

# **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 :

- %P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (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 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). 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 = %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 feraleux 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 %SiO<sub>2</sub> : permet de caractériser la teneur de silice dans le minerai.

Si SiO<sub>2</sub> < 20%, le minerai est pauvre en minéraux siliceux ;

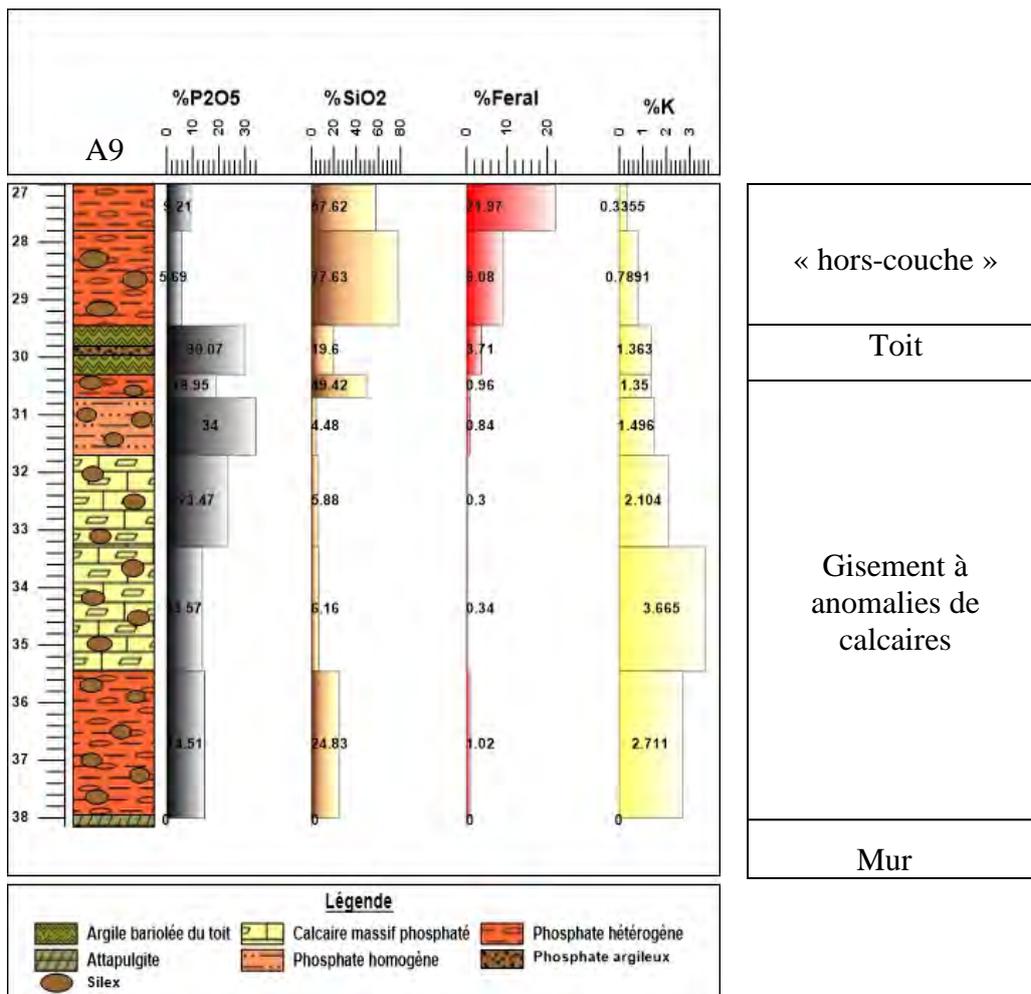
Si 40% > SiO<sub>2</sub> > 20%, présence moyenne de la silice dans le minerai ;

Si SiO<sub>2</sub> > 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

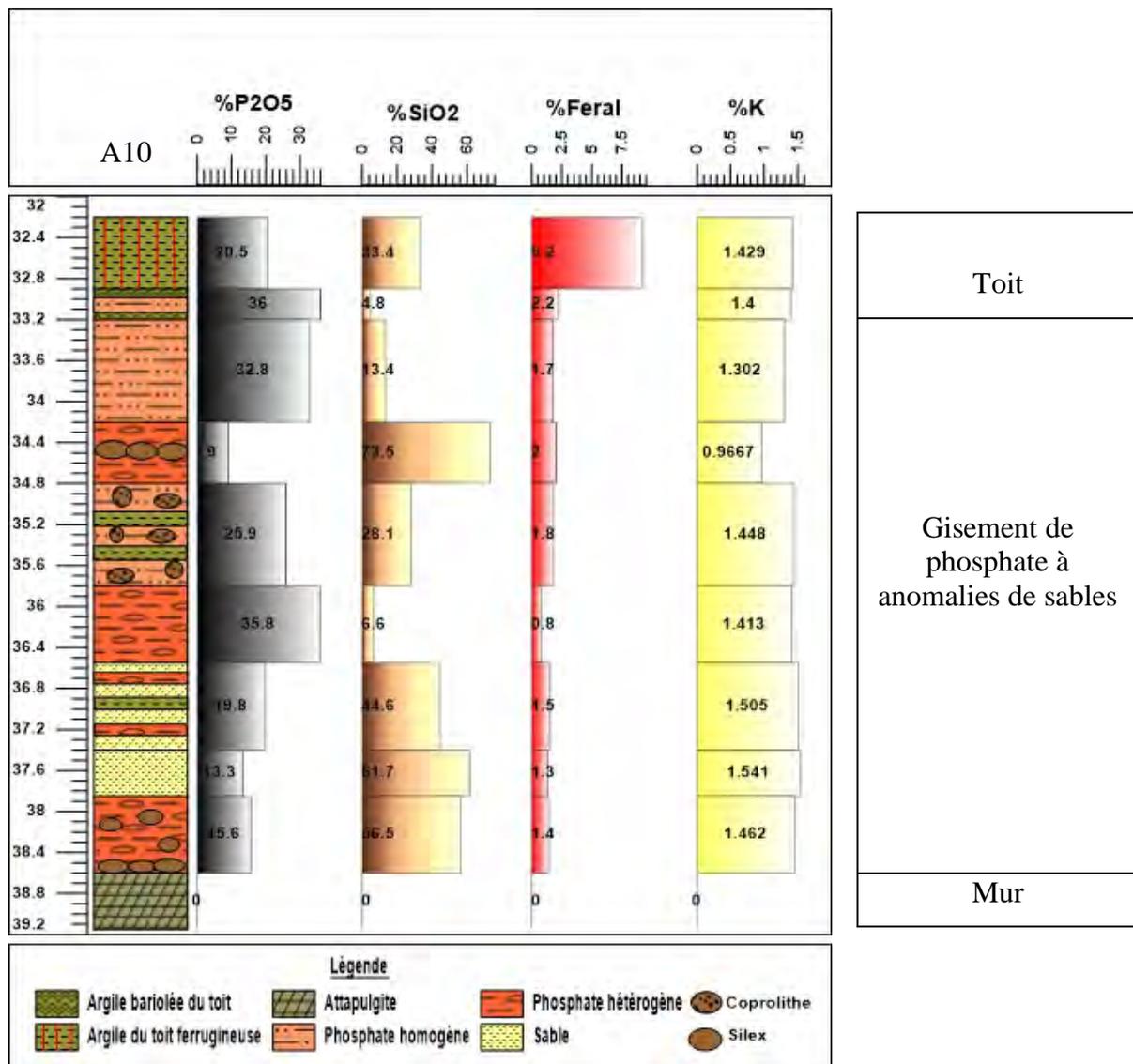
La calcite est bien représentée dans ce sondage, avec à la base du phosphate homogène calciteux (K= 2,71%) et à silex, résultant de la forte présence au-dessus de bancs de calcaires massifs à niveaux phosphatés (K= 2,885%). Plus les pourcentages en K augmentent, plus ceux en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, feral et SiO<sub>2</sub> sont faibles. La teneur la plus élevée en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (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

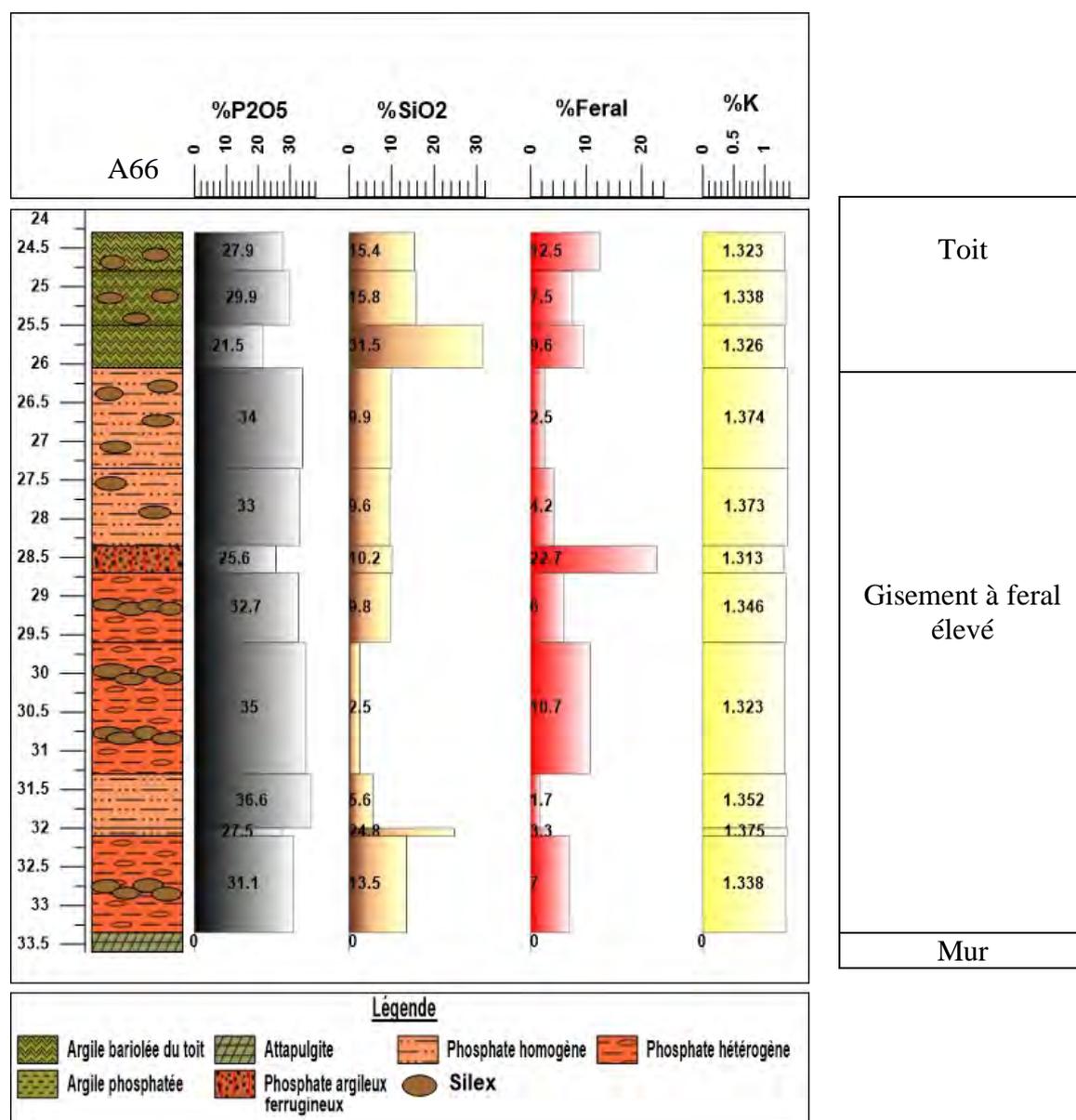
La silice est l'oxyde dominant dans ce sondage. Son abondance au sein des minerais homogène et hétérogène est soit due à la présence de silex en bancs ou à une pollution sableuse provenant des poches de sable sus-jacentes ( $\text{SiO}_2 = 53,15\%$  en moyenne). Les silex ne constituent pas des anomalies 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

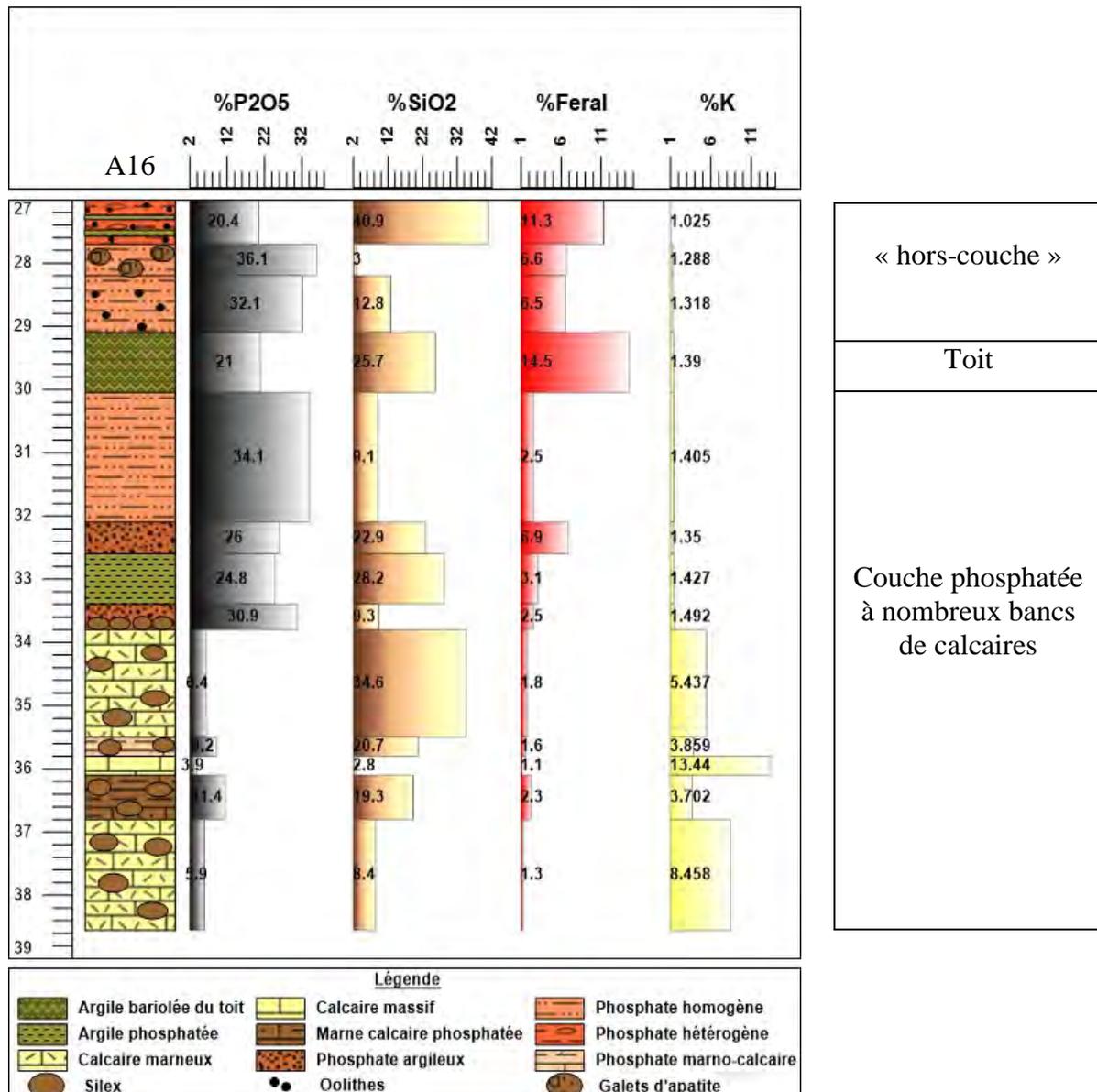
Les plus forts pourcentages en  $P_2O_5$  sont présents au niveau du minerai homogène (36,6%), qui est moins feraleux que le minerai hétérogène. Ces deux unités sont intercalées d'un banc de phosphate argileux induré très riche en feral (22,7%), ce qui explique son caractère ferrugineux. Les teneurs 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

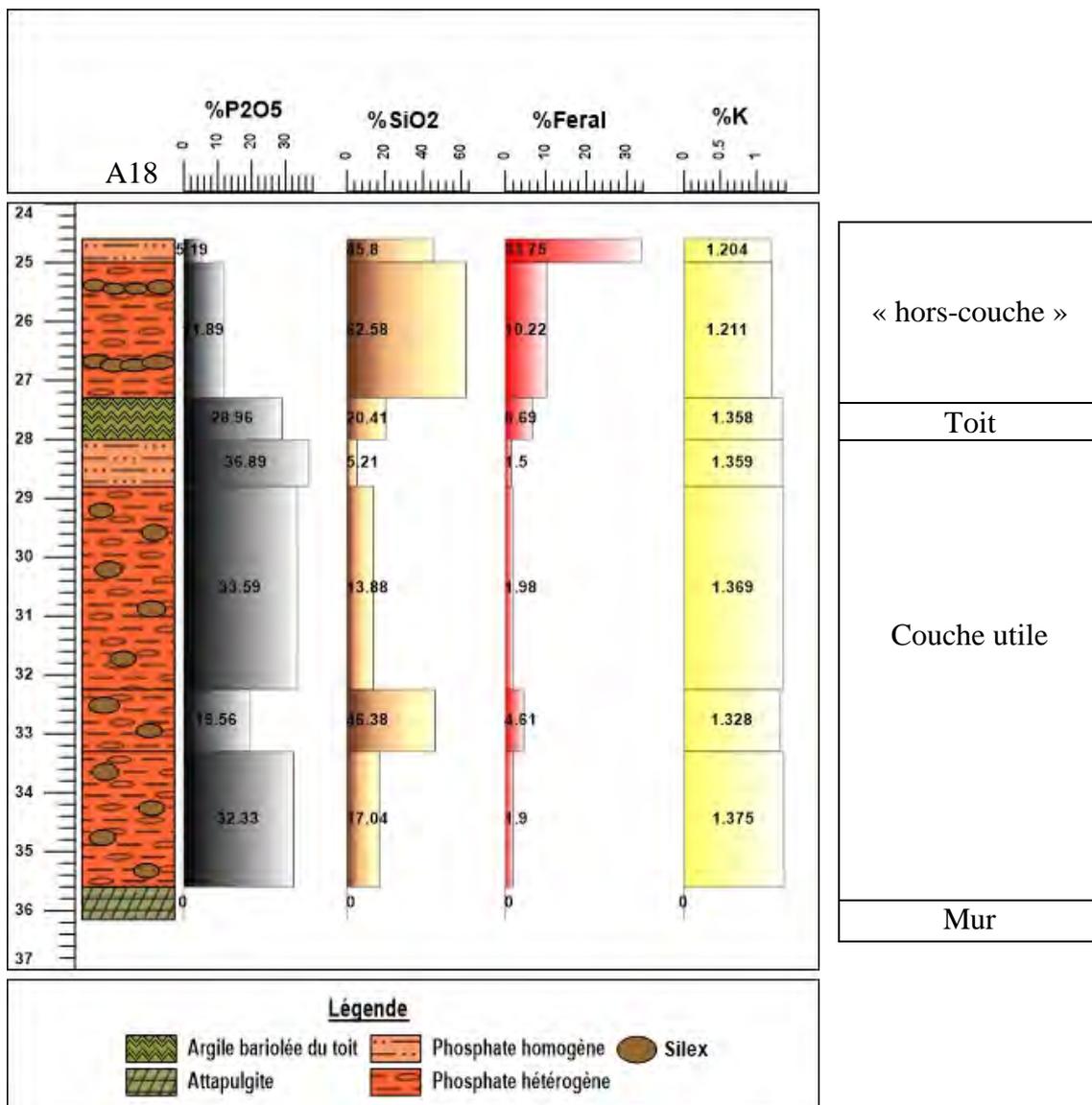
Une épaisseur importante (4,75m) de faciès carbonatés est notée à la base du gisement avec des %K élevés (3,702 à 13,44%), accompagnées de teneurs très faibles en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (3,9 à 11,4%) en feral et en silice. La plus forte teneur en phosphore (34,1%) est notée au niveau du phosphate 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sont d'autant plus faibles que ceux en SiO<sub>2</sub> et feral sont élevés.



**Figure 11** : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A16

### II.1.5 Sondage A18

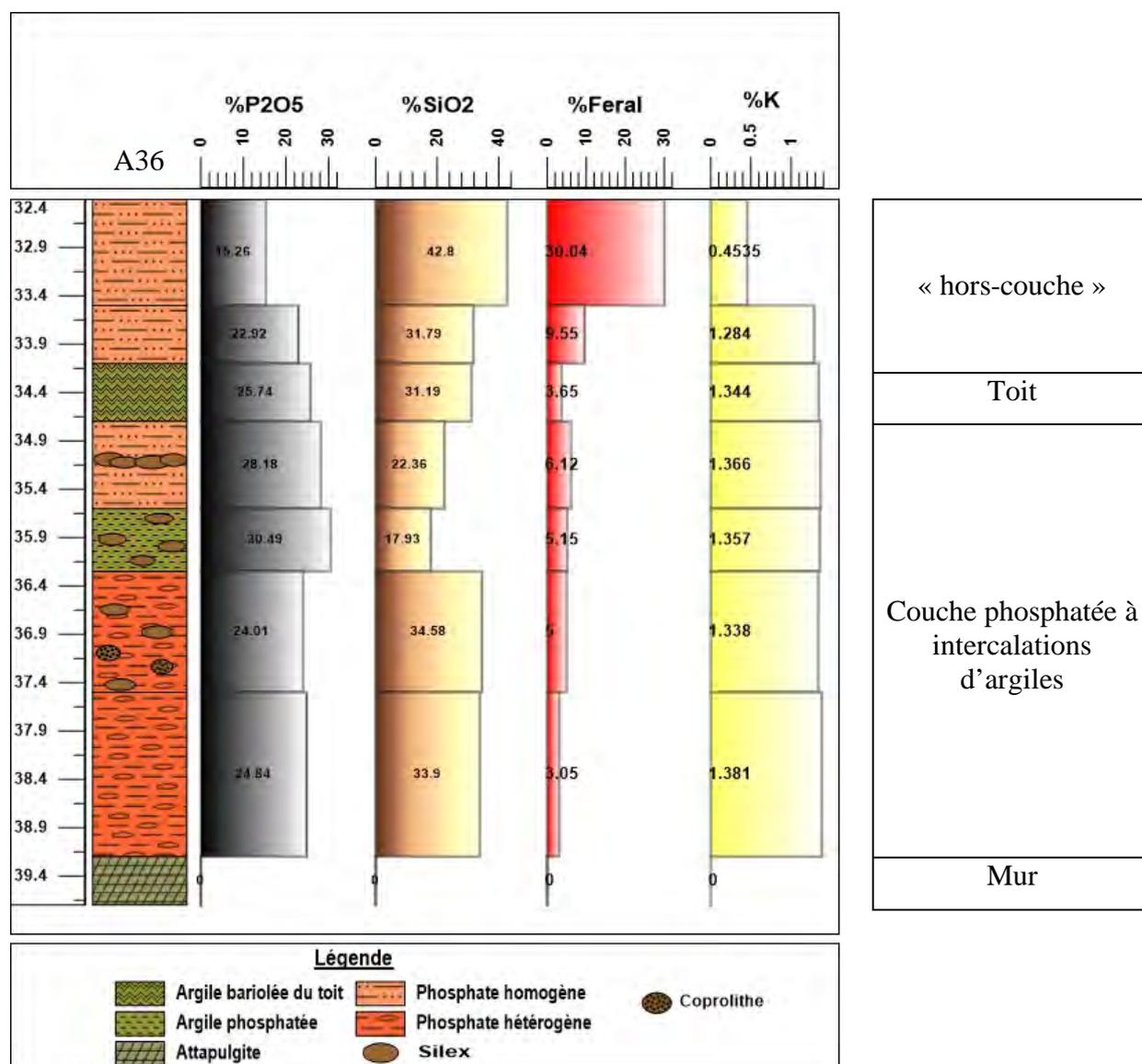
Au niveau du phosphate hétérogène à la base, les pourcentages en  $P_2O_5$  sont influencés par la silice et le feral : plus les teneurs en  $SiO_2$  et feral sont élevées, plus le minerai est appauvri en phosphore, et inversement les niveaux très phosphatés sont faiblement siliceux et feraleux. Le phosphate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

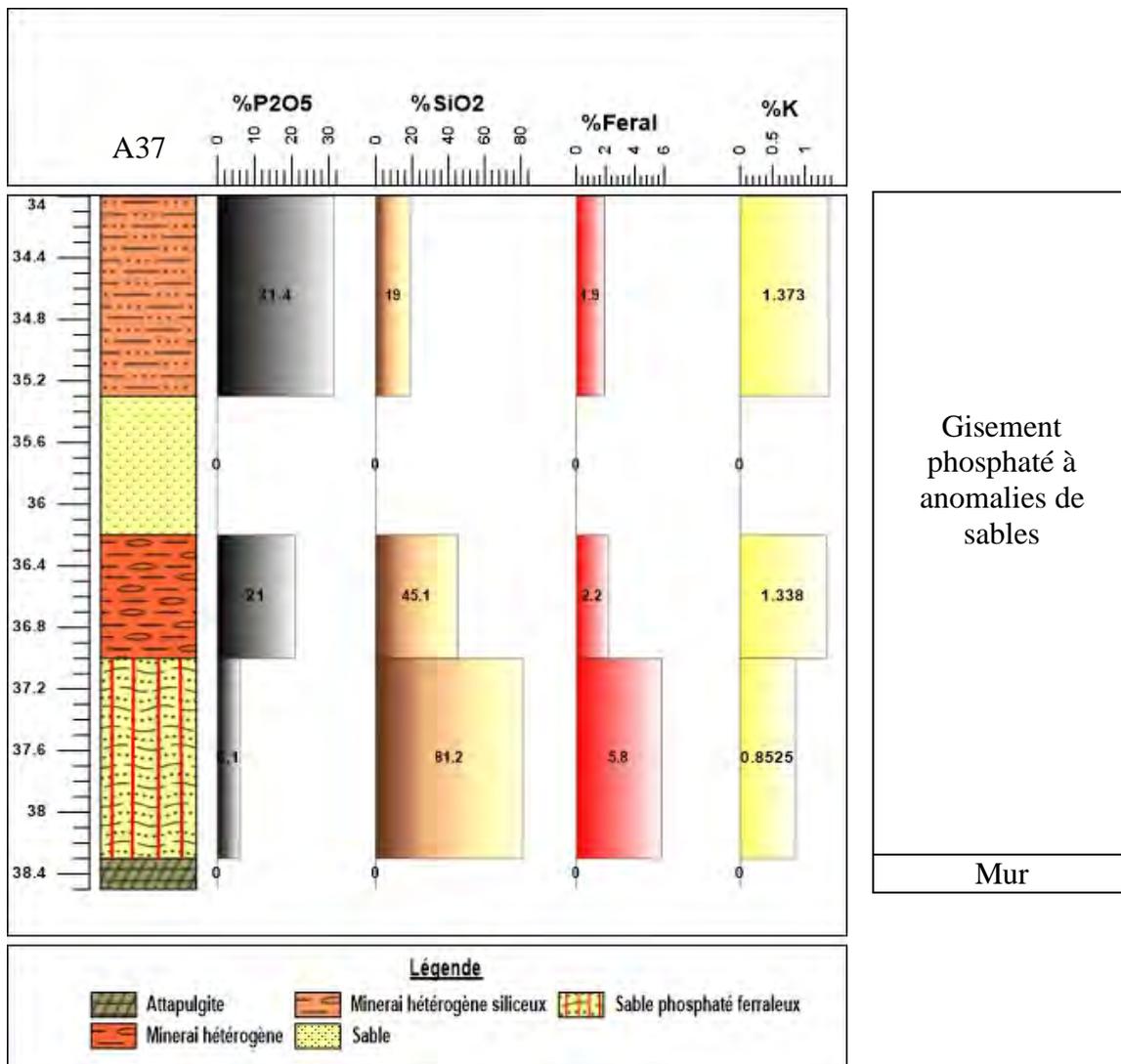
Les argiles phosphatées qui séparent les phosphates hétérogène et homogène, renferment la plus forte teneur en  $P_2O_5$  (30,49%) et sont également « feraleuses » (5,15%). La couche utile est constituée de phosphates homogène et hétérogène, avec des teneurs en  $P_2O_5$  moyennes à élevées (24,01 à 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

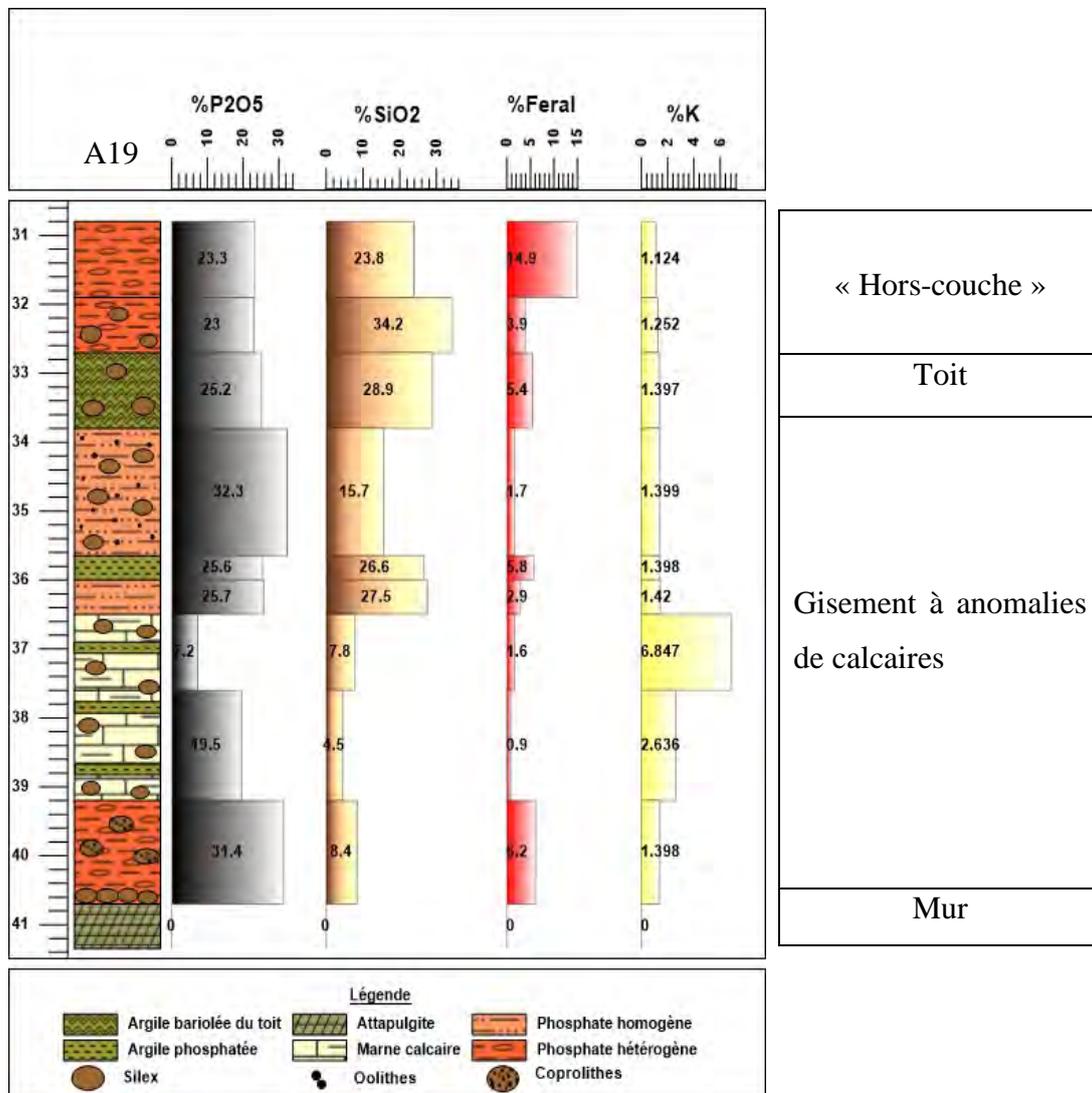
A la base, le log débute par du sable phosphaté très riche en silice et en même temps feraleux (81,2 et 5,8% respectivement), contrairement aux teneurs en  $P_2O_5$  et K qui y sont très faibles (6,1 et 0,853%). Le phosphate hétérogène s'intercale entre ce sable feraleux susmentionné et du sable fin 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

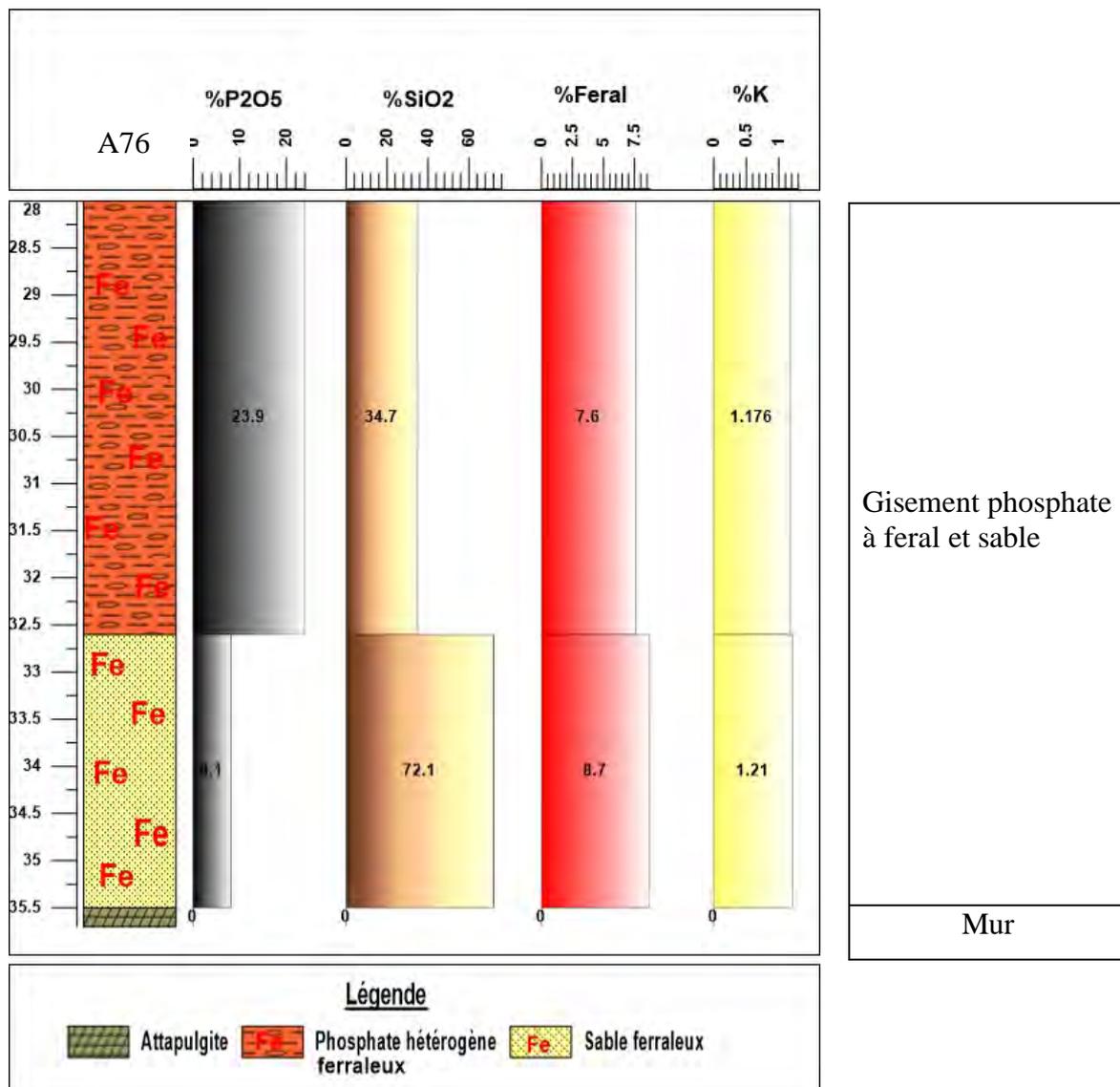
Le phosphate hétérogène à la base est séparé du phosphate homogène par des couches de marnes calcaires à lits d'argiles, à K élevé (4,74% en moyenne), très faiblement phosphatées (13,35%) et du phosphate argileux moyennement phosphaté (25,7%). Le phosphate hétérogène à coprolithes est argilo-marneux, ce qui montre que la sédimentation argileuse domine à ce niveau. Il renferme avec le phosphate homogène les pourcentages les plus élevés en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (31,4 et 32,3%). Les argiles bariolées du toit ont des teneurs quasi semblables aux argiles phosphatées intercalées au minerai. Le niveau « hors-couche » est représenté par du phosphate hétérogène altéré, avec des teneurs élevées en feral (9,45%), moyennes en SiO<sub>2</sub> (29%) et assez faibles en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 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 feraleux 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (8,1%). Les pourcentages en K sont faibles dans les deux faciès (1,193 en moyenne).

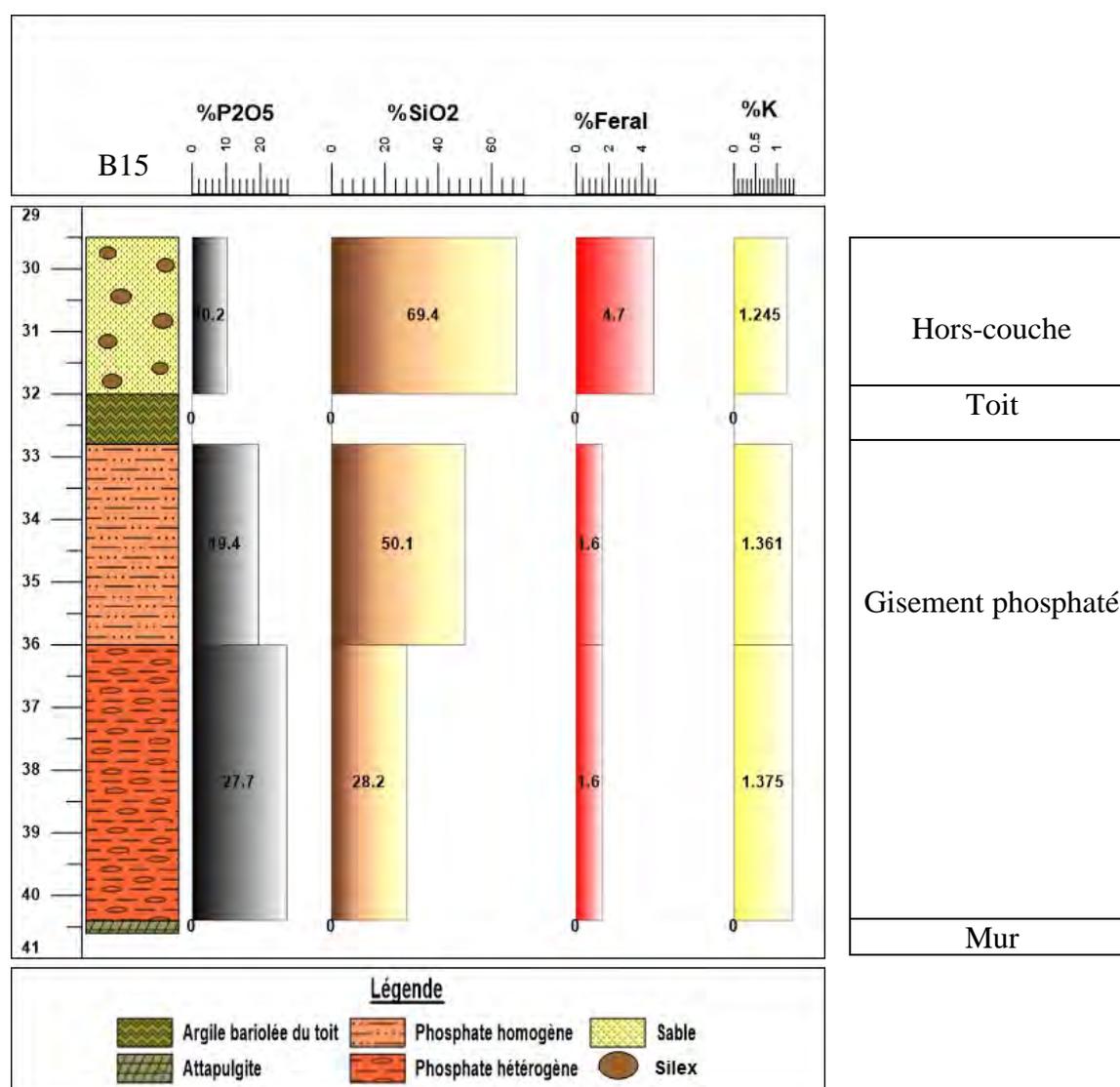


**Figure 16** : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage A76

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

### II.2.1 Sondage B15

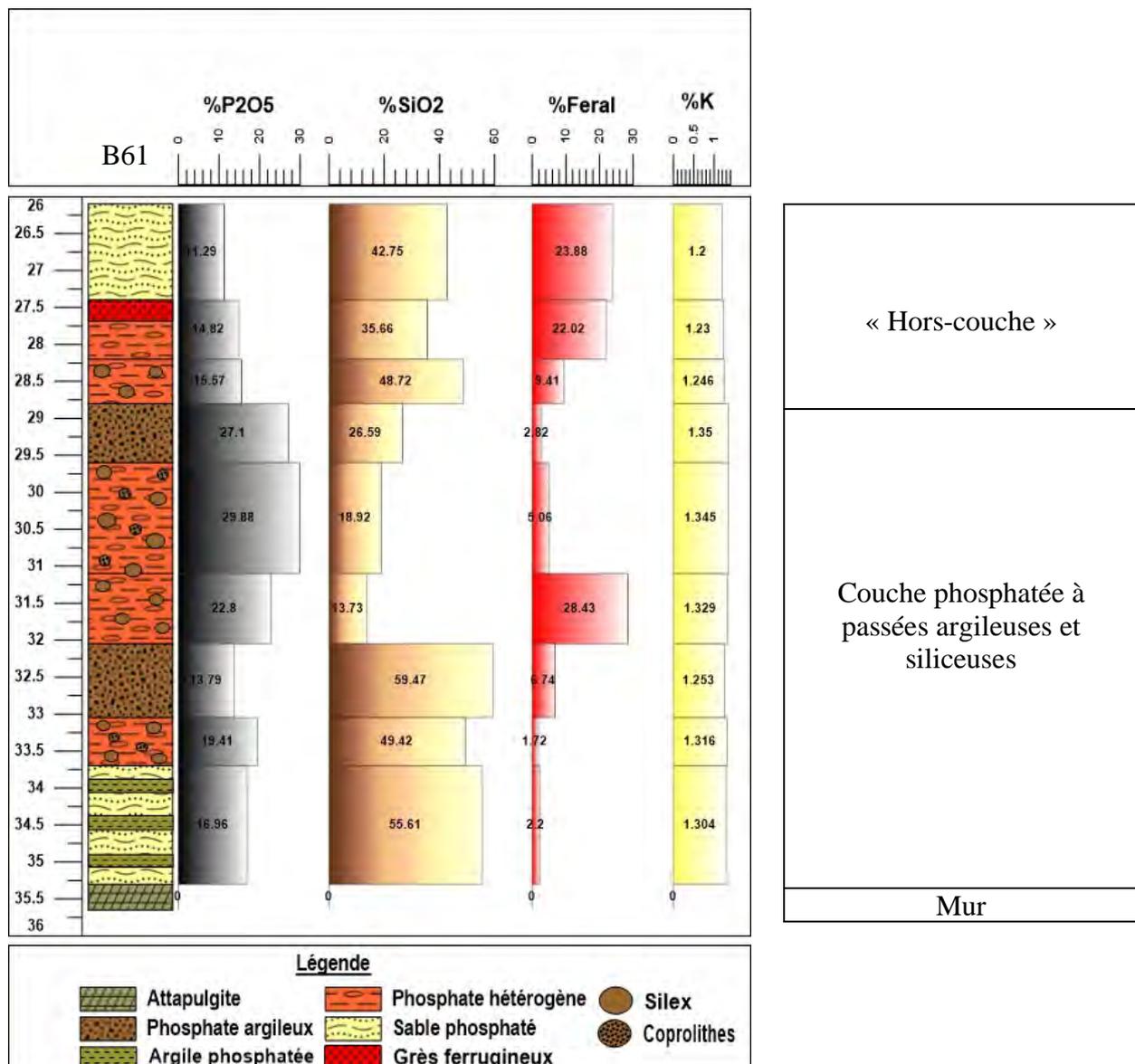
Au niveau de ce sondage, la silice est l'oxyde le plus représenté dans les faciès. Le phosphate hétérogène à la base est moyennement siliceux (28,2%), mais plus riche en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> que le phosphate homogène au-dessus qui contrairement à ce dernier est très siliceux, ce qui réduit son 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%), feraleux (4,7%) et très siliceux (69,4%).



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

### II.2.2 Sondage B61

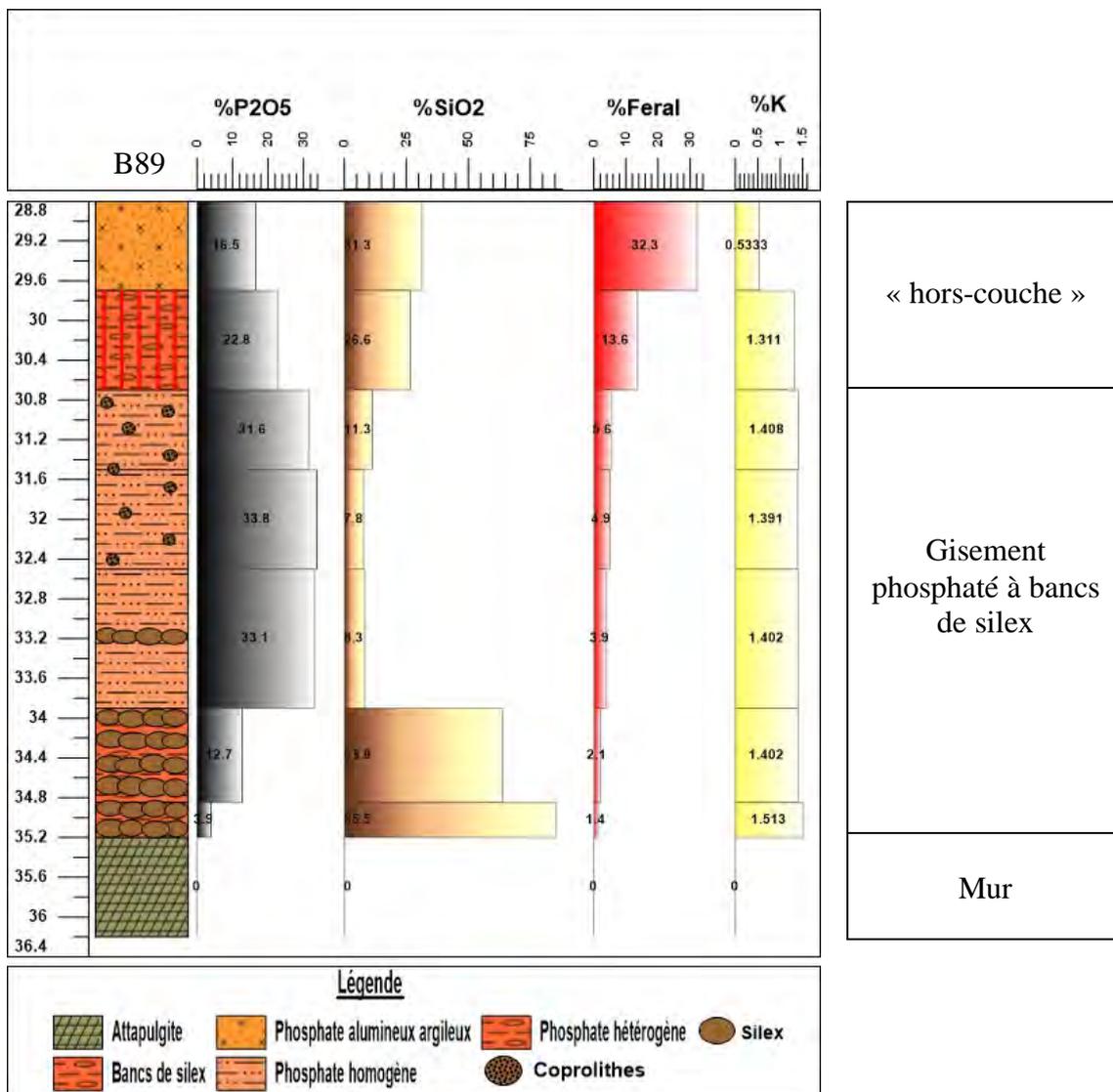
Du sable peu phosphaté (16,96%) est noté à la base à pourcentage en SiO<sub>2</sub> très élevé (55,61%). Les forts taux en silice enregistrés dans les niveaux à phosphate traduisent la présence de niveaux argileux et/ou de silex. Les teneurs élevées en feral dans ce minerai seraient dues à l'absence 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

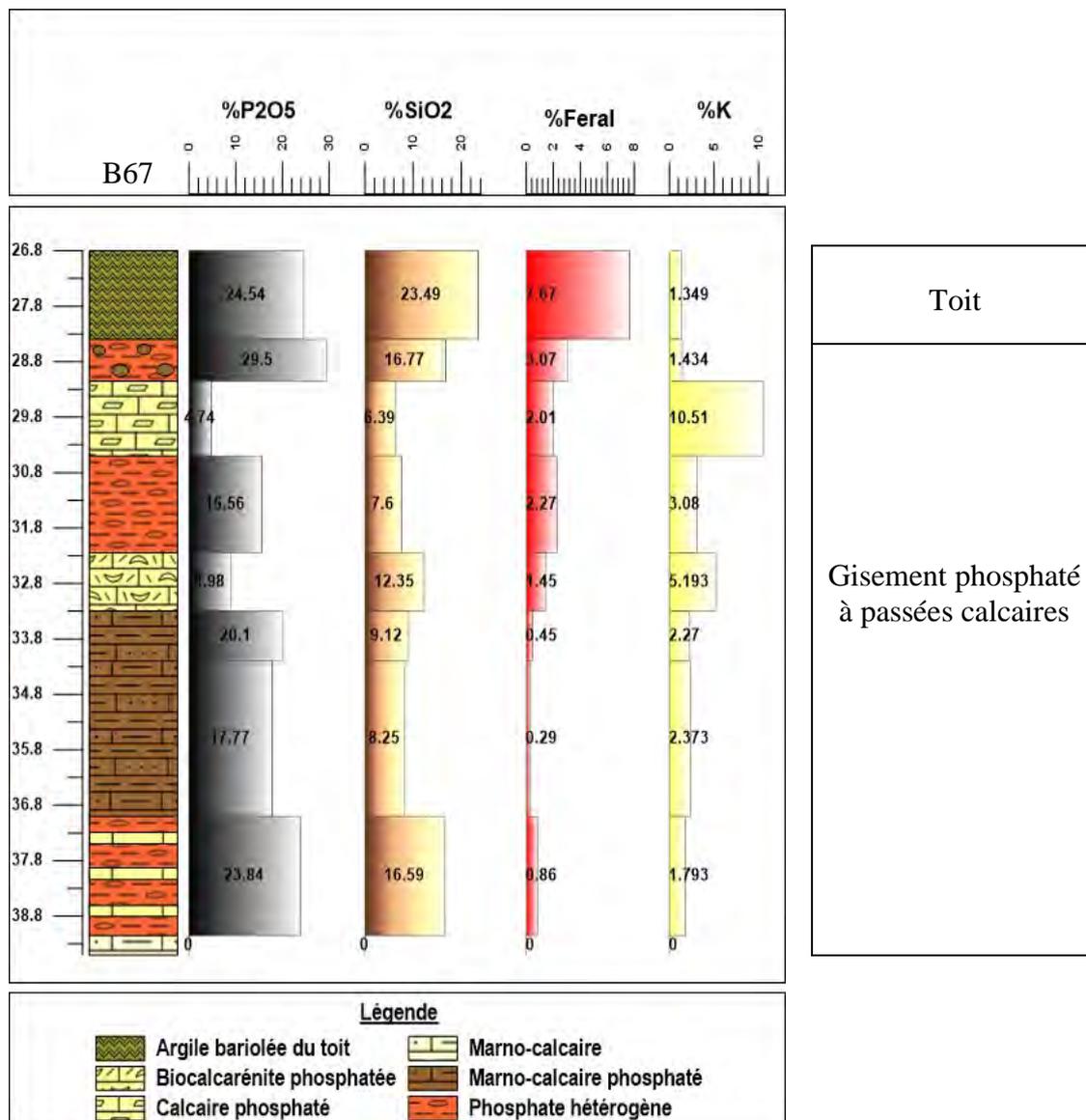
Les fortes teneurs en silice enregistrées à la base du sondage sont dues à la présence de bancs de silex à coprolithes et nummulites. Cependant leur présence au sein du gisement ne peut être considérée comme une anomalie parce qu'ils sont facilement séparés des particules phosphatées colmatées sur les 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 feraleux au sommet qui est dû à l'absence des argiles du toit. Le phosphate « hors couche » est constitué de phosphate hétérogène feraleux 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

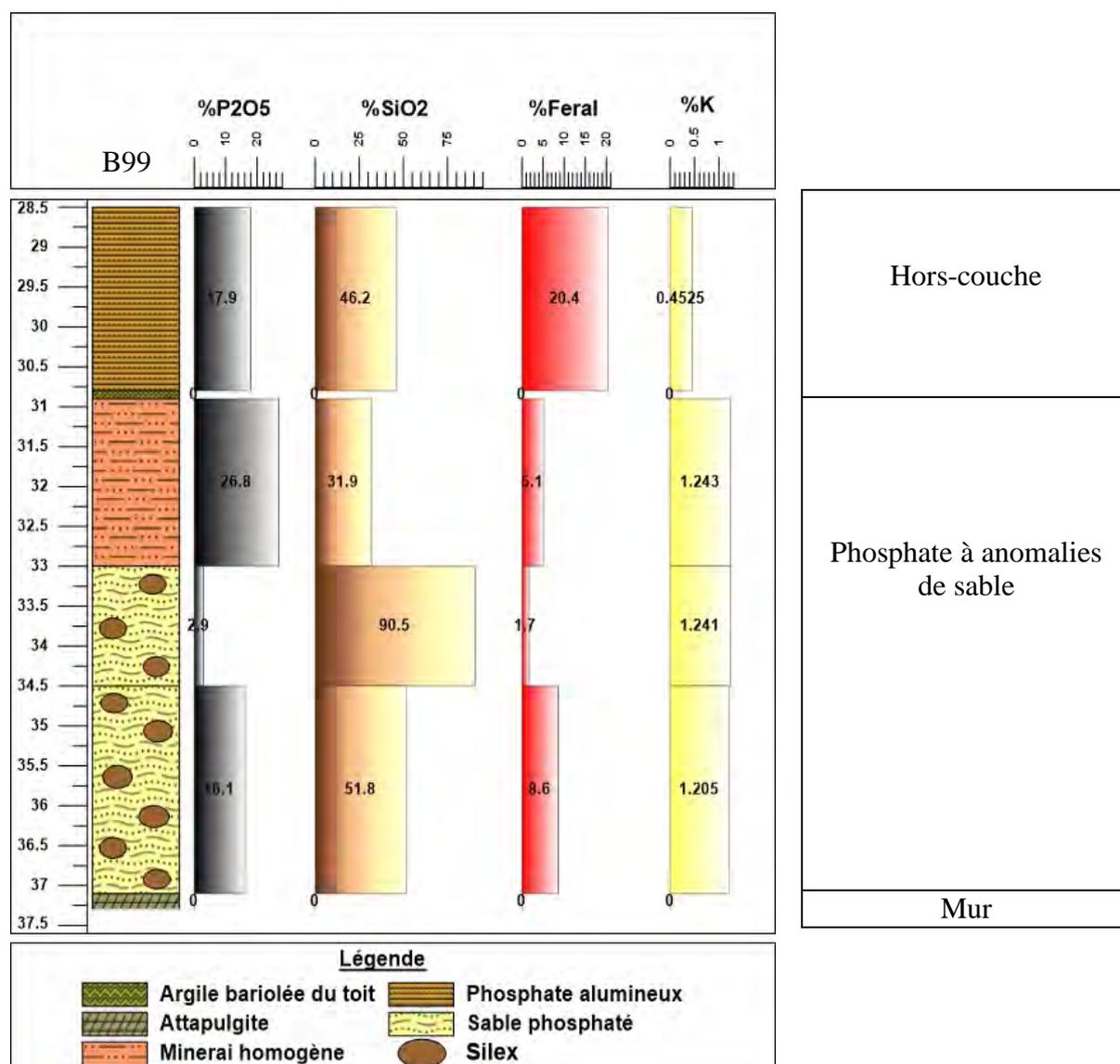
Nous notons la forte présence de faciès carbonatés avec : des bancs de calcaire au sein du gisement et de la calcite diffuse dans les niveaux à phosphate hétérogène, calciteux à la base et au sommet (K= 1,79 et 3,08). Les analyses des faciès montrent que plus les teneurs en K sont élevées, plus ces faciès 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub> élevé (29,5%) et faible pour les autres oxydes. Les argiles du toit sont ferreuses (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

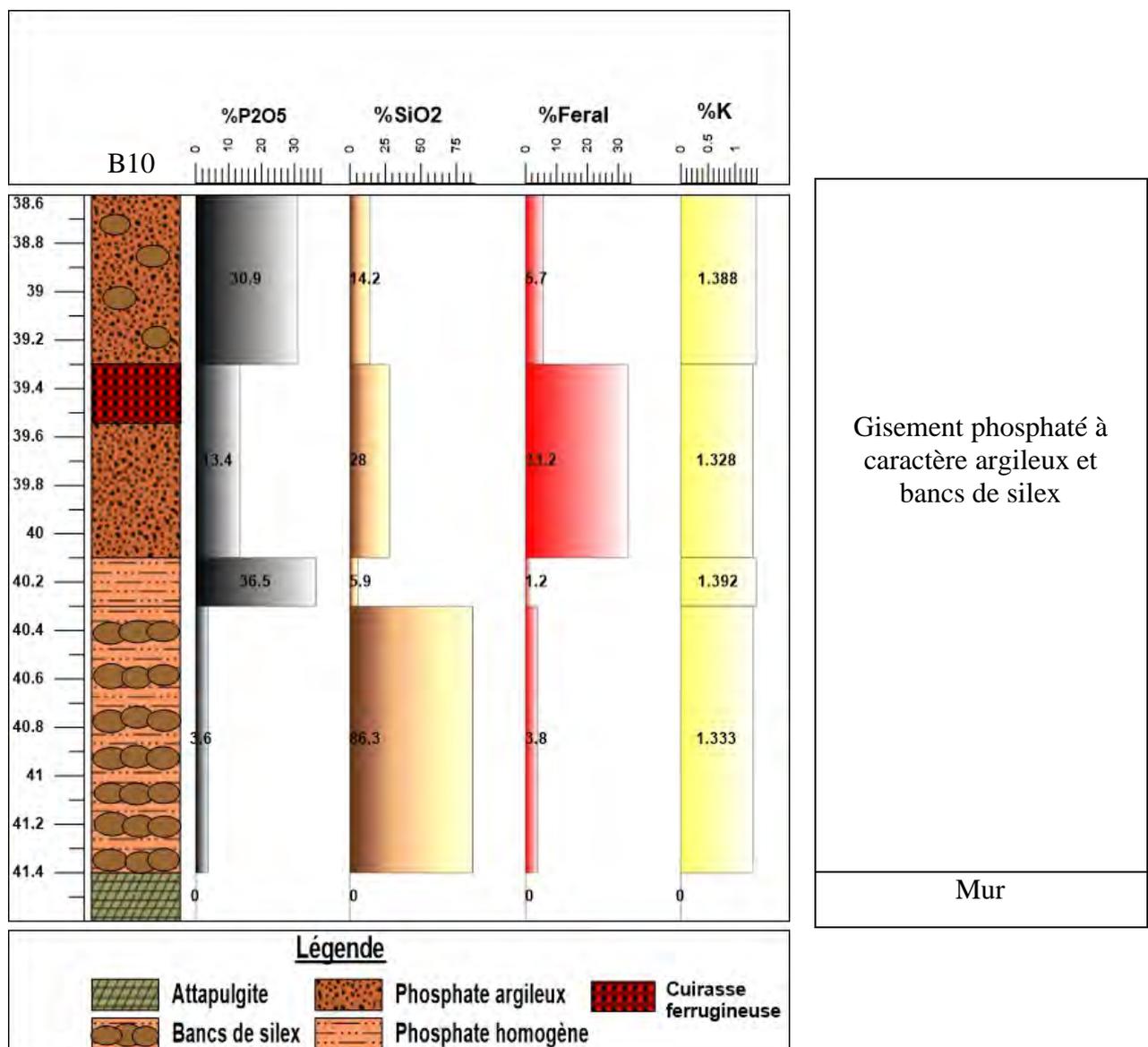
La silice est bien représentée à la base (teneur moyenne de 71,15%), témoignant la présence de sable à nombreux silex, très peu phosphaté (9,5% en moyenne). Le phosphate homogène au-dessus est à la fois moyennement siliceux et feraleux (31,9 et 5,1% respectivement) avec une teneur moyenne de 26,8% de  $P_2O_5$ . Les argiles du toit occupent une épaisseur très faible. Le phosphate d'alumine, riche en fer (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

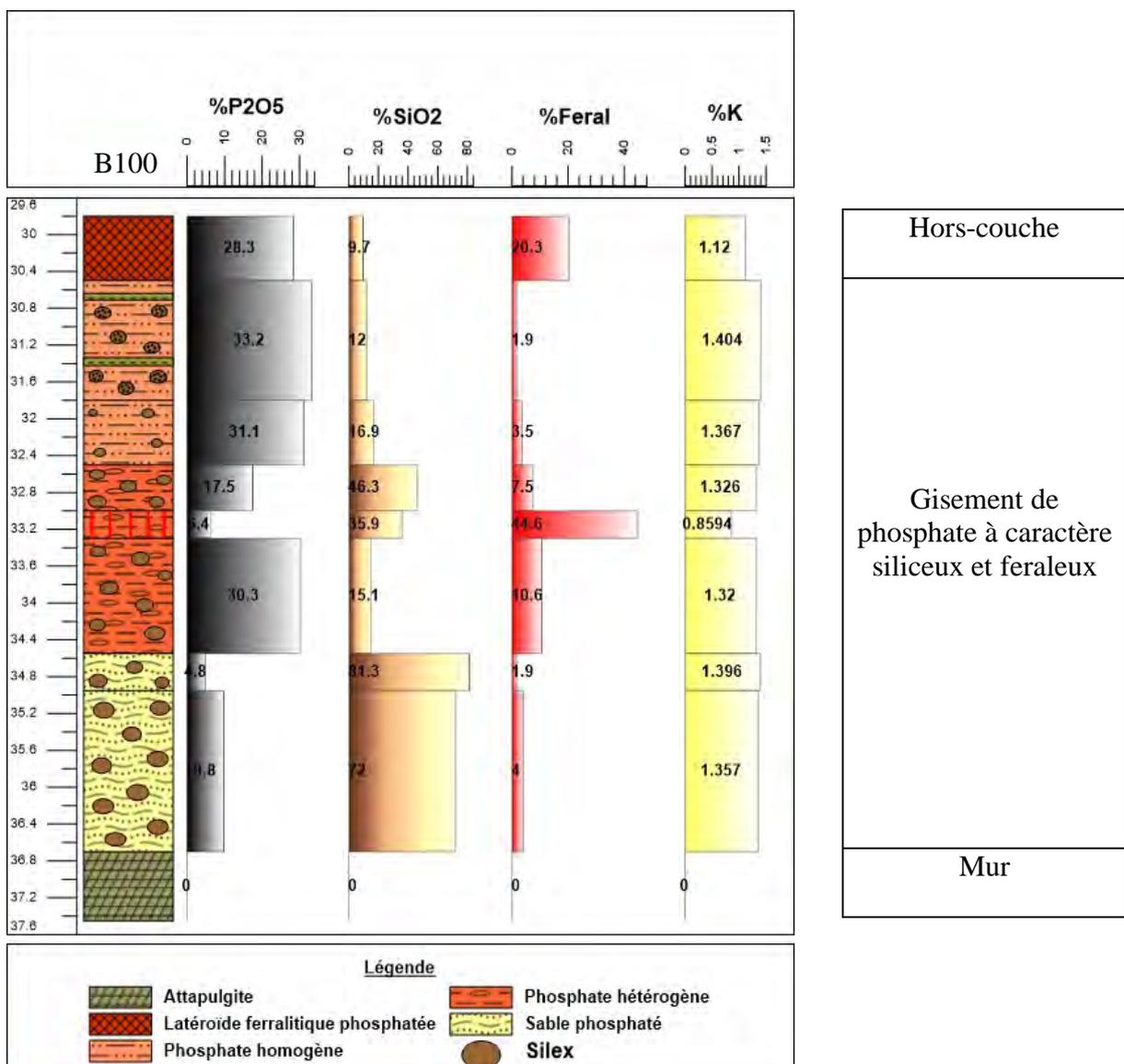
A la base, la forte teneur en  $\text{SiO}_2$  correspond à des bancs de silex sains qui ne sont pas considérés comme des anomalies. Les niveaux phosphatés sus-jacents ont des teneurs variables en  $\text{P}_2\text{O}_5$ , influencées surtout par le feral : plus le minerai est riche en feral, plus il 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  $\text{P}_2\text{O}_5$  faible (13,4%). Elle est surmontée d'un phosphate argileux moins feraleux que le niveau inférieur (feral = 5,7 et  $\text{P}_2\text{O}_5$  = 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

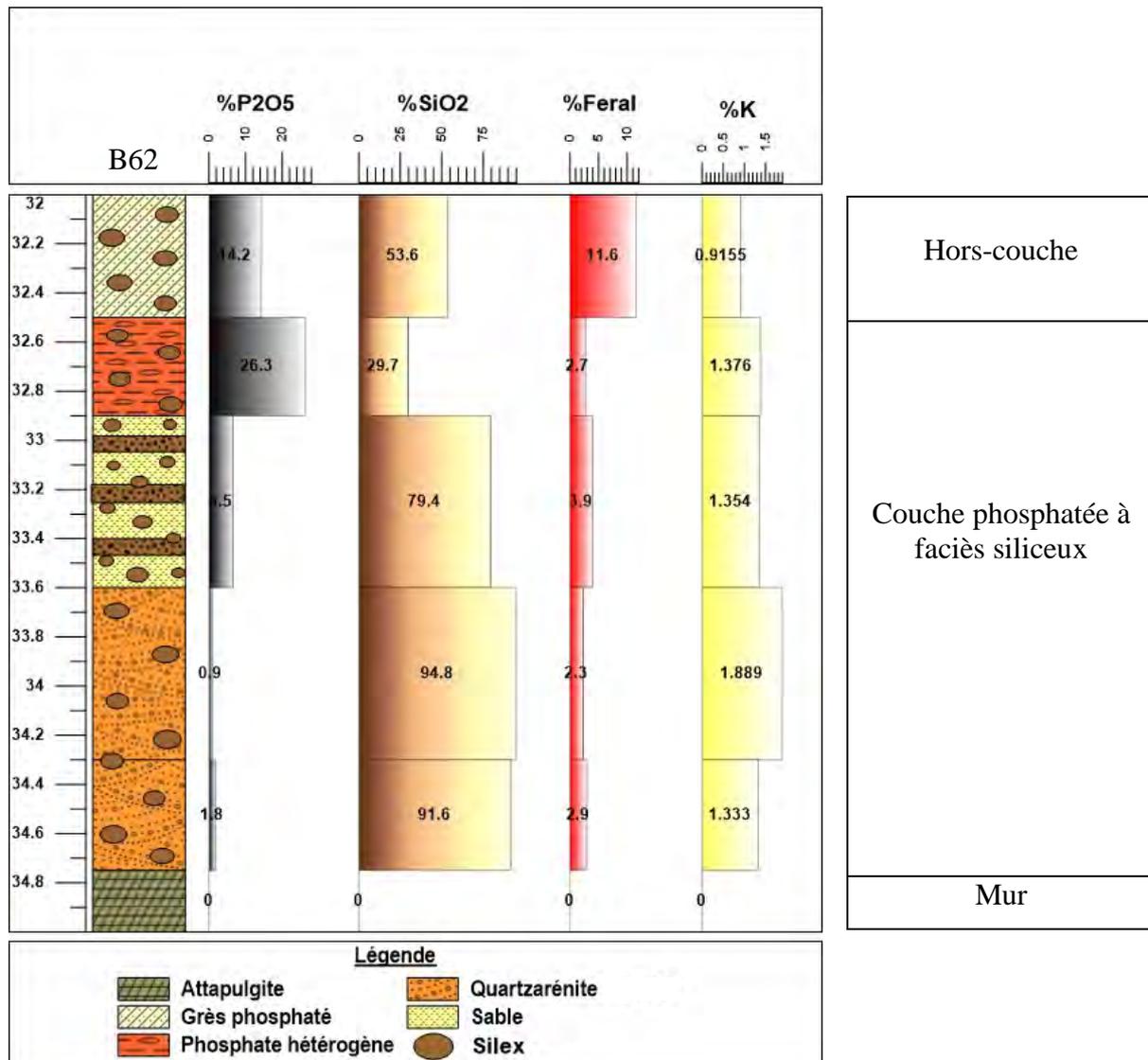
Les oxydes les plus présents dans les faciès sont le fer et la silice. Leur teneur élevée entraîne une réduction du phosphore et du K au niveau des faciès : au niveau des poches de sable à la base très peu phosphaté (% moyens : 76,65% en SiO<sub>2</sub> et 7,3% en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et du phosphate hétérogène à caractères argilo-siliceux et feraleux (en moyenne 41,1% de SiO<sub>2</sub>, 25,05% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 20,9% de fer). 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 32,15% et faible pour les autres oxydes. Le phosphate « hors-couche » représentée par de la latéritoïde phosphatée est très feraleux (20,3%).



**Figure 23** : Répartition verticale des oxydes majeurs du sondage B100

### II.2.8 Sondage B62

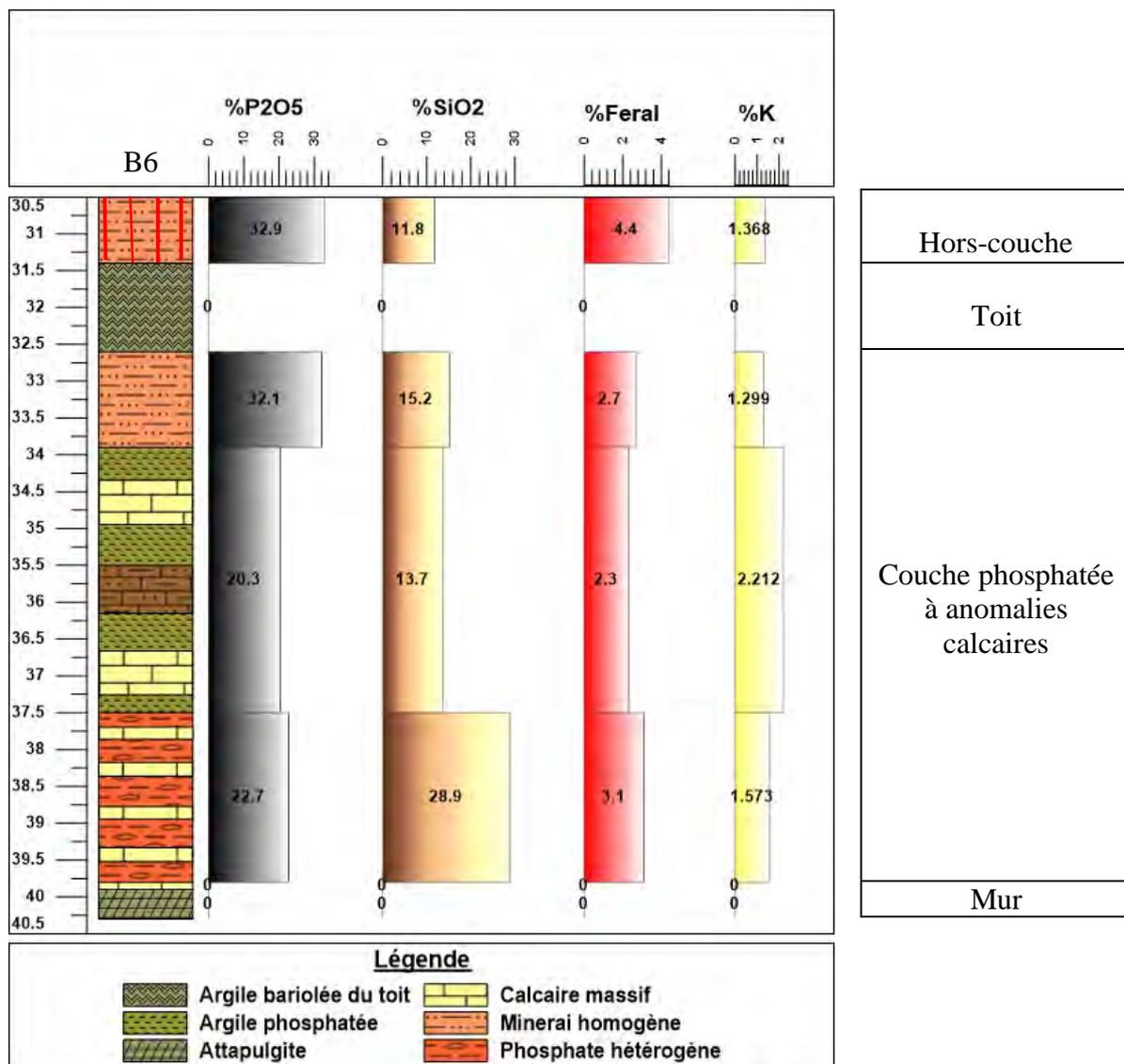
La silice est l'oxyde le mieux représenté dans les faciès. La constance de cet oxyde est due à la présence de faciès siliceux, notamment un banc de quartzarénite phosphatée et du sable intercalé dans du phosphate argileux. Ces deux niveaux susmentionnés ont des teneurs très élevées en  $\text{SiO}_2$  (88,6%), ce qui les appauvrit en  $\text{P}_2\text{O}_5$  (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  $\text{SiO}_2$  (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<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, en SiO<sub>2</sub> 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 feraleux (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

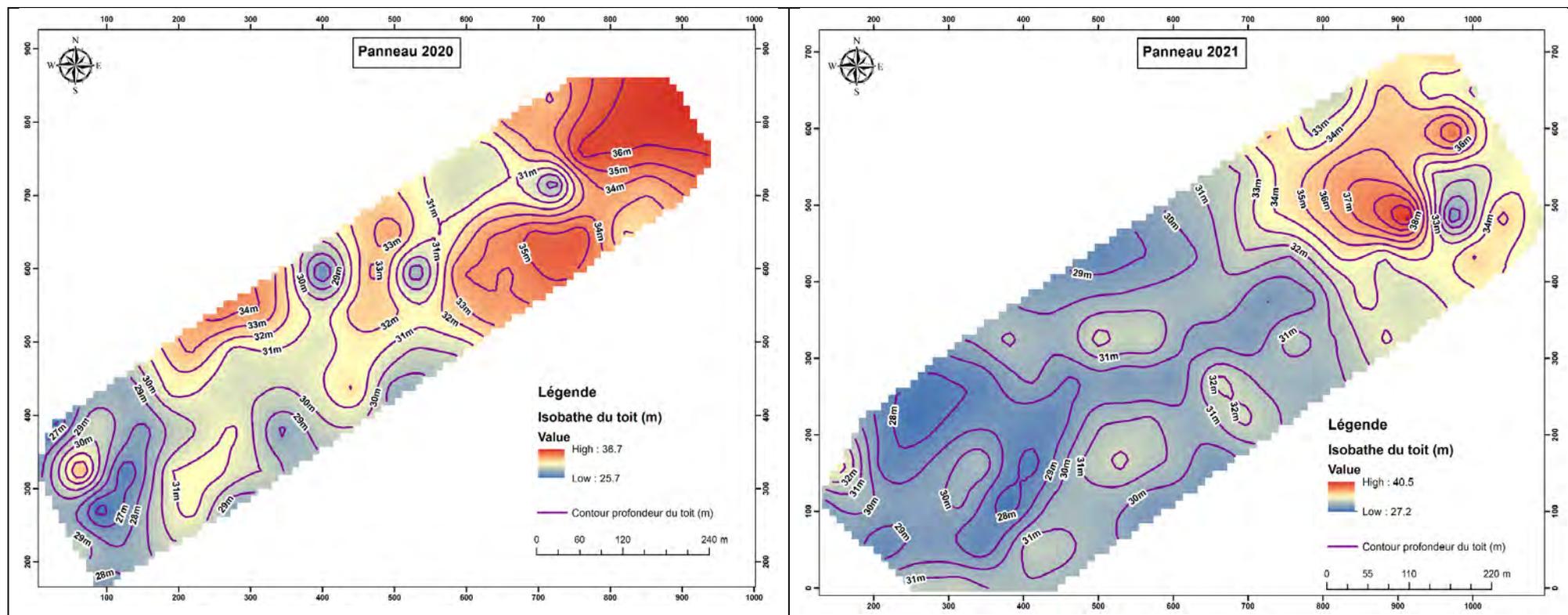
Pour comprendre la géométrie du gisement phosphaté, une série comparative de cartes stratigraphiques 2D a été réalisée. Il s'agit de la variation de la morphologie du toit, du mur et de l'épaisseur de la couche phosphaté des deux panneaux 2020 et 2021. Toutes les cartes ont été cotées par référence à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

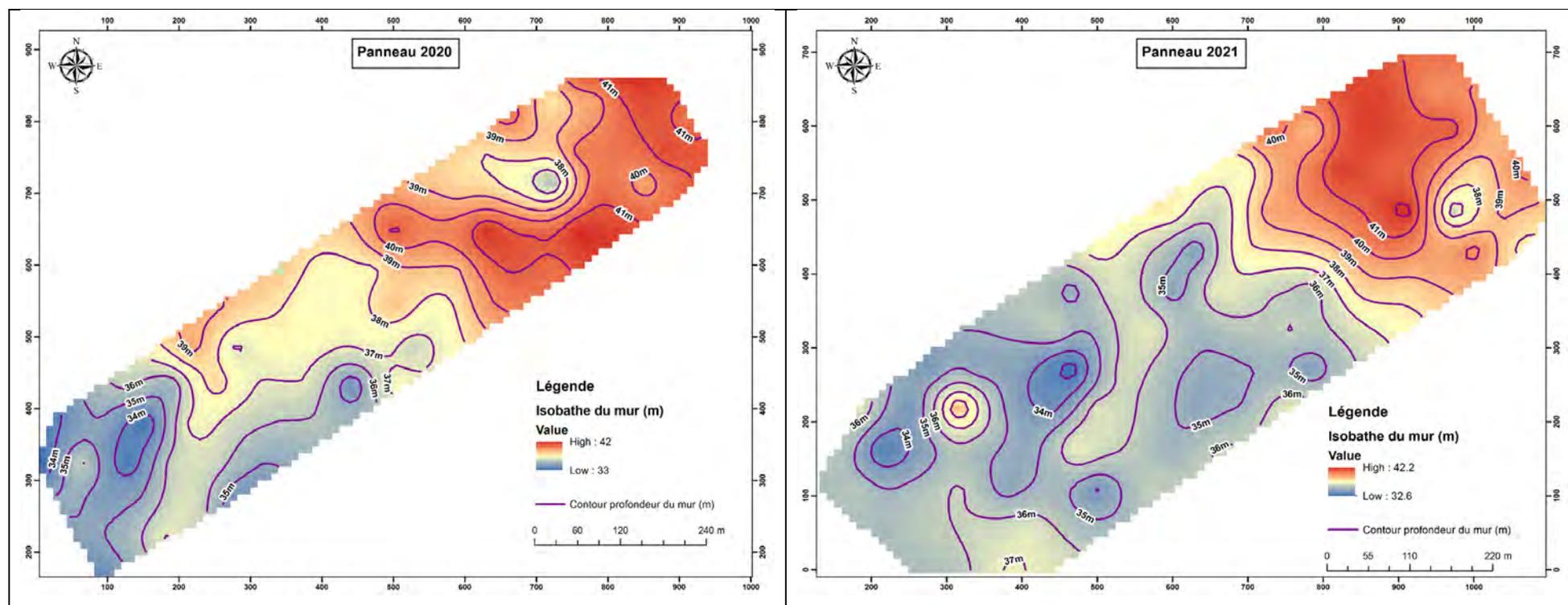
### III.2 Cartes des isobathes comparées du mur de la couche utile Xu des panneaux 2020 et 2021

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'enfoncé 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.

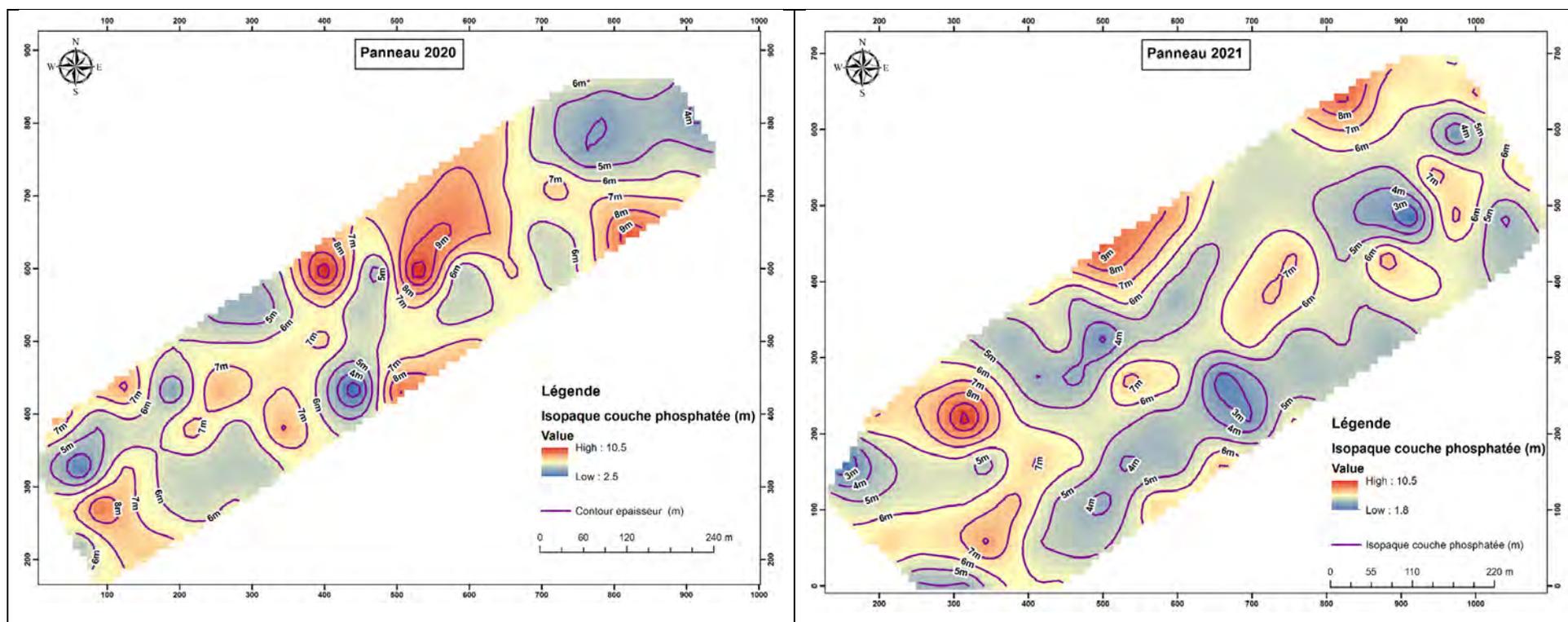


**Figure 27** : Cartes comparées des isobathes du mur de la couche utile Xu des panneaux 2020 (à gauche) et 2021 (à droite)

### 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 (SiO<sub>2</sub>)

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 diagenétique 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  $\text{SiO}_2$  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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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 fer 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  $\text{P}_2\text{O}_5$  et  $\text{CaO}$  sont partiellement remplacés par le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Slansky et al., 1964). Ce fer peut également provenir du lessivage du phosphate « hors-couche ». Lorsque ces oxydes de fer occupent une proportion importante dans le minerai, nous parlons de phosphate ferreux qui devient par conséquent très pauvre en phosphore. La formation de phosphates ferreux n'est ainsi pas synchrone au dépôt des phosphates. Tout comme la silice, le fer 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-ferrallitique 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-fer, 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'infiltreraient 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.