



**HAL**  
open science

## Nature et origine des cuirasses ferrugineuses de la région de Khat Oummat Elbid, Inchiri, Mauritanie

Rayane El Ghastalany, Yannick Branquet, Mohamed Abdoullah Bagga, Imad Khalil Taviche, Amina Wafik, Mohamed Gnahalla, El Houssein Abdeina

### ► To cite this version:

Rayane El Ghastalany, Yannick Branquet, Mohamed Abdoullah Bagga, Imad Khalil Taviche, Amina Wafik, et al.. Nature et origine des cuirasses ferrugineuses de la région de Khat Oummat Elbid, Inchiri, Mauritanie. Bulletin de la Société Géologique de France, 2023, 194, pp.3. 10.1051/bsgf/2023002 . insu-04032068

**HAL Id: insu-04032068**

**<https://insu.hal.science/insu-04032068v1>**

Submitted on 16 Mar 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Nature et origine des cuirasses ferrugineuses de la région de Khat Oummat Elbid, Inchiri, Mauritanie

Rayane El Ghastalany<sup>1,\*</sup>, Yannick Branquet<sup>2,3</sup>, Mohamed Abdoullah Bagga<sup>4</sup>,  
Imad Khalil Taviche<sup>1</sup>, Amina Wafik<sup>5</sup>, Mohamed Ghnahalla<sup>6</sup> et El Houssein Abdeina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Nouakchott, Faculté des sciences et techniques, Département de géologie, BP 5026, Nouakchott, Mauritanie

<sup>2</sup> Géosciences Rennes, UMR 6118, CNRS–Université de Rennes, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

<sup>3</sup> ISTO, UMR 7327, Université d'Orléans–CNRS–BRGM, 1A, rue de la Férollerie, CS 20066, 45071 Orléans cedex 2, France

<sup>4</sup> ANARPAM (Agence nationale de recherche géologique et du patrimoine minier), Zone administrative Nouakchott-Ksar, BP 654, Nouakchott, Mauritanie

<sup>5</sup> Université Cady Ayyad-Marrakech, Faculté des sciences Semlalia, Laboratoire de dynamique de la lithosphère et genèse des ressources minérales et énergétiques, BP 2390, 40000 Marrakech, Maroc

<sup>6</sup> IC2MP, UMR 7285, Université de Poitiers–CNRS, 5, rue Albert Turpin, 86073 Poitiers cedex 9, France

Reçu le 19 juillet 2022 / Accepté le 4 janvier 2023 / Publishing online: 8 March 2023

**Résumé** – Les chapeaux de fer (ou gossans) développés à l'aplomb d'une minéralisation sulfurée et/ou oxydée primaire restent un métalotecte majeur pour l'exploration minière. L'identification de gossans au sein de régions arides à régolithe ferrugineux de différentes origines n'est pas aisée et suppose une bonne connaissance de ces formations superficielles indurées rouges à l'échelle régionale. En s'inscrivant dans cette démarche, nous avons étudié certaines cuirasses ferrugineuses de la région de Khat Oummat Elbid (KOB) d'Inchiri en Mauritanie, région activement prospectée pour l'or et le cuivre en particulier. La zone de KOB appartient au segment orogénique des Mauritanides septentrionales. Deux collines à socle de quartzite et coiffées de cuirasses ferrugineuses ont été sélectionnées pour cette étude. Les campagnes de terrain ont permis d'étudier le socle, de lever des logs dans les cuirasses et d'échantillonner pour des analyses pétrographiques, minéralogiques (microscopie optique, MEB, DRX) et géochimiques (multi-élémentaire roches totales). Il apparaît que les cuirasses étudiées sont des ferricrètes au sens strict sans lien direct avec le développement de profils latéritiques. Le socle quartzitique contribue uniquement en produisant une fraction clastique grossière à la base des ferricrètes. Le ciment des ferricrètes est goethitique à la base entre les clastes de quartzite tandis que le sommet est marqué par des granulométries très fines et des processus authigéniques dominants (nodules et pisolithes à cortex de goethite et hématite). De la base au sommet des ferricrètes, des grains d'ilménite arrondis accompagnés de grains de quartz de petite taille suggèrent un transport éolien « saupoudrant » ce matériel depuis des sources externes. Ces ferricrètes sont donc caractérisés par des allochtonies mécaniques et chimiques importantes, la source du Fe en solution comme des grains d'ilménite étant difficilement traçable avec certitude dans cette région. La comparaison avec des teneurs moyennes en éléments majeurs et traces de gossans, cuirasses latéritiques et minerai de Fe des tourbières (« bog ore ») montre que la géochimie en roche totale est utilisable pour discriminer les ferricrètes de KOB des gossans au premier ordre, mais qu'il convient d'implémenter les bases de données avec des analyses de gossans se développant au-dessus de gisements de type *iron-oxides-copper-gold deposits* comme ceux exploités en Inchiri (e.g. gisement de Guelb-Moghrein, près d'Akjoujt).

**Mots clés** : Mauritanides septentrionales / Inchiri / cuirasses ferrugineuses / ferricrète / gossan / exploration minière

**Abstract** – **Nature and origin of the ferruginous duricrust of the Khat Oummat Elbid area, Inchiri, Mauritania.** Formed through oxidation of underlying primary sulfide- and/or oxide-bearing mineralization, gossans remain a major metalotect for mineral exploration. The identification of gossans within arid regions with ferruginous regolith of different origins is not easy and requires a good knowledge of these superficial red indurated formations on a regional scale. Following this approach, we studied some ferruginous

\*Auteur correspondant : [elghastalanyrayane@gmail.com](mailto:elghastalanyrayane@gmail.com)

cuirasses in the Khat Oummat Elbid (KOB) region of Inchiri in Mauritania, a region actively prospected for gold and copper in particular. The KOB zone belongs to the orogenic segment of the northern Mauritanides. Two hills with a quartzite basement and capped with ferruginous duricrust were selected for this study. The good outcrop quality made it possible to study the basement, to realize logs across the duricrusts and to sample for petrographic, mineralogical (optical microscopy, SEM, DRX) and geochemical (multi-elementary total rock) analyses. The duricrusts are ferricretes in the strict sense with no direct link to the development of lateritic profiles. The quartzitic basement contributes only by producing a coarse clastic fraction at the base of the ferricretes. The cement of the ferricretes is goethitic at the base in between the quartzite clasts while the top is marked by very fine grain sizes and dominant authigenic processes (nodules and pisolites with cortex of goethite and hematite). From the base to the top of the ferricretes, rounded ilmenite grains accompanied by small quartz grains suggest aeolian transport “sprinkling” this material from external sources. These ferricretes are therefore characterized by significant mechanical and chemical allochthonies, the source of Fe in solution such as grains of ilmenite being difficult to trace with certainty in this region. The comparison with average contents of major and trace elements of gossans, lateritic cuirasses and bog ore shows that whole rock geochemistry can be used to discriminate KOB ferricretes from gossans at first-order, but that databases should be implemented with analyzes of gossans developing above iron-oxides-copper-gold deposits such as those exploited in Inchiri (*e.g.* the Guelb-Moghrein deposit, near Akjoujt).

**Keywords:** northern Mauritanides / Inchiri / iron-rich duricrusts / ferricrete / gossan / mining exploration

## 1 Introduction

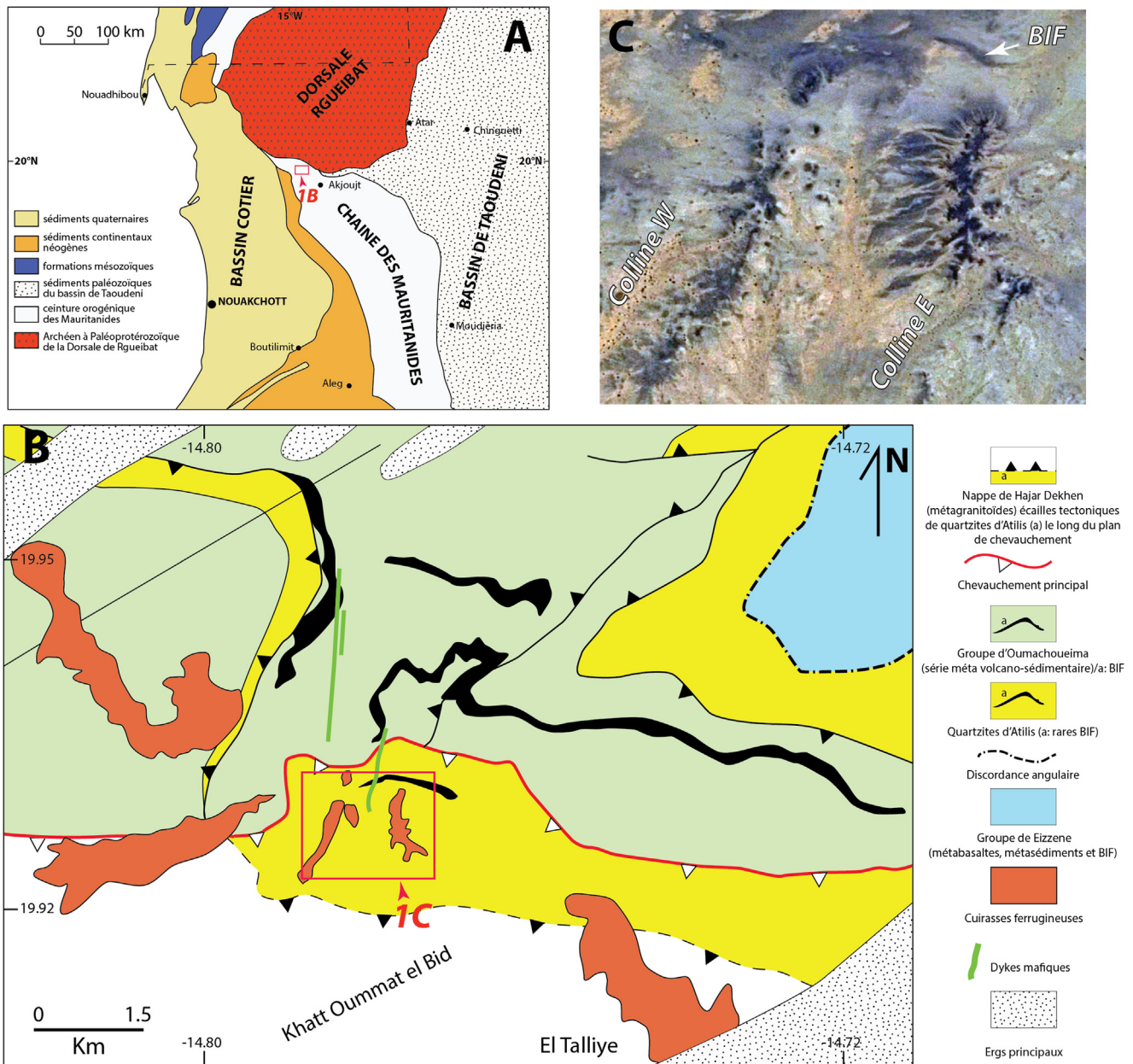
En Mauritanie, l'État de Inchiri est actuellement le lieu de recherches minières intenses, notamment pour l'or (chantiers artisanaux d'orpaillage et mine de Tasiast) et pour le cuivre (mine de Guelb-Moghrein) (Fig. 1). Cette recrudescence récente de l'orpaillage accélère le développement minier et a donné lieu à la création d'une nouvelle société nationale selon le décret n° 2020-065 du 28 mai 2020 portant création d'une société nationale dénommée MAADEN Mauritanie et fixant ses règles d'organisation et de fonctionnement et d'un nouveau cadastre minier. Au sein du segment orogénique des Mauritanides septentrionales, la stratégie d'exploration repose en partie sur la recherche de gossans (*i.e.* chapeaux de fer) surmontant des minéralisations primaires à oxydes/sulfures comme des amas sulfurés volcanogéniques ou des gisements de Cu/Au et oxydes de fer (*e.g.* « IOCG » pour le gisement de Guelb-Moghrein proche d'Akjoujt, Kolb *et al.*, 2006). Cependant, cette région d'Inchiri, et plus particulièrement la zone de Khat Oummat Elbid (KOB, Fig. 1), présente de nombreuses et diverses formations superficielles indurées rouges riches en fer et silice dont l'origine est encore mal comprise (Maignien, 1958; Pitfield *et al.*, 2004). Il apparaît donc majeur de caractériser ces formations superficielles rouges afin de pouvoir distinguer entre gossan surmontant une minéralisation primaire cible des compagnies minières et formations superficielles rouges non économiques telles que les cuirasses ferrugineuses et/ou alumineuses sur un profil latéritique, les ferricrètes et potentiellement le minerai de fer des tourbières (« bog ore », bien que non économique actuellement). De plus, dans cette région, d'épais niveaux de fer rubané (« BIF ») sont intercalés dans les formations plissées et faillées de la chaîne des Mauritanides (Fig. 1) sans que leur contribution potentielle au dépôt des formations superficielles rouges indurées ne soit évaluée ou discutée. Dans cette étude, nous présentons des nouvelles données minéralogiques, texturales et géochimiques permettant de caractériser la nature et discuter l'origine de ces formations. Nos

investigations nous ont également amené à revoir la cartographie du socle dans ce secteur.

## 2 Contexte géologique

Les formations ferrugineuses indurées étudiées (par la suite nommée cuirasse sans connotation génétique) se situent à 40 km au nord-ouest de la ville d'Akjoujt proche de la zone de contact entre la dorsale archéenne et le paléoprotérozoïque de Rgueibat et la chaîne des Mauritanides (Fig. 1A). Le socle des cuirasses est constitué des roches des Mauritanides résultat des orogènes panafricaine et hercynienne (Lécorché *et al.*, 1989; Dallmeyer et Lécorché, 1989). Les deux orogènes successifs correspondent à des raccourcissements qui ont engendré des ceintures de plis et des chevauchements syn-métamorphes à vergence principale vers l'Est. Le segment nord de la chaîne qui nous concerne (*i.e.* région d'Akjoujt) est principalement marqué par la déformation hercynienne caractérisée par un front chevauchant oriental d'unités tectono-métamorphiques sur le socle archéen d'Amsaga et sur les sédiments du bassin paléozoïque de Taoudeni (Fig. 1A). Les roches impliquées dans les Mauritanides septentrionales sont d'âges paléo- à néoprotérozoïques (Pitfield *et al.*, 2004) avec de très fortes incertitudes sur l'âge réel des protolithes (Martyn et Strickland, 2004).

Comprise entre deux champs dunaires majeurs (respectivement Akchar-azzafal et Aoukar, d'orientation NE-SW), la région de KOB correspond à un chevauchement majeur de la nappe de Hajar Dekhen sur les groupes d'Oumachouema et d'Eizzene (Fig. 1B). Ce chevauchement vers l'Est juxtapose du matériel métagranitique sur des séries meta-volcano-sédimentaires (Pitfield *et al.*, 2004). Cependant, dans le secteur de KOB, la cartographie reste approximative et les contours peu précis comme indiqué sur la feuille d'Akjoujt (Pitfield *et al.*, 2004). Dans ce secteur de KOB, les cuirasses reposant sur ce socle forment des buttes (altitude moyenne 130 m) à pentes très douces avec des colluvions pelliculaires formées de cailloutis ferrugineux (Fig. 1C et 2A). Les ravines du réseau



**Fig. 1.** A : carte géologique simplifiée du Nord-Ouest de la Mauritanie (modifiée de Pitfield *et al.*, 2004) ; B : carte structurale de la région de Khat Oummat Elbid (encart en A) depuis les cartes géologiques d'Akjoujt (Marcelin, 1968 ; Pitfield *et al.*, 2004) modifiées et réinterprétées par nos données ; C : image satellite Google Earth de la zone d'étude (encart en B) montrant les deux collines Ouest et Est coiffées de formations ferrugineuses (en sombre) sur un socle constitué des quartzites d'Atilis comportant quelques BIF au Nord.

**Fig. 1.** A : simplified geological map of North-West Mauritania (modified from Pitfield *et al.*, 2004) ; B : structural map of the Khat Oummat Elbid region (inset in A) from the Akjoujt geological maps (Marcelin, 1968 ; Pitfield *et al.*, 2004) modified and reinterpreted by our data ; C : Google Earth satellite image of the study area (inset in B) showing the two West and East hills topped with ferruginous formations (in dark) on a basement made up of Atilis quartzites including few BIFs to the North.

hydrographique actuel sont radiales et divergent par rapport au sommet des buttes, ces tributaires étant collectés par de plus larges vallées (altitude moyenne 115 m) entre ces buttes ferrugineuses. Malgré un colluvionnement important et parfois gênant, le socle affleure localement dans les pentes (Fig. 2B) et les pentes plus raides permettant le levé de log du régolithe ferrugineux. Le travail s'est porté principalement

sur deux grandes collines coiffées de formations ferrugineuses (Fig. 1B), mais de nombreux pointements de formations rouges sont observables sur les photos satellites et aériennes de cette région de l'Inchiri (e.g. Fig. 1B, C), conduisant les prospecteurs miniers à suspecter la présence de gossan au-dessus de concentrations métalliques primaires sulfurées et/ou oxydées.

### 3 Échantillonnage et méthodes

Plusieurs campagnes de terrain ont été réalisées entre 2017 et 2021 dans la région de KOB dont certaines en collaboration avec l'industrie minière intéressée par la distinction entre gossan et autres formations superficielles ferrugineuses. Dans la présente étude, nous focalisons sur la zone de la [figure 1C](#) qui comporte deux collines (Ouest et Est) surmontées par ces cuirasses. Au total, 50 échantillons ont été récoltés, dont 34 de cuirasses, 8 de BIF, 6 de quartzites et 2 échantillons de dykes mafiques. Les coordonnées géographiques des échantillons présentés et analysés dans cette étude sont reportées dans le [tableau S1](#). Les échantillons n° 6XX concernent la colline Est et 7XX la colline Ouest. Au niveau des cuirasses, la position dans le profil vertical a été systématiquement notée (base, milieu, top, [Tab. S1](#)).

À partir de lames minces, les observations et mesures en microscopie optique (transmission et réflexion) et au MEB (JEOL IT 300 LA EDS à pression variable, résolution 5 nm à 20 keV) ont été réalisées à Géosciences Rennes.

Les analyses DRX ont été réalisées sur les poudres obtenues au mortier à agate à partir des fragments des cuirasses puis préparées suivant le protocole standard proposé par [Brindley et Brown \(1980\)](#) et [Moore et Reynolds \(1997\)](#). Les analyses ont été réalisées à l'Université de Poitiers équipée d'un diffractomètre Bruker D8 ADVANCE, rayonnement  $\text{CuK}\alpha$ , à 40 kV, 40 mA, sur une plage angulaire de  $2-65^\circ 2\theta$  avec un pas  $0,025^\circ 2\theta$  par 3 s pour la fraction  $> 2 \mu\text{m}$  et sur une plage angulaire bas angles de  $2-30^\circ 2\theta$  avec un pas de  $0,02^\circ 2\theta$  par 3 s pour les fractions  $< 2 \mu\text{m}$ . Les fractions fines des poudres initiales ont été dispersées dans de l'eau osmosée en utilisant l'agitation ultrasonique Elma S60. Ces particules fines ont été séparées par des méthodes de centrifugation en utilisant une centrifugeuse Sorvall LEGEND XRF avec une vitesse de rotation de 1000 rpm pendant 2 min 30 s à  $20^\circ\text{C}$ . Les fractions  $< 2 \mu\text{m}$  obtenues ont été pipetées sur des lames de verre et séchées à l'air (AD) pour être analysées à température ambiante. Après analyse AD, les lames orientées ont été analysées après saturation à l'éthylène-glycol (EG), et après chauffage à  $350^\circ\text{C}$  et  $550^\circ\text{C}$  pendant 4 heures. L'identification des phases minérales et les modèles d'indexation ont été obtenus à l'aide du logiciel X'pert High Score par comparaison avec les fichiers PDF3 de l'International Center for Diffraction Data (ICDD JCPDS).

Les analyses géochimiques en roche totale ont été réalisées sur 27 échantillons par ALS (Irlande) utilisant une dissolution/attaque par 4 acides ( $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$  dissolution + HCl leaching) puis des analyses par ICP-AES and ICP-MS pour les majeurs et les traces respectivement (résultats dans le [Tab. S1](#); protocole ME-MS61 détaillé et marges d'erreur sur <https://www.alsglobal.com/-/media/ALSGlobal/Resources-Grid/ALSSuperTraceMethodsRev10.pdf>).

## 4 Résultats

### 4.1 À l'échelle de l'affleurement

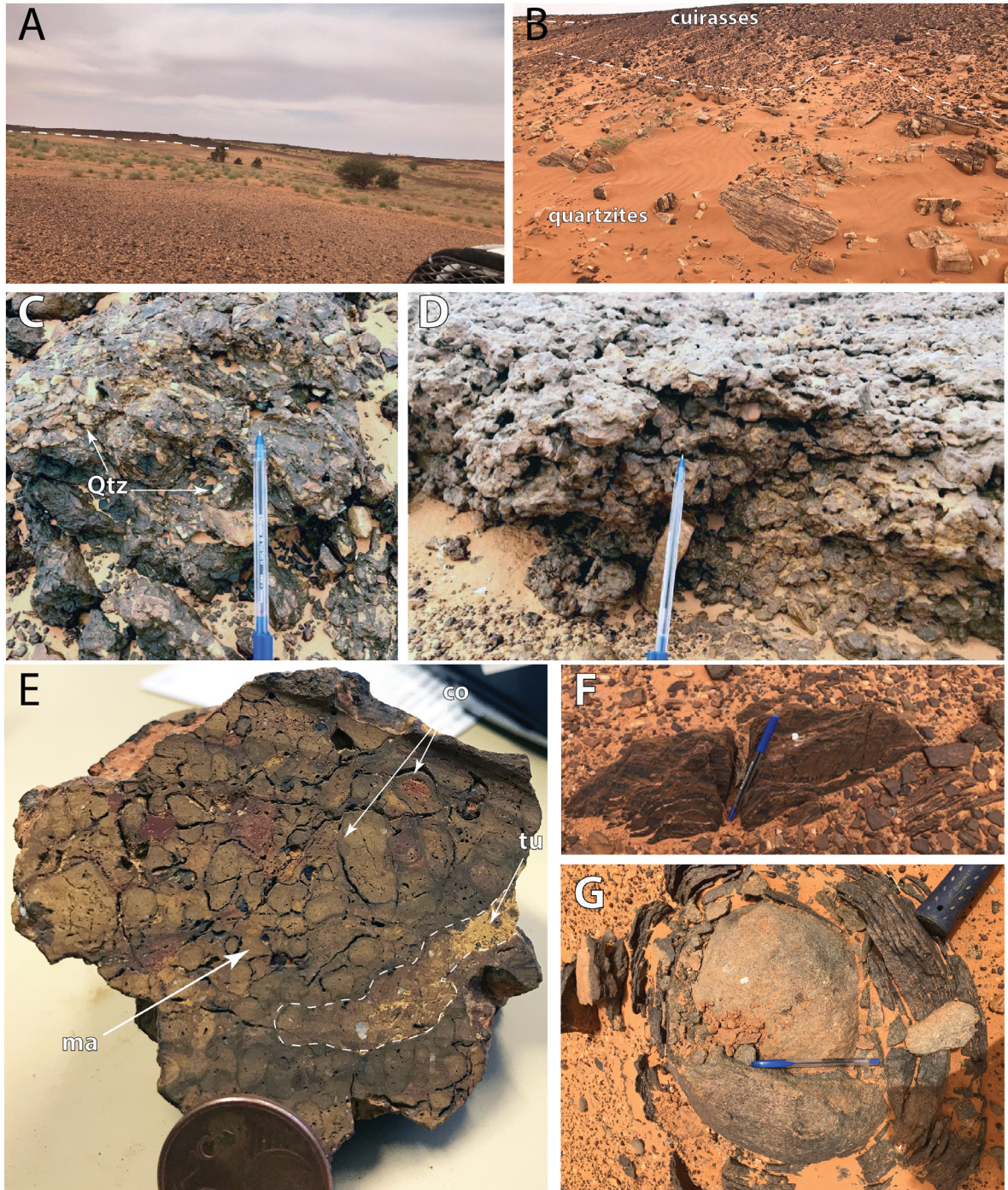
Les cuirasses de KOB (Khat Oummat Elbid) ont une épaisseur maximum de 5 m sur les deux collines étudiées ([Fig. 2A](#)), ce qui représente un volume considérable de

matériaux ferrugineux en place (approximativement 1.5 millions  $\text{m}^3$ ) comme en colluvion. Elles surmontent les roches du socle avec un contact franc ([Fig. 2B](#)). Les cuirasses sont très indurées par la cimentation d'oxydes/hydroxydes de fer. Les faciès varient de la base au sommet du profil entre deux extrêmes : (i) la base est caractérisée par un faciès bréchiq à grandes vacuoles ([Fig. 2C](#)) à nombreux clastes pluricentimétriques de quartzite anguleux (souvent rectangulaires) et non jointifs. La matrice est un plasma d'oxydes de fer cimentant des microfragments de quartzite. Quelques nodules et enduits sont visibles à l'œil nu en particulier en drapage des vacuoles ; (ii) le sommet présente typiquement un faciès nodulaire non jointif sans claste de quartzite centimétrique comme à la base ([Fig. 2D, E](#)). Les nodules sont composés d'oxydes de fer comprenant de petits fragments de quartz. La matrice est de même nature que les nodules. Les nodules sont généralement entourés de cortex ferrugineux de 1 à 3 mm qui semblent rubanés mais certains échantillons du sommet des cuirasses présentent des nodules de grande taille ( $> 2 \text{cm}$ ) à cortex rubané épais évoquant une texture pisolithique. Ces nodules sont systématiquement entourés de cavités qui suivent leurs formes ([Fig. 2E](#)), avec également des fractures contournant les nodules, un motif général suggérant de la dessiccation. Finalement, des tubules remplis de matériel plus argileux jaunâtre avec des fragments de quartz traversent cette cuirasse nodulaire sommitale en présentant également des enduits rubanés sur leurs parois.

Les deux collines de cuirasses étudiées reposent essentiellement sur des quartzites très dures, très pures (plus de 99 % de quartz) et foliées ([Fig. 2B](#)). Dans le secteur cartographié sous ces cuirasses, il n'y a donc pas de gneiss quartzofeldspathique comme l'indique la carte géologique ([Marcelin, 1968](#); [Pitfield et al., 2004](#)), raison pour laquelle nous proposons une carte modifiée ([Fig. 1B](#)). Logiquement avec des quartzites très pures, il n'y a aucune lithomarge ni saprolithe en contact avec les cuirasses qui ne sont donc pas « en place » au sommet d'un profil latéritique « classique » sur roches quartzofeldspathiques. Les mesures de foliation dans les quartzites sont trop peu nombreuses pour esquisser les structures à l'échelle de KOB, mais tous les affleurements montrent une discordance importance de la foliation avec la surface horizontale du contact avec les cuirasses. Localement au Sud de la colline Est, au sein des quartzites se trouvent des lentilles métriques de matériel quartzofeldspathique métamorphisé que nous interprétons comme des méta-arkoses. Au Nord des deux collines au sein des quartzites affleurent des niveaux de BIF fortement schistosés et redressés ([Fig. 2F](#)). Ces caractéristiques font de ces quartzites sous les cuirasses une formation très similaires aux quartzites d'Atilis bien connus et décrits à Inchiri ([Strickland et Martyn, 2002](#)). Des dykes mafiques d'orientation subméridienne et altérés en pelure d'oignon viennent recouper toutes les formations du socle ([Fig. 2G](#)).

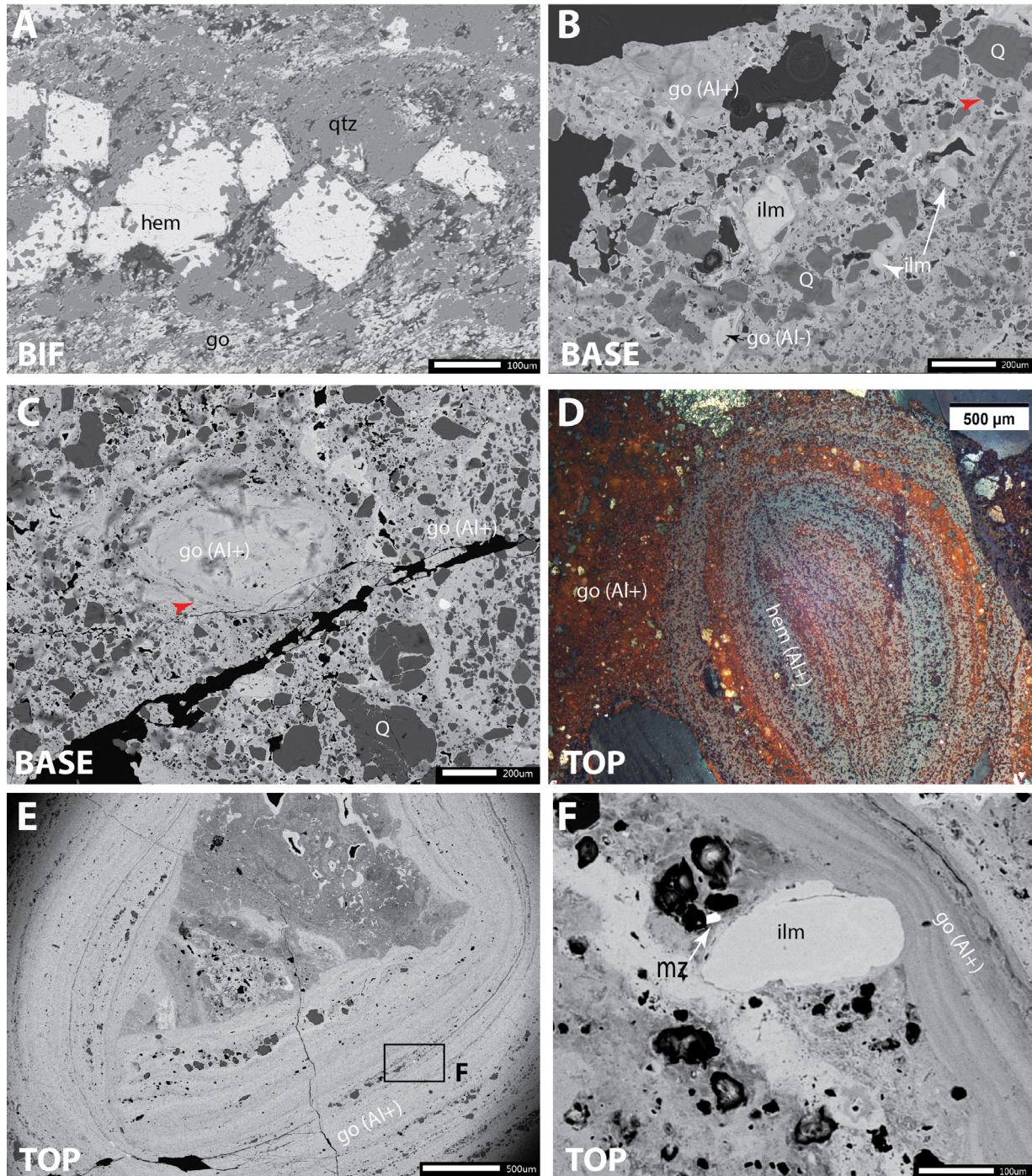
### 4.2 Pétrographie et textures

Les quartzites et les BIF du substratum des cuirasses ont été examinées en microscopie optique et au MEB. Les quartzites sont composés à plus de 99 % modal de quartz, ce qui est corroboré par l'analyse chimique ([Tab. S1](#)). La foliation



**Fig. 2.** Affleurements, aspects macroscopiques des cuirasses. A : morphologie des collines cuirassées au sommet par un maximum de 5 m de formations ferrugineuses au-dessus d'un substratum limité par le tireté blanc (colline Est, Fig. 1C) ; B : substratum quartzitique des cuirasses, le contact (tireté blanc) est ici dégradé par le colluvionnement ; C : faciès bréchié de base des cuirasses présentant des clastes anguleux pluri-centimétriques de quartzites (Qtz) ; D : faciès sommital des cuirasses, mamelonné, à nodules ovoïdes et sans fragments de quartzite de grande taille ; E : section sciée d'un faciès sommital présentant des nodules de même nature que la matrice (ma), entourés d'un fin cortex d'oxydes de fer (co) ainsi que des tubules (tu) de matériel jaunâtre plus argileux. Les cavités sphériques autour de clastes et les fractures les contournant suggèrent une dessiccation.

**Fig. 2.** Outcrops, macroscopic aspects of the iron-rich duricrusts. A: morphology of the hills shielded at the top by a maximum of 5 m of ferruginous formation above basement limited with a white dashed line (east hill, Fig. 1C); B: basement of the duricrusts made of quartzites, contact with ferruginous duricrust (white dashed line) is often covered by colluvium; C: basal brecciated facies of the duricrusts showing multi-centimetric angular clasts of quartzites (Qtz); D: summit facies of the duricrusts, hummock, with ovoid nodules and without large quartzite fragments; E: sawn section of a summit facies showing nodules of the same nature as the matrix, surrounded by a fine cortex of iron oxides (co) as well as tubules (tu.) of more clayey yellowish material. Spherical cavities around clasts and fractures around them suggest desiccation.



**Fig. 3.** Pétrographie et textures des roches du socle et des cuirasses. A : photo MEB (BSE) des BIF de KOB. Les cristaux automorphes cubiques de magnétite ont été remplacés par de l'hématite dans une matrice de quartz jaspés et de goéthite ; B : faciès de base des cuirasses (ech. n° 635, MEB, BSE), de texture bréchique à clastes anguleux de quartzites montrant localement des lobes de corrosion (dissolution, *e.g.* flèche rouge). Des clastes d'ilménite souvent arrondis sont abondants. La goéthite riche en Al (blanc grisâtre) est la principale phase cimentant les clastes. Une goéthite pauvre en Al (plus claire) vient tapisser/remplir les cavités ; C : faciès de base des cuirasses (ech. n° 711, MEB, BSE), similaire à B présentant des nodules de goéthite riche en Al, la flèche rouge indique l'initiation d'un rubanement du cortex ; D : faciès sommital des cuirasses (ech. n° 768, microscope optique, lumière réfléchie, nicols croisés à 70°) à pisolithes sans nucléus apparent et des enduits rubanés concentriques et discordants alternant hématite et goéthite alumineuse ; E : pisolithe du sommet des cuirasses (ech. n° 664, MEB, BSE) à discordance des enduits rubanés. Ces derniers sont composés de goéthite alumineuse alternant avec des microfragments de roche. Le nucléus est un claste anguleux de roche également indurée par la précipitation des enduits dans les fractures et en imprégnation de la matrice ; F : détail de E (*cf.* encart, MEB, BSE) montrant qu'entre les rubans des enduits pisolithiques on trouve des fractions sableuses à minéraux lourds (ilménite et monazite). Abréviations : hem. : hématite ; go. : goéthite (Al+ et Al-, riche et pauvre en aluminium respectivement) ; qtz. : quartz ; Q. : quartzite ; mz. : monazite ; ilm. : ilménite.

**Fig. 3.** Petrography and textures of basement rocks and iron-rich duricrusts. A: SEM photo (BSE) of KOB BIFs. Cubic automorphic crystals of magnetite were replaced by hematite in a matrix of jasperoid quartz and goethite; B: base facies of the duricrusts (sample No. 635, SEM, BSE), brecciated texture with angular quartzite clasts locally showing corrosion lobes (dissolution, e.g. red arrow). Often rounded clasts of ilmenite are abundant. Al-rich goethite (greyish-white) is the main clast-cementing phase. A goethite low in Al (lighter) lines/fills the cavities; C: base facies of the duricrusts (sample No. 11, SEM, BSE), similar to B showing Al-rich goethite nodules with incipient banded coating (red arrow); D: summit facies of the duricrusts (sample No. 768, optical microscope, reflected light, nicols crossed at 70°) with pisolites without apparent nucleus and concentric and discordant banded coatings alternating hematite and aluminous goethite; E: pisolite from the top of the duricrusts (sample No. 664, SEM, BSE) with unconformity of the banded coatings. The latter are composed of aluminous goethite alternating with microfragments of rock. The nucleus is an angular clast of rock also indurated by the precipitation of the coatings in the fractures and in impregnation of the matrix; F: detail of E (see inset, SEM, BSE) showing that between the bands of pisolithic coatings there are sandy fractions with heavy minerals (ilmenite and monazite). Abbreviations: hem.: hematite; go.: goethite (Al+ and Al-, rich and poor in aluminum respectively); qtz.: quartz; Q.: quartzite; mz.: monazite; ilm.: ilmenite.

est marquée par des bandes de recristallisation dynamique induisant une réduction de la taille des grains. Aucun grain de quartz primaire n'est préservé. Sur 5 lames minces de quartzite les minéraux accessoires reconnus sont dans l'ordre d'abondance : (i) des grains de pyrite de 10 microns ; (ii) des muscovites détritiques ; (iii) des zircons, seuls minéraux lourds reconnus, les phases titanées (rutile, ilménite) étant absentes. Quelques micro-cracks tardifs à calcite viennent recouper la foliation. Les BIF sont composés principalement d'hématite, de goethite et de quartz jaspé avec des carbonates de fer en minéral accessoire au sein de la matrice. Des cristaux automorphes d'hématite correspondent au remplacement d'anciennes magnétites (*i.e.* martite, Fig. 3A). Hématite et goethite peuvent contenir des teneurs importantes en Al (jusqu'à 5 % pds élément à l'EDS). Aucun minéral titané n'a été observé dans les BIF, ce qui est confirmé par les analyses DRX.

L'examen des lames minces confirme la texture béchique des faciès de base des cuirasses (Fig. 3B, C). Les grands clastes de quartzite sont systématiquement anguleux alors que les petits clastes sont soit anguleux soit arrondis. Des lobes de corrosion attestent d'une dissolution de la silice, même si elle reste limitée (Fig. 3B). Les grains émoussés et arrondis d'ilménite sont abondants. Quartzite et ilménite sont les seules natures de claste observées. Il est difficile d'inférer l'existence d'une matrice fine pré-datant la cimentation par la goethite : les relations avec les cavités (Fig. 3B) suggèrent une cimentation directe d'un agrégat poreux de cailloutis, les cavités finissant par se remplir de goethite. Des nodules de goethite dépourvue de clastes au centre présentent un début de cortex rubané sur les bords (Fig. 3C) suggérant que des enduits peuvent également se former à la base des cuirasses. Les textures nodulaire et pisolithique du sommet des cuirasses sont également confirmées en microscopie (Fig. 3D, E). Quelques clastes centimétriques de quartzite sont observables mais la granulométrie moyenne est inférieure à celle des faciès de base. Contrairement à la base des cuirasses, l'hématite est bien représentée en particulier comme enduit rubané alternant avec la goethite dans les pisolithes (Fig. 3D). La plupart des pisolithes présentent des discordances : des enduits rubanés sont tronqués par d'autres plus récents (Fig. 3D, E). Un zoom sur le cortex de ces pisolithes (Fig. 3E, F) montre qu'il s'agit bien de véritables enduits issus de gel ou de solution riches en fer qui cristallisent en espace ouvert sans remplacement d'une matrice fine préexistante poreuse. Entre les couches d'enduit des grains fins de quartz et de minéraux lourds arrondis (ilménite et monazite sur la Fig. 3F) forment des micro-strates. Tout comme à la base, les faciès supérieurs renferment des grains d'ilménite

arrondis en abondance. Il est remarquable que sur toute l'épaisseur de la cuirasse, la goethite et l'hématite (au sommet) sont riches en aluminium (jusqu'à 10 % pds élément à l'EDS).

### 4.3 Minéralogie par DRX

Les analyses globales en DRX (Fig. 4) montrent que les cuirasses, indépendamment du niveau dans le profil, sont principalement composées de quartz et de goethite et plus accessoirement d'hématite dont les pics sont plus nets pour les deux échantillons du sommet (n° 768 et 664). Sulfure, gibbsite et boémite ne sont pas détectés. Curieusement l'ilménite, présente sur tout le profil (*cf. supra*), n'est pas détectée sur ces échantillons, ce qui suggère une maille de libération au broyage trop faible (les micro-grains d'ilménite restant emballés dans la goethite). Sur la fraction fine aux petits angles, les pics de l'illite/micas, de la kaolinite et de la calcite apparaissent. Ces phases sont cependant très minoritaires et possiblement inféodées aux remplissages des tubules (Fig. 2E) que nous n'avons pas explorées au MEB en détail.

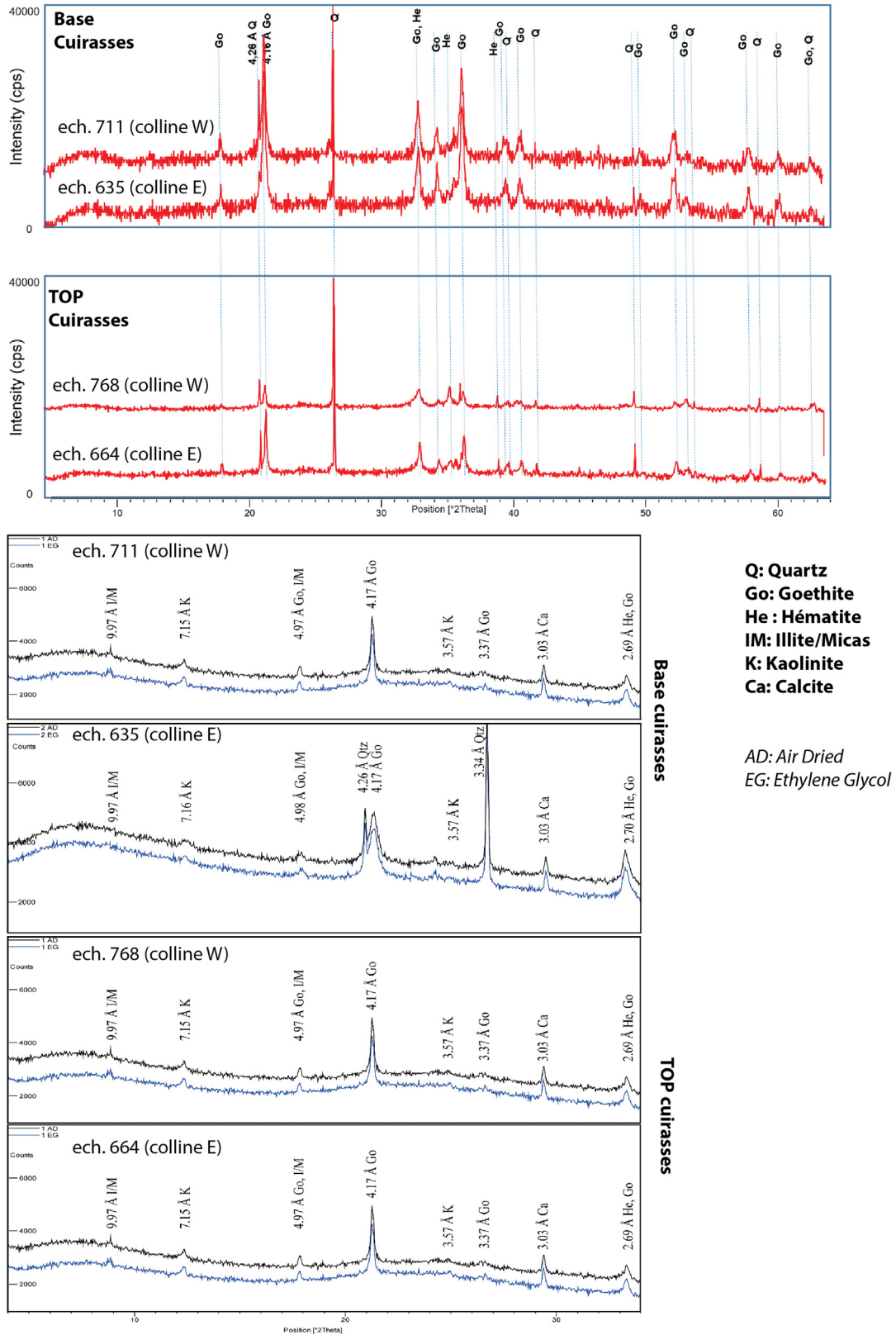
### 4.4 Géochimie roche totale

Les résultats sont présentés dans le [tableau S1](#) (les coordonnées et la provenance au sein du profil et des collines sont indiquées) et sur les graphiques de la [figure 5](#).

La teneur en SiO<sub>2</sub> des quartzites du substratum des cuirasses confirme la pureté en quartz de ces roches qui contiennent de très faibles concentrations pour tous les autres éléments majeurs et en particulier en Al et Ti. La teneur de 1,21 % en FeOtot est vraisemblablement due aux micro-grains de pyrite observées en lame mince. Les teneurs basses en K<sub>2</sub>O et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> des autres roches du socle démontrent bien le caractère quartzo-feldspathique de méta-arkoses sans que ces roches puissent être confondues avec des sills de granitoïdes beaucoup plus riches en K et Al qui seraient injectés dans les quartzites.

Par rapport aux quartzites du socle quasiment tous les éléments majeurs et traces (excepté Si) sont enrichis dans les cuirasses, ce qui suppose une allochtonie chimique importante. Les cuirasses des collines W et E ne montrent pas de différences. La concentration en TiO<sub>2</sub> varie peu d'une colline à l'autre et sur le profil vertical. FeOtot et SiO<sub>2</sub> sont clairement anti-corrélés (Fig. 5A) sur le profil vertical pour les deux collines, une logique qui peut avoir plusieurs origines (*cf. infra*). Les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont faibles ce qui corrobore





**Fig. 4.** Spectres DRX des cuirasses de KOB des deux collines étudiées. En haut sur roche totale, en bas sur fraction argileuse (voir Tab. S1 pour la localisation et la composition chimique des 4 échantillons).

**Fig. 4.** DRX spectrum of KOB's iron duricrusts from both studied hills. Top on total rock, bottom on clay fraction (see Tab. S1 for the location and chemical composition of the 4 samples).

le peu de kaolinite identifié et donc Al incorporé essentiellement par les oxydes/hydroxydes de fer.  $Al_2O_3$  et  $SiO_2$  (et donc fer) ne sont pas corrélés (Fig. 5B) suggérant une fois encore que ces cuirasses ne sont pas issues de processus « classiques » latéritiques avec dissolution de  $SiO_2$  et enrichissement en  $Al_2O_3$  (kaolinite/bauxitisation) vers le haut; un processus également invisible sur la figure 5E où aucun échantillon ne dévie vers le pôle kaolinite. Le Fe et le V dont les mobilités sont souvent associées ne sont pas corrélés (Fig. 5C), le V, tout comme le Ti ne montrant aucune tendance avec la profondeur. Le Cr est globalement corrélé au titane (Fig. 5D), ce qui suggère qu'il est incorporé dans les grains d'ilménite abondants et seul porteurs identifiés du Ti.

## 5 Discussion

Ces données permettent de discuter la nature, la typologie et l'origine de ces cuirasses de KOB. Pour les données de géochimie, une compilation des moyennes de la littérature sur les différents types de cuirasses a été réalisée et présentée sur la figure 6. De plus, nous argumenterons cette discussion du point de vue du prospecteur de l'industrie minière en exploration « greenfield » pour qui la géochimie en roche totale représente un poste majeur dans ces régions recouvertes d'ergs et de régoolithes caillouteux.

### 5.1 Nature et typologie des cuirasses de KOB

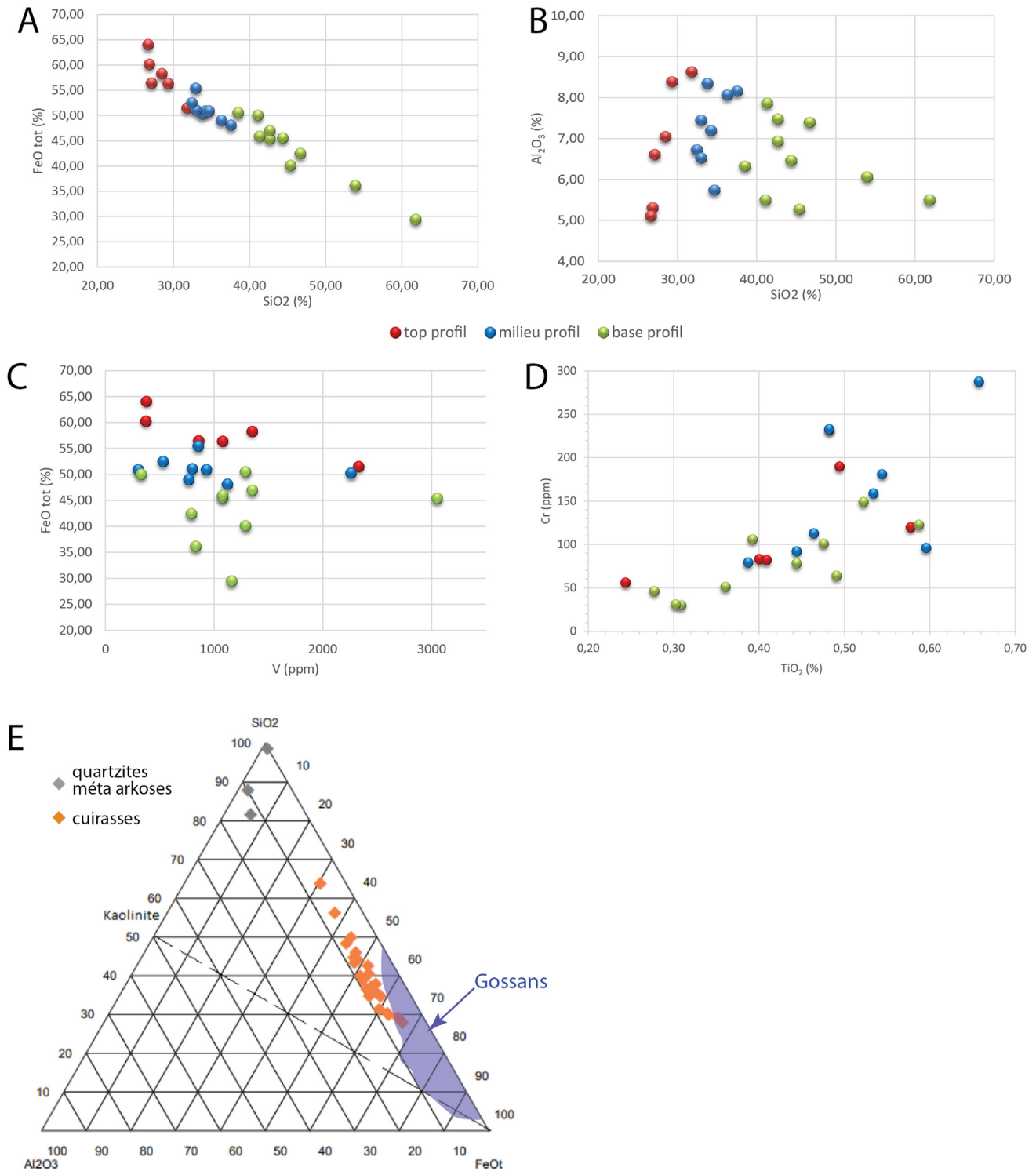
Les cuirasses de KOB ne sont définitivement pas des cuirasses sur un profil latéritique. La nature quartzitique du substrat, le manque de lithomarge/saprolithe, la faible proportion de kaolinite et les basses teneurs en  $Al_2O_3$  sont des arguments de premier ordre permettant d'écarter le développement d'un profil latéritique *in situ*. Sur la carte d'Akjoujt la plus récente, Pitfield *et al.* (2004) reconnaissent des « conglomérats à ciment ferrugineux » sur profil tronqué écartant ainsi des profils latéritiques complets mais sans plus de précision. Du point de vue de la géochimie: (i) l'anti-corrélation Fe/Si (Fig. 5A) est trompeuse, car fréquemment observée dans les parties cuirassées des profils latéritiques sur roche mère quartzo-feldspathique (Nahon, 1976; Tardy, 1993); (ii) seule  $Al_2O_3$  est discriminante pour les éléments majeurs (Fig. 6A); (iii) le Cr et le Zr sont nettement appauvris dans les cuirasses de KOB relativement aux cuirasses sur profil latéritique alors que V est très enrichi (Fig. 6B). Avec Ti, ces éléments sont considérés relativement immobiles pendant la latérisation, dérivant des oxydes et ferrosilicates des roches mères, le V accompagnant Fe pendant le développement du profil (Blot *et al.*, 1978; Blot, 2004). Au Nord-Ouest de la Mauritanie, lors d'une prospection géochimique systématique, ces éléments apparaissent donc être de bons indicateurs pour distinguer des formations ferrugineuses cuirassées d'origine différentes de celles développées sur des profils latéritiques « classiques ».

L'étendue des deux collines ferrugineuses, le substrat quartzitique, le manque de sulfures résiduels en lame minces et DRX sont des arguments évidents pour disqualifier l'hypothèse de gossans concernant les cuirasses étudiées de KOB. Cependant, lors d'une exploration « greenfield » les prospecteurs: (i) ne peuvent avoir accès qu'à des pointements

ferrugineux entourés par du sable, repérés en photographie aérienne au préalable; (ii) doivent pouvoir identifier un gossan au sein même de cuirasses ferrugineuses. Ici, la géochimie s'avère très discriminante. Les gossans sont en effet très appauvris en  $SiO_2$  et en  $Al_2O_3$  et enrichis en Fe par rapport aux cuirasses sur latérites et aux cuirasses de KOB (Fig. 5C et 6A). Encore plus discriminant, les teneurs en métaux comme Zn et Pb (émanant de l'oxydation de sulfures primaires) sont nettement plus représentés que Cr, V et Zr dans les gossans (Fig. 6B, Nicholson, 1987; Blot 2004). S se trouve enrichi également dans les gossans relativement aux cuirasses souvent portées par des sulfates (*e.g.* jarosite) ou des sulfures secondaires comme l'orpiment ou le réalgar. Naturellement, les moyennes présentées sur la figure 6 cache une variabilité importante des gossans car: (i) les gossans suffisamment anciens et matures sont zonés chimiquement suivant une verticale et la partie supérieure peut être fortement lessivée en métaux lourds (*e.g.* Velasco *et al.*, 2013); (ii) les teneurs en métaux des gossans dépendent de la composition initiale en oxydes et sulfures primaires composant le minerai primaire dessous. Dans la région d'Akjoujt les chapeaux de fer sur les différents niveaux de BIF (Fig. 1) ne sont pas décrits, mais on doit s'attendre à des teneurs en FeOtot proches de 90% (*e.g.* la formation Canga développée au-dessus des itabirites, Spier *et al.*, 2019). Le gisement de type « IOCG » à Cu-Au-Co de Guelb-Moghrein proche d'Akjoujt est caractérisé par deux gossans qui constituent deux collines dont l'orientale est constituée principalement de « goethite pisolitale » (Sakellaris, 2007; First Quantum, 2016). Le minerai est principalement composé de sulfures (pyrrhotite, chalcopyrite, covellite, arsénopyrite, cobaltite), d'arsénides de Fe-Ni-Co et de minéraux à Te-Au-Bi-Ag encaissés dans des niveaux de méta-carbonates riches en Fe et Mg au sein de formations à BIF à magnétite (Kolb *et al.*, 2010). Les gossans sur ce type de minéralisation seront *de facto* déplétés en Pb et Zn relativement aux moyennes présentées sur la figure 6B. Au-dessus d'un minerai sulfuré de Cu, la mobilité importante du Cu peut également produire des gossans déplétés en Cu, les phases oxydées du Cu (malachite, azurite, cuprite, chrysocole) pouvant précipiter loin de la source sulfurée. Pour toute exploration géochimique des gossans au sein des cuirasses de l'Inchiri, il conviendrait d'avoir à disposition le fond géochimique caractéristique des gossans de Guelb-Moghrein et des autres indices autour d'Akjoujt.

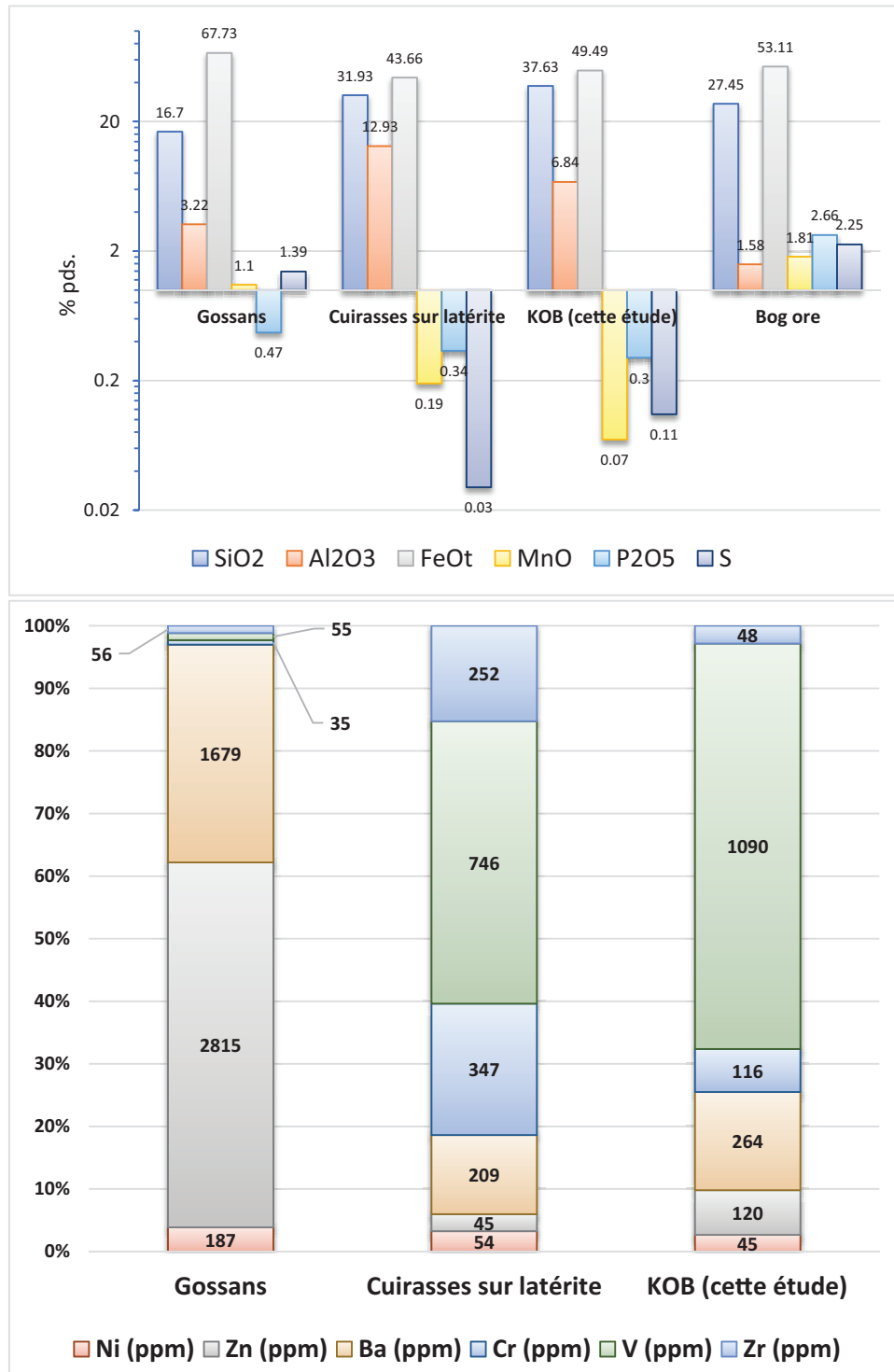
Ainsi, les cuirasses de KOB étudiées sont des ferricrètes au sens strict à savoir une formation superficielle clastique (colluvion, régoilite en place, alluvion, sable, etc.) cimentée et indurée par des oxydes/hydroxydes de fer (Verplanck *et al.*, 2007). D'après ces auteurs les ferricrètes s.s. sont soit alluviaux avec des clastes polygéniques sub-angulaires à arrondis, soit colluviaux avec des clastes monogéniques, soit des bog ores (minerai de fer des tourbières) avec très peu de clastes liés plus ou moins directement à des sources ferrugineuses.

Comme on peut le voir sur les moyennes compilées (Fig. 6A), les « bog ores » ont des compositions d'éléments majeurs qui leurs sont propres. Ils sont pauvres en  $Al_2O_3$  et riches en Mn, P et S éléments associés à la matière organique et au métabolisme bactérien lors de la genèse/diagenèse de ce type de ferricrète. La richesse en P provoque la précipitation de vivianite, minéral typique des « bogs ores » actuels, modernes, comme



**Fig. 5.** Géochimie élémentaire des cuirasses ferrugineuses de KOB en fonction de la place dans le profil vertical. A : anti-corrélation entre la silice et le fer total ; B : l'alumine est sans corrélation avec la silice ; C : la teneur en vanadium est peu variable et reste indépendante de celle du fer ; D : corrélation positive entre le chrome et le titane ; E : triplot classique alumine/silice/fer total montrant que les cuirasses de KOB n'enregistrent pas de composante de kaolinisation attendue pour des cuirasses sur latérite. Elles sont déplétées en fer relativement aux gossans (domaine établi par [Blot, 2004](#)).

**Fig. 5.** Elementary geochemistry of KOB ferruginous cuirasses as a function of position in the vertical profile. A : anti-correlation between silica and total iron ; B : alumina has no correlation with silica ; C : the vanadium content is little variable and remains independent of that of the iron ; D : positive correlation between chromium and titanium ; E : classic alumina/silica/total iron triplot showing that the KOB breastplates do not record the kaolinization component expected for breastplates on laterite. They are iron depleted with respect to gossans (range established by [Blot, 2004](#)).



**Fig. 6. A :** moyennes en éléments majeurs pour les gossans ( $n=114$ , Blot, 2004 ; soufre depuis  $n=123$ , Velasco *et al.*, 2013), les cuirasses ferrugineuses sur profil latéritique ( $n=98$ , Blot, 2004 ; soufre depuis  $n=201$ , Cornelius *et al.*, 2007), les Bog Ore (ou minerai de fer des tourbières ;  $n=38$ , Thelemann *et al.*, 2017 ; soufre depuis  $n=26$ , Wirt *et al.*, 2007) et nos données de KOB (cf. Tab. S1) ; **B :** moyennes en éléments traces pour les gossans ( $n=11$ , Blot, 2004), cuirasses sur profil latéritique ( $n=98$ , Blot, 2004) et les cuirasses de KOB.

**Fig. 6. A :** means in major elements for gossans ( $n=114$ , Blot, 2004 ; sulfur from  $n=123$ , Velasco *et al.*, 2013), iron duricrusts on lateritic profile ( $n=98$ , Blot, 2004 ; sulfur from  $n=201$ , Cornelius *et al.*, 2007), Bog Ore ( $n=38$ , Thelemann *et al.*, 2017 ; sulfur from  $n=26$ , Wirt *et al.*, 2007) and our KOB data (cf. Tab. S1) ; **B :** means in trace elements for gossans ( $n=11$ , Blot, 2004), iron duricrusts on lateritic profile ( $n=98$ , Blot, 2004) and KOB iron duricrusts.

anciens (Bricker *et al.*, 2003 ; Kaczorek et Sommer, 2003). Les ferricrètes s.s. de KOB ne sont donc pas des « bogs ores ».

## 5.2 Genèse des ferricrètes s.s. de KOB : un modèle original

En raison de l'identification d'un socle de quartzites difficilement altérables, les ferricrètes de KOB sont caractérisées par des allochtonies mécanique et chimique.

### 5.2.1 Une allochtonie mécanique

Les clastes sont principalement du quartzite du socle et des grains de quartz (Fig. 2 et 3). La base du profil est marquée par de gros clastes quartzitiques anguleux avec également des grains de quartz de plus petite taille plus arrondis. Le sommet, très appauvri en clastes, correspond principalement à des enduits goethitiques et hématitiques sans qu'ils ne croissent sur une matrice gréseuse (Fig. 3E, F). Sur tout le profil vertical, y compris au sommet entre les enduits rubanés des pisolithes, des grains d'ilménite arrondis et d'autres minéraux lourds comme la monazite sont distribués (Fig. 3B, F). Le quartzite du substratum ne contient que très peu de Ti (Tab. S1) et aucune ilménite ni rutile n'ont été observés en lame mince. Le socle de quartzites n'est donc probablement pas la source des ilménites des ferricrètes, qui de plus se seraient concentrées à la base des ferricrètes, ce qui n'est pas observé. En raison de l'origine mono-lithologique des clastes principaux et de leur caractère anguleux la formation superficielle cimentée par les oxydes de fer n'était pas une alluvion. Compte tenu des autres lithologies affleurant à moins de 1 km des collines étudiées (Fig. 1), une alluvion dans ce contexte devrait être pluri-lithologique. L'hypothèse d'une colluvion ou d'un régolithe caillouteux peu transporté est donc la plus favorable pour expliquer au moins la base des ferricrètes de KOB. Cependant, ceci n'explique pas les petits grains de quartz émoussés et surtout la présence et la répartition des grains arrondis d'ilménite. L'aspect arrondi des petits grains de quartz pourrait être issu d'une dissolution partielle de la silice exprimée par les lobes de corrosion (Fig. 3B). Ces mécanismes de dissolution supergène du quartz ou de roches riches en quartz par des eaux acides ont été identifiés sur le terrain (e.g. Melfi *et al.*, 1976) comme en laboratoire (e.g. Bennett *et al.*, 1988). Cependant, au vu du faible volume impliqué, cette dissolution du quartz n'est pas un mécanisme dominant la formation de ces ferricrètes. Les grains d'ilménite étant allochtones impliquent, en plus du colluvionnement des cailloutis quartzitiques de la base, un transport additionnel de grains fins par de l'eau ou du vent. Un transport particulière par l'eau est peu probable (*cf. supra*), il aurait laissé des traces de structures sédimentaires (stratification, chenaux, grano-classement). Nous privilégions ainsi un transport éolien pour ces grains fins de quartz et minéraux lourds. Les sables éoliens à minéraux lourds sont bien connus, en particulier dans les déserts froids (Brookfield, 2011).

Ce « saupoudrage » de grains fins est en accord avec l'incorporation au sein des pisolithes de ces minéraux lourds entre les enduits rubanés (Fig. 3E, F). En accord avec Alexandre (2002), nous interprétons les stratifications tronquées et les strates de grains inter-enduits des pisolithes comme des encroûtements sédimentaires rythmiques en

surface libre plutôt que associées à des phénomènes de diffusion du fer à partir de nodules lors de la déshydratation d'une cuirasse (Nahon, 1976 ; Boulangé et Bocquier, 1983 ; Tardy, 1993). Le sommet pisolithique des ferricrètes de KOB correspondrait donc à des horizons dominés par l'authigénèse des oxydes/hydroxydes de fer dans des conditions très poreuses ou en surface et recouverts périodiquement par des apports éoliens. Au moins trois autres arguments viennent confirmer ces conditions de surface pour le sommet des ferricrètes de KOB : (i) les tubules observés au sommet des ferricrètes (Fig. 2E) sont caractéristiques soit de terriers de termites classiquement observés dans les cuirasses (e.g. Alexandre, 2002), soit de racines de végétaux responsables de la dissolution des oxydes/hydroxydes de Fe ; (ii) les fractures de dessiccation entourant les nodules (Fig. 2E) ; (iii) une hématite plus abondante au sommet qu'à la base (non observée) attestant de conditions périodiques plus anhydres (Fig. 3D).

### 5.2.2 Une allochtonie chimique

Ces ferricrètes ne peuvent s'expliquer que par un transport du Fe en solution depuis des sources extérieures aux quartzites du substrat. Le Fe est soluble en solution sous sa forme réduite ferreuse, ce qui impose un passage par des conditions réductrices des eaux avant le dépôt en conditions oxydantes au sein du ferricrète. Nous n'avons aucun moyen de spéculer sur l'agent réducteur dans notre cas (matière/acides organiques d'un sol? lithologie riche en sulfures?). Les sources potentielles de Fe sont nombreuses comme par exemple les BIF proximaux des deux collines étudiées (Fig. 1 et 3A). Un niveau élevé de la nappe ou un ruissellement efficace sont susceptibles d'être le vecteur des eaux riches en Fe dissous dans le milieu très poreux et perméable que constitue la base clastique de ces ferricrètes. Les concentrations en Fe sont corrélées à la baisse des teneurs en SiO<sub>2</sub> au sein de ferricrètes en général mais également verticalement le long du profil (Fig. 5A). La dissolution de SiO<sub>2</sub> observée par des lobes de corrosion (Fig. 3B) est trop limitée pour expliquer cette corrélation. Nous suggérons que cette corrélation montre plutôt une évolution verticale où la base est riche en clastes colluvionnaires de quartzites les oxydes de Fe cristallisant dans une porosité alors que le sommet se développe en condition authigénique de surface pour les oxydes de Fe associés à un apport restreint de petits grains détritiques par le vent probablement.

L'aluminium des oxy-hydroxydes de Fe mérite une discussion approfondie. En effet, les quartzites sont déplétées totalement en Al, sa source dans les ferricrètes n'est donc pas proximale. Nous ne disposons pas d'analyses chimiques ni EPMA des goethites, mais les analyses semi-quantitatives à l'EDS indiquent des maxima de 5% pds Al (ou 12,2% pds Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou 5% atom Al). Ainsi, nous évaluons des taux de substitution maximum en AlOOH dans la goethite de l'ordre de 5% mol, ce qui est faible et révélateur de conditions hydromorphes modérément acides lors de la précipitation des goethites (Fitzpatrick et Schwertmann, 1982). Les quantités d'aluminium à extraire à la source (sans doute de façon concomitante au Fe) ne sont donc pas anormales pour peu que les conditions soient suffisamment acides (Ségalen, 1973).

## 6 Conclusion

Les formations ferrugineuses de KOB sont des ferricrètes *stricto sensu* formés sur un substratum de quartzites sans relation directe avec le développement de profils latéritiques. Ces formations montrent à la base une cimentation goethitique de cailloutis de quartzite puis vers le sommet un caractère authigénique dominant avec des nodules et pisolithes à cortex de goethite et hématite. Ces ferricrètes sont originales au sens où ils enregistrent de la base au sommet un saupoudrage de grains arrondis d'ilménite (et de petits grains de quartz) probablement transportés par le vent.

Les collines étudiées permettaient d'observer de socle dessous et de lever un échantillonnage vertical du ferricrète en place. En raison du colluvionnement important, ces observations sont bien souvent impossibles en particulier sur des pointements très restreints de formations ferrugineuses. Notre étude montre que pour l'exploration minière l'outil géochimique est discriminant pour différencier les gossans des autres formations ferrugineuses au premier ordre. Cependant, les teneurs moyennes compilées ici pour comparaison avec les ferricrètes de KOB sont sujettes à d'importantes variations en fonction de l'altération, du climat et de la végétation, mais surtout de la composition des oxydes, sulfures, arséniures constituant la minéralisation primaire. La prudence serait donc de constituer une base de données exhaustive d'analyses en roche totale des principaux gossans avérés de la province de l'Inchiri (*e.g.* gisement IOCG de Guelb-Moghrein).

## Matériel supplémentaire

**Tableau S1.** Analyses en roche totale de 24 échantillons de cuirasses, 2 de méta-arkoses et 1 de quartzite (ICP-AES and ICP-MS pour les majeurs et les traces respectivement, protocole ME-MS61 détaillé et marges d'erreur sur <https://www.alsglobal.com/-/media/ALSGlobal/Resources-Grid/ALSSuperTraceMethodsRev10.pdf>). Coordonnées géographiques et position dans le profil (Base, Milieu, Top) sont indiquées.

**Table S1.** Bulk-Rock analyzes of 24 samples of iron-rich duricrust, 2 of meta-arkoses and 1 of quartzite (ICP-AES and ICP-MS for majors and traces respectively, detailed ME-MS61 protocol and margins of error on <https://www.alsglobal.com/-/media/ALSGlobal/Resources-Grid/ALSSuperTraceMethodsRev10.pdf>). Geographical coordinates and position in the profile (Base, Middle, Top) are indicated.

Le matériel supplémentaire est disponible sur <https://www.bsgf.fr/10.1051/bsgf/2023002/olm>.

**Remerciements.** Cette étude fait partie du doctorat de R.E. (en cours). R.E. a bénéficié d'une bourse de mobilité pour recherche de 7 mois du MAE *via* le Service de coopération et d'action culturelle à Nouakchott. Xavier Le Coz, Loïc Joanny et Francis Gouttefangeas des plateformes techniques de l'Université de Rennes sont remerciés chaleureusement pour la réalisation des lames minces et des analyses au MEB. M. Ely Ould Mohamed a grandement facilité le travail sur le terrain. Nous remercions les deux reviewers anonymes qui ont

grandement amélioré la qualité de l'article. Ce travail est dédié à la mémoire des six humanitaires français de l'ONG Acted ainsi que leur guide et leur chauffeur, victimes du terrorisme, assassinés le 9 août 2020 au Niger.

## Références

- Alexandre J. 2002. Les cuirasses latéritiques et autres formations ferrugineuses tropicales. Exemple du Haut Katanga. *Annales-Sciences Géologiques, Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgium* 107: 118. <https://doi.org/10.1111/j.1351-0754.2004.00591c.x>.
- Bennett PC, Melcer ME, Siegel DI, Hassett JP. 1988. The dissolution of quartz in dilute aqueous solutions of organic acids at 25°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52(6): 1521–1530.
- Blot A, Lepun JC, Pion JC. 1978. Corrélations géochimiques entre les cuirasses ferrugineuses et les roches du socle cristallin au Sénégal et en Haute Volta. Lithodépendance et héritage géochimique. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série D: Sciences naturelles* (286): 1331–1334.
- Blot A. 2004. Caractérisation des chapeaux de fer en milieu latéritique cuirassé. *Comptes rendus geoscience* 336(16): 1473–1480. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.07.008>.
- Boulangé B, Bocquier G. 1983. Le rôle du fer dans la formation des pisolites alumineux au sein des cuirasses bauxitiques latéritiques. *Sciences géologiques, bulletins et mémoires* 72(1): 29–36.
- Bricker OP, Simon NS, Newell WL, Clark I. 2003. Bog iron formation in the Nassawango Watershed, Maryland (p. 1). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Brindley GW, Brown G. 1980. Crystal structure of clay minerals and their X-ray identification: the Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, v. 5. <https://doi.org/10.1180/mono-5>.
- Brookfield ME. 2011. Aeolian processes and features in cool climates. *Geological Society, London, Special Publications* 354(1): 241–258. <https://doi.org/10.1144/SP354.16>.
- Cornelius M, Robertson IDM, Cornelius AJ, Morris PA. 2007. Laterite geochemical database for the western Yilgarn Craton, Western Australia. Western Australia Geological Survey, Record, 44 p. <https://doi.org/10.4225/08/586009a364f32>.
- Dallmeyer RD, Lécorché JP. 1989. 40Ar/39Ar polyorogenic mineral age record within the central Mauritanide orogen, West Africa. *Geological Society of America Bulletin* 101(1): 55–70.
- Fitzpatrick RW, Schwertmann U. 1982. Al-substituted goethite—an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. *Geoderma* 27(4): 335–347. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(82\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(82)90022-2).
- First Quantum. 2016. Guelb Moghrein Copper Gold Mine, Inchiri, Mauritania, NI 43-101 Technical Report.
- Kaczorek D, Sommer M. 2003. Micromorphology, chemistry, and mineralogy of bog iron ores from Poland. *Catena* 54(3): 393–402. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00133-4).
- Kolb J, Gregori A, Sakellaris F, Michael M. 2006. Controls on hydrothermal Fe oxide-Cu-Au-Co mineralization at the Guelb Moghrein deposit, Akjoujt area, Mauritania. *Miner Deposita* (41): 68–81. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0041-7>.
- Kolb J, Meyer FM, Vennemann T, Sindern S, Prantl S, Böttcher ME, *et al.* 2010. Characterisation of the hydrothermal fluids of the Guelb Moghrein iron oxide-Cu-Au-Co deposit, Mauritania: ore mineral chemistry, fluid inclusions and isotope geochemistry. In: Porter TM, ed. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective, v. 4-Advances in the understanding of IOCG deposits. Adelaide: PGC Publishing, pp. 553–572.

- Lécorché JP, Dallmeyer RD, Villeneuve M. 1989. Definition of tectonostratigraphic terranes in the Mauritanide, Bassaride, and Rokelide orogens, West Africa. *Geol Soc Am Bull* (230): 131–144.
- Maignien R. 1958. Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique Occidentale [The Cuirassement of Soil in Guinea, West Africa]. Thèse Sciences. Strasbourg: Université de Lorraine, pp. 239.
- Marcelin J. 1968. Carte géologique de la région d'Akjoujt à 1/2000,000. Paris: Bur Rech géol Min edit.
- Martyn J, Strickland C. 2004. Stratigraphy, structure and mineralisation of the Akjoujt area, Mauritania. *Journal of African Earth Sciences* 38: 489–503. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.03.004>.
- Melfi AJ, Pédro G, Nalovic L, Queiroz Neto JP. 1976. Étude sur l'altération géochimique des itabirites du Brésil (dissolution du quartz et instabilité de l'hématite primaire en conditions tropicales hydrolysantes). *Cah ORSTOM, Sér Pédol* 3: 179–192.
- Moore DM, Reynolds RC. 1997. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, pp. 378.
- Nahon D. 1976. Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs: géochimie, structures, relais et coexistence. *Sciences Géologiques, Strasbourg* 44: 232.
- Nicholson K. 1987. Ironstone-gossan discrimination: pitfalls of a simple geochemical approach—A case study from northeast Scotland. *Journal of Geochemical Exploration* 27(1–2): 239–257. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(87\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0375-6742(87)90022-7).
- Pitfield PEJ, Key JA, Waters RM, Hawkins CN, *et al.* 2004. Notice explicative des cartes géologiques et géologiques à 1/200 000 et 1/500 000 du Sud de la Mauritanie. Volume 1-géologie. Nouakchott: DMG, Ministère des Mines et de l'Industrie, pp. 494–498.
- Sakellaris GA. 2007. Petrology, geochemistry, stable and radiogenic isotopy of the Guelb Moghrein iron oxide-copper-gold-cobalt deposit, Mauritania.
- Scott KM, Ashley PM, Lawie DC. 2001. The geochemistry, mineralogy and maturity of gossans derived from volcanogenic Zn-Pb-Cu deposits of the eastern Lachlan Fold Belt, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration* 72(3): 169–191. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00159-5).
- Ségalen P. 1973. L'aluminium dans les sols (No. 22). Paris, France: Orstom.
- Spier CA, Levett A, Rosière CA. 2019. Geochemistry of canga (ferricrete) and evolution of the weathering profile developed on itabirite and iron ore in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita* 54(7): 983–1010. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0856-7>.
- Strickland CD, Martyn JE. 2002. The Guelb Moghrein Fe-oxide copper-gold-cobalt deposit and associated mineral occurrences, Mauritania: a geological introduction. In: Porter TM, ed. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: a global perspective, v. 2. Adelaide: PGC Publishing, pp. 275–291.
- Tardy Y. 1993. Pétrologie des latérites et des sols tropicaux. Masson, pp. 459.
- Thelemann M, Bebermeier W, Hoelzmann P, Lehnhardt E. 2017. Bog iron ore as a resource for prehistoric iron production in Central Europe—A case study of the Widawa catchment area in eastern Silesia, Poland. *Catena* (149): 474–490. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.002>.
- Velasco F, Herrero JM, Suárez S, Yusta I, Alvaro A, Tornos F. 2013. Supergene features and evolution of gossans capping massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews* (53): 181–203. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.008>.
- Verplanck PL, Yager DB, Church SE, Stanton MR. 2007. Ferricrete classification, morphology, distribution, and carbon-14 age constraints. *US Geological Survey Professional Paper* (1651): 721–744.
- Wirt L, Vincent KR, Verplanck PL, Yager DB, Church SE, Fey DL. 2007. Geochemical and hydrologic processes controlling formation of ferricrete. *US Geological Survey Professional Paper* (1651): 779–815.

**Citation de l'article** :El Ghastalany R, Branquet Y, Bagga MA, Taviche IK, Wafik A, Ghnahalla M, Abdeina EH. 2023. Nature et origine des cuirasses ferrugineuses de la région de Khat Oummat Elbid, Inchiri, Mauritanie, *BSGF - Earth Sciences Bulletin* 194: 3.