement phosphaté (26,3%). Le phosphate « hors-couche » est représenté par du grès phosphaté à silex très riche en SiO_2 (53,6%) et également feraleux (11,6%), il renferme la plus faible teneur en K (0,915%).

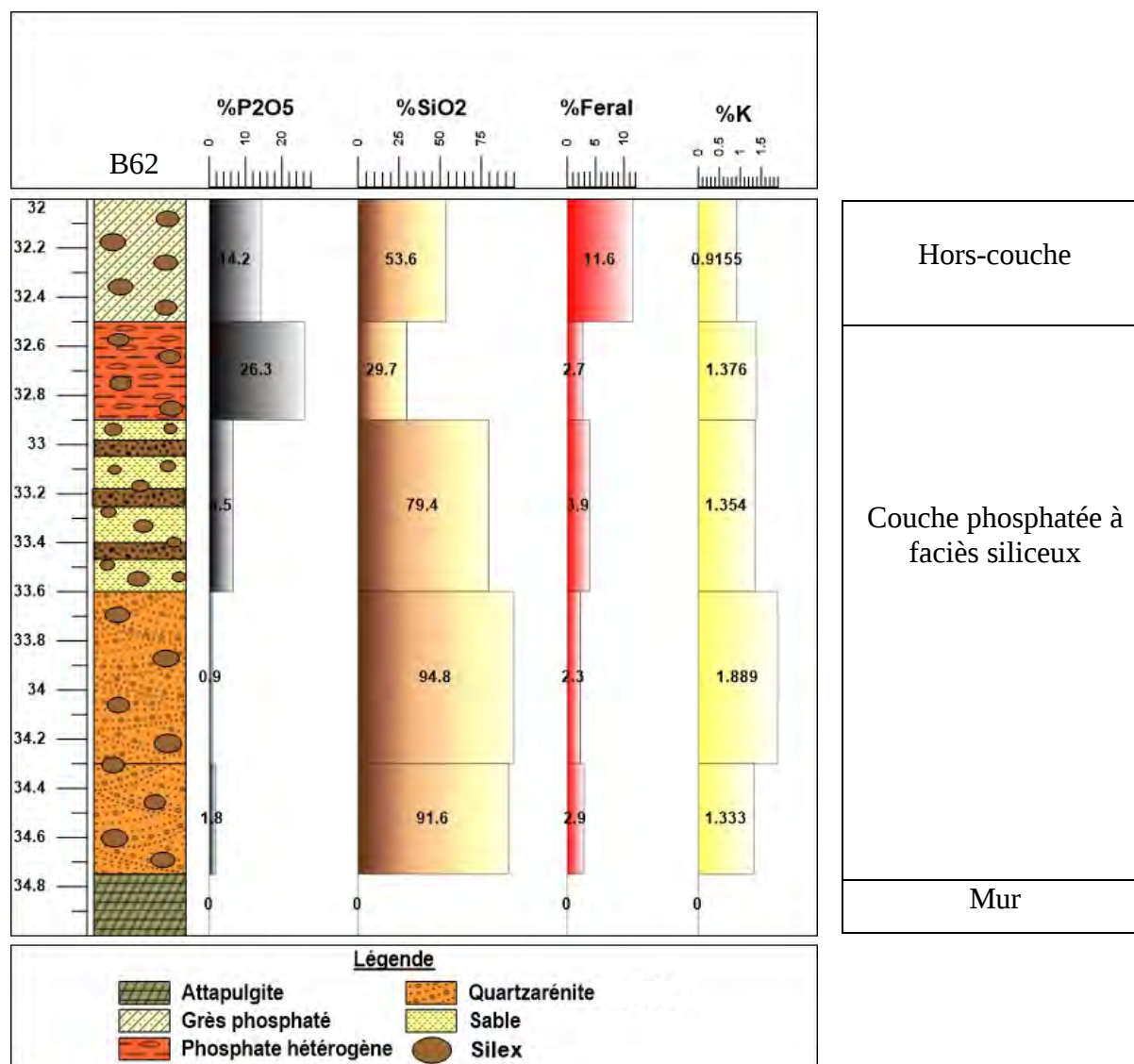


Figure 24 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B62

II.2.9 Sondage B6

Ce sondage est à dominante calcaire. Il débute à la base par un banc de calcaire massif et au-dessus, il s'intercale dans les niveaux à phosphate hétérogène et à argiles. Ils renferment de fortes teneurs en K (1,572 et 2,211) qui, plus elles sont élevées, plus les pourcentages en P_2O_5 , en SiO_2 et feral sont faibles. Les conditions de sédimentation ont dû favoriser la précipitation de la calcite en association avec les particules argileuses, d'où la présence de marnes. Le minerai homogène au sommet est très phosphaté (32,1%) et faible pour les autres oxydes. Le phosphate « hors-couche » au-dessus des argiles du toit est représenté par du phosphate homogène feral (4,4%).

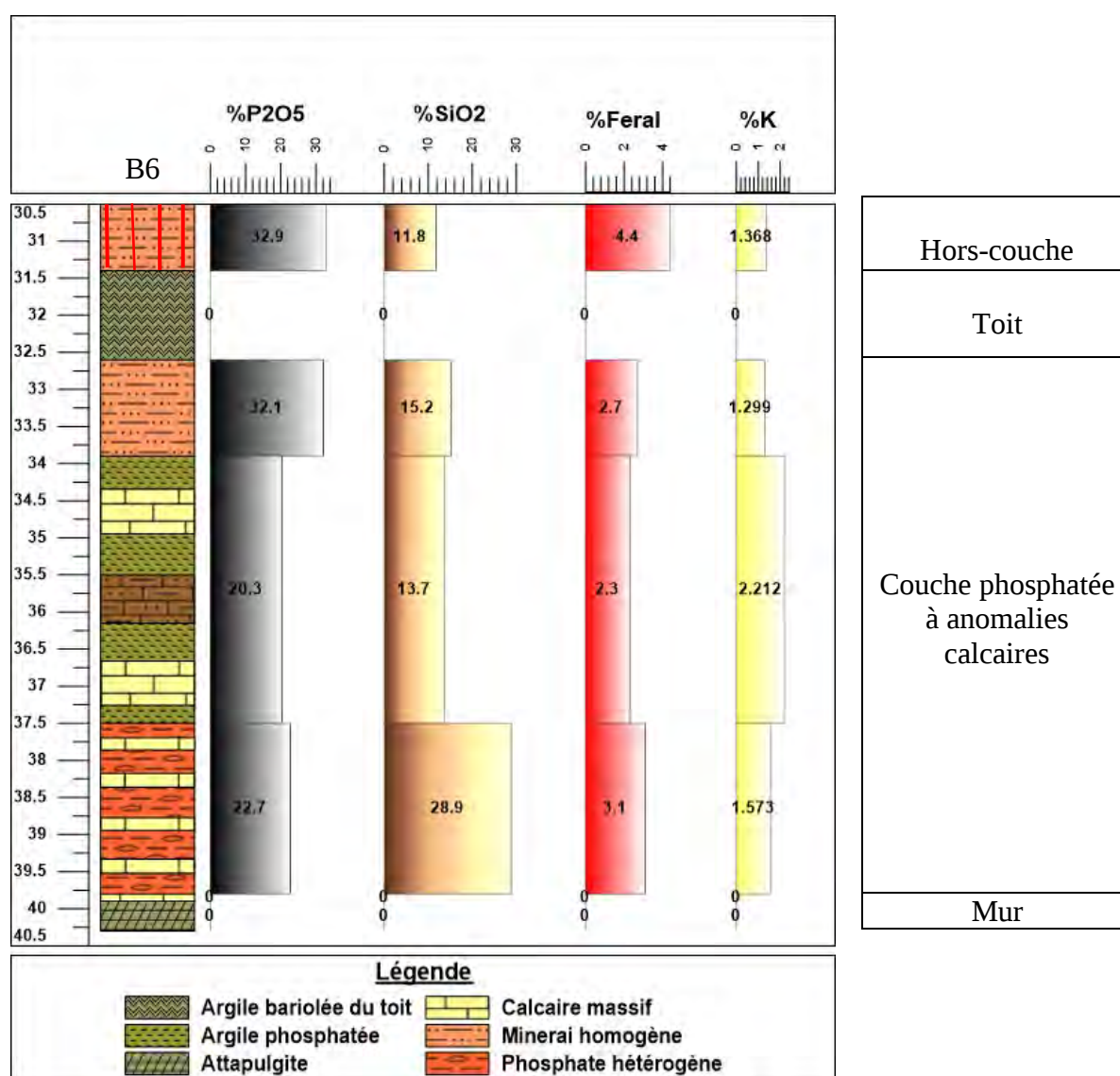


Figure 25 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B6

III Cartographie comparée de la couche phosphatée exploitable et des anomalies de couche

Pour comprendre la géométrie du gisement phosphaté, une série comparative de cartes stratigraphiques 2D a été réalisée. Il s'agit de la variation de la morphologie du toit, du mur et de l'épaisseur de la couche phosphaté des deux panneaux 2020 et 2021. Toutes les cartes ont été cotées par référence à la surface du sol du fait de l'absence d'informations sur l'altitude des points de sondages.

III.1 Cartes des isobathes comparées du toit de la couche utile des panneaux

L'analyse de la carte isobathe (figure 26) montre que le toit de la couche phosphatée du panneau 2020 est dans l'ensemble irrégulier, entaillé de haut-fonds situés de 30 à 32m de la surface. Ces derniers sont plus rencontrés au Sud-Ouest et au centre du panneau. Ainsi, le toit est moins profond à ce niveau et s'enfonce progressivement à l'extrême Nord-Est pour atteindre 36m de profondeur.

Tandis que la carte de la variation du toit du panneau 2021 montre que deux zones peuvent être définies suivant les profondeurs de recoupement plus importantes :

- Du Sud-Ouest jusqu'au centre, le toit est plus superficiel et est atteint à des profondeurs allant de 28 à 33m ;
- la zone Nord-Est le toit s'enfonce à ce niveau avec des profondeurs élevées (34 à 40m).

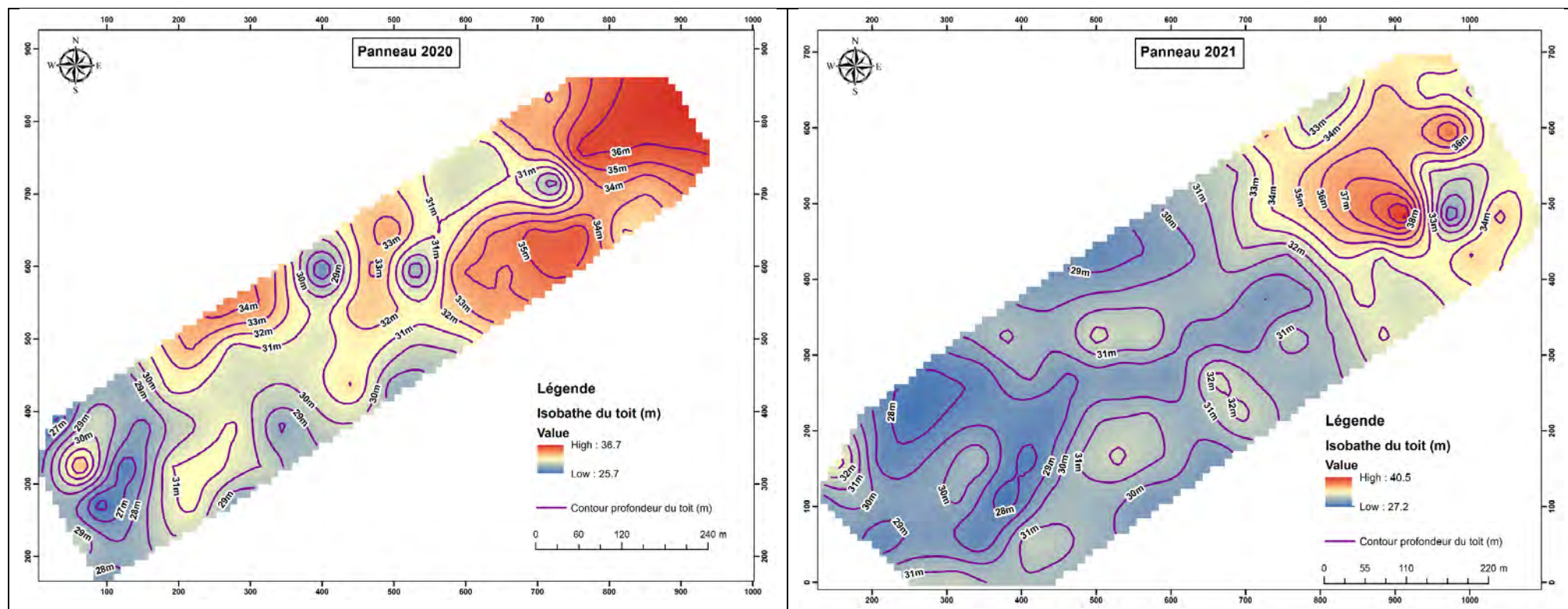


Figure 26 : Cartes comparées des isobathes du toit de la couche utile Xu des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (droite)

III.2 Cartes des isobathes comparées du mur de la couche utile Xu des panneaux 2020 et 2021

La morphologie du mur de la couche phosphatée (figure 27) du panneau 2020 est relativement semblable à celle du toit avec cette fois-ci trois zones distinctes qui se dessinent :

- A l'extrême Sud-Ouest, le mur est plus superficiel et se situe à 36 m de profondeur ;
- Au centre, la morphologie est plus ou moins régulière entre 37 à 40m ;
- Au Nord-Est, relativement régulier, le mur s'enfonce jusqu'à atteindre 42 m de profondeur.

De même pour le panneau 2021, les deux zones décrites précédemment au niveau du toit se retrouvent mais avec des profondeurs plus importantes :

- La partie Sud-Ouest jusqu'au centre où le mur est moins profond, il est recoupé entre 34 et 37m de profondeur, avec la présence de dépressions ;
- La partie Nord-Est où le mur est plus profond, allant jusqu'à 42m de profondeur.

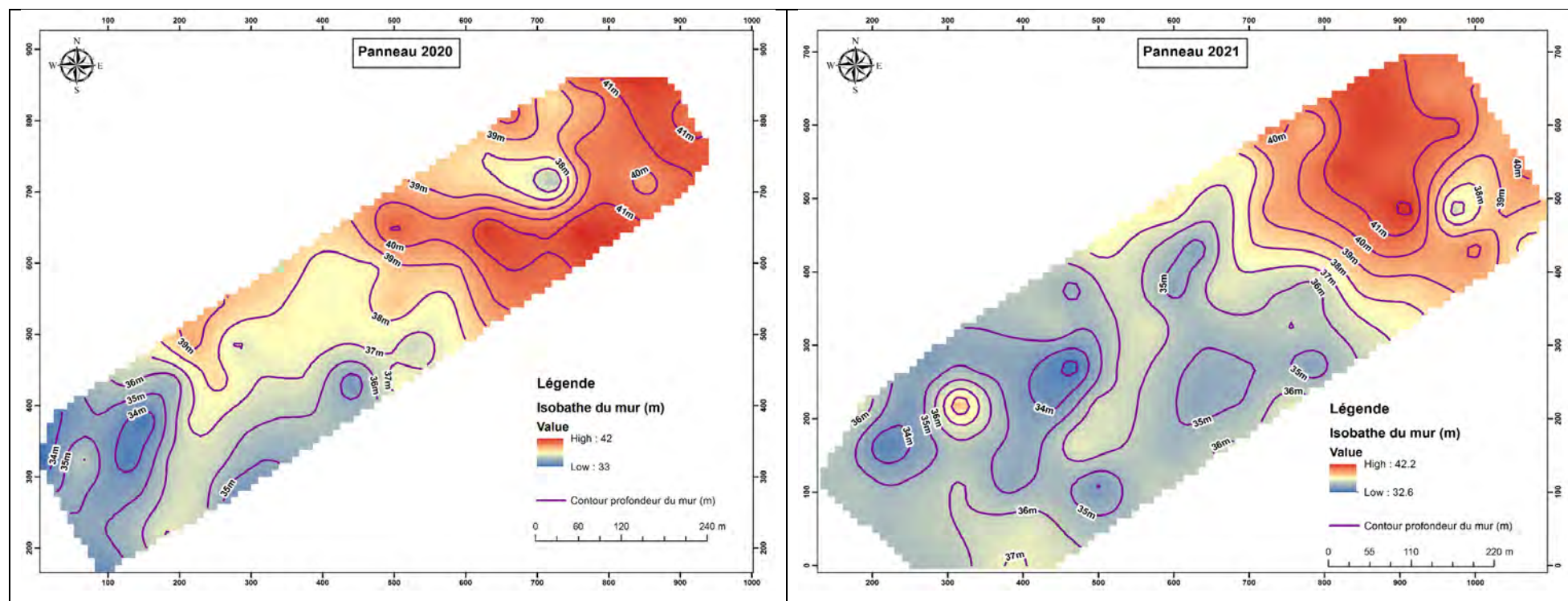


Figure 27 : Cartes comparées des isobathes du mur de la couche utile Xu des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

III.3 Cartes isopaques comparées de la couche phosphatée utile des panneaux 2020 et 2021

L'analyse des cartes isopaques des deux panneaux (figure 28) montre :

- les plus fortes épaisseurs de la couche exploitable du panneau 2020 sont observées dans la zone centre orientée vers le Nord du panneau. A ce niveau, la couche atteint son potentiel maximal de 10m, matérialisée par des formes concentriques. Il est noté également, au SW, un potentiel intéressant de 8 m. Au delà, l'épaisseur est relativement régulière à 5m-7m à l'exception de quelques passages où la couche se rétrécit au NE, au centre et au SW (3-2m) ;
- de même, au niveau du panneau 2021, les épaisseurs les plus importantes sont localisées dans la partie Nord du panneau, de l'Ouest jusqu'à l'Est où la couche phosphatée est épaisse de 8 à 9m. Partant du centre jusqu'à la partie Sud du panneau, la couche s'amincit davantage (jusqu'à 3m d'épaisseur).

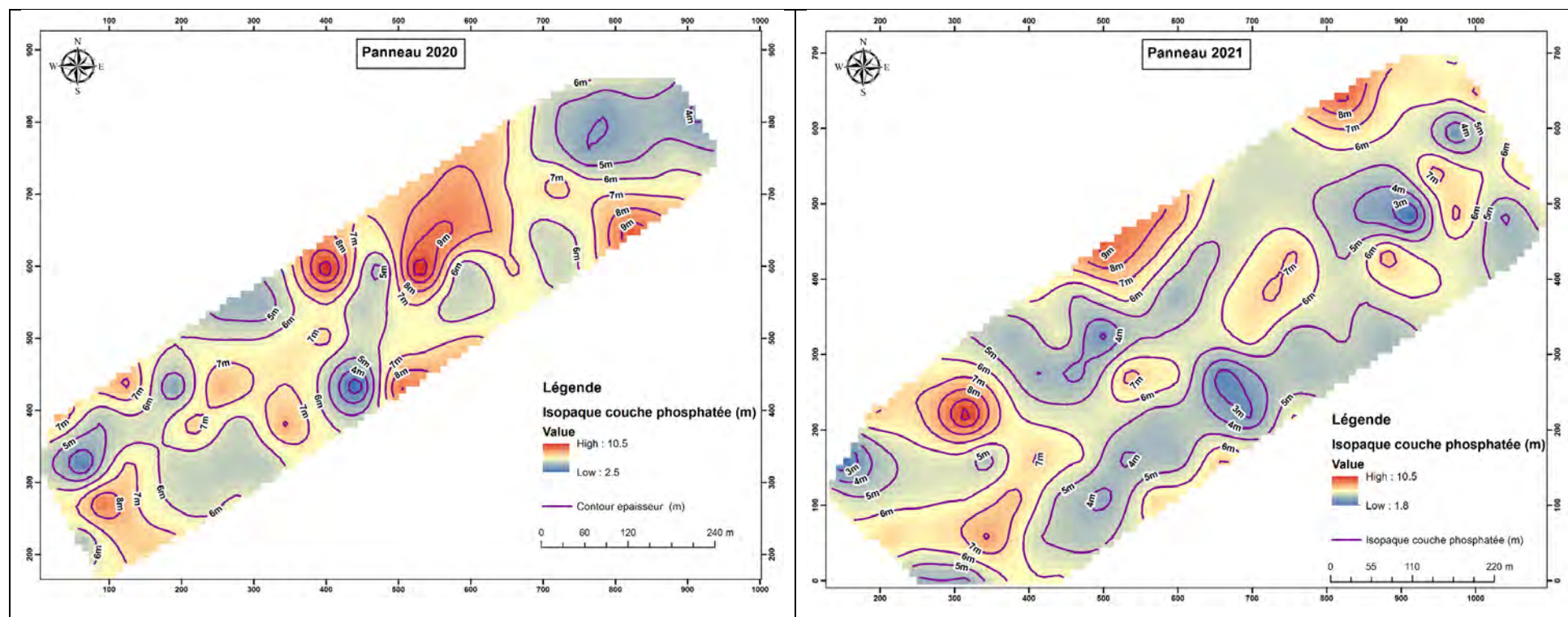


Figure 28 : Cartes isopaques comparées de la couche phosphatée utile Xu des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

III.4 Cartes isopaques comparées des anomalies

L'analyse de ces cartes présentées en annexes nous montre que :

- les anomalies de sables ne sont pas très fréquentes dans les panneaux et occupent en général de faibles épaisseurs au sein du minerai (1 à 2m), excepté le sondage A32 du budget 2020 (jusqu'à 6m d'épaisseur). Notons également qu'elles sont plus dispersées dans le panneau 2021 que 2020.
- Le feral est contrairement à la silice, fréquemment recoupé au niveau des sondages avec des épaisseurs variables : jusqu'à 4m au NE du panneau 2020 (A12, A20), faible au centre (1-2m) et importantes dans les sondages à l'extrême SW (A70, A72, A76 etc). Tandis qu'il est recoupé dans plus de sondages au niveau du panneau 2021 avec des épaisseurs moyennes à élevées (2 à 4m) à partir du centre (B51, B60, B59, B54 etc) jusqu'au WS (B93, B99, B100 etc).
- Les anomalies de calcaire sont par contre les moins recoupées. Elles sont localisées dans quelques sondages au NE du panneau 2020 (épaisseurs de 1 jusqu'à 5m à A9, A10, A16 et A19), il en est de même pour le budget 2021 où le calcaire est très épais à B67 à l'Ouest (10m), B66 et B6 (5,9m) au NE.

IV Synthèse litho-géochimique

La variabilité verticale des oxydes majeurs nous a permis de réaliser un calage lithologie/oxydes qui est nécessaire afin d'expliquer la répartition irrégulière et inégales des oxydes majeurs dans les faciès :

IV.1 La silice (SiO₂)

La silicification est un phénomène important dans cette formation phosphatée et se présente sous plusieurs aspects au sein des faciès phosphatés :

- Le silico-feral ou phosphate « hors-couche » :

Il est généralement siliceux, avec des teneurs généralement très élevées, jusqu'à plus de 70% (en A9). Ceci serait dû à une contamination sableuse au contact des niveaux supérieurs de recouvrement sableux.

- Les argiles du toit

Les teneurs en silice sont variables au niveau des argiles du toit et sont moins élevées que celles au niveau du phosphate « hors couche » (environ 20 à 30%). Elles renferment par endroits des rognons de silex issus du phénomène diagénétique précoce.

- La couche phosphatée

Le minerai de phosphate n'est généralement pas siliceux, malgré la présence de fortes concentrations à certains endroits. Ces taux élevés en SiO_2 sont dus à la présence de :

- Silex se présentant sous forme de galets, de rognons de différentes tailles ou en bancs à la base surtout, sont plus nombreux dans le minerai hétérogène. Il faut cependant noter que ces silex ne sont pas nuisibles au minerai ;
- mais aussi de faciès sableux tels que du sable fin ou grossier phosphaté sous forme de lentilles, et des bancs de quartzarénite à épaisseurs variables et peu phosphatés. Ils sont retrouvés à la base ou au sommet, mais également au sein de la couche phosphatée, ce qui explique le caractère siliceux du minerai à certains endroits. Ils sont parfois intercalés de niveaux argileux. Ces faciès sableux causent beaucoup de problèmes lors de l'exploitation du minerai. La mise en place de ce sable est liée selon Atger (1970) à des fracturations se produisant en même temps que se forme le fossé d'effondrement associé aux mouvements tectoniques et activités volcaniques dans la presqu'île du Cap-Vert.

IV.2 Le feral ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$)

- Le niveau silico-ferralitique ou phosphate « hors-couche »

Le feral se concentre principalement à ce niveau (jusqu'à plus de 30%), jusqu'au sein de la couche phosphatée, avec une répartition généralement décroissante. Il semble y avoir en effet une continuité de variation de teneurs en Fe_2O_3 et Al_2O_3 depuis le phosphate « hors-couche » jusqu'aux argiles (Slansky et al., 1964). Cette présence importante de feral dans ce phosphate alumineux ou « hors-couche » résulte de l'altération continentale de type latéritique d'une formation de phosphate de chaux préexistante, ce qui explique la pauvreté en phosphore de ce niveau.

- Les argiles du toit

Les concentrations ferrugineuses des argiles du toit se font par migration des oxydes ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) à partir des couches sus-jacentes de phosphate alumineux susmentionné. Elles servent d'écran à l'altération latéritique qui n'a pu se développer vers le bas : la couche argileuse dans ce cas fonctionne comme un piège où le fer s'accumule (Slansky et al., 1964). Elle sert ainsi de barrière au minerai contre les produits issus de cette altération, du fait de son imperméabilité.

- La couche phosphatée

Lorsque les argiles du toit sont altérées, le feral est pris dans des solutions qui percolent à travers les couches sous-jacentes. Ces circulations d'eaux provoquent en même temps la dissolution de grains phosphatés où le P_2O_5 et CaO sont partiellement remplacés par le Fe_2O_3 et Al_2O_3 (Slansky et al., 1964). Ce feral peut également provenir du lessivage du phosphate « hors-couche ». Lorsque ces oxydes de feral occupent une proportion importante dans le minerai, nous parlons de phosphate feraléux qui devient par conséquent très pauvre en phosphore. La formation de phosphates feraléux n'est ainsi pas synchrone au dépôt des phosphates. Tout comme la silice, le feral constitue un problème majeur lorsqu'il est présent en abondance dans le minerai.

IV.3 Le rapport K ($\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$)

Les études antérieures des phosphates de Taïba (Flicoteaux, 1982 ; Slansky et al., 1964) ont mis en évidence l'altération par lessivage des carbonates en utilisant les variations du ratio géochimique $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$. Ce rapport définit le degré de « calcicité » du minerai. Si $K < 1,45$, le minerai est qualifié de bon au-delà de cette valeur, il est considéré comme calciteux.

- Le niveau silico-ferralitique ou phosphate « hors-couche »

Les teneurs en K y sont plus faibles (jusqu'à 1,35%). En effet, les valeurs de $K < 1,31$ attestent la présence de minéraux alumineux ou alumino-calciques, qui sont caractéristiques de faciès phosphatés altérés très pauvres en K (minimum 0,46%) de ce niveau supérieur.

- Les argiles du toit

Tout comme le niveau à silico-feral, le rapport K y est négligeable et atteint rarement 1,4% dans la plupart des sondages. Des valeurs supérieures à celle-ci renseignent soit sur la présence de

niveaux calcaires qui n'ont pas subi de lessivage, soit sur la présence de marnes intercalées dans ces argiles.

- La couche phosphatée

La couche phosphatée est généralement peu calcaire (jusqu'à 1,44%), mais elle passe latéralement et brusquement dans certains sondages, à des carbonates très peu phosphatés formant des piliers au sein de la couche : il s'agit essentiellement de bancs calcaires ou de marno-calcaires, renfermant parfois des rognons de silex noirs, avec des teneurs en K très élevées (2 à 13%). On peut également observer un calcaire cristallin fossilifère à la base de la couche (B67). La calcite se forme souvent en association avec les minéraux phosphatés dans les milieux de dépôt du phosphate. Elle est ainsi en proportion variable au niveau du minerai, suivant le lieu de prélèvement. Mais elle est surtout marquée dans le phosphate hétérogène avec des teneurs allant jusqu'à plus de 3% de K, entraînant un affaiblissement net des teneurs en phosphore dans le minerai, tandis que le phosphate homogène est moins calciteux (jusqu'à 1,49%).

IV.4 Le phosphore (P_2O_5)

Il détermine la qualité du minerai et est présent dans tous les faciès le long des sondages, avec des teneurs variables.

- Le silico feral ou « hors-couche »

Il s'agit de phosphate altéré, marqué par des teneurs très élevées en feral et silice et est par conséquent très pauvre en phosphore (<20%), ce qui le rend difficile à exploiter.

- Les argiles du toit

Elles sont faibles à moyennement phosphatées (environ 25%). Selon Slansky *et al.* (1964), ces argiles du toit sont d'origine sédimentaire et sont comparables aux niveaux argileux intercalés dans le phosphate de chaux sous-jacent, mais elles correspondent à une période plus longue de ralentissement des apports phosphatés.

- La couche phosphatée

Les plus fortes teneurs en P_2O_5 sont notées dans le phosphate homogène (jusqu'à 36%). Le phosphate hétérogène est moins riche du fait des éléments figurés qui y sont retrouvés : silex et/ou lits d'argiles. Il peut être également feraléux par endroits. Dans certains sondages, la

couche phosphatée recèle des anomalies et il est constaté que leur présence au sein de cette couche entraîne une nette diminution du P_2O_5 :

- la silice est l'une des principales causes d'appauvrissement du minerai en phosphore. En effet, une pollution sableuse affecte négativement l'exploitation du minerai notamment lors de la production du fait du coût élevé du traitement de sable. Son élimination quand il est chargé avec le minerai nécessite de ce fait des réactifs à coût élevé pour l'usine de traitement. Les silex présents surtout dans le minerai hétérogène ne sont pas considérés comme des anomalies du fait qu'ils n'affectent pas du point de vue minéralogique et géochimique le phosphore et ils sont facilement séparés des particules phosphatées colmatées sur les blocs stériles lors de l'exploitation ;
- tout comme la silice, le feral constitue un problème majeur lorsqu'il est en abondance dans le minerai. La diminution de teneurs en P_2O_5 correspond généralement à un taux élevé en feral. Ces fortes concentrations proviendraient des niveaux supérieurs soit par l'absence des argiles du toit qui sont des couches protectrices soit par érosion du silico feral, et de ce fait des eaux météoriques s'infiltrent à travers les couches phosphatées, entraînant en même temps les oxydes de fer et d'aluminium de ces niveaux qui s'accumulent dans le minerai (Samb, 2007).

Il faut également noter que le caractère néfaste du feral est d'autant plus élevé lorsqu'il est combiné à la silice ;

- la calcite, représentée par des bancs de calcaire recoupés surtout à la base, cause beaucoup de problèmes lorsqu'elle est en abondance dans le phosphate. Selon Atger (1970), quelle que soit sa concentration, la calcite est toujours présente dans un minerai de phosphate sédimentaire. Elle est ainsi représentée sous forme libre ou diffuse dans le minerai ou sous forme de bancs de calcaires aux contacts discontinus, ayant cependant des caractères sédimentaires communs avec le phosphate. D'après Slansky (1980), le rapport K égal à 1,31 caractérise les faciès phosphatés à fluorapatites, s'il est inférieur à 1,3, il y a présence de minéraux alumineux dans les phosphates altérés. Dans le cas où K est supérieur à 1,31, il y a substitution de PO_4 par CO_3 dans l'apatite et des teneurs supérieures à 1,57 témoignent de la présence de la calcite à l'état libre dans le minerai.

Conclusion partielle

Dans l'ensemble, nous remarquons une même succession lithologique de la base au sommet au niveau des sondages des deux panneaux, comparable aux études lithostratigraphiques réalisées auparavant sur le panneau de Tobène (Atger, 1970 ; Slansky, 1980 ; Flicoteaux, 1982 ; Samb, 1998). Les plus fortes teneurs en P_2O_5 sont notées au niveau de la couche phosphatée utile, toutefois le minerai homogène recèle les plus forts taux en phosphore. Certaines unités lithologiques comme les argiles du toit ou le phosphate « hors-couche » sont parfois absentes. La morphologie des isobathes du toit et du mur des deux panneaux démontre que la couche phosphatée est inclinée dans le sens SW-NE, et s'enfonce suivant cet axe. Les cartes isopaques montrent une irrégularité de l'épaisseur du minerai, avec un amincissement de la couche utile dans certaines zones coïncidant avec la présence d'anomalies, surtout dans les zones riches en fer qui sont les plus marquées au niveau des panneaux. La présence d'épaisseur importante de fer dans le minerai est souvent caractérisée par une épaisseur faible ou nulle de la couverture argileuse du toit.

Chapitre 3 : Etude géochimique comparative des oxydes majeurs de la couche phosphatée au niveau des panneaux d'exploitation 2020 et 2021 : cartographie géochimique comparée, corrélations des éléments chimiques et synthèse des résultats des analyses chimiques.

I Cartographie géochimique comparée

Des cartes isoteneurs sont établies afin de connaître la répartition spatiale de chaque oxyde majeur présent au sein de la couche phosphatée, dans l'ensemble des secteurs d'étude. Ces cartes ont pu être réalisées grâce aux résultats des analyses chimiques obtenues sur chaque sondage, en procédant ensuite au calcul des moyennes pondérales de chaque élément chimique (P_2O_5 , SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 et K) d'un sondage donné, grâce à la formule ci-dessous :

$T_m (\%) = \sum [(X_i/X_t) \times T_i]$, avec X_i = épaisseur d'un faciès i ;

X_t = épaisseur cumulée de tous les faciès du sondage

T_i = teneur en oxyde d'un faciès i

Les paramètres géochimiques décrits précédemment (Chapitre I) serviront à déterminer les zones de répartition des éléments chimiques. Ces cartes ont pu être confectionnées grâce au logiciel ArcGIS.

I.1 Variation latérale du feral ($Fe_2O_3 + Al_2O_3$) dans les panneaux 2020 et 2021

Les teneurs varient de 0,65 à 11,1% pour le panneau 2020 avec une moyenne de 3,12, tandis qu'au niveau du budget 2021, les teneurs sont plus élevées et vont de 0,88 à 17,15% pour une moyenne de 3,85. Selon le Service Géologique des ICS, un taux de feral supérieur à 4% signifie que le minerai phosphaté est feral et causera des problèmes au cours de l'exploitation. Les cartes de répartition latérale du feral (figure 29) montre que deux ensembles de valeurs peuvent être dégagés au niveau du panneau 2020 :

- o Teneurs faibles [0,7 à 4%] : la majeure partie des sondages du panneau allant du Nord-Est jusqu'au Sud-Ouest, ont des % en feral compris dans cet intervalle de valeurs ;
- o teneurs moyennes à élevées [4,1 à 10,8%] : caractérisant la présence d'anomalies de feral qui sont localisées à l'extrême Sud-Ouest, marquées par des formes concentriques autour des points ;

Tandis qu'au niveau de la carte du panneau 2021, trois zones sont bien visibles :

- o zones à teneurs faibles [0,2 à 4%] : rencontrées dans une partie des sondages situés au Nord-Est jusqu'au centre et quelques points au Sud-Ouest ;
- o % moyens [4,1 à 6%] : couvrent également une partie du panneau allant du centre au Sud-Ouest ;
- o % très élevés [6,1 à 17%] : présents dans des sondages localisés surtout au centre.

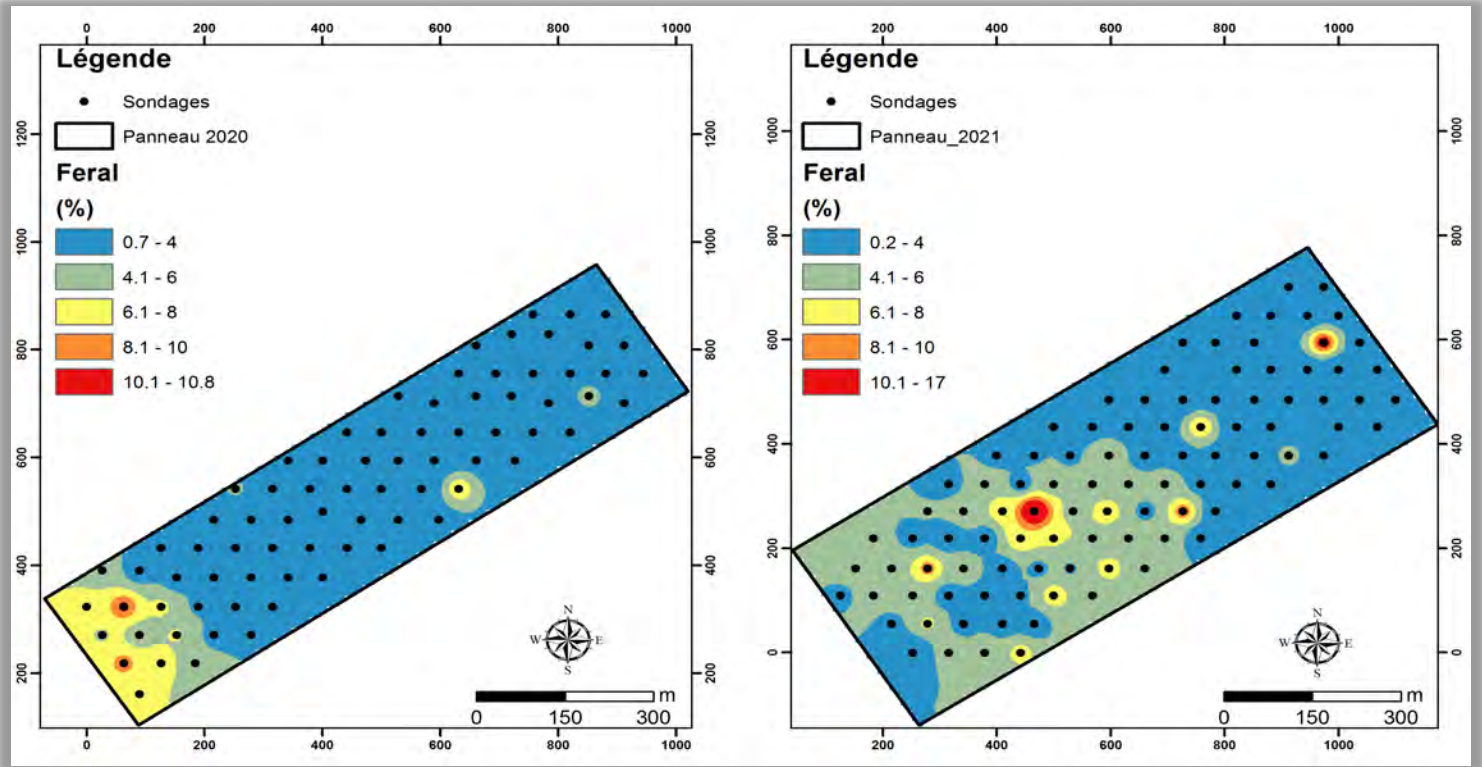


Figure 29 : cartes des isoteneurs en feral dans les panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

I.2 Variation latérale de la silice (SiO_2) dans les panneaux 2020 et 2021

Les pourcentages en silice du panneau 2020 varient de 4,12 à 49,35%, pour une moyenne de 18,03, tandis que ceux du panneau 2021 sont beaucoup plus élevés et vont de 5,49 à 77,79% avec une moyenne de 20,51. La valeur de référence est de 40%, des teneurs supérieures témoignent d'une forte présence de silice. L'analyse des deux cartes (figure 30) montre que la quasi-totalité de la surface des panneaux est dominée par des teneurs en silice faibles allant jusqu'à 30%. Des teneurs moyennes (30 à 40%) sont notées dans quelques sondages, sous forme d'enclaves, évoluant jusqu'à atteindre des valeurs en silice élevées (>40%) marquant la présence d'anomalies de sable :

- o au panneau 2020 dans des sondages comme A32, A37 au centre dans la partie Nord, et A76 au Sud-Ouest,
- o des anomalies de SiO_2 beaucoup plus répandues, trouvées dans les points tels que B62, B54 au centre, B100 et B99 au Sud-Ouest.

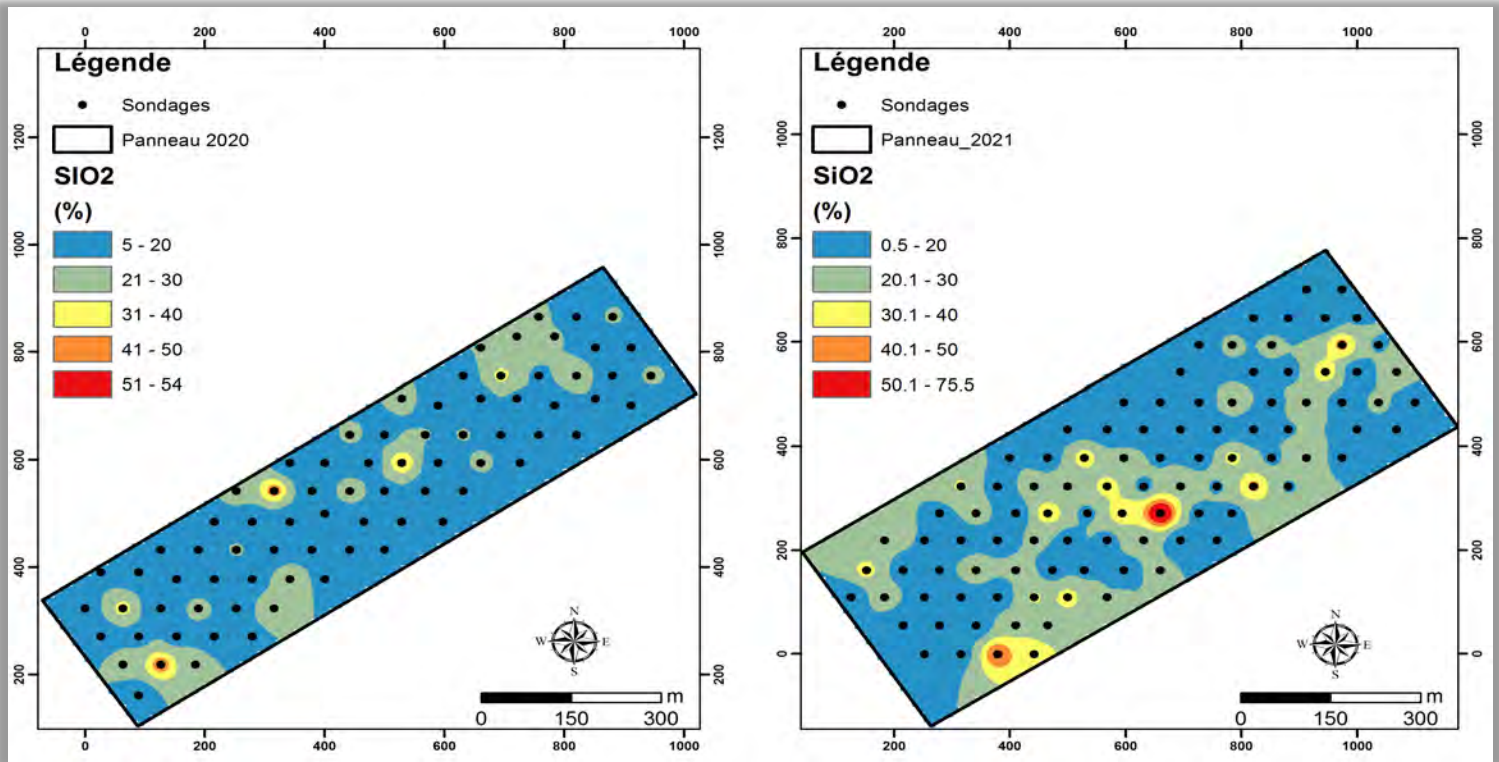


Figure 30 : cartes des isoteneurs en SiO_2 des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

I.3 Variation latérale du CaO dans les panneaux 2020 et 2021

Les teneurs en CaO sont comprises entre 16,97 et 76,15%, pour une moyenne de 42,20% au niveau du panneau 2020, et varie de 10,18 à 49,73% dans le panneau 2021 avec une moyenne de 40,07%. L'analyse des cartes (figure 31) montre que des teneurs élevées en calcite (>40%) sont plus présentes dans le panneau 2020 que 2021.

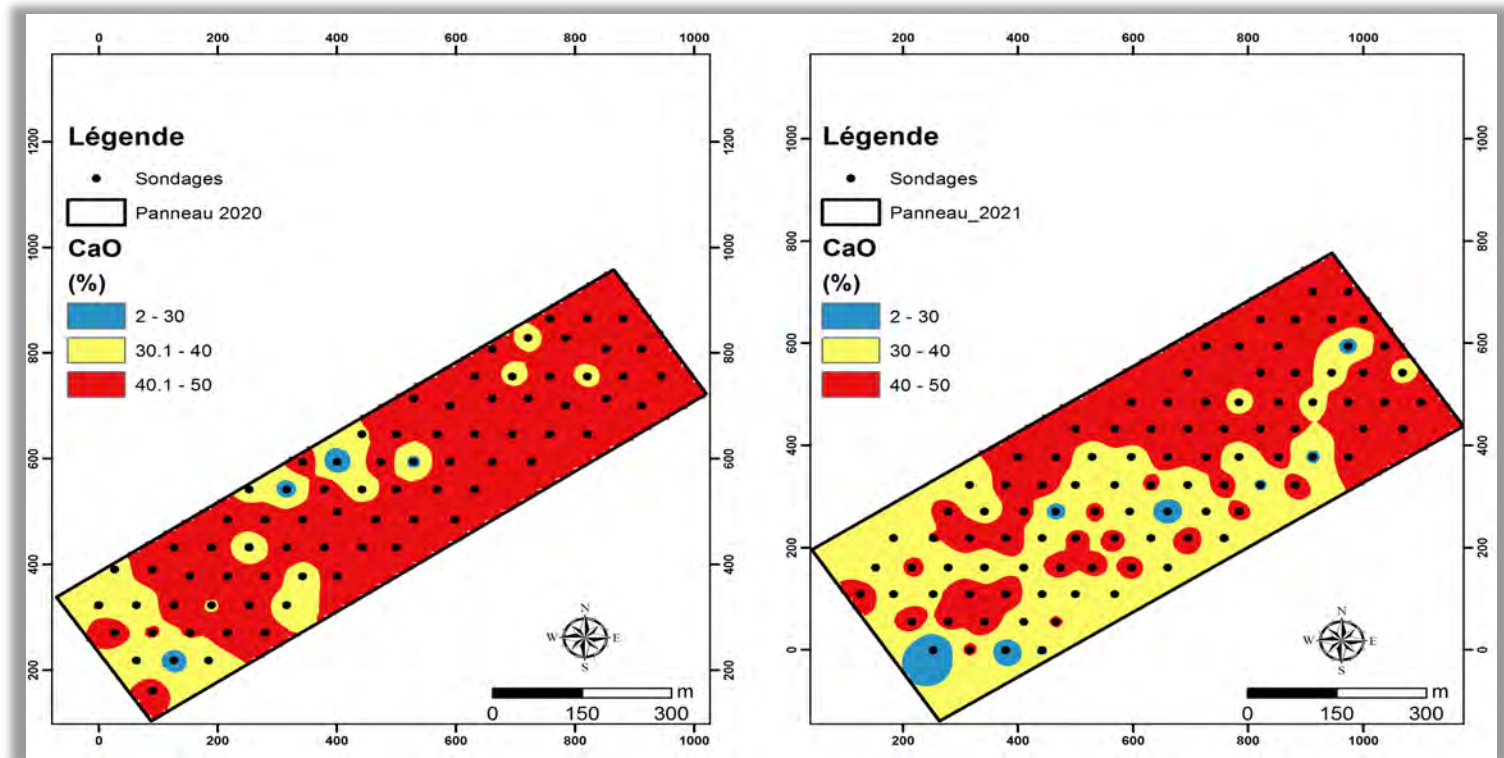


Figure 31 : Cartes des isoteneurs en CaO des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

L'établissement de cartes isoteneurs du rapport K permettra de mieux analyser la répartition de la calcite dans le phosphate. Le ratio K ($\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$) désigne la proportion de calcite présente au sein du phosphate. Au niveau du panneau 2020, le rapport K varie de 0,53 à 4,3 pour une moyenne de 1,41 tandis que pour 2021, le K est plus réduit allant de 0,79 à 3,5 avec une moyenne de 1,38. En analysant les cartes, il est remarqué que la calcite est faiblement présente dans le minerai avec des teneurs en K inférieures à 1,45 pour la majorité des sondages. Des zones à K supérieur à 1,45 renferment des anomalies de calcaire, selon la convention adoptée au Service de Géologie des ICS. Ces zones à anomalies de calcaire dans les panneaux 2020 et 2021, sont ainsi localisées :

- o dans des sondages (A16, A9, A19 etc) au NE du panneau 2020 à K élevé ($>1,46$) ;
- o pour le panneau 2021, les zones à K entre 1,46 et 2 sont situées au Nord-Est (B6), les parties nord et centre (B18) et l'Ouest (B67) sont les zones les plus saturées en K (3,5).

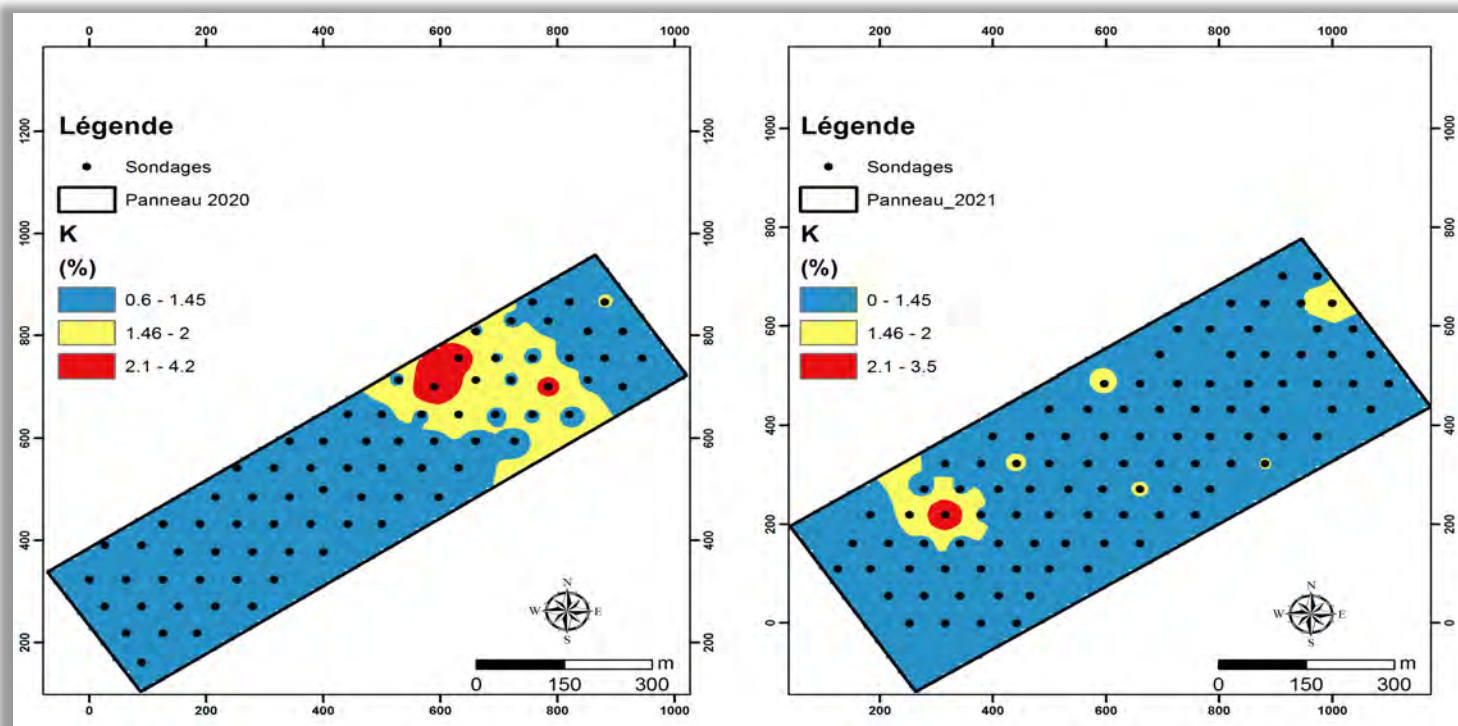


Figure 32 : Cartes des isoteneurs en K des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

I.4 Variation latérale des teneurs en P_2O_5 dans les panneaux 2020 et 2021

Le phosphore P_2O_5 est l'élément chimique qui détermine la qualité du minerai. Celle-ci est dite bonne lorsque les teneurs en phosphore sont supérieures à 22%. Les valeurs minimales et maximales obtenues après calcul à partir des analyses chimiques de chaque sondage sont respectivement 17,44 et 36,035% avec une moyenne de 30,38% pour le panneau 2020, tandis qu'au niveau du budget 2021, les teneurs en phosphore sont comprises entre 7,34 et 36,22% pour une moyenne de 29,43%. Ces valeurs susmentionnées donnent une idée sur l'enrichissement en phosphore des deux panneaux. L'analyse des cartes isoteneurs montre ainsi :

- o au niveau du panneau 2020 : des sondages à teneurs très élevées situées entre 31 et 36% qui couvrent la majeure partie du budget 2020 et des zones à potentiel intéressant (23 à 30%) ;
- o au niveau du panneau 2021 : des valeurs quasi semblables à celles du panneau 2020 avec des pourcentages très élevés (31 à 35,8%) mais moins répandues que le budget 2020 du NE jusqu'au centre et des teneurs comprises entre 23 et 30% couvrant la majeure partie des sondages, plus présents au centre jusqu'au Sud-Ouest ;

- o des points où le phosphore est faible (<22%), localisés dans la partie Nord Est du panneau 2020 et dans peu de sondages au SW, tandis qu'ils sont plus visibles dans le budget 2021 au centre, au NE et beaucoup plus au Sud-Ouest.

Il est également remarquable de constater que les points à pourcentages faibles en P_2O_5 correspondent aux zones où les anomalies sont recoupées :

- au niveau du panneau 2020, les anomalies sont localisées dans quelques sondages au SW, plus précisément dans A65, A76 où le feral et la silice dominant, au centre dans A32 et A37 où il y a présence de sable et au NE plus précisément dans A9, A16 et A10 où le calcaire domine ;
- le budget 2021 où les anomalies sont plus apparentes, localisées au Sud-Ouest avec B67 où le calcaire est bien représenté et les sondages B62, B10, B54, B59, B99 et B100 où le feral et/ou la silice dominant au NE, au centre et au SW.

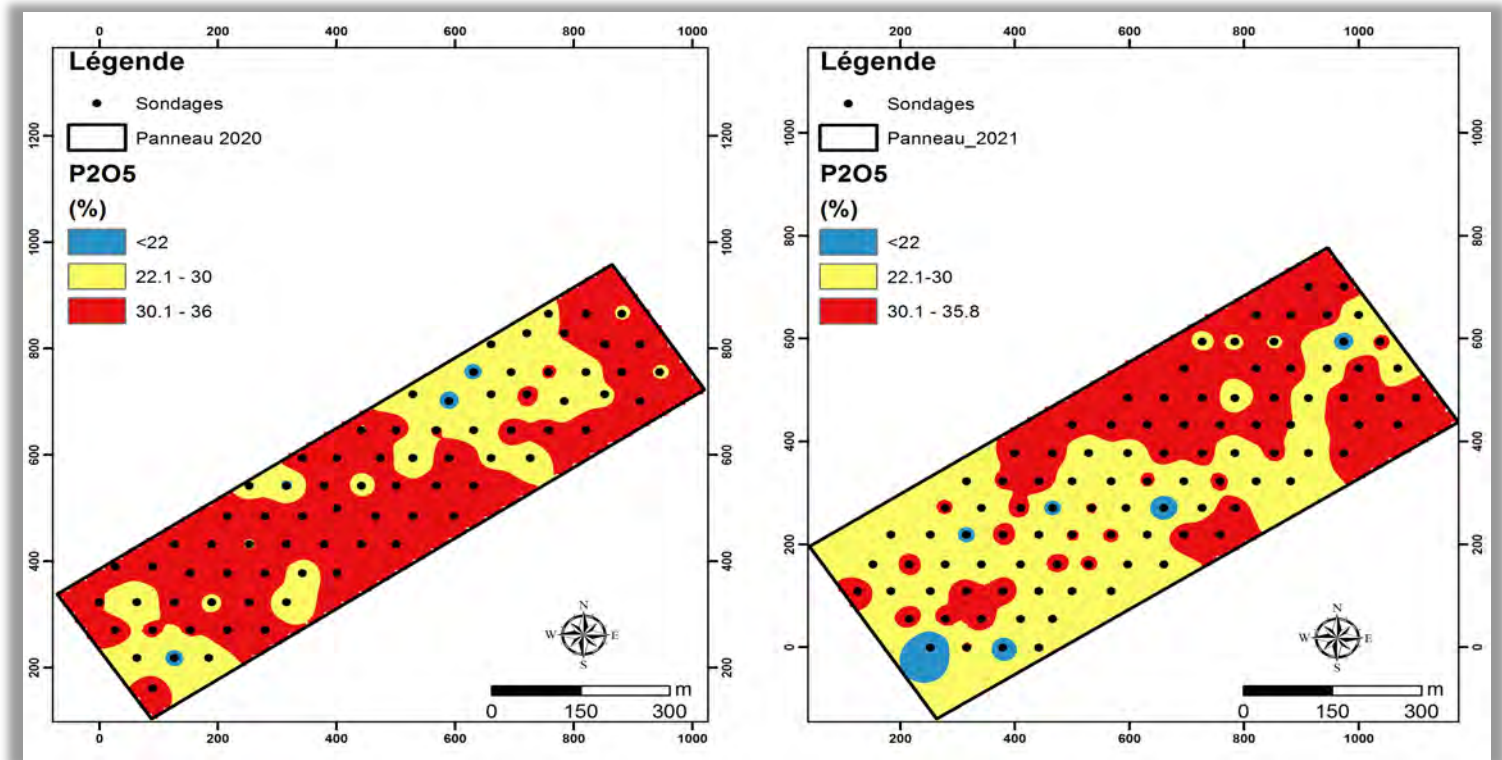


Figure 33 : Cartes des isoteneurs en P_2O_5 des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

II Corrélations des oxydes majeurs

La figure 34 représente les diagrammes de corrélation des oxydes (SiO₂, feral et CaO) en fonction du P₂O₅ pour chaque panneau. Ils ont été réalisés grâce au logiciel OriginPro, en utilisant la formule de calcul du coefficient de corrélation de Pearson :

$$r = \frac{\sum (xi - \bar{x})(yi - \bar{y})}{\sqrt{\sum (xi - \bar{x})^2 \sum (yi - \bar{y})^2}}$$

r = coefficient de corrélation

x_i = valeurs de la variable x d'un échantillon

$\bar{x}$ = moyenne des valeurs de la variable x

y_i = valeurs de la variable y d'un échantillon

$\bar{y}$ = moyenne des valeurs de la variable y

Cette étude porte sur l'ensemble des sondages des panneaux, elle est nécessaire afin de vérifier s'il existe une relation linéaire entre le phosphore et les autres oxydes. Selon la forme du nuage de points observée et les coefficients de corrélation obtenus (tableau 1), différentes interprétations seront établies. Il faut également noter que le panneau 2021 compte au total plus de sondages (100) que le panneau 2020 (78), les résultats des corrélations seront donc plus précis au niveau du budget 2021.

II.1 Corrélation SiO₂/P₂O₅

Pour l'ensemble des sondages étudiés, le diagramme SiO₂/P₂O₅ montre une évolution en sens inverse des teneurs obtenues au niveau des deux panneaux, avec des coefficients des droites de régression négatives ($r = -0,79722$ pour 2020 et $-0,89302$ pour 2021). Ces diagrammes montrent que la relation entre ces deux oxydes est fortement antagoniste : pour de fortes valeurs en silice, le phosphore est très faible et inversement, les plus faibles teneurs en silice sont accompagnées de phosphore très élevé.

II.2 Corrélation feral/P₂O₅

Les coefficients de corrélation des droites sont faibles : $-0,28274$ pour le panneau 2020 et $-0,42788$ pour 2021. Les droites de régression montrent que feral et phosphore sont opposés, mais leur relation est modérément linéaire comparée à la silice. De très fortes teneurs en feral correspondent à des taux faibles du phosphore.

II.3 Corrélation CaO/P₂O₅

Les coefficients de corrélations positives (0,31997 et 0,88239) montrent qu'il existe une relation parfaite entre le CaO et le P₂O₅. L'évolution des oxydes se fait dans un même sens : l'un augmente en même temps que l'autre. Ces diagrammes témoigneraient de la similarité des conditions de dépôt du phosphore et de la calcite.

Tableau 1: Coefficients de corrélation (r^2) entre le P₂O₅ et les oxydes majeurs

		SiO ₂	CaO	Feral
Panneau 2020	P ₂ O ₅	-0.79	0.31	-0.28
Panneau 2021	P ₂ O ₅	-0.89	0.88	-0.42

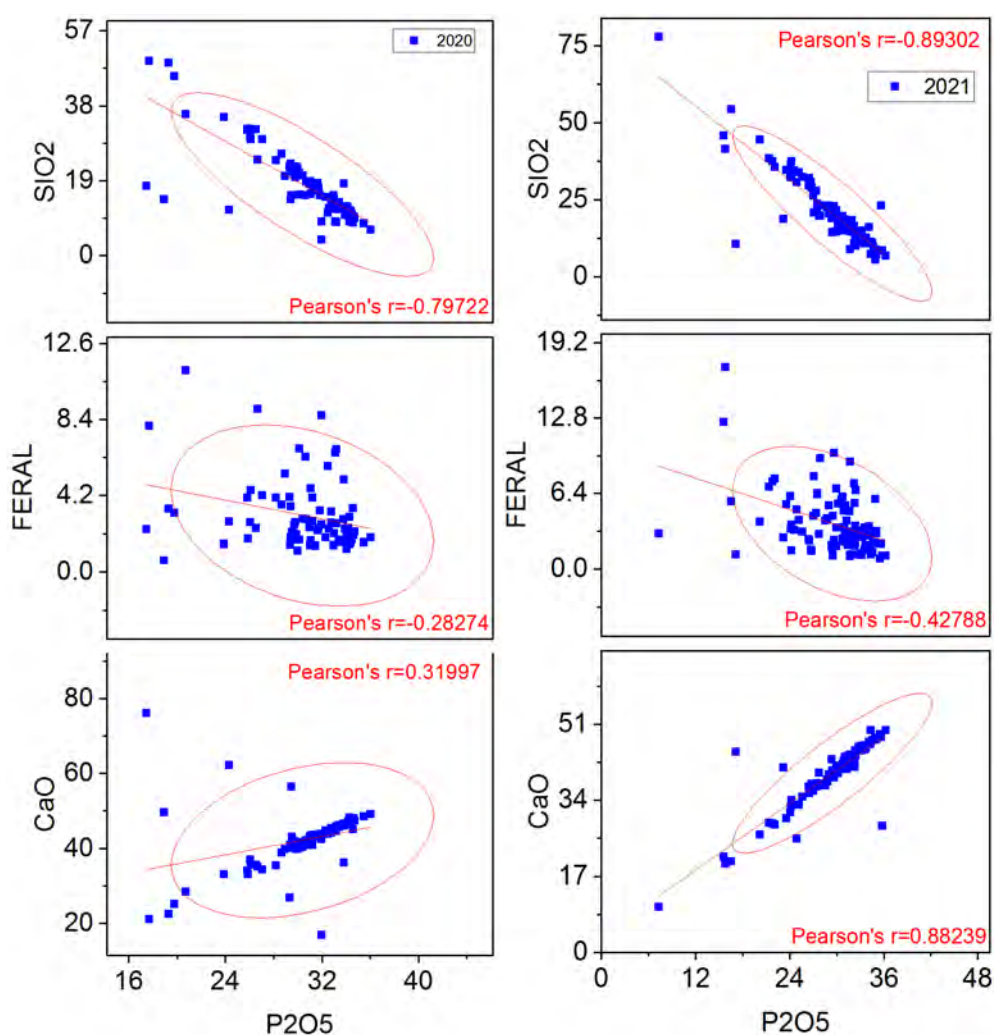


Figure 34 : Corrélations des oxydes majeurs des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

III Synthèse sur les teneurs moyennes en oxydes des anomalies de couche

Les résultats des analyses chimiques montrent que :

- sur 78 sondages étudiés, le panneau 2020 recèle 12 sondages à anomalies de sable (dont trois ont des teneurs moyennes supérieures à 40%), 47 renferment du feral élevé à certains niveaux (18 sondages à pourcentage de feral moyen > 4%) et 6 sondages ont des anomalies de calcaire (4 sondages à %CaO > 40%) ;
- tandis que le panneau 2021 est couvert par 100 sondages au total avec 25 sondages à anomalies de sable (dont 4 ont des taux moyens à SiO₂ > 40%), 68 sont à feral (37 à feral moyen > 4%) et 5 sondages renferment du calcaire (avec deux à CaO > 40%).

Les sondages (présentés en annexes) à teneurs moyennes dépassant les valeurs de référence de la silice, du feral et de la calcite ont permis d'établir des diagrammes récapitulatifs.

III.1 La silice

La figure 35 représente les diagrammes récapitulatifs des teneurs moyennes en SiO₂ supérieures à 40% (fig. 35) des sondages à anomalies de sable au niveau des panneaux 2020 et 2021. Ces teneurs moyennes en silice sont plus élevées au panneau 2021 (54,59%) que 2020 (47,93%), accompagnées ainsi de teneurs faibles en P₂O₅ (18,92 et 14,97% respectivement) et en CaO (24% et 18,45%). Les moyennes en feral supérieures à 4% montrent que les couches de sable sont généralement « feraleuses » (4,92% et 7,47%).

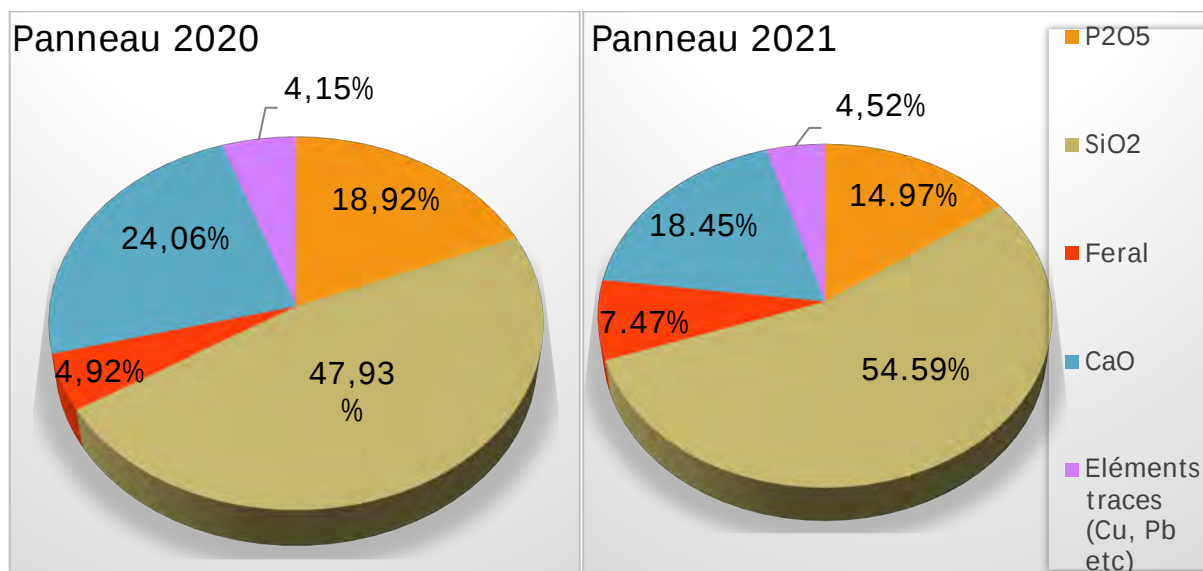


Figure 35 : Diagrammes récapitulatifs des teneurs moyennes des oxydes majeurs dans les anomalies à sable

III.2 Le feral

Il constitue l'anomalie la plus fréquemment rencontrée au niveau des sondages avec des teneurs moyennes quasi semblables (aux environs de 6%) pour les deux secteurs d'étude. Contrairement aux résultats obtenus pour la silice, les niveaux à feral élevé ne renferment généralement pas des teneurs importantes en SiO_2 . Le phosphore y est appréciable avec des moyennes de 28,79 et 27,33%, respectivement pour les panneaux 2020 et 2021 (figure 36). En général, les oxydes de fer et d'aluminium ne polluent pas l'ensemble des faciès d'un sondage mais ils peuvent s'accumuler dans des niveaux et parfois engendrer la formation de banc induré de fer ou de cuirasse ferrugineuse au sein même du gisement. Il est ainsi nécessaire de détecter ces sondages à feral et de dégager soigneusement ces niveaux indurés de fer sans impacter la couche de phosphate exploitable.

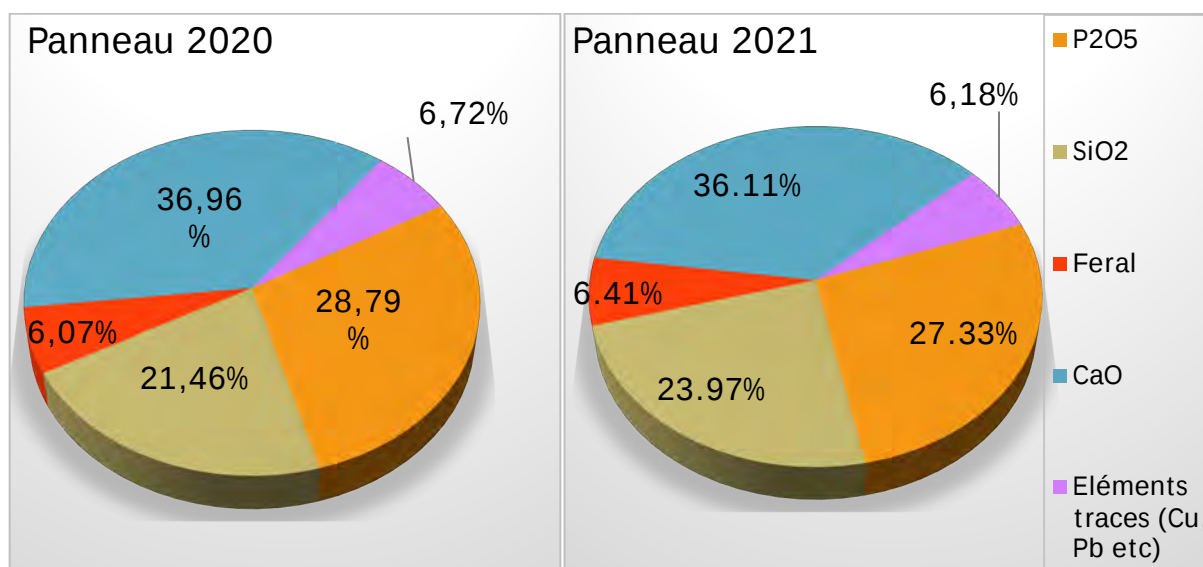


Figure 36 : Diagrammes récapitulatifs des teneurs moyennes des oxydes majeurs dans les anomalies de feral

III.3 Le calcaire

Les teneurs moyennes obtenues au niveau des anomalies de calcaire (fig. 37) révèlent des pourcentages moyens en CaO plus élevés dans le panneau 2021 (54,85%) que 2020 (44,56%). Ces niveaux à anomalies de calcite sont faibles en silice et feral, elles sont également peu phosphatées (22,53 et 20,17% respectivement en 2020 et 2021).

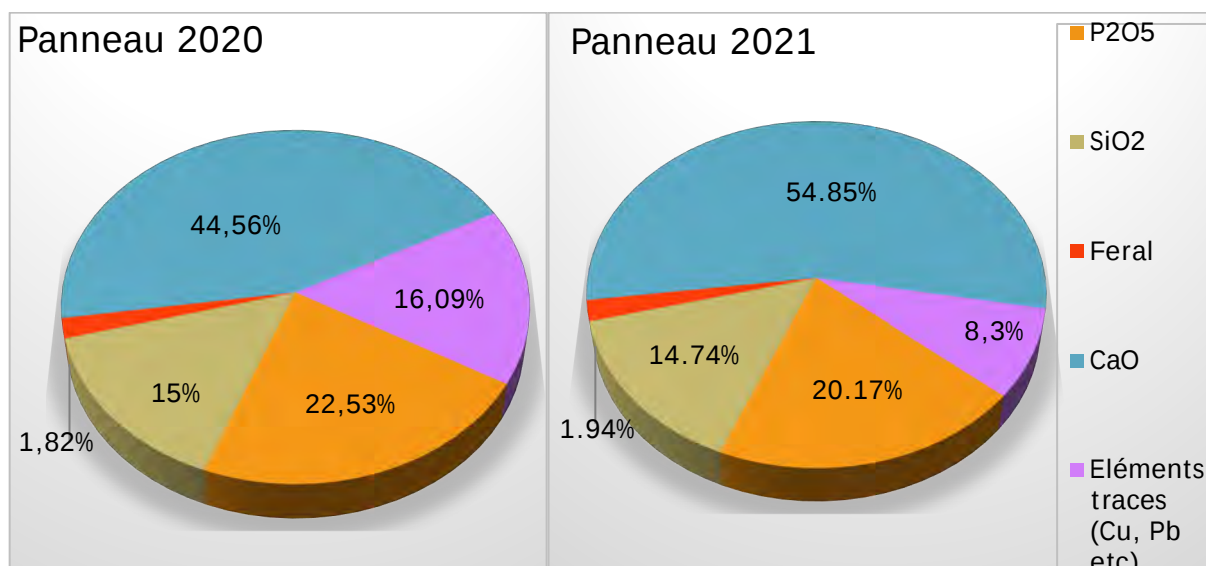


Figure 37 : Diagrammes récapitulatifs des teneurs moyennes des oxydes dans les anomalies à calcaires

Conclusion partielle

L'étude géochimique a montré que les teneurs les plus importantes en phosphore (supérieures à 31%) sont surtout concentrées dans le panneau 2020 que 2021. Ce dernier recèle néanmoins des niveaux à potentiel économique intéressant.

Les anomalies de couche sont quant à elles plus présentes dans le budget 2021 que 2020, ce qui expliquerait probablement la différence de concentrations en phosphore entre ces deux panneaux. Il est en effet constaté que la présence de ces anomalies en certains points s'accompagne de faibles taux en P_2O_5 .

Les corrélations ont démontré que la silice et le feral sont des oxydes non associables au phosphore, en d'autres termes réduisent les teneurs en P_2O_5 lorsqu'ils sont associés au minerai de phosphate, tandis que la calcite (CaO) a des similitudes du point de vue sédimentaire avec le phosphore.

La synthèse sur les anomalies montre que le feral est l'anomalie la plus rencontrée dans les secteurs d'étude, suivi de la silice et enfin le calcaire trouvé seulement au niveau de quelques points. Cette synthèse illustre l'inégalité de répartition des oxydes à anomalies, qui sont plus répandus dans le budget 2021 que 2020.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

L'étude géochimique comparative des panneaux d'exploitation 2020 et 2021 du panneau de Tobène n'aurait pu se faire sans la compréhension au préalable de la distribution des oxydes dans les faciès phosphatés. Ainsi l'étude sur la variabilité verticale des oxydes dans les niveaux lithologiques a montré les oxydes majeurs les plus présents dans le minerai phosphaté :

- le phosphore (P_2O_5) est logiquement plus présent dans le minerai de phosphate, mais les niveaux à phosphate homogène sont plus enrichis en P_2O_5 que le phosphate hétérogène ;
- Les anomalies de silice sont représentées par des couches de sable ou des bancs de quartzarénite à $\%SiO_2$ très élevés qui peuvent contaminer le minerai ;
- les oxydes de fer et d'aluminium ($Fe_2O_3+Al_2O_3$) sont en général plus concentrés dans le minerai hétérogène que homogène; lorsqu'ils sont abondants, ils s'accumulent dans des niveaux et peuvent engendrer la formation de bancs indurés de fer au sein du gisement ;
- la calcite (CaO) diffuse dans le minerai est connue grâce au ratio K ($\%CaO/\%P_2O_5$), et est aussi représentée par des bancs de calcaires à K très élevé.

Les résultats des teneurs moyennes obtenues à partir des analyses chimiques utilisées pour réaliser l'étude géochimique comparative montrent que :

- le panneau d'exploitation du budget 2020 renferme des sondages à P_2O_5 plus élevé que le panneau 2021, avec des teneurs supérieures à 30% occupant la quasi-totalité du panneau ;
- le feral est l'anomalie la plus fréquemment rencontrée dans les deux panneaux mais elle est beaucoup plus répandue dans le panneau 2021 que 2020, avec des teneurs élevées allant jusqu'à 17% ;
- il en est de même pour la silice qui est plus présente dans le budget 2021, jusqu'à 75%;
- la calcite est par contre l'anomalie la moins représentée aussi bien dans le panneau 2020 que 2021.

Les synthèses des analyses sur les anomalies de couche démontrent cette différence de concentrations en anomalies (feral, SiO_2 et CaO) entre les deux panneaux (plus en 2021). Ces zones à anomalies sont accompagnées de teneurs faibles en P_2O_5 , donc entravent l'enrichissement du minerai, raison pour laquelle le secteur 2021 est moins enrichi en P_2O_5 que le budget 2020.

Il faut également noter que le panneau d'exploitation 2021 a une surface plus large que 2020, donc d'un point de vue économique, son exploitation serait probablement plus coûteuse et plus fastidieuse que celle du panneau 2020 du fait des difficultés rencontrées avec les anomalies de fer (surconsommation d'acide sulfurique, obstruction des filtres par les sulfates néoformés, percussion des godets des draglines avec les bancs indurés etc), de silice (élimination dans le minerai nécessitant des réactifs à coût élevé pour l'usine de traitement) et de calcaire (difficulté à la laverie).

Au terme de notre étude, quelques recommandations peuvent être proposées :

- Associer aux analyses chimiques, les données sur la granulométrie des faciès pour connaître les tranches granulométriques les plus phosphatées ;
- Revoir et corriger les descriptions lithologiques ainsi que les analyses chimiques associées au niveau des bases de données ;
- Un bon contrôle des opérations d'exploitation, surtout dans les zones à feral car il est non seulement l'anomalie la plus répandue dans les panneaux et aussi il peut se confondre rapidement dans le minerai ;
- Plus de rigueur à la phase d'extraction notamment lors du chargement du minerai sur les dumpers pour éviter les pertes au moment du transport.



Références bibliographiques

- Atger M. (1970) : Données sur la Géologie du Gisement de Phosphate de Taïba et les Gisements d'Origine Sédimentaire. Rapport interne C.S.P.T., 14p.
- Bickoundou A. C. (2000) : Faciès phosphatés du site de Tobène centre : aspects lithostratigraphique, granulométrique et chimique. Mémoire DEA, UCAD, 66p.
- Diagne M. (2003) : Faciès phosphaté du site de Tobène : Essai de caractérisation géochimique. Mémoire de D.E.A. Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 67p.
- Diop A. M. (2002) : La série phosphatée de la partie occidentale du gisement de Tobène lithologie, biostratigraphie et évolution paléoenvironnementale Mem. D.E.A, U.C.A.D, 53p
- Flicoteaux R. (1982) : Genèse des phosphates alumineux du Sénégal occidental. Etapes et guides de l'altération. Mémoire n° 67, Inst de Geol. hist pasteur de Strasbourg, 229p
- Flicoteaux R. et Medus J. (1974) : Existence d'une lacune entre les termes marins du Paléogène et du Néogène du Sénégal méridional démontrée par les microfaunes et les microflores. Trav. Lab. Sci. Terre, St-Jérôme (Marseille), 29p.
- Flicoteaux R., Nahon D. et Paquet H. (1977) : Genèse des phosphates alumineux à partir des sédiments argilo-phosphatés du Tertiaire de Lam-Lam (Sénégal). Suite minéralogique. Permanences et changements de structures. Sci. Géol. Bull., 30, 3, pp. 153-174, Strasbourg.
- Lucas J., Menor E., et Prevot L., (1979) : Gisement de phosphate de Taïba (Sénégal) un exemple d'enrichissement par l'altération. *Bull. SC. Geol. Fr*, 32 (1-2) 39-57
- Ly A., Fall M., Diouf B. et Samb E. M. (2003) : Gisement phosphate de Tobène (Secteur occidental) : Biostratigraphie, sédimentologie et évolution paléoenvironnementale. Rapport Final, 172 p
- Menor E. 1975 : La sédimentation phosphatée, pétrographie, minéralogie et géochimie des gisements de Taïba (Sénégal) et d'Olinda (Brésil). Thèse Dr. Ing., Univ. Louis Pasteur Strasbourg, 153p, France.

- Pannatier M. (1995) : Etude Géologique et Géostatistique du Gîte de Phosphate de Taïba (Sénégal). Thèse Doct. Uni. Lausanne, 209p
- Roger J., Banton O., Barusseau J.P., Castaigne P., Comte J-C., Duvail C., Nehlig P., Noël, B.J., Serrano O., Travi Y. (2009) - Notice explicative de la cartographie multi-couches à 1/50 000 et 1/20 000 de la zone d'activité du Cap-Vert. Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar, 245 pages, 68P.
- Sagna P. (2005) : Dynamique du climat et de son évolution récente dans sa partie Ouest de l'Afrique Occidentale. Thèse Doct. UCAD, Tome I, 277p.
- Samb M. (1993) : Rapport de stage sur Tobène. Rapport interne CSPT, 65p.
- Samb M. (1998) : Aspects minéralogiques et chimiques des phosphates sédimentaires du gisement de Tobène (Sénégal). Transformations de l'apatite par la diagenèse et l'altération pédologique. Bull. I.F.A.N Ch. A. Diop, Dakar, t. 49, n° 2, p. 55-77.
- Samb M. (2007) : répartition des faciès phosphatés oxydés dans le gisement de Tobène (Sénégal) : guide d'exploitation. Journal des Sciences Vol.7, N°2 45p.
- Slansky, 1980 : Géologie des phosphates sédimentaires. Orléans, B.R.G.M édit, Mém. N°114, 92p.
- Slansky M., Lallemend A. and Millot G. (1964). "La sédimentation et l'Altération Latéritique des Sédiments Phosphatés du Gisement de Taïba." *Bull. Serv. Carte Géol. Fr.* 17 : 311-24
- Sylla M. (1986) : « Le Feral » à Taïba. Dakar. Mém. d'ingénieur Géologue de conception. IST. 70p.
- Tessier F., Flicoteaux R., Lappartient J. R., Nahon D. et Triat J. M. (1975) : Réforme du concept de "Continental Terminal" dans les bassins côtiers de l'Ouest africain. 9^{ème} Congr. Inter. Sédim. ; Nice, Thème I, p. 207-212

TABLE DES MATIERES

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Sommaire.....	iv
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Présentation des ICS et du site minier de Taïba : cadres géographique et géologique, et méthodologie d'étude.....	3
I Présentation et structuration des ICS.....	3
II Le gisement de Taïba.....	5
II.1 Cadre géographique.....	5
II.2 Cadre géologique	6
II.2.1 Géologie régionale.....	6
II.2.2 Géologie locale.....	7
II.3 Le gisement de Tobène.....	10
II.3.1 Description et activités minières.....	10
II.3.2 Localisation des panneaux d'étude	11
II.3.3 Techniques d'étude des sondages.....	12
Chapitre 2 : Caractérisation litho-géochimique de quelques sondages des panneaux d'exploitation 2020 et 2021.....	14
I Problématique et objectifs.....	14
II Répartition verticale des éléments chimiques le long de quelques sondages	14
II.1 Répartition verticale de la teneur des oxydes majeurs le long de quelques sondages du panneau 2020.....	16
II.1.1 Sondage A9.....	16
II.1.2 Sondage A10.....	17
II.1.3 Le sondage A66.....	18
II.1.4 Sondage A16.....	19
II.1.5 Sondage A18.....	20
II.1.6 Sondage A36.....	21
II.1.7 Sondage A37.....	22
II.1.8 Sondage A19.....	23
II.1.9 Le sondage A76.....	24
II.2 Répartition verticale de la teneur des oxydes majeurs le long de quelques sondages du panneau 2021.....	25
II.2.1 Sondage B15	25
II.2.2 Sondage B61	26
II.2.3 Sondage B89	27
II.2.4 Sondage B67	28
II.2.5 Sondage B99	29
II.2.6 Sondage B10	30
II.2.7 Sondage B100	31
II.2.8 Sondage B62	32
II.2.9 Sondage B6.....	33
III Cartographie comparée de la couche phosphatée exploitable et des anomalies de couche	34
III.1 Cartes des isobathes comparées du toit de la couche utile Xu des panneaux 2020 et 2021	34
III.2 Cartes des isobathes comparées du mur de la couche utile Xu des panneaux 2020 et 2021	36
III.3 Cartes isopaques comparées de la couche utile Xu des panneaux 2020 et 2021	38

III.4	Cartes isopaques comparées des anomalies	40
IV	Synthèse litho-géochimique	40
IV.1	La silice (SiO ₂).....	40
IV.2	Le feral (Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃).....	41
IV.3	Le rapport K (CaO/P ₂ O ₅).....	42
IV.4	Le phosphore (P ₂ O ₅).....	43
	Conclusion partielle.....	45
 Chapitre 3 : Etude géochimique comparative des oxydes majeurs de la couche phosphatée au niveau des panneaux d'exploitation 2020 et 2021 : cartographie géochimique, corrélations des éléments chimiques et synthèse des résultats des analyses chimiques.....		46
I	Cartographie géochimique comparée	46
I.1	Variation latérale du feral (Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃) dans les panneaux 2020 et 2021	46
I.2	Variation latérale de la silice (SiO ₂) dans les panneaux 2020 et 2021	47
I.3	Variation latérale du CaO dans les panneaux 2020 et 2021	48
I.4	Variation latérale des teneurs en P ₂ O ₅ dans les panneaux 2020 et 2021.....	50
II	Corrélations des oxydes majeurs	52
II.1	Corrélation SiO ₂ /P ₂ O ₅	52
II.2	Corrélation feral/P ₂ O ₅	52
II.3	Corrélation CaO/P ₂ O ₅	53
III	Synthèse sur les teneurs moyennes en oxydes des anomalies de couche	54
III.1	La silice	54
III.2	Le feral	55
III.3	Le calcaire	55
	Conclusion partielle.....	57
	Conclusion générale.....	58
	Références bibliographiques.....	60
	Liste des figures.....	55
	Liste des tableaux.....	A
	Annexes.....	A

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation des panneaux d'exploitation Taïba.....	4
Figure 2 : Carte de localisation du gisement de phosphate de Taïba (Flicoteaux, 1982).....	5
Figure 3 : Carte géologique du bassin sénégal-mauritanien (d'après Pasmì, 2009, modifiée).....	7
Figure 4 : Log synthétique du gisement phosphaté de Taïba (Samb, 1998), modifié	9
Figure 5 : Tobène : subdivisions et paramètres du panneau (Service de la géologie/ICS)	10
Figure 6 : Plan de positionnement des panneaux d'exploitation des budgets 2020 et 2021 dans le panneau de Tobène	11
Figure 7 : Positionnement des sondages dans les panneaux 2020 et 2021.....	12
Figure 8 : Répartition verticale des oxydes majeurs du le sondage A9	16
Figure 9 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A10	17
Figure 10 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A66	18
Figure 11 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A16	19
Figure 12 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A18.....	20
Figure 13 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A36	21
Figure 14 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A37	22
Figure 15 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A19	23
Figure 16 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A76	24
Figure 17 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B15	25
Figure 18 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B61	26
Figure 19 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B89	27
Figure 20 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B67	28
Figure 21 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B99	29
Figure 22 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B10	30
Figure 23 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B100	31
Figure 24 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B62	32
Figure 25 : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B6	33
Figure 26 : Cartes comparées des isobathes du toit de la couche utile Xu des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (droite)	35
Figure 27 : Cartes comparées des isobathes du mur de la couche utile Xu des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite).....	37

Figure 28 : Cartes isopaques comparées de la couche utile Xu des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite).....	39
Figure 29 : cartes isoteneurs du feral dans le panneau 2020 (à gauche) et panneau 2021 (à droite)	47
Figure 30 : cartes isoteneurs des teneurs en SiO ₂ des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)	48
Figure 31 : Cartes des isoteneurs en CaO des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à gauche)	49
Figure 32 : Cartes des isoteneurs en K des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite).....	50
Figure 33 : Cartes des isoteneurs en P ₂ O ₅ des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)	51
Figure 34 : Corrélations des oxydes majeurs des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)	53
Figure 35 : Diagrammes récapitulatifs des teneurs moyennes des oxydes majeurs dans les anomalies à sable	54
Figure 36 : Diagrammes récapitulatifs des teneurs moyennes des oxydes majeurs dans les anomalies de feral	55
Figure 37 : Diagrammes récapitulatifs des teneurs moyennes des oxydes dans les anomalies à calcaires.....	56

Liste des tableaux

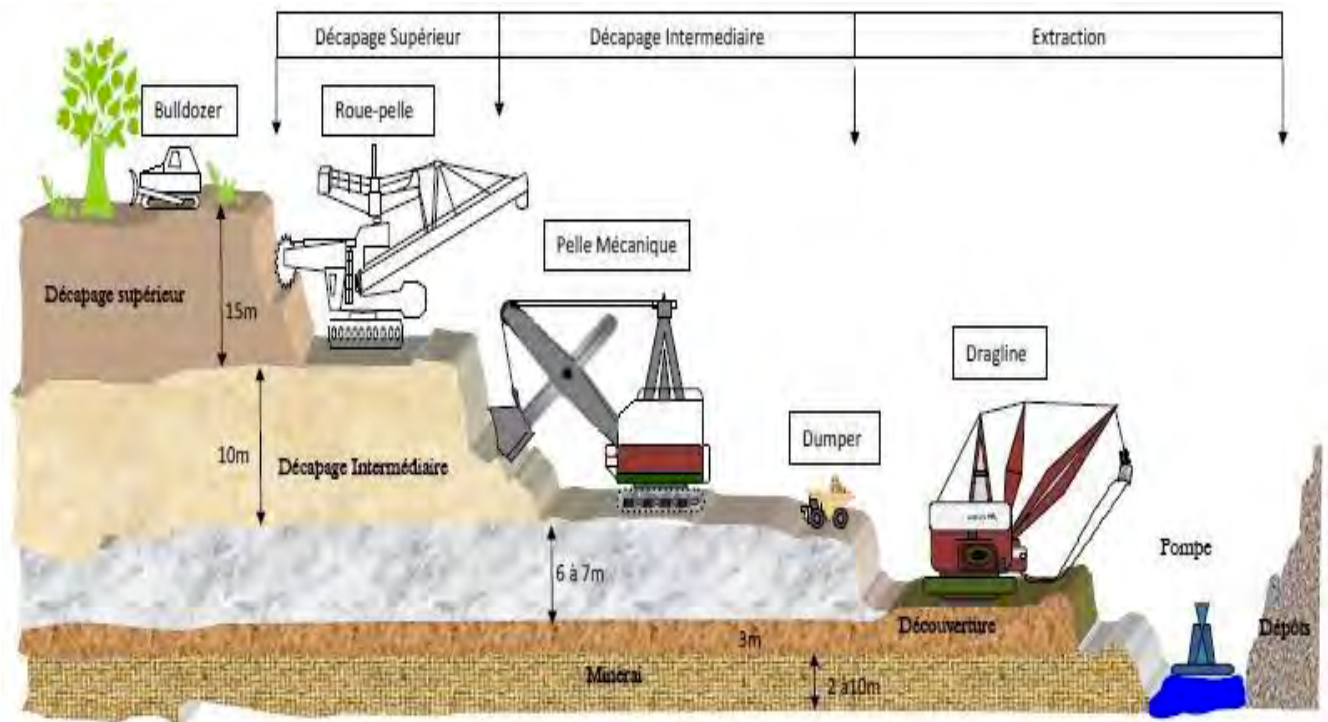
Tableau 1 : Coefficients de corrélation des oxydes majeurs.....	53
--	----

Liste des tableaux en annexes

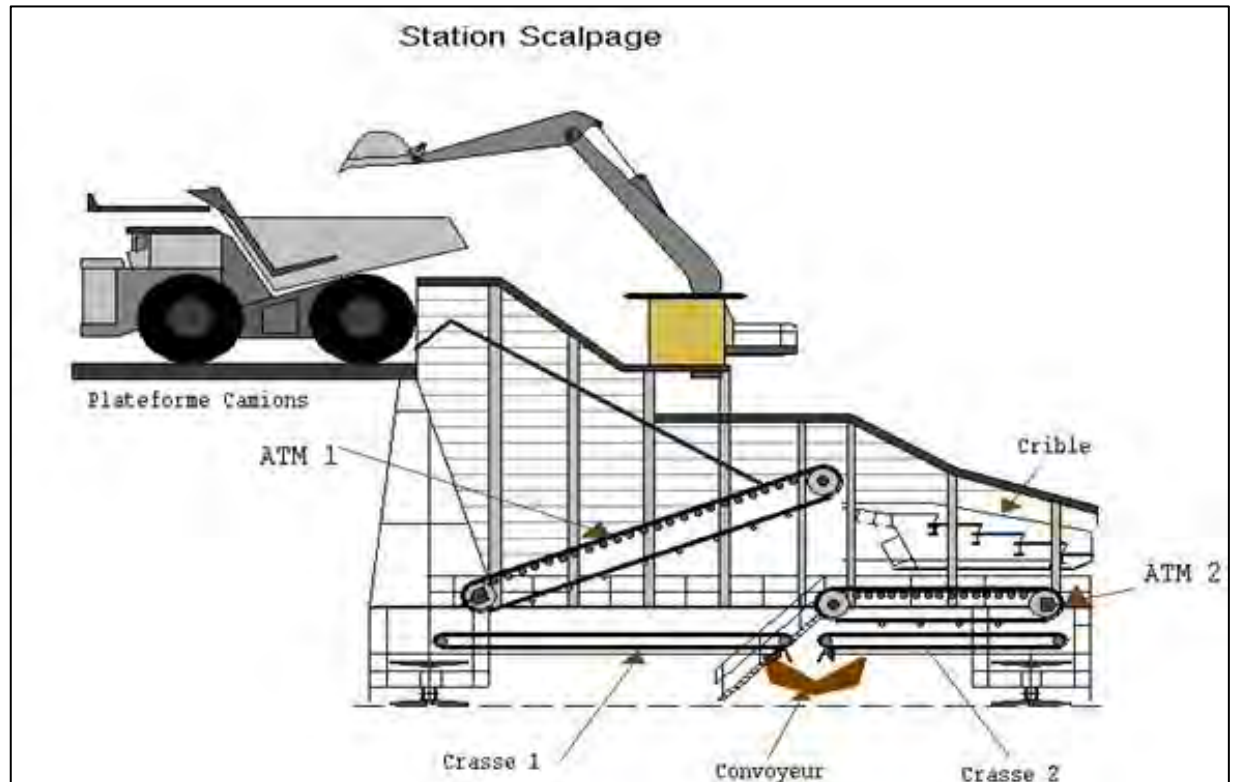
Tableau 2 : Description lithologique et teneurs en oxydes majeurs des sondages du panneau 2020.....	E
Tableau 3 : Description lithologique et teneurs en oxydes majeurs des sondages du panneau 2021.....	G
Tableau 4 : Coordonnées (X,Y) et teneurs moyennes des oxydes des sondages du panneau 2020.....	I
Tableau 5 : Coordonnées (X,Y) et les teneurs moyennes des oxydes des sondages du Panneau 2021.....	K
Tableau 6 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de SiO ₂ (> 40%) du panneau 2020.....	N
Tableau 7 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de SiO ₂ (> 40%) du panneau 2021.....	N
Tableau 8 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de feral (> 4%) du panneau 2020.....	N
Tableau 9 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de feral (> 4%) du panneau 2021.....	O
Tableau 10 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de CaO (> 40%) du panneau 2020.....	P
Tableau 11 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de CaO (> 40%) du panneau 2020.....	Q

Annexes

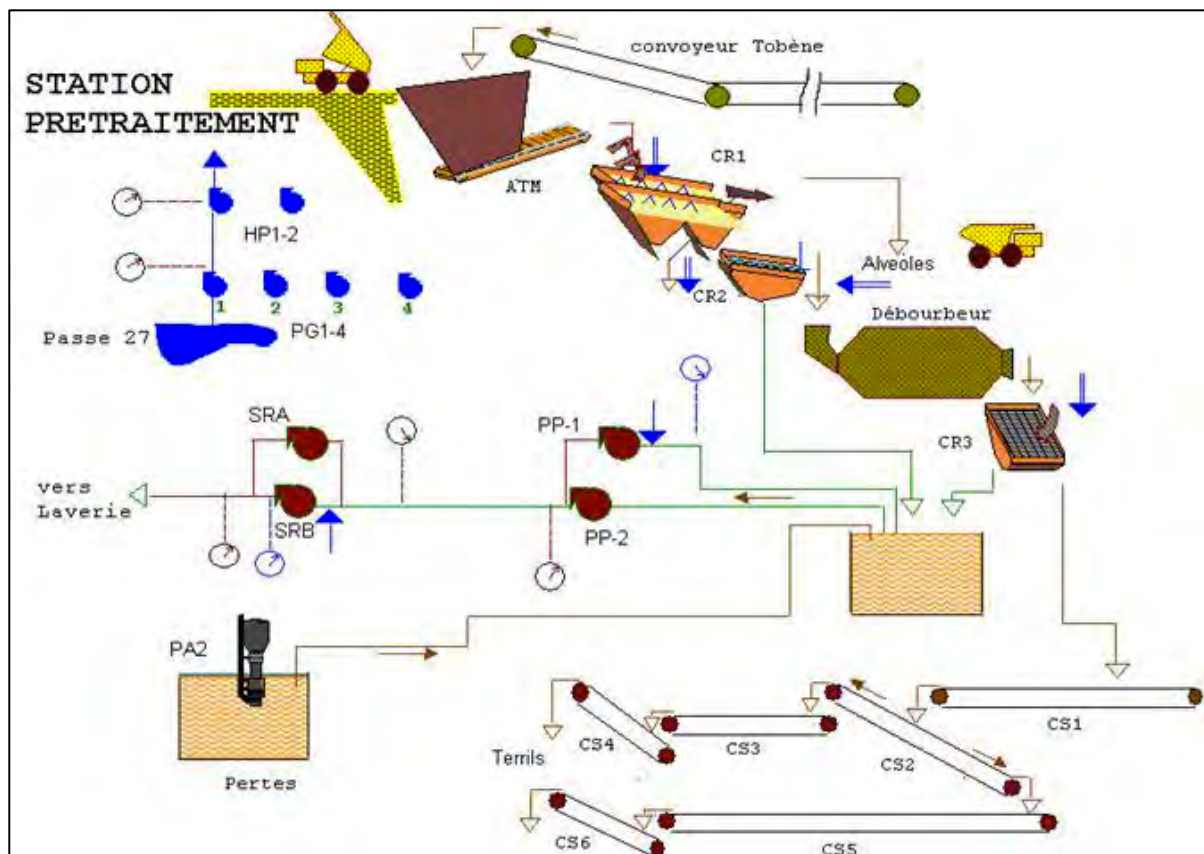
Annexe I : Les principales étapes d'extraction et traitement du minerai



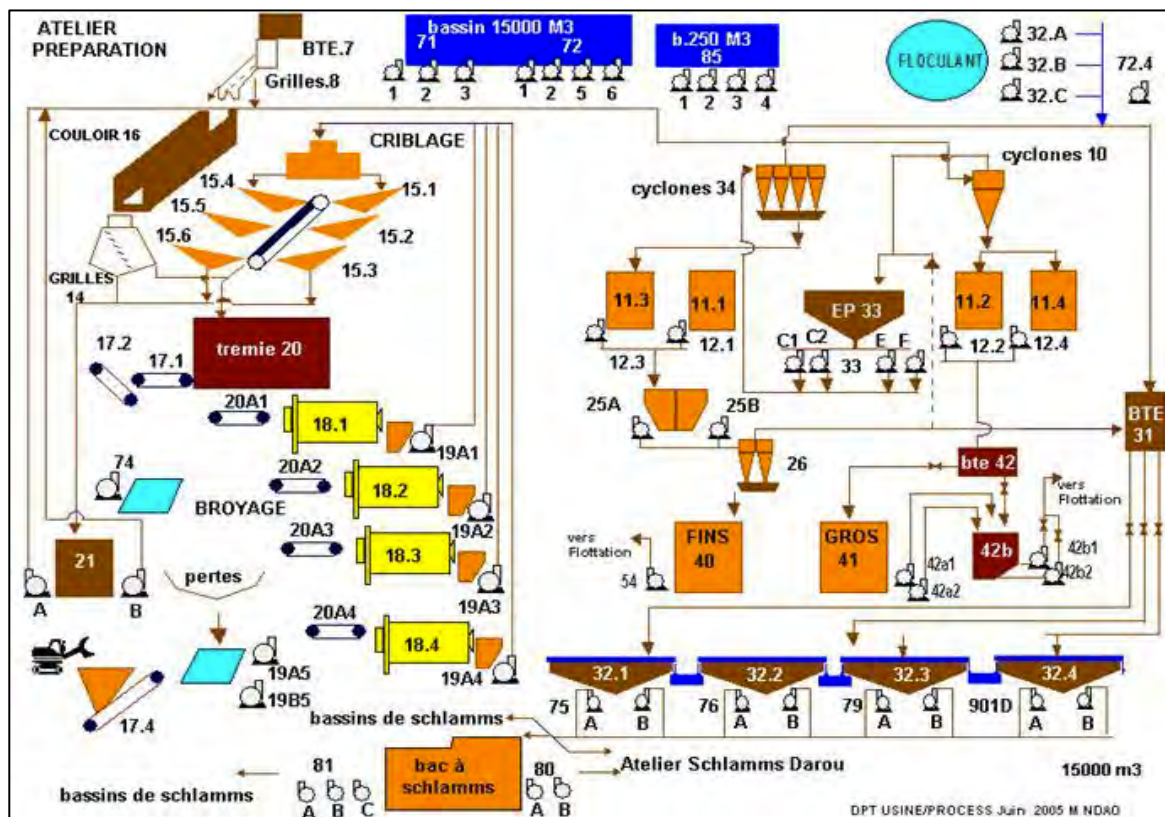
Annexe I.1 : Phases d'extraction du minerai



Annexe I.2 : Circuit de traitement du minerai à la station de scalpage

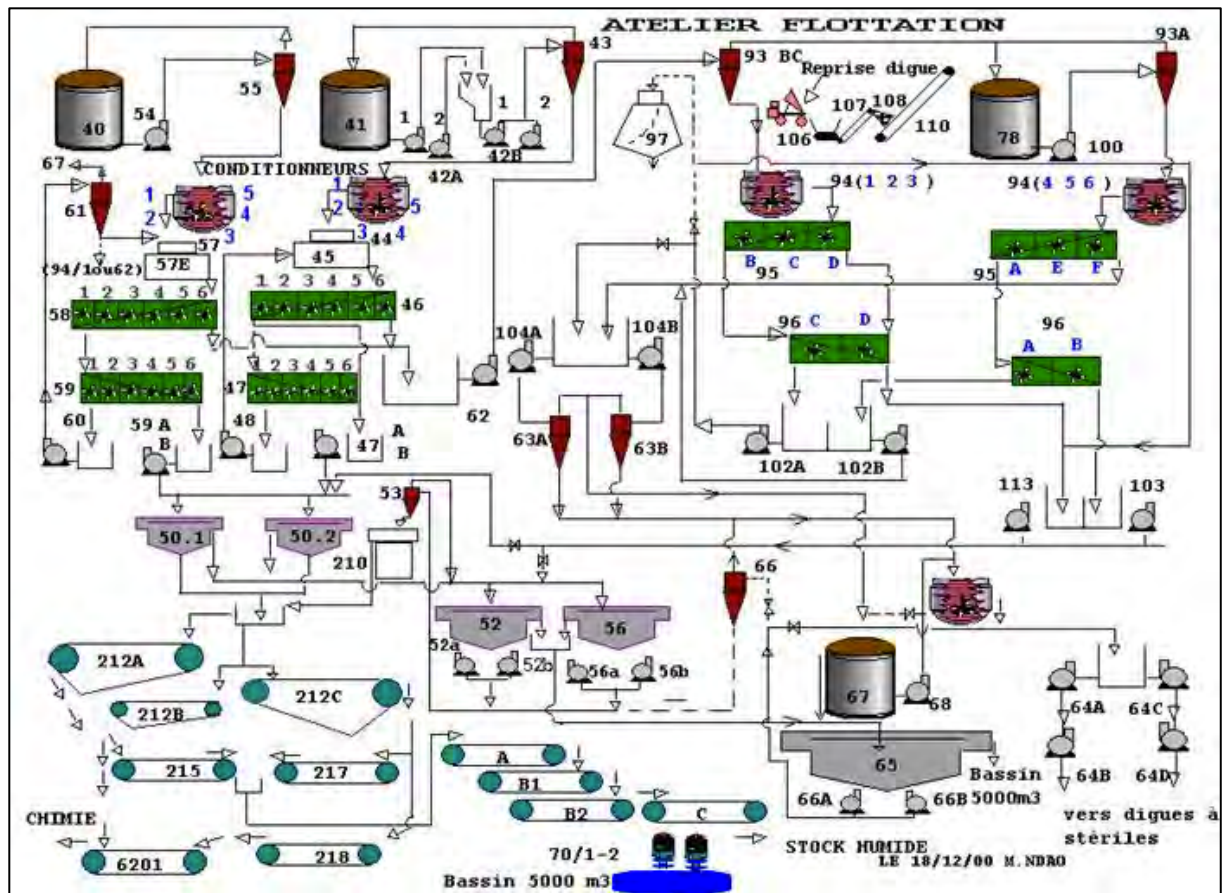


Annexe I.3 : Circuit de traitement du minerai à la station de débouillage



Annexe I.4 : Circuit de traitement du minerai à la station de préparation

C



Annexe I.5: Circuit de traitement du minerai à la station de flottation

Annexe II : Liste des tableaux annexe**Tableau 2** : Description lithologique et teneurs en oxydes majeurs des sondages du panneau 2020

Sondages	Toit	Mur	Lithologie	%P2O5	%SiO2	%Feral	%K
A18	24.6	25	Phosphate homogène	5.19	45.8	33.75	1.204
A18	25	27.3	Phosphate hétérogène	11.89	62.58	10.22	1.211
A18	27.3	28	Argile bariolée du toit	28.96	20.41	6.69	1.358
A18	28	28.8	Phosphate homogène	36.89	5.21	1.5	1.359
A18	28.8	32.25	Phosphate hétérogène	33.59	13.88	1.98	1.369
A18	32.25	33.3	Phosphate hétérogène	19.56	46.38	4.61	1.328
A18	33.3	35.6	Phosphate hétérogène	32.33	17.04	1.9	1.375
A18	35.6	36.15	Attapulgit	-	-	-	-
A10	32.2	32.9	Argile du toit ferrugineuse	20.5	33.4	9.2	1.429
A10	32.9	33.2	Argile bariolée du toit	36	4.8	2.2	1.400
A10	33.2	34.2	Phosphate homogène	32.8	13.4	1.7	1.302
A10	34.2	34.8	Phosphate hétérogène	9	73.5	2	0.967
A10	34.8	35.8	Phosphate homogène	25.9	28.1	1.8	1.448
A10	35.8	36.55	Phosphate hétérogène	35.8	6.6	0.8	1.413
A10	36.55	37.4	Sable	19.8	44.6	1.5	1.505
A10	37.4	37.85	Sable	13.3	61.7	1.3	1.541
A10	37.85	38.6	Phosphate hétérogène	15.6	56.5	1.4	1.462
A10	38.6	39.15	Attapulgit	-	-	-	-
A37	34	35.3	Minerai homogène	31.4	19	1.9	1.373
A37	35.3	36.2	Sable	-	-	-	-
A37	36.2	37	Minerai hétérogène siliceux	21	45.1	2.2	1.338
A37	37	38.3	Sable phosphaté feral	6.1	81.2	5.8	0.852
A37	38.3	38.5	Attapulgit	-	-	-	-
A32	27.1	27.8	Argile bariolée du toit	22.4	28.7	9.7	1.442
A32	27.8	28.2	Phosphate homogène	36	6.3	1.72	1.403
A32	28.2	29.4	Phosphate homogène	35.7	7.8	1	1.398
A32	29.4	30.4	Quartzarénite	6.7	81.7	2.6	1.104
A32	30.4	30.9	Sable fin	10.5	69.1	3.6	1.267
A32	30.9	31.2	Phosphate homogène	20.5	43.5	4.4	1.288
A32	31.2	32	Cuirasse gréseuse	15.9	45.4	17.6	0.855
A32	32	32.6	Phosphate argileux	24.7	31.3	1.4	1.324
A32	32.6	34.3	Argile quartz	6.4	79.2	2.7	1.219
A32	34.3	35	Phosphate hétérogène	31.7	16.6	1.9	1.379
A32	35	37.4	Argile quartz	13.5	61.8	2.3	1.311
A32	37.4	38.9	Phosphate hétérogène	34.2	9.6	1.5	1.398
A32	38.9	39.5	Attapulgit	-	-	-	1.204
A9	27	27.8	Phosphate hétérogène	9.21	57.62	21.97	0.336
A9	27.8	29.45	Phosphate hétérogène	5.69	77.63	9.08	0.789
A9	29.45	30.3	Argile bariolée du toit	30.07	19.6	3.71	1.363

E

A9	30.3	30.7	Phosphate hétérogène	18.95	49.42	0.96	1.350
A9	30.7	31.7	Phosphate homogène	34	4.48	0.84	1.496
A9	31.7	35.45	Calcaire massif phosphaté	23.47	5.88	0.3	2.104
A9	35.45	37.95	Phosphate hétérogène	13.57	6.16	0.34	3.665
A9	37.95	38.15	Attapulгите	14.51	24.83	1.02	2.711
A19	30.8	31.9	Phosphate hétérogène	-	-	-	-
A19	31.9	32.7	Phosphate hétérogène	23	34.2	3.9	1.252
A19	32.7	33.8	Argile bariolée du toit	25.2	28.9	5.4	1.397
A19	33.8	35.65	Phosphate homogène	32.3	15.7	1.7	1.399
A19	35.65	36	Argile phosphatée	25.6	26.6	5.8	1.398
A19	36	36.5	Phosphate homogène	25.7	27.5	2.9	1.420
A19	36.5	37.6	Marne calcaire	7.2	7.8	1.6	6.847
A19	37.6	39.2	Marne calcaire	19.5	4.5	0.9	2.636
A19	39.2	40.7	Phosphate hétérogène	31.4	8.4	6.2	1.398
A19	40.7	41.35	Attapulгите	-	-	-	-
A16	27	27.7	Phosphate hétérogène	20.4	40.9	11.3	1.025
A16	27.7	28.2	Phosphate homogène	36.1	3	6.6	1.288
A16	28.2	29.1	Phosphate homogène	32.1	12.8	6.5	1.318
A16	29.1	30.05	Argile bariolée du toit	21	25.7	14.5	1.390
A16	30.05	32.1	Phosphate homogène	34.1	9.1	2.5	1.405
A16	32.1	32.6	Phosphate argileux	26	22.9	6.9	1.350
A16	32.6	33.4	Argile phosphatée	24.8	28.2	3.1	1.427
A16	33.4	33.8	Phosphate argileux	30.9	9.3	2.5	1.492
A16	33.8	35.5	Calcaire marneux	6.4	34.6	1.8	5.438
A16	35.5	35.8	Phosphate marno-calcaire	9.2	20.7	1.6	3.859
A16	35.8	36.1	Calcaire massif	3.9	2.8	1.1	13.436
A16	36.1	36.8	Marne calcaire phosphatée	11.4	19.3	2.3	3.702
A16	36.8	38.55	Calcaire marneux	5.9	8.4	1.3	8.458
A36	32.4	33.5	Phosphate homogène	15.26	42.8	30.04	0.453
A36	33.5	34.1	Phosphate homogène	22.92	31.79	9.55	1.284
A36	34.1	34.7	Argile bariolée du toit	25.74	31.19	3.65	1.344
A36	34.7	35.6	Phosphate homogène	28.18	22.36	6.12	1.366
A36	35.6	36.25	Argile phosphatée	30.49	17.93	5.15	1.357
A36	36.25	37.5	Phosphate hétérogène	24.01	34.58	5	1.338
A36	37.5	39.2	Phosphate hétérogène	24.84	33.9	3.05	1.381
A66	24.3	24.8	Argile bariolée du toit	27.9	15.4	12.5	1.323
A66	24.8	25.5	Argile bariolée du toit	29.9	15.8	7.5	1.338
A66	25.5	26.05	Argile bariolée du toit	21.5	31.5	9.6	1.326
A66	26.05	27.35	Phosphate homogène	34	9.9	2.5	1.374
A66	27.35	28.35	Phosphate homogène	33	9.6	4.2	1.373
A66	28.35	28.7	Phosphate homogène	25.6	10.2	22.7	1.313
A66	28.7	29.6	Phosphate argileux	32.7	9.8	6	1.346
A66	29.6	31.3	Phosphate hétérogène	35	2.5	10.7	1.323
A66	31.3	32	Phosphate homogène	36.6	5.6	1.7	1.352
A66	32	32.1	Phosphate hétérogène	27.5	24.8	3.3	1.375
A66	32.1	33.35	Phosphate hétérogène	31.1	13.5	7	1.338

F

Tableau 3 : Description lithologique et teneurs en oxydes majeurs des sondages du panneau 2021

Sondages	Toit	Mur	Lithologie	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%Feral	%K
B15	29.5	32	Sable	10.2	69.4	4.7	1.245
B15	32	32.8	Argile bariolée du toit	-	-	-	-
B15	32.8	36	Phosphate homogène	19.4	50.1	1.6	1.361
B15	36	40.4	Phosphate hétérogène	27.7	28.2	1.6	1.375
B15	40.4	40.6	Attapulgate	-	-	-	-
B89	28.8	29.7	Phosphate alumineux argileux	16.5	31.3	32.3	0.533
B89	29.7	30.7	Phosphate hétérogène	22.8	26.6	13.6	1.311
B89	30.7	31.5	Phosphate homogène	31.6	11.3	5.6	1.408
B89	31.5	32.5	Phosphate homogène	33.8	7.8	4.9	1.391
B89	32.5	33.9	Phosphate homogène	33.1	8.3	3.9	1.402
B89	33.9	34.85	Bancs de silex	12.7	63.8	2.1	1.402
B89	34.85	35.2	Bancs de silex	3.9	85.5	1.4	1.513
B89	35.2	36.2	Attapulgate	-	-	-	-
B61	26.1	27.4	Sable phosphaté	11.29	42.75	23.88	1.200
B61	27.4	28.2	Phosphate hétérogène	14.82	35.66	22.02	1.230
B61	28.2	28.8	Phosphate hétérogène	15.57	48.72	9.41	1.246
B61	28.8	29.6	Phosphate argileux	27.1	26.59	2.82	1.350
B61	29.6	31.1	Phosphate hétérogène	29.88	18.92	5.06	1.345
B61	31.1	32.05	Phosphate hétérogène	22.8	13.73	28.43	1.329
B61	32.05	33.05	Phosphate argileux	13.79	59.47	6.74	1.253
B61	33.05	33.7	Phosphate hétérogène	19.41	49.42	1.72	1.316
B61	33.7	35.3	Sable phosphaté	16.96	55.61	2.2	1.304
B61	35.3	35.65	Attapulgate	-	-	-	-
B6	30.5	31.4	Minerai homogène	32.9	11.8	4.4	1.368
B6	31.4	32.6	Argile bariolée du toit	0	0	0	0.000
B6	32.6	33.9	Minerai homogène	32.1	15.2	2.7	1.299
B6	33.9	37.5	Argile phosphatée	20.3	13.7	2.3	2.212
B6	37.5	39.8	Phosphate hétérogène	22.7	28.9	3.1	1.573
B6	39.8	39.9	Calcaire massif	-	-	-	-
B6	39.9	40.3	Attapulgate	-	-	-	-
B62	32	32.5	Grès phosphaté	14.2	53.6	11.6	0.915
B62	32.5	32.9	Phosphate hétérogène	26.3	29.7	2.7	1.376
B62	32.9	33.6	Sable	6.5	79.4	3.9	1.354

B62	33.6	34.3	Quartzarénite meuble	0.9	94.8	2.3	1.889
B62	34.3	34.75	Quartzarénite meuble	1.8	91.6	2.9	1.333
B62	34.75	35	Attapulгите	-	-	-	-
B67	26.8	28.4	Argile bariolée du toit	24.54	23.49	7.67	1.349
B67	28.4	29.15	Phosphate hétérogène	29.5	16.77	3.07	1.434
B67	29.15	30.5	Calcaire phosphaté	4.74	6.39	2.01	10.513
B67	30.5	32.25	Phosphate hétérogène	15.56	7.6	2.27	3.080
B67	32.25	33.3	Biocalcarénite phosphatée	8.98	12.35	1.45	5.193
B67	33.3	34.2	Marno-calcaire phosphaté	20.1	9.12	0.45	2.270
B67	34.2	37	Marno-calcaire phosphaté	17.77	8.25	0.29	2.373
B67	37	39.15	Phosphate hétérogène	23.84	16.59	0.86	1.793
B67	39.15	39.5	Marno-calcaire	-	-	-	-
B100	29.8	30.5	Latéroïde feralitique phosphatée	28.3	9.7	20.3	1.120
B100	30.5	31.8	Phosphate homogène	33.2	12	1.9	1.404
B100	31.8	32.5	Phosphate homogène	31.1	16.9	3.5	1.367
B100	32.5	33	Phosphate hétérogène	17.5	46.3	7.5	1.326
B100	33	33.3	Phosphate hétérogène	6.4	35.9	44.6	0.859
B100	33.3	34.55	Phosphate hétérogène	30.3	15.1	10.6	1.320
B100	34.55	34.95	Sable phosphaté	4.8	81.3	1.9	1.396
B100	34.95	36.7	Sable phosphaté	9.8	72	4	1.357
B100	36.7	37.45	Attapulгите	-	-	-	-
B99	28.5	30.8	Phosphate alumineux	17.9	46.2	20.4	0.453
B99	30.8	30.9	Argile bariolée du toit	-	-	-	-
B99	30.9	33	Minerai homogène	26.8	31.9	5.1	1.243
B99	33	34.5	Sable phosphaté	2.9	90.5	1.7	1.241
B99	34.5	37.1	Sable phosphaté	16.1	51.8	8.6	1.205
B99	37.1	37.3	Attapulгите	-	-	-	-
B10	38.6	39.3	Phosphate argileux	30.9	14.2	5.7	1.388
B10	39.3	40.1	Phosphate argileux	13.4	28	33.2	1.328
B10	40.1	40.3	Phosphate homogène	36.5	5.9	1.2	1.392
B10	40.3	41.4	Bancs de silex	3.6	86.3	3.8	1.333
B10	41.4	41.6	Attapulгите	-	-	-	-

Tableau 4 : Coordonnées (X,Y) et teneurs moyennes des oxydes des sondages du panneau 2020

Sondages	X	Y	P ₂ O ₅	SiO ₂	K	FERAL	CaO
A1	757.89	865.78	29.72	21.19	1.397	2.08	41.52
A2	821.05	865.78	34.07	11.66	1.367	2.06	46.58
A3	881.05	865.78	29.50	21.40	1.461	2.20	43.10
A4	660.53	808.41	29.79	19.87	1.387	2.74	41.32
A5	721.05	829.27	26.07	30.15	1.420	2.74	37.00
A6	784.21	829.27	30.15	21.00	1.381	1.76	41.64
A7	852.63	808.41	33.44	13.58	1.368	1.77	45.74
A8	912.11	808.41	33.82	12.18	1.360	1.72	45.99
A9	631.58	756.25	18.90	14.25	2.622	0.65	49.56
A10	694.74	756.25	23.91	35.09	1.382	1.56	33.04
A11	757.89	756.25	30.67	18.73	1.374	2.89	42.16
A12	821.05	756.25	25.80	31.90	1.318	4.10	34.00
A13	881.05	756.25	34.59	9.57	1.372	2.13	47.45
A14	944.74	756.25	29.39	22.47	1.394	1.50	40.96
A15	528.95	714.53	30.00	22.02	1.336	1.20	40.08
A16	589.47	701.49	17.44	17.70	4.367	2.33	76.15
A17	660.53	714.53	29.46	15.31	1.915	1.76	56.40
A18	721.05	714.53	31.62	18.41	1.364	2.27	43.13
A19	784.21	701.49	24.32	11.66	2.556	2.77	62.15
A20	852.63	714.53	28.94	20.14	1.377	5.42	39.84
A21	912.11	701.49	34.70	9.54	1.366	2.22	47.40
A22	442.11	646.73	29.88	22.49	1.333	2.07	39.84
A23	500	646.73	31.45	17.39	1.376	1.46	43.27
A24	568.42	646.73	30.40	20.30	1.331	2.92	40.46
A25	631.58	646.73	29.71	20.65	1.412	2.56	41.94
A26	694.74	646.73	31.03	18.86	1.371	1.48	42.53
A27	757.89	646.73	31.05	18.04	1.395	1.74	43.32
A28	821.05	646.73	34.38	11.30	1.362	1.65	46.84
A29	342.11	594.57	35.47	8.22	1.366	1.65	48.47
A30	400	594.57	31.99	4.12	0.530	2.62	16.97
A31	473.68	594.57	33.78	11.70	1.375	2.91	46.45
A32	528.95	594.57	19.79	45.52	1.272	3.26	25.17
A33	589.47	594.57	34.48	10.74	1.359	1.77	46.88
A34	660.53	594.57	29.40	23.25	1.363	3.60	40.06
A35	726.68	594.57	29.41	14.29	1.376	1.89	40.46
A36	252.63	542.42	26.09	29.47	1.363	4.51	35.55
A37	315.79	542.42	19.28	48.92	1.166	3.46	22.47

A38	378.95	542.42	34.03	12.47	1.370	1.28	46.61
A39	442.11	542.42	27.06	29.54	1.268	4.22	34.33
A40	500	542.42	31.72	17.26	1.353	2.42	42.92
A41	568.42	542.42	33.38	13.12	1.386	1.68	46.25
A42	631.58	542.42	31.99	8.64	1.326	8.61	42.41
A43	215.79	485.05	34.61	9.94	1.390	2.03	48.11
A44	278.95	485.05	36.04	6.50	1.366	1.89	49.22
A45	342.11	485.05	33.92	10.23	1.377	2.37	46.71
A46	400	500	34.31	11.42	1.369	1.55	46.97
A47	465.79	485.05	33.88	11.91	1.371	1.68	46.45
A48	528.95	485.05	32.96	15.36	1.376	1.48	45.37
A49	597.37	485.05	31.81	15.30	1.378	3.39	43.85
A50	126.32	432.9	31.21	16.55	1.395	2.79	43.53
A51	189.47	432.9	32.57	12.05	1.355	2.37	44.14
A52	252.63	432.9	29.30	22.53	0.915	4.13	26.81
A53	315.79	432.9	34.21	11.23	1.382	2.05	47.28
A54	378.94	432.9	32.30	14.80	1.387	1.90	44.80
A55	442.11	432.9	34.58	8.30	1.305	3.50	45.11
A56	500	432.9	33.22	11.70	1.379	2.68	45.82
A57	26.32	391.17	33.83	18.25	1.068	5.07	36.14
A58	89.47	391.17	34.17	12.19	1.354	1.68	46.28
A59	152.63	378.13	34.22	10.05	1.374	2.41	47.03
A60	215.79	378.13	34.30	8.64	1.403	3.04	48.13
A61	278.95	378.13	32.80	13.69	1.344	2.71	44.08
A62	342.11	378.13	25.86	32.11	1.282	1.82	33.16
A63	400	378.13	30.98	18.15	1.386	2.44	42.95
A64	0	323.36	30.14	15.44	1.332	6.79	40.16
A65	63.16	323.36	20.70	35.80	1.377	11.10	28.50
A66	126.32	323.36	33.20	8.55	1.347	6.75	44.72
A67	189.47	323.36	28.66	25.82	1.357	3.70	38.89
A68	252.63	323.36	33.03	14.44	1.367	2.13	45.16
A69	315.79	323.36	26.51	32.00	1.345	2.41	35.65
A70	26.32	271.21	32.51	10.84	1.348	5.82	43.83
A71	89.47	271.21	31.05	15.59	1.320	4.59	40.98
A72	152.63	271.21	30.64	15.26	1.334	6.35	40.89
A73	215.79	271.21	32.76	13.33	1.386	3.31	45.41
A74	278.95	271.21	31.24	17.81	1.308	4.09	40.85
A75	63.15	219.05	26.67	24.35	1.317	8.99	35.11
A76	126.32	219.05	17.71	49.36	1.189	8.03	21.06
A77	184.21	219.05	28.18	24.21	1.257	4.07	35.43
A78	89.47	161.68	33.12	8.62	1.349	6.55	44.67

J

Tableau 5 : Coordonnées (X,Y) et les teneurs moyennes des oxydes des sondages du Panneau 2021

Sondages	X	Y	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	K	%FERAL	%CaO
B1	912.11	701.49	34.70	9.54	1.366	2.22	47.43
B2	973.68	701.49	34.54	10.91	1.376	1.45	47.52
B3	821.05	646.73	34.38	11.30	1.362	1.65	46.87
B4	881.05	646.73	32.78	14.10	1.400	1.28	45.86
B5	944.74	646.73	34.36	7.45	1.446	1.25	49.66
B6	1000	646.73	23.20	18.83	1.843	2.63	41.38
B7	726.68	594.57	29.41	14.29	1.376	1.89	40.59
B8	784.21	594.57	29.48	22.70	1.381	1.17	40.68
B9	852.63	594.57	29.46	22.70	1.371	1.82	40.50
B10	973.68	594.57	15.58	45.88	1.350	12.49	21.33
B11	1036.84	594.57	30.74	18.93	1.346	2.53	41.53
B12	694.74	542.42	31.70	18.40	1.382	1.10	43.80
B13	821.05	542.42	31.69	16.82	1.390	1.22	44.19
B14	881.05	542.42	33.20	15.03	1.356	1.23	45.09
B15	944.74	542.42	24.21	37.42	1.369	1.60	33.17
B16	1000	542.42	35.54	8.57	1.374	0.89	48.83
B17	1068.42	542.42	26.83	28.97	1.408	1.56	37.75
B18	597.37	485.05	34.10	16.00	1.532	3.60	47.04
B19	660.53	485.05	31.90	15.08	1.381	2.22	44.10
B20	726.68	485.05	33.75	12.60	1.356	1.86	45.79
B21	784.21	485.05	25.64	32.43	1.345	3.12	34.88
B22	852.63	485.05	31.89	16.58	1.356	2.53	43.25
B23	912.11	485.05	26.76	30.69	1.369	1.66	36.59
B24	973.68	485.05	33.55	12.28	1.353	1.64	45.39
B25	1036.84	485.05	29.92	21.54	1.385	1.93	41.41
B26	1100	485.05	33.57	10.83	1.353	3.50	45.48
B27	500	432.9	33.22	11.70	1.379	2.68	45.81
B28	568.42	432.9	35.07	8.66	1.370	3.18	48.02
B29	631.58	432.9	32.30	15.04	1.311	2.71	42.58
B30	694.74	432.9	34.31	11.23	1.354	2.80	46.58
B31	757.89	432.9	31.69	8.87	1.360	9.12	43.19
B32	821.05	432.9	36.22	6.73	1.373	1.17	49.73

K

B33	881.05	432.9	29.98	19.09	1.353	3.51	40.48
B34	1000	432.9	31.13	17.62	1.385	2.52	43.21
B35	1068.42	432.9	31.94	18.32	1.367	1.24	43.71
B36	400	378.13	30.98	18.15	1.386	2.44	42.91
B37	465.79	378.13	32.34	13.61	1.375	3.65	44.38
B38	528.95	378.13	24.16	36.39	1.326	3.39	32.43
B39	597.37	378.13	27.56	22.26	1.337	6.41	37.36
B40	660.53	378.13	31.79	17.61	1.344	2.43	42.75
B41	726.68	378.13	31.99	14.58	1.374	3.13	43.92
B42	784.21	378.13	24.58	34.41	1.314	3.30	32.94
B43	852.63	378.13	31.45	17.41	1.397	2.05	43.93
B44	912.11	378.13	24.88	30.70	1.095	5.01	25.36
B45	973.68	378.13	32.40	14.81	1.393	2.13	45.12
B46	315.79	323.36	26.51	32.00	1.345	2.41	35.66
B47	378.94	323.36	30.63	15.60	1.341	5.88	41.06
B48	442.11	323.36	35.67	23.06	1.560	2.17	48.12
B49	500	323.36	28.89	23.04	1.307	4.18	38.20
B50	568.42	323.36	25.16	33.95	1.312	4.14	33.05
B51	631.58	323.36	31.63	14.69	1.344	4.89	42.64
B52	694.74	323.36	27.05	26.42	1.316	4.49	36.18
B53	757.89	323.36	31.05	18.60	1.408	2.90	43.67
B54	821.05	323.36	20.20	44.60	1.307	4.00	26.40
B55	881.05	323.36	29.38	18.89	1.481	1.99	43.13
B56	278.95	271.21	31.24	17.81	1.308	4.09	40.90
B57	342.11	271.21	27.57	23.66	1.367	6.30	37.88
B58	410.53	271.21	32.25	10.84	1.332	7.26	43.05
B59	465.79	271.21	15.81	41.56	1.010	17.15	19.76
B60	534.21	271.21	30.88	16.22	1.382	4.92	42.70
B61	594.25	271.21	21.80	37.43	1.316	7.42	28.86
B62	660.53	271.21	7.34	77.80	1.520	2.99	10.18
B63	726.68	271.21	29.68	14.48	1.311	9.86	39.08
B64	784.21	271.21	32.21	16.40	1.331	2.01	42.71
B65	184.21	219.05	28.58	23.15	1.262	4.11	37.27
B66	252.63	219.05	27.73	19.95	1.443	2.96	40.12
B67	315.79	219.05	17.14	10.65	3.596	1.26	44.92

L

B68	378.94	219.05	33.19	13.55	1.389	1.37	46.13
B69	442.11	219.05	27.08	20.89	1.365	7.88	37.27
B70	500	219.05	30.74	14.89	1.366	6.10	42.02
B71	568.42	219.05	31.10	15.58	1.355	5.36	42.26
B72	631.58	219.05	29.54	20.45	1.343	4.47	39.66
B73	694.74	219.05	34.97	5.50	1.366	5.94	47.82
B74	757.89	219.05	35.78	8.57	0.798	1.17	28.29
B75	152.63	161.68	23.61	34.68	1.275	5.49	30.04
B76	215.79	161.68	32.33	14.75	1.276	5.58	41.53
B77	278.95	161.68	27.91	19.65	1.340	9.41	37.76
B78	342.11	161.68	24.06	32.59	1.293	6.19	31.27
B79	410.53	161.68	29.63	22.85	1.346	2.43	40.09
B80	473.68	161.68	32.39	13.44	1.383	3.15	44.85
B81	528.95	161.68	30.97	17.99	1.355	3.52	41.95
B82	597.37	161.68	29.97	14.58	1.390	6.82	41.70
B83	660.53	161.68	28.78	22.56	1.337	4.26	38.57
B84	126.32	109.53	33.61	10.80	1.351	3.36	45.49
B85	184.21	109.53	27.35	27.78	1.351	4.72	37.01
B86	252.63	109.53	30.19	16.73	1.323	5.55	39.99
B87	315.79	109.53	33.66	11.64	1.377	2.00	46.35
B88	378.94	109.53	35.08	7.15	1.356	3.02	47.58
B89	442.11	109.53	24.24	32.14	1.417	3.72	34.01
B90	500	109.53	22.13	35.68	1.263	7.64	28.59
B91	568.42	109.53	29.01	20.49	1.371	5.39	39.84
B92	215.79	55.26	33.39	11.18	1.359	3.23	45.40
B93	278.95	55.26	32.48	9.99	1.352	6.67	44.00
B94	342.11	55.26	34.74	8.40	1.366	3.18	47.46
B95	410.53	55.26	26.47	29.48	1.400	2.48	36.99
B96	465.79	55.26	30.75	19.66	1.343	2.34	41.36
B97	252.63	0	-	-	-	-	-
B98	315.79	0	31.01	15.92	1.352	5.25	41.94
B99	378.94	0	16.53	54.42	1.227	5.75	20.29
B100	442.11	0	21.38	38.51	1.336	6.95	28.96

Tableau 6 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de SiO₂ (> 40%) du panneau 2020

Sondages	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%Feral	%CaO	%Eléments traces
A32	19,79	45,52	3,26	26,18	5,25
A37	19,28	48,92	3,46	25,08	3,26
A76	17,71	49,36	8,03	20,93	0,01
TENEURS MOYENNES	18,93	47,93	4,92	24,06	4,15

Tableau 7 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de SiO₂ (> 40%) du panneau 2021

Sondages	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%Feral	%CaO	%Eléments traces
B59	15,81	41,56	17,15	15,97	9,5
B62	7,34	77,79	2,99	11,16	0,72
B54	20,2	44,6	4	26,4	4,8
B99	16,53	54,42	5,75	20,27	3,02
TENEURS MOYENNES	14,97	54,59	7,47	18,45	4,52

Tableau 8 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de feral (> 4%) du panneau 2020

Sondages	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%Feral	%CaO	%Eléments traces
A12	25,80	31,90	4,10	34,00	4,20
A20	28,94	20,14	5,42	39,83	5,67
A36	26,09	29,47	4,51	35,55	4,37
A39	27,06	29,54	4,22	34,33	4,85
A42	31,99	8,64	8,61	42,41	8,34
A52	29,30	22,53	4,13	27,13	16,91
A57	33,83	18,25	5,07	36,14	6,71
A64	30,14	15,44	6,79	40,16	7,47

A65	20,70	35,80	11,10	28,50	3,90
A66	33,20	8,55	6,75	44,72	6,79
A70	32,51	10,84	5,82	43,83	6,99
A71	31,05	15,59	4,59	40,98	7,78
A72	30,64	15,26	6,35	40,89	6,85
A74	31,24	17,81	4,09	40,85	6,01
A75	26,67	24,35	8,99	35,11	4,88
A76	17,71	49,36	8,03	21,06	3,85
A77	28,18	24,21	4,07	35,43	8,11
A78	33,12	8,62	6,55	44,67	7,03
Teneurs Moyennes	28,79	21,46	6,07	36,96	6,72

Tableau 9 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de feral (> 4%) du panneau 2021

Sondages	P2O5	SiO2	Feral	CaO	Eléments traces
B10	15,57	45,88	12,49	21,02	5,04
B31	31,69	8,87	9,12	43,10	7,22
B39	27,56	22,26	6,41	36,83	6,93
B44	24,88	30,70	5,01	27,25	12,16
B47	30,63	15,60	5,88	41,06	6,84
B49	28,89	23,04	4,18	37,75	6,15
B50	25,16	33,95	4,14	33,03	3,73
B51	31,63	14,69	4,89	42,52	6,28
B52	27,05	26,42	4,49	35,59	6,45
B54	20,20	44,60	4,00	26,40	4,80
B56	31,24	17,81	4,09	40,85	6,01
B57	27,57	23,66	6,30	37,69	4,79
B58	32,25	10,84	7,26	42,97	6,67
B59	15,81	41,56	17,15	15,97	9,51
B60	30,88	16,22	4,92	42,67	5,31
B61	21,80	37,43	7,42	28,69	4,66
B63	29,68	14,48	9,86	38,92	7,05

O

B65	28,58	23,15	4,11	36,07	8,09
B69	27,08	20,89	7,88	36,96	7,20
B70	30,74	14,89	6,10	41,98	6,29
B71	31,10	15,58	5,36	42,13	5,84
B72	29,54	20,45	4,47	39,68	5,85
B73	34,97	5,50	5,94	47,76	5,84
B75	23,61	34,68	5,49	30,10	6,11
B76	32,33	14,75	5,58	41,24	6,10
B77	27,91	19,65	9,41	37,41	5,63
B78	24,06	32,59	6,19	31,10	6,06
B82	29,97	14,58	6,82	41,67	6,95
B83	28,78	22,56	4,26	38,47	5,92
B85	27,35	27,78	4,72	36,97	3,18
B86	30,19	16,73	5,55	39,93	7,60
B90	22,13	35,68	7,64	27,96	6,59
B91	29,01	20,49	5,39	39,78	5,33
B93	32,48	9,99	6,67	43,90	6,97
B98	31,01	15,92	5,25	41,92	5,90
B99	16,53	54,42	5,75	20,27	3,03
B100	21,38	38,51	6,95	28,57	4,60
TENEURS MOYENNES	27,33	23,97	6,41	36,11	6,18

Tableau 10 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de CaO (> 40%) du panneau 2020

Sondages	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%Feral	%CaO	%Eléments traces
A9	18,90	14,25	0,65	45,15	21,05
A16	17,44	17,70	2,33	42,93	19,60
A17	29,46	16,38	1,76	44,26	8,14
A19	24,32	11,66	2,55	45,90	15,57
Teneurs Moyennes	22,53	15,00	1,82	44,56	16,09

Tableau 11 : Teneurs moyennes en oxydes des sondages à anomalies de CaO (> 40%) du panneau 2020

Sondages	%P ₂ O ₅	%SiO ₂	%Feral	%CaO	%Eléments traces
B6	23,2	18,83	2,63	42,75	12,6
B67	17,14	10,65	1,27	61,64	9,31
Teneurs moyennes	20,17	14,74	1,95	52,19	10,95

Annexe III : Figures des cartes isopaques des anomalies

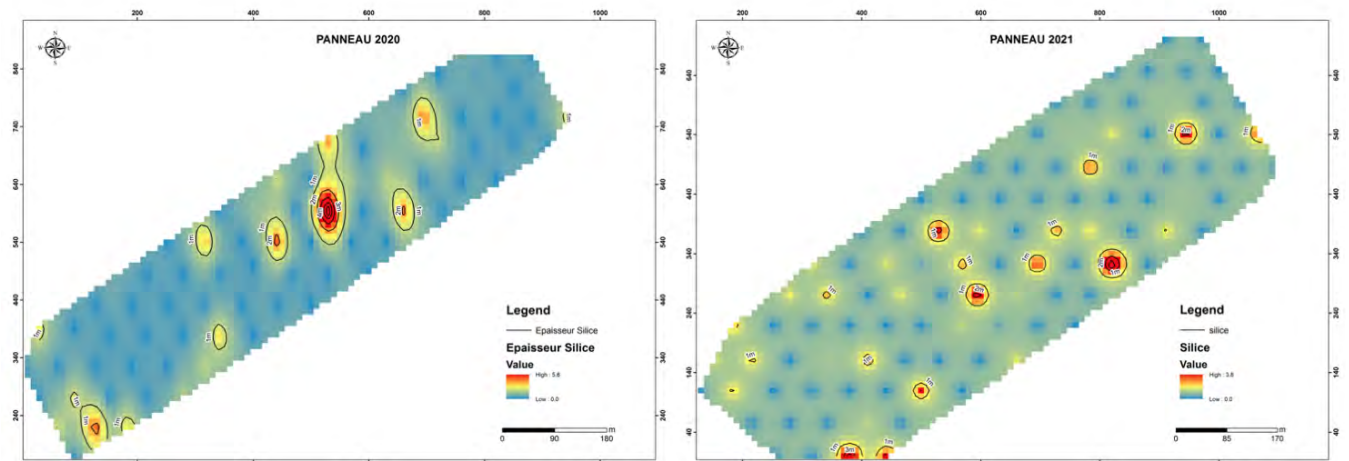


Figure 1 : Cartes isopaques des anomalies de silice des panneaux 2020 et 2021

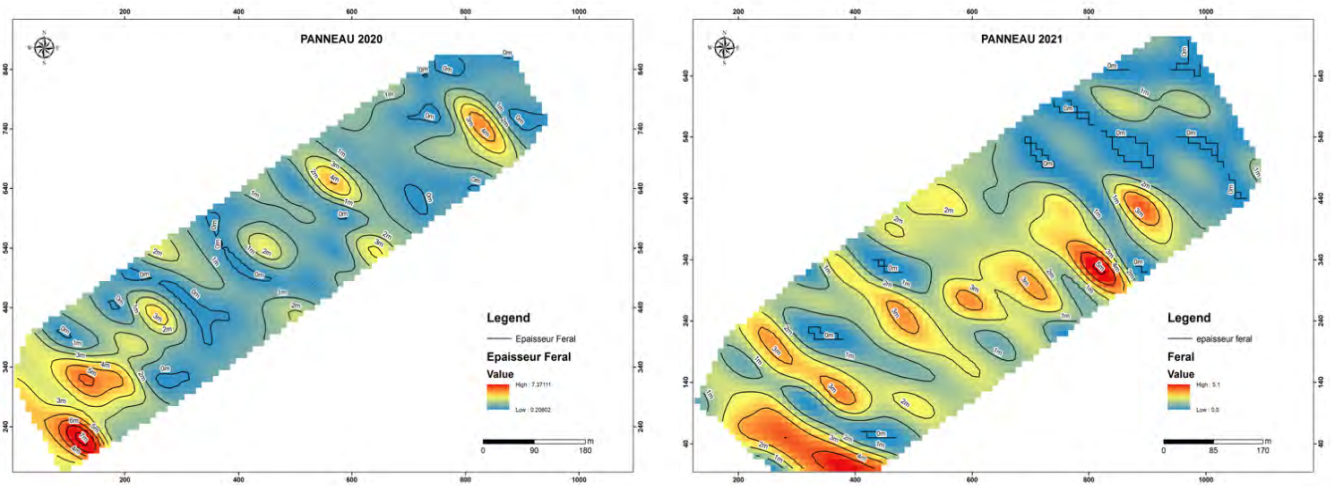


Figure 2 : Cartes isopaques des anomalies de feral des panneaux 2020 et 2021

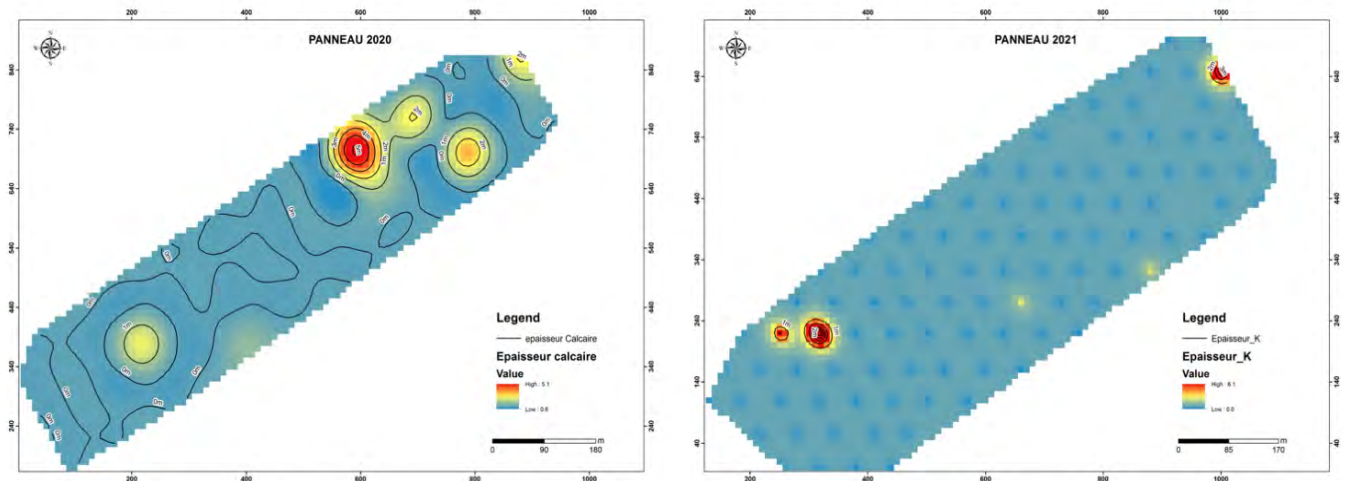


Figure 3 : Cartes isopaques des anomalies de calcite des panneaux 2020 et 2021