

cartographie chimique et structuration pétrogéochimique tridimensionnelle de la DTZ dans le massif de Sumail

A la vue de la structuration décrite pour les coupes de Buri et du fait que le massif de Sumail soit très peu penté vers le SE (Nicolas *et al.*, 1988b), la structuration pétrologique et géochimique tridimensionnelle originelle de la DTZ autour du diapir de Maqсад peut être facilement visualisée par la mise en relation des observations structurales effectuées sur l'ensemble de la zone d'étude et des évolutions chimiques de chaque coupe échantillonnée.

6.3.5.1. Continuité latérale des variations chimiques

Les évolutions chimiques décrites pour les coupes de Buri 2014, Buri 1 et Buri 2 semblent très fortement contrôlées par la structure tectonique de la zone. Cependant, certaines tendances sont communes aux trois coupes malgré la diversité des faciès lithologiques et le fait que ces coupes soient affectées par des failles différentes. Par exemple, il apparaît que les variations de la composition de l'olivine atteignent un paroxysme à l'altitude de 700 m dans les trois coupes. Egalement, la baisse du rapport Mg# et l'augmentation de la teneur en TiO₂ des clinopyroxènes et des chromites est globalement commune aux trois coupes. Cette observation peut amener à dégager des caractères communs à l'ensemble de la DTZ au-delà des spécificités locales déjà illustrées ; les coupes de Buri 2014 et Buri 2 sont par exemple très semblables à la fois de par leur pétrologie et leurs compositions chimiques malgré le contraste avec la coupe de Buri 1 localisée en position intermédiaire le long du flanc ouest (pour rappel, Figure 6.45).

Un autre exemple marquant la continuité latérale des compositions chimiques le long de la DTZ est illustré par les coupes d'Arrière-Buri 1 et 2 échantillonnées le long du flanc est (Figure 6.27). La superposition de l'évolution verticale de leurs compositions chimiques définit des tendances très

similaires entre les deux coupes avec une augmentation du rapport La_{CN}/Sm_{CN} des dunites pures et de la teneur en TiO_2 des clinopyroxènes et une diminution de la teneur en NiO de l'olivine et du rapport Mg# des chromites entre environ 725 et 825 m d'altitude (Figure 6.128). La tendance inverse est ensuite observée d'environ 825 à 900-925 m tandis qu'au-delà, les compositions chimiques montrent une succession des deux tendances décrites, définissant des horizons épais de 50 à 100 m - les tendances sont toutefois moins bien définies pour le TiO_2 dans le clinopyroxène.

La continuité latérale des variations chimiques dans la DTZ est ici très claire pour deux coupes échantillonnées à 800 m l'une de l'autre (la partie supérieure de la coupe d'Arrière-Buri 2 est même légèrement décalée de quelques centaines de mètres de plus au SE, voir le figure 6.27) et recoupées en partie par des failles communes et en partie par des failles propres à chaque coupe. Cette continuité latérale illustre une logique dans la structuration de la DTZ à grande échelle. Les logs en NiO_{ol} et $Mg\#_{chro}$ montrent même que la lacune d'échantillonnage entre 750 et 800 m à la base de la coupe d'Arrière-Buri 1 - alternances harzburgites-dunites - est comblée par les échantillons d'Arrière-Buri 2 collectés à la même altitude.

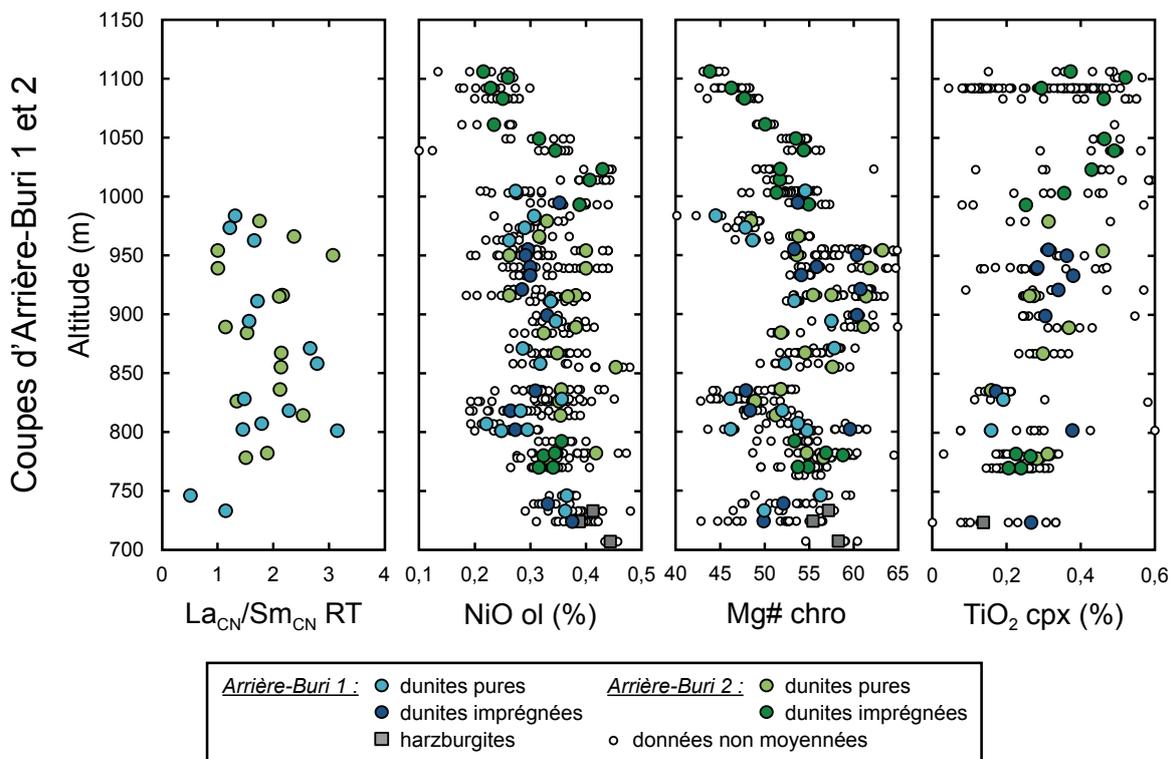


Figure 6.128 : Continuité latérale des compositions chimiques le long du flanc est entre les deux coupes d'Arrière-Buri 1 et d'Arrière-Buri 2 séparées d'environ 800 m, illustrées par les rapports La_{CN}/Sm_{CN} des roches totales et Mg# des chromites et les teneurs en NiO des olivines et TiO_2 des clinopyroxènes. Aucune correction du pendage du massif n'a été appliquée du fait de la proximité des deux coupes.

6.3.5.2. Structuration verticale globale de la DTZ

La première coupe décrite dans cette zone, la coupe de Tuff (Abily, 2011; Abily et Ceuleneer, 2013), montre pour les mêmes éléments chimiques que ceux décrits pour les coupes d'Arrière-Buri 1 et 2 le même type de variations de même amplitude (Figure 6.129A). On observe cependant un décalage vertical des différentes tendances qui rend difficile la concordance entre les coupes.

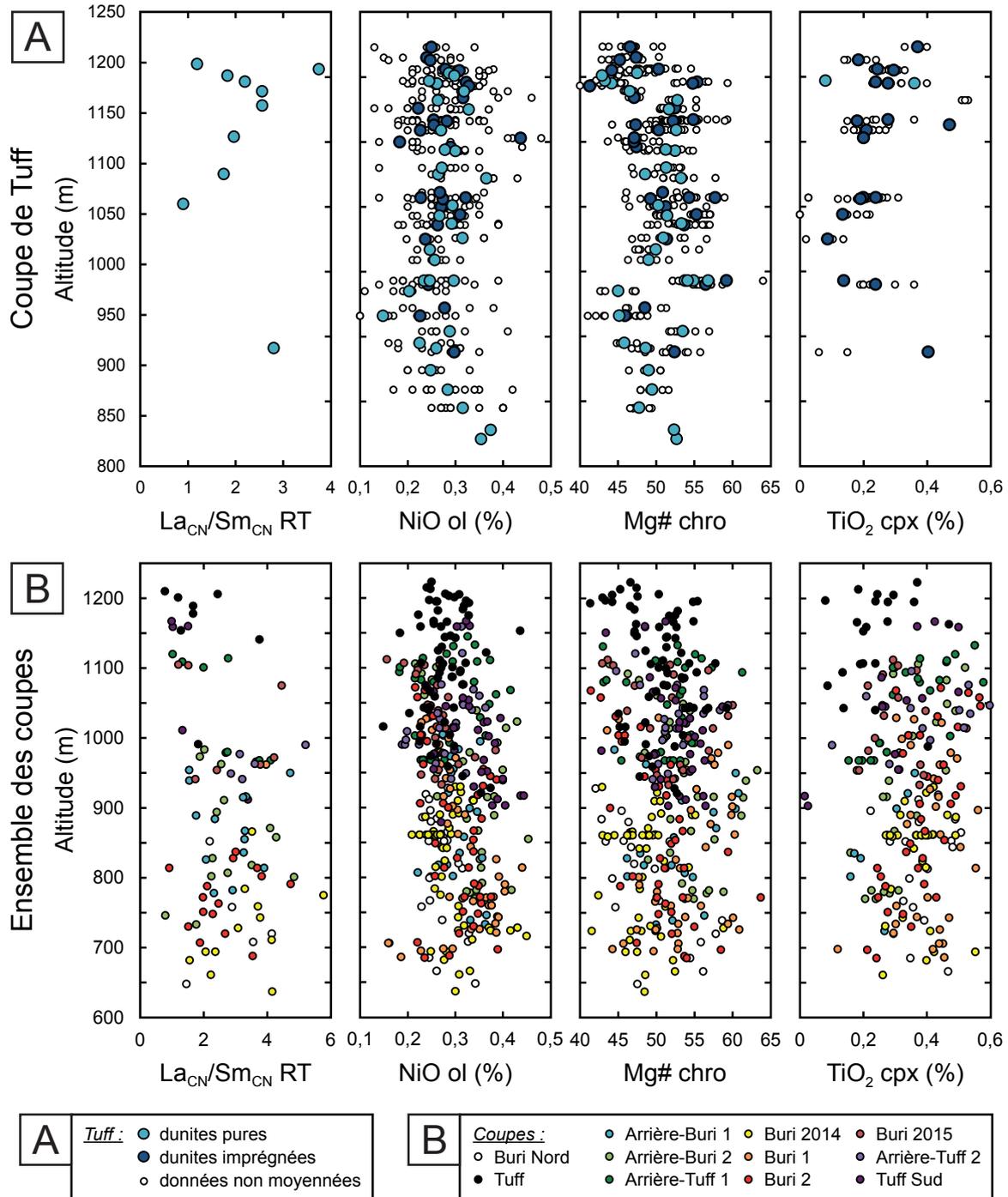


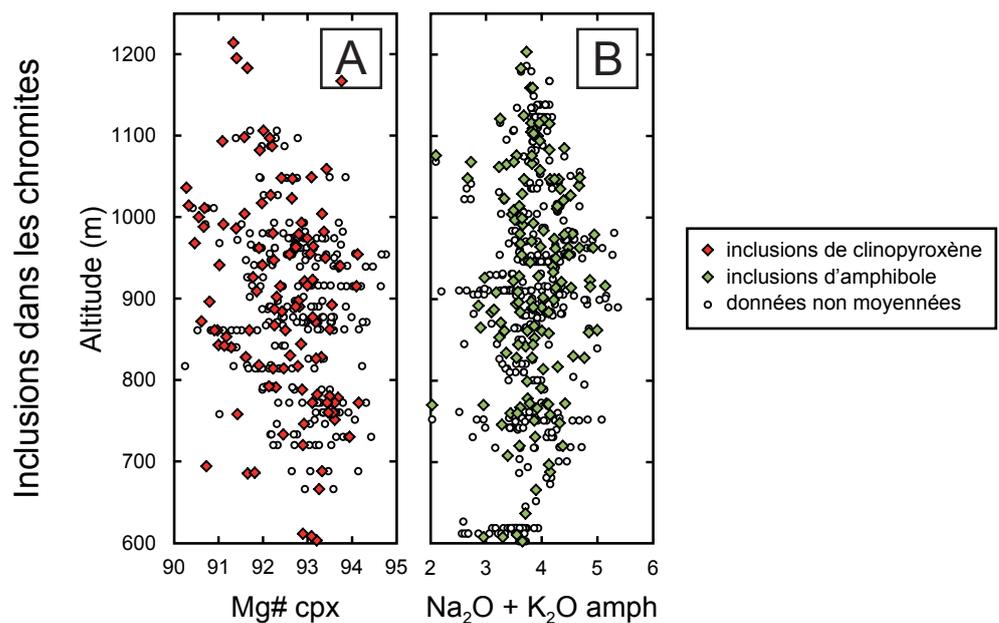
Figure 6.129 : Evolution des rapports La_{CN}/Sm_{CN} des roches totales et Mg# des chromites et des teneurs en NiO de l'olivine et en TiO_2 des clinopyroxènes le long de la coupe de Tuff (A) et de l'intégralité des coupes de la crête dunitique de Tuff-Buri (B). Quelques données pour les terres rares des coupes de Tuff et de Tuff Sud proviennent du travail de Claverie (2013).

De la même manière, la teneur en NiO_{ol} et le rapport $Mg\#_{chro}$ semblent définir une évolution en zigzag lorsqu'on inclut l'ensemble des coupes dans un même graphique, en particulier de 600 à 1000 m d'altitude (Figure 6.129B), mais cette tendance ne se devine pas pour tous les éléments chimiques. Ceci illustre que la logique de structuration globale de la DTZ est également largement perturbée par des

spécificités locales et ne se reproduit que partiellement à l'échelle de toutes les coupes, ce qui peut être expliqué de différentes manières. Tout d'abord le faible pendage du massif de 10° vers le SE peut avoir un impact significatif sur la corrélation de la structuration verticale de la DTZ lorsque la distance entre les coupes atteint plusieurs kilomètres - la coupe de Tuff est distante d'environ 3,6 km de la coupe d'Arrière-Buri 2 par exemple. Le cumul des petits décalages locaux observés sur différents plans de failles peut également devenir significatif à grande échelle, au plus la distance est grande, au plus la probabilité de recouper ces petits accidents augmente. D'autre part, puisque la structuration de la DTZ s'organise à partir du développement de la fracturation, la mise en place d'une faille 50 m plus haut ou plus bas dans une coupe par rapport à une autre peut amener à une structuration verticalement décalée. Enfin, on peut supposer que le stade d'avancement de la construction de la DTZ peut différer selon la distance au diapir de Maqsad, ce qui laisserait supposer une structuration tridimensionnelle originelle le long de la crête dunitique de Tuff-Buri.

Enfin, en ce qui concerne la structuration verticale globale de la DTZ, il est intéressant de regarder l'évolution de la composition chimique des inclusions silicatées dans les chromites, qui peuvent par ailleurs apporter des informations sur les magmas ayant percolé dans les zones où les liquides ont été entièrement extraits et maintenant définies comme les horizons de dunités pures. La figure 6.130 présente deux logs, l'un montrant l'évolution du rapport Mg# des inclusions de clinopyroxène, l'autre montrant l'évolution de la teneur en éléments alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) dans les inclusions d'amphibole. Ces deux indicateurs montrent, au même titre que les phases minérales composant les dunités de la DTZ, des évolutions en zigzag le long de la DTZ avec des tendances s'étalant presque systématiquement sur une centaine de mètres d'épaisseur. On peut par exemple observer quatre tendances successives, à la hausse sur les intervalles 650 - 750 m et 850 - 950 m, et à la baisse entre 750 et 850 m et au-delà de 950 m. Une nouvelle fois, l'évolution de ces compositions montre que même si les failles contrôlent de manière très claire la structuration pétrologique et géochimique de la DTZ de manière locale, tel qu'illustré par l'étude des différentes coupes, il semble y avoir une structuration globale à plus grande échelle qui organise la DTZ en différents niveaux successifs.

Figure 6.130 : Evolution du rapport Mg# des clinopyroxènes et de la teneur en éléments alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) des amphiboles en inclusion dans les chromites de l'ensemble des dunités de la DTZ du massif de Sumail.



6.3.5.3. Structuration pétrogéochimique de la DTZ autour du diapir de Maqsad

Dans l'optique de mieux évaluer la structuration pétrologique et géochimique de la DTZ entre l'oasis de Tuff et le village de Buri au nord, les compositions chimiques ont été projetées sur Google Earth afin d'obtenir une visualisation en trois dimensions de la distribution des variations (Figures 6.131 à 6.134).

Pour rappel avant la description des cartes, la comparaison des compositions en éléments majeurs et en traces des roches totales et des minéraux ont permis de mettre en évidence différentes tendances dans les dunités de la DTZ. Ces signatures peuvent être attribuées à divers processus :

dunitisation :

- convexité marquée des spectres de terres rares des roches totales de dunités pures (degré de concavité très négatif, fort rapport La_{CN}/Sm_{CN} , faible rapport Gd_{CN}/Yb_{CN}),
- forts rapports Fo et teneurs en NiO dans l'olivine,
- fort rapport La_{CN}/Yb_{CN} des spectres de terres rares des magmas calculés à l'équilibre avec les clinopyroxènes imprégnants, marqueurs de la genèse de magmas enrichis en silice et en éléments en traces incompatibles lors de la fusion incongruente de l'orthopyroxène des harzburgites résiduelles ;

interaction avec un liquide de type MORB - rééquilibrage chimique avec la matrice d'olivine :

- lissage des spectres de terres rares des dunités pures qui présentent une convexité moins marquée (degré de concavité moins négatif, plus faible rapport La_{CN}/Sm_{CN} , plus fort rapport Gd_{CN}/Yb_{CN}),
- diminutions conjointes du rapport Fo et de la teneur en NiO dans l'olivine,
- augmentation de la teneur en CaO dans l'olivine,
- signature en éléments en traces des clinopyroxènes interstitiels proche de la composition calculée pour les clinopyroxènes à l'équilibre avec les laves de l'unité extrusive V1 ;

crystallisation fractionnée :

- imprégnations majoritairement de plagioclase et de clinopyroxène (augmentation des teneurs en CaO et Al_2O_3 des roches totales, spectres de terres rares de plus en plus concaves des roches totales avec l'augmentation de la quantité de clinopyroxène),
- augmentation de la teneur en TiO_2 de l'ensemble des phases minérales imprégnantes, du XCr des chromites, du Na_2O des clinopyroxènes ;

hybridation des magmas percolants avec des fluides hydrothermaux de haute température :

- hydratation des magmas (augmentation du rapport YFe^{3+} des chromites, cristallisation de minéraux indicateurs d'un magma parent hydraté)
- appauvrissement en LREE des magmas ayant cristallisé les clinopyroxènes (plus faible rapport La_{CN}/Sm_{CN} dans les clinopyroxènes et magmas à l'équilibre calculés).

La première carte de la bande dunitique de Tuff-Buri montre la distribution des faciès lithologiques (Figure 6.131A). La deuxième montre la teneur en CaO des roches totales, reflétant la quantité relative d'imprégnations (cf. paragraphe 6.2.4.1 et figure 6.84) (Figure 6.131B). On observe le long du flanc ouest l'augmentation de la teneur en CaO au-dessus de l'accident régional N155 pour les coupes de Buri 2015 et de Buri 2 au sud, indiquant une quantité supérieure de clinopyroxène et/ou de plagioclase,

ainsi qu'au-delà d'une faille N180 affectant la partie supérieure de la coupe de Buri 2014. La coupe de Buri 1, en position intermédiaire, montre une teneur en CaO globalement forte et reflétant le fort degré d'imprégnation caractérisant cette coupe (Figures 6.48 et 6.127A). Tel qu'observé pour de nombreuses coupes (Figures 6.36 et 6.56), l'orthopyroxène et l'amphibole apparaissent également au-delà de certaines zones de failles, ici illustré pour les coupes de Buri 2, d'Arrière-Buri 2 et d'Arrière-Tuff 1 (Figure 6.131A).

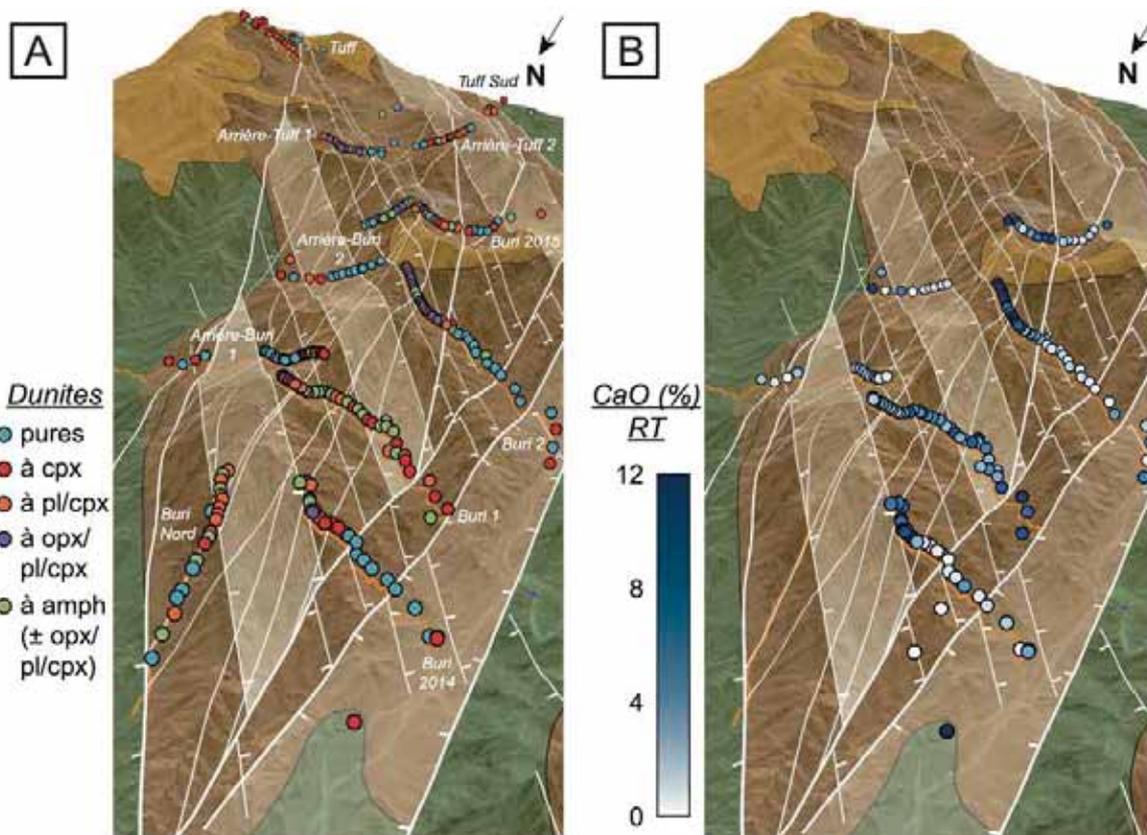


Figure 6.131 : Illustration de la distribution spatiale des imprégnations le long de la crête dunitique de Tuff-Buri avec la projection des différents faciès lithologiques (A) et la teneur en CaO des roches totales qui augmente avec la quantité de clinopyroxène et de plagioclase. La projection de la composition chimique des dunités sur le fond topographique Google Earth a été réalisée à l'aide de l'outil Geolokit (Triantafyllou *et al.*, 2017). La carte géologique calquée sur la topographie correspond à la figure 6.124.

La projection de la composition chimique de l'olivine montre également une forte corrélation avec les zones de failles des deux systèmes N130 et N165-180. On observe par exemple des valeurs particulièrement fortes du Fo entre les deux accidents régionaux N165-N180 affectant la coupe de Buri 2014, au-delà de l'accident N165 recoupant la base de la coupe de Buri 1, ou encore au-delà d'une faille N130 le long de la coupe d'Arrière-Buri 2 (Figure 6.132A). La teneur en NiO montre une distribution similaire et même mieux marquée, avec de fortes valeurs au cœur du graben central le long de la coupe de Buri 1 par exemple (Figure 6.132B). Les accidents régionaux N155 et N165-180 affectant le flanc ouest semblent également contraindre les fortes valeurs en CaO des olivines dans les parties inférieures de coupes tel qu'il avait déjà été observé sur les logs chimiques présentés plus haut (Figures 6.127B et 6.132C). Les parties plus superficielles, correspondant aux zones plus imprégnées, affichent de plus faibles valeurs. Cette répartition peut signifier l'enregistrement de la percolation de

MORB à la base du flanc ouest si l'hypothèse d'un lien entre fortes valeurs en CaO dans l'olivine et rééquilibrage avec un tel liquide avant fermeture du système s'avère être bonne (Abily et Ceuleneer, 2013). La coupe de Buri Nord montre les plus fortes valeurs en CaO au centre d'une unité contrainte par deux failles régionale N130, suggérant la focalisation de la percolation des MORB au cœur de cette unité, similairement à ce qui a été observé à plus fine échelle le long de l'affleurement de la coupe de Buri 2014 (Figure 6.125). La distribution des valeurs du rapport La_{CN}/Sm_{CN} des dunités pures montre une répartition cohérente avec la distribution de la composition de l'olivine, avec de faibles rapports La_{CN}/Sm_{CN} au niveau des zones aux faibles rapports Fo et teneurs en NiO et aux fortes teneurs en CaO (i.e. fort rééquilibrage entre la matrice dunitique et un MORB), et inversement (Figure 6.132D).

Les fortes valeurs du rapport XCr apparaissent dans les zones au faible CaO_{ol} , soit assez haut dans la DTZ au-delà des failles régionales N130 et N165-180 (Figure 6.133A), inversement aux fortes valeurs du rapport YFe^{3+} surtout observées sous l'accident régional N165 recoupant le flanc ouest (Figure 6.133B). La distribution spatiale des teneurs en TiO_2 de la chromite est plus aléatoire, bien que les plus fortes concentrations semblent apparaître en montant dans la section au-dessus des zones affectées par des failles régionales ; cette observation est particulièrement bien établie pour les coupes localisées à la terminaison de la crête de Tuff-Buri (Buri Nord, Buri 2014) (Figure 6.133C). D'un point de vue général et malgré des exceptions à cette tendance générale, les échantillons aux plus fortes concentrations en Cr, contenant donc une plus forte abondance en chromites - dans le sens où 1 % de chromite en plus ou en moins impactera beaucoup plus fortement la teneur en Cr de la roche totale que quelques pourcents d'imprégnations de pyroxène -, correspondent aux échantillons dont la chromite présentent un rapport XCr plus faible (Figure 6.133A et D). Cette observation se vérifie bien notamment pour les coupes de Buri 1 et 2, d'Arrière-Buri 2 et d'Arrière-Tuff1. En d'autres termes, le magma hybride ayant transporté le Cr a soit cristallisé une quantité faible ou modérée de chromite aux fortes teneurs en Cr_2O_3 , soit une plus forte quantité de chromites moins riches en chrome.

Le Mg# des clinopyroxènes montre les plus fortes valeurs pour les coupes de Buri 1 et d'Arrière-Buri 1 et 2, tandis que les failles semblent contraindre des zones à fortes ou faibles valeurs (Figure 6.134A). La teneur en TiO_2 montre une distribution presque parfaitement inverse (Figure 6.134B). Les fortes teneurs en Na_2O rappellent la distribution des valeurs du XCr, avec des valeurs dans l'ensemble plus faibles sous les accidents régionaux N165 recoupant le flanc ouest et N130 affectant la coupe de Buri Nord (Figure 6.134C). Les forts rapports La_{CN}/Yb_{CN} des clinopyroxènes, reflétant l'équilibre avec des MORB ou avec les magmas plus enrichis (liquides résiduels issus de la dunitisation, sont au contraire majoritairement distribués à la base du flanc ouest, le reste de la DTZ montrant davantage une signature plus appauvrie en LREE (Figure 6.134D).

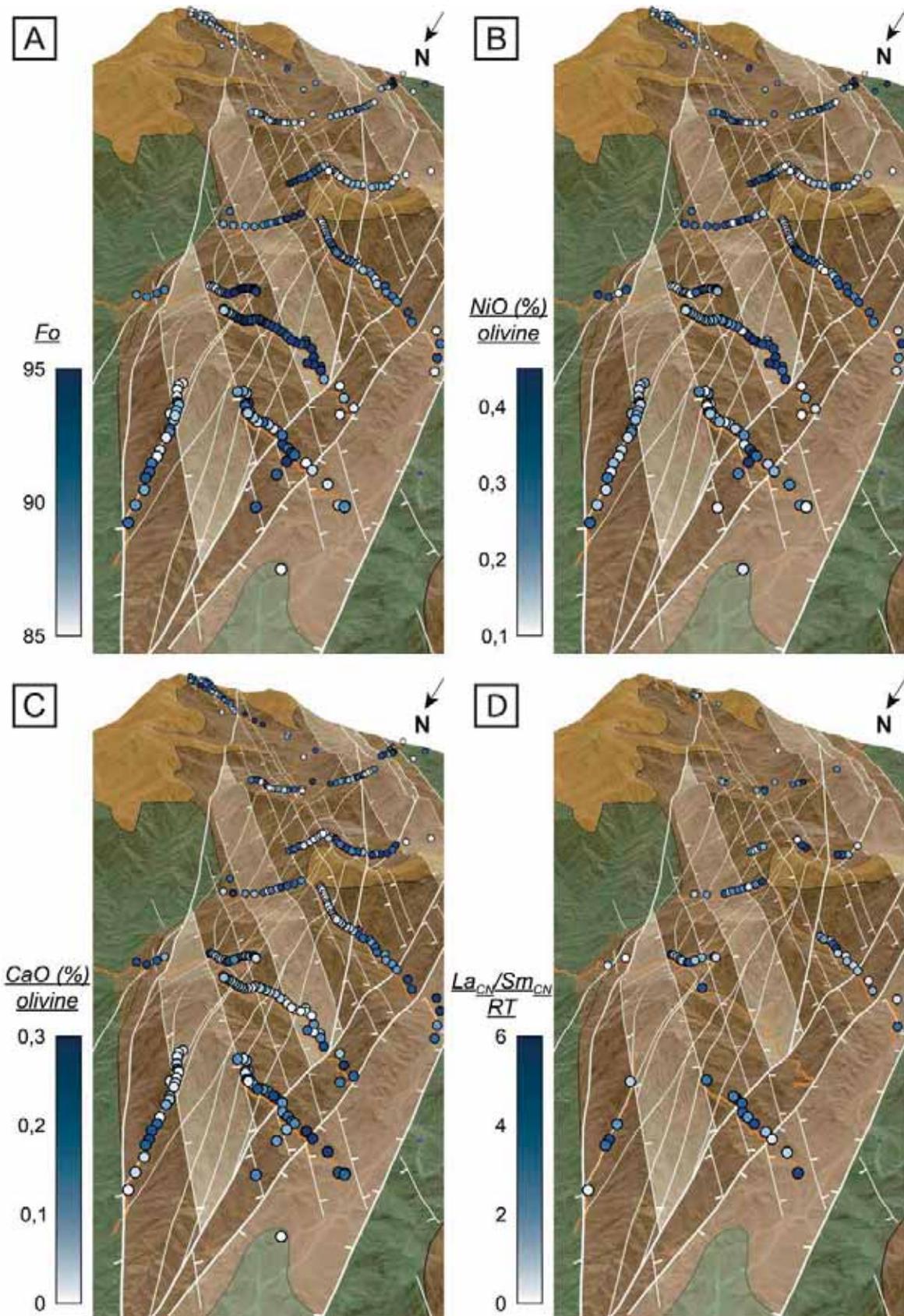


Figure 6.132 : Distribution spatiale de la composition chimique de l'olivine avec le rapport Fo (A) et les teneurs en NiO (B) et CaO (C), ainsi que du rapport $\text{La}_{\text{CN}}/\text{Sm}_{\text{CN}}$ des roches totales (D).

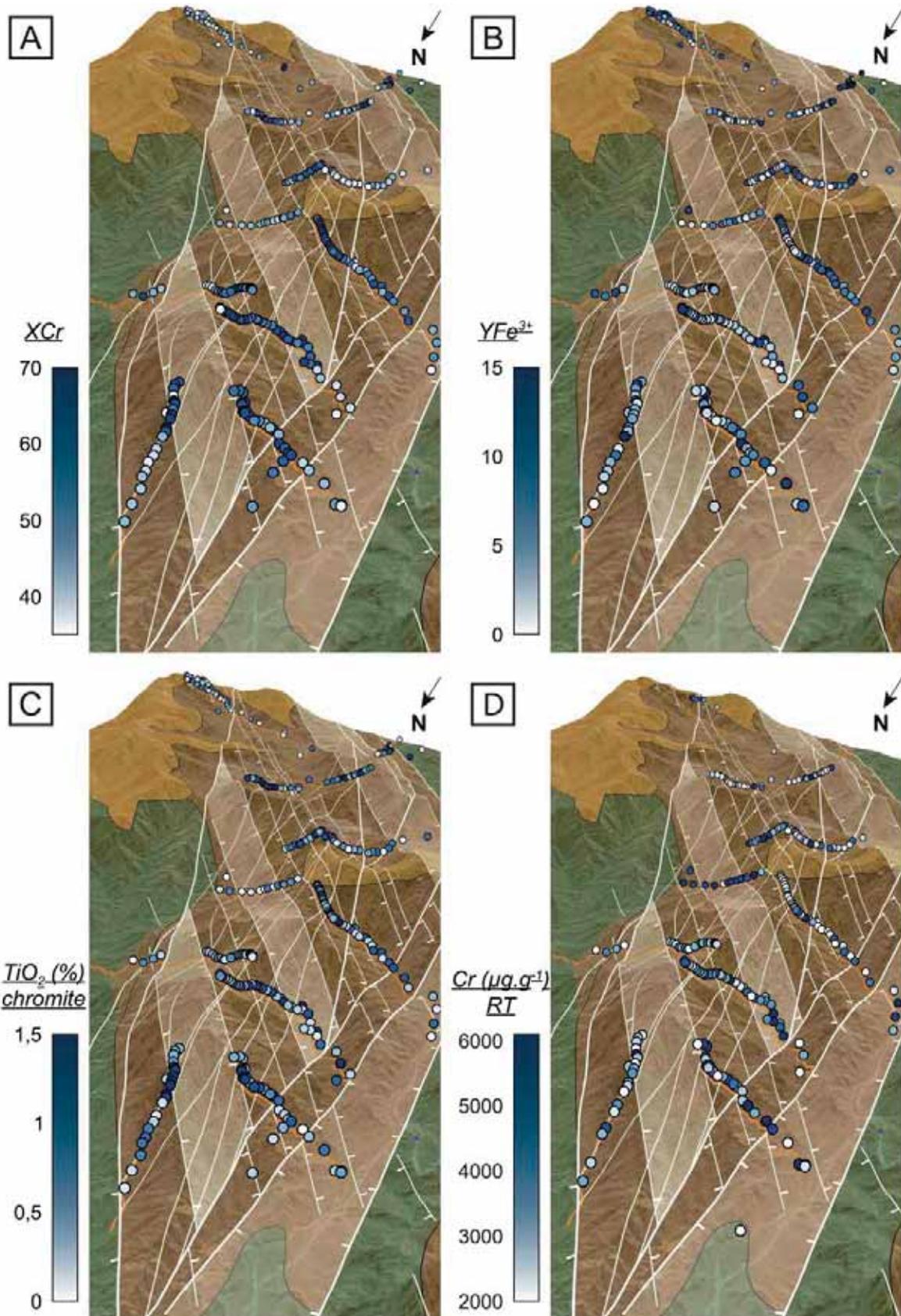


Figure 6.133 : Distribution spatiale de la composition chimique de la chromite avec les rapports X_{Cr} (A) et $Y_{Fe^{3+}}$ (B) et la teneur en TiO_2 (C), ainsi que de la teneur en Cr des roches totales (D).

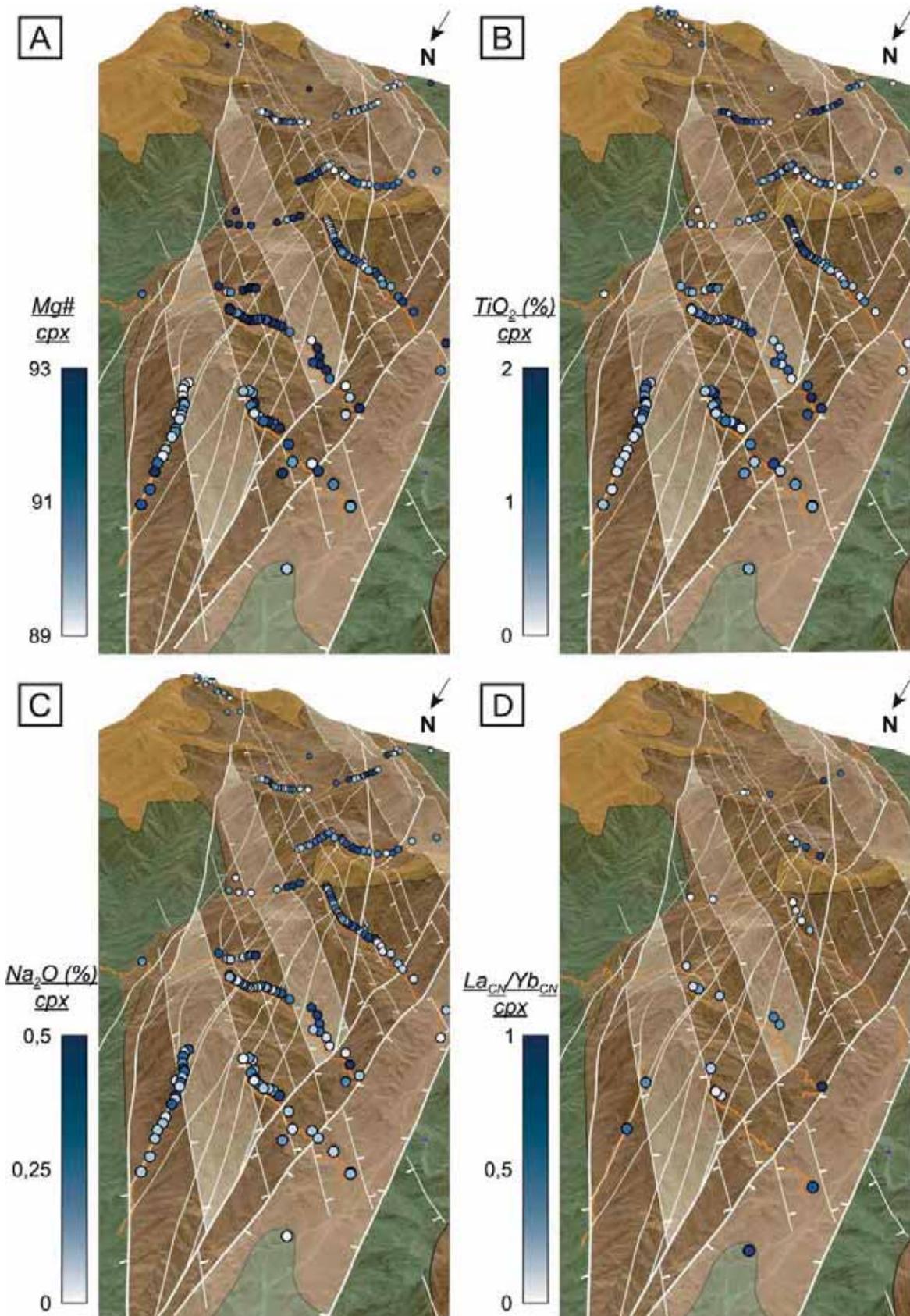


Figure 6.134 : Distribution spatiale de la composition chimique du clinopyroxène avec le rapport Mg# (A), les teneurs en TiO₂ (B) et Na₂O (C), et le rapport La_{CN}/Yb_{CN} (D).

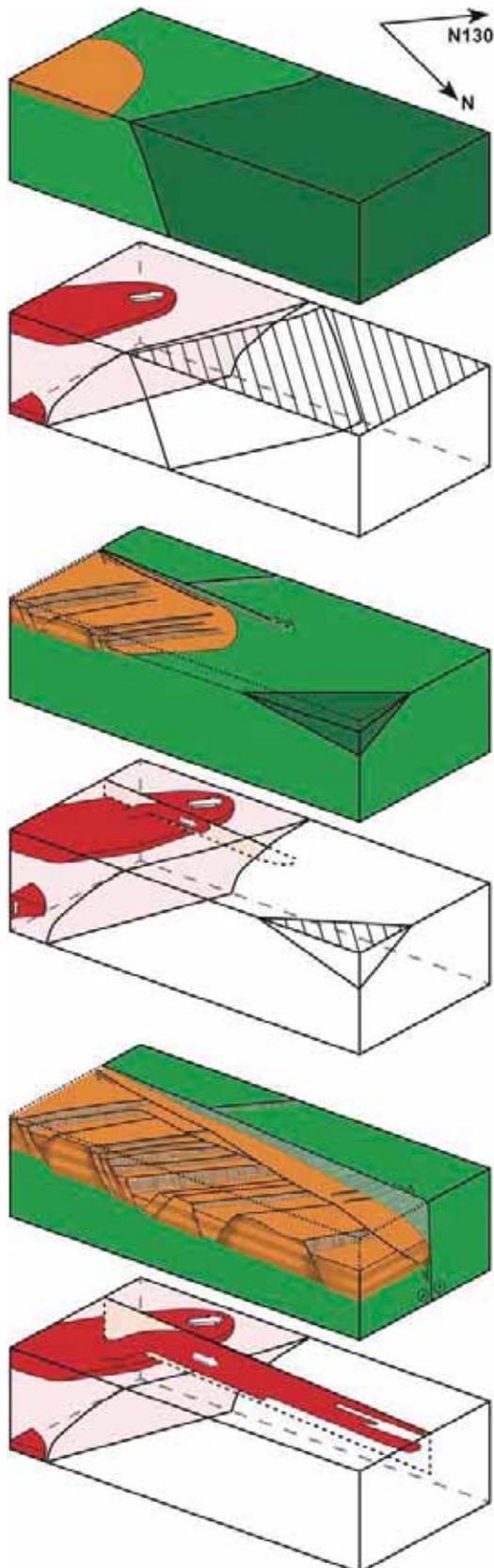
L'ensemble de ces observations permet de mettre en évidence deux grandes zones le long de la bande dunitique de Tuff-Buri : 1) la base du flanc ouest avec une forte signature MORB ou de magma enrichi, à la fois dans la composition de la matrice d'olivine ainsi que dans les minéraux interstitiels ; 2) les niveaux plus superficiels de la DTZ qui montrent la percolation de MORB plus évolués ou de magmas hybrides contenant une plus forte proportion du composant siliceux et hydraté. Le graben formé par le système de failles N165-180 bordant le flanc ouest apparaît ainsi comme un couloir de focalisation des magmas MORB.

La distribution des compositions chimiques couplée à l'ensemble des observations et mesures structurales effectuées sur le terrain nous amène à proposer le modèle de formation suivant pour la DTZ dans cette zone (Figure 6.135) :

A) Le diapir de Maqсад se met en place dans une lithosphère océanique plus ancienne, refroidie et en partie altérée par hydrothermalisme. Ce diapir alimente un segment de dorsale orienté N130 s'étendant du massif de Wadi Tayin, au SE de Sumail, au massif de Nakhl au NW (e.g. Ceuleneer, 1986; Nicolas *et al.*, 2000a; Python et Ceuleneer, 2003). Dans ce schéma la flèche ne représente pas le flux mantellique - qui s'horizontalise au Moho en s'éloignant perpendiculairement à l'axe (Ceuleneer, 1986; Ceuleneer *et al.*, 1988; Joussetin *et al.*, 1998) - mais le flux magmatique (migration interstitielle) délivré par le diapir et qui alimente le segment qui se propage vers le NW.

B) A l'aplomb du diapir, les harzburgites sont progressivement dunitisées (alentours de Tuff) dans un environnement alimenté en magmas d'une part, et qui commence à se structurer selon deux grandes directions, N130 en lien avec l'expansion le long de l'axe, et N165-180. Ces failles deviennent alors à la fois des structures canalisant le flux magmatique à la transition manteau-croûte et des vecteurs pour l'introduction de fluides hydrothermaux en profondeur. L'alternance des tendances observée dans la distribution verticale de la composition chimique s'accorde avec un front de dunitisation des harzburgites progressant vers le bas (Abily et Ceuleneer, 2013), et par l'arrivée de vagues magmatiques successives (Rabinowicz *et al.*, 1987; Rabinowicz et Ceuleneer, 2005) qui vont chacune permettre la dunitisation d'horizons épais de 50 à 100 m. Bien que le timing entre chaque vague magmatique soit difficile à évaluer, on peut imaginer des cycles où l'activité magmatique domine, amenant à la dunitisation d'un front, alternant avec des cycles davantage tectoniques et hydrothermaux. Au cours de ce processus, la compaction de la matrice dunitique peut progresser en plusieurs étapes vers le bas, possiblement en réponse au refroidissement de la DTZ à partir de son sommet, et contraindre les fronts de percolation dans lesquels le MORB peut transiter et/ou s'accumuler.

C) Le système continue de se développer dans un environnement structural asymétrique en transtension. La faille bordière N165 canalise une partie du flux magmatique qui va amener à une dunitisation préférentielle vers le nord plutôt que vers le NW le long de l'axe de dorsale. Dans le même temps, les failles N130 continuent à se mettre en place, notamment à l'est de l'accident bordier N165, amenant à une dunitisation de plus en plus profonde (vers Buri). Dans ce schéma la DTZ opère alors sur le même principe qu'une chambre magmatique, ou plutôt comme un *mush*, dans lequel les magmas interstitiels vont pouvoir se différencier et être hybridés avec les liquides provenant des zones de failles majeures (fluides hydrothermaux, voire produits de fusion hydratée des roches mafiques ou harzburgites fracturées) ou être compacté selon l'environnement structural et thermique local. Les failles, et notamment la faille bordière N165 ont par la suite continué à jouer après l'arrêt de l'activité magmatique en association avec des circulations de fluides hydrothermaux à basse température.



A Stade initial :

- Développement du segment de dorsale d'orientation N130 et d'affinité MORB au sein de l'ancienne lithosphère d'affinité calco-alcaline appauvrie (e.g. Benoit *et al.*, 1999; Ceuleneer, 1986; Clénet *et al.*, 2010; Nicolas *et al.*, 2000; Pylhon et Ceuleneer, 2003). Ce nouveau segment, alimenté par le diapir de Maqsad, est identifié par des directions du fluage mantellique verticales à proximité du diapir et qui s'horizontalisent au fur et à mesure que le flux s'en éloigne. Son orientation est différente au NE de Buri, où elle est d'orientation N30, et au SW au-delà de l'accident régional N165 de Muqbariah.

- Premiers stades de la dunitisation des harzburgites à l'aplomb de la zone diapirique riche en magmas interstitiels.

B Stade intermédiaire :

- Propagation du segment de dorsale vers le NW et le massif de Nakhl, avec un manteau asthénosphérique qui continue à fluer selon une orientation N130 et qui draine également le magma selon cette direction.

- Développement des deux systèmes de failles d'orientation N130, parallèle à l'axe de la dorsale, et N165-180 définissant un environnement global transtensif dextre. Cette structuration en système conjugué affecte la croûte et s'ancre progressivement dans la DTZ, et permet l'introduction de fluides hydrothermaux dans ces niveaux profonds.

- Une zone dominée par la tectonique, d'orientation N165, affecte la partie la plus supérieure de la section mantellique. Cette zone focalise la migration des magmas, amenant à une dunitisation préférentielle vers le nord.

- Dans le même temps, le front de dunitisation s'approfondit par paliers liés à l'arrivée de vagues magmatiques successives délivrées par le diapir. La cristallisation des magmas interstitiels conduisant aux niveaux imprégnés est plus prononcée dans certains horizons, notamment à proximité des zones de failles.

C Stade final :

- Fonctionnement continu du segment de dorsale N130.

- La DTZ poursuit son développement vers le nord et de plus en plus profondément. A la construction par le bas s'ajoute l'approfondissement du propagateur de par le cumul des décalages le long des failles N130.

- Du fait de son épaissement la DTZ devient une zone de drainage majeure où les MORB peuvent se différencier et être hybridés avec les fluides hydratés riches en silice issus de la dunitisation en présence de fluides hydrothermaux.

Figure 6.135 : Modèle tridimensionnel du développement de la bande dunitique de Tuff-Buri le long du paléo-axe de dorsale centré sur le diapir de Maqsad, déduit du modèle proposé par Abily et Ceuleneer (2013) et des observations de terrain et données pétrologiques et géochimiques reportées dans cette thèse.

6.3.5.4. Structuration pétrogéochimique de la DTZ en périphérie du diapir de Maqsad

La DTZ en périphérie du diapir de Maqsad, dans les secteurs d'Al Juyaynah, d'Al Felgain et de la coupe du camp, apparaît globalement moins épaisse que le long de la bande dunitique de Tuff-Buri (Figure 6.83). Cette zone donne par ailleurs accès à la base de la croûte inférieure avec l'affleurement d'importantes unités de gabbros lités et dont le contact avec la DTZ apparaît systématiquement faillé (Figure 6.80).

La composition chimique de l'olivine des dunites dans ce secteur périphérique est assez semblable à ce qui est observé à l'axe, si ce n'est des gammes de variation des valeurs du rapport Fo et de la teneur en NiO des dunites pures plus restreintes vers des valeurs hautes, rarement inférieures à 89 et 0,25 % respectivement (Figure 6.136A). On observe toujours les plus fortes teneurs en CaO pour les olivines des dunites pures par rapport aux dunites imprégnées (Figure 6.136B). Les chromites montrent des rapports XCr proche à légèrement plus élevé et YFe^{3+} similaire aux chromites des dunites échantillonnées à l'axe. La teneur en TiO_2 est en revanche significativement plus faible, ne dépassant que rarement 0,5 %. De la même manière, les clinopyroxènes montrent une teneur en TiO_2 légèrement plus faible pour une gamme de variation du rapport Mg# similaire (Figure 6.136C et D). Ceci suggère que la DTZ en périphérie du diapir de Maqsad a également été percolée par un magma de type MORB relativement primitif mais que la composante évoluée et hydratée y est bien moins représentée. Cette observation va avec l'abondance beaucoup plus faible des minéraux marqueurs d'un magmatisme hydraté (orthopyroxène, amphibole, diopside, grenat), à l'exception de la coupe du camp qui comprend très largement des amphiboles interstitielles (Figure 6.83) et qui est recoupée par des dikes de diorite.

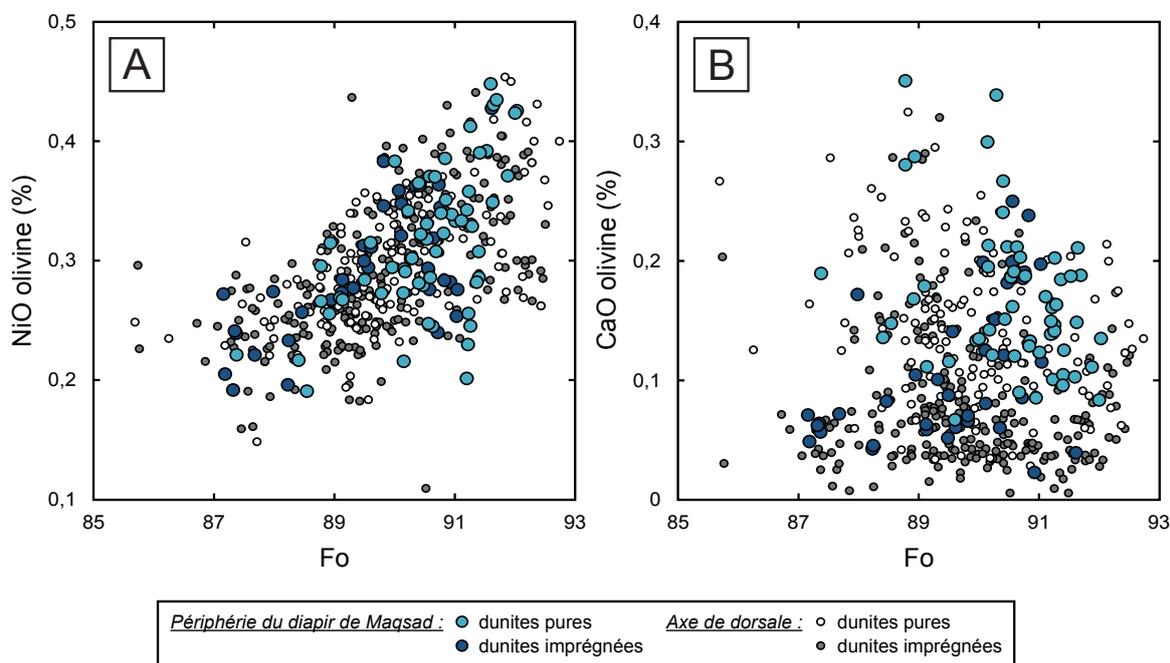
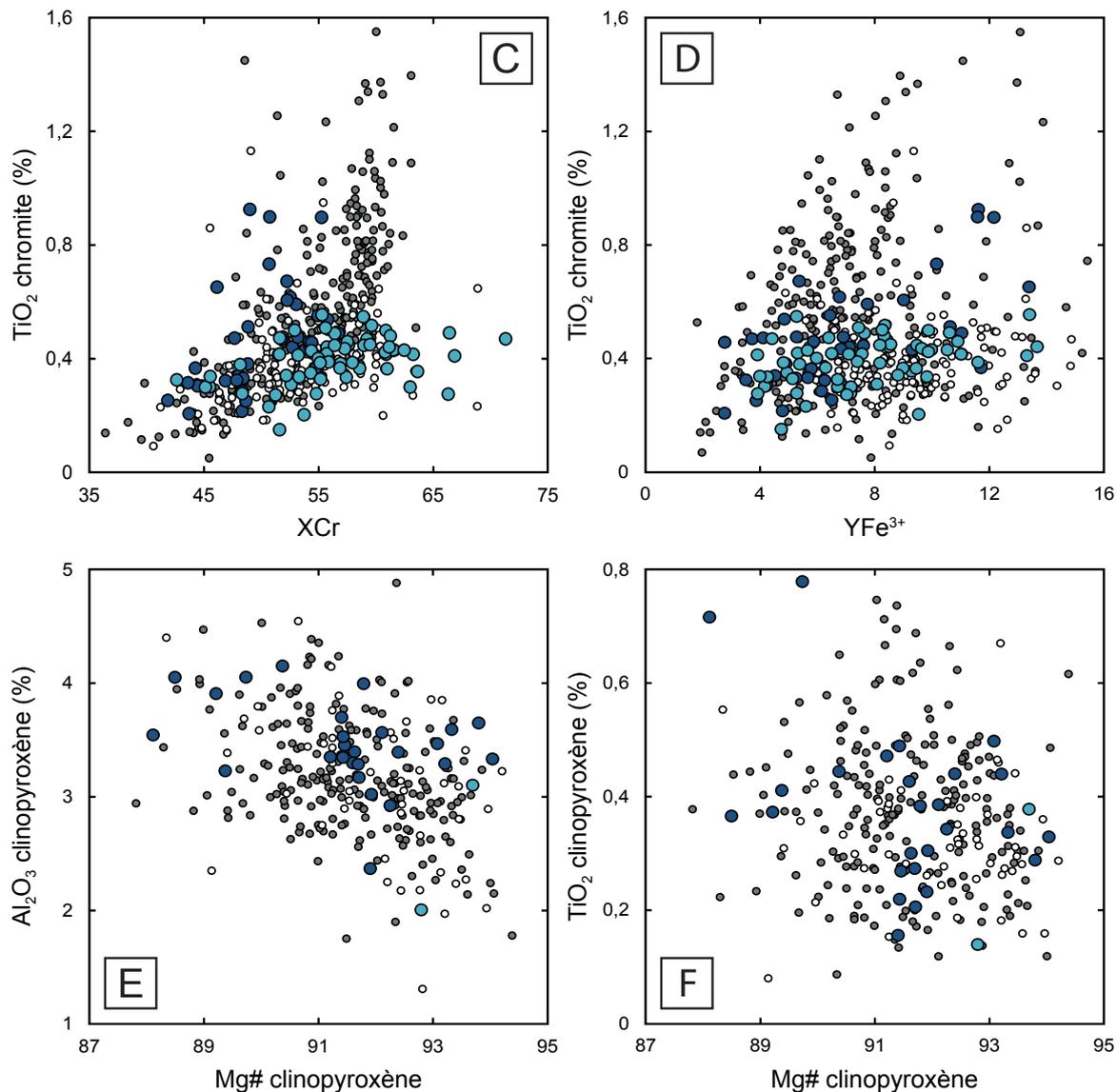


Figure 6.136 : Comparaison de la composition chimique de l'olivine, illustrée par les teneurs en NiO (A) et CaO (B) en fonction du rapport Fo, de la chromite, illustrée par la teneur en TiO_2 en fonction des rapports XCr (C) et YFe^{3+} (D), et du clinopyroxène, illustrée par les teneurs en Al_2O_3 (E) et TiO_2 (F) en fonction du rapport Mg#, entre les dunites échantillonnées en périphérie du diapir de Maqsad et les dunites échantillonnées à l'axe le long de la bande dunitique de Tuff-Buri.



Les spectres de terres rares et multiélémentaires des dunites pures de la zone périphérique montrent des allures de spectres très semblables à l'ensemble des spectres déjà décrits (Figure 6.137A et B). Les concentrations en HREE sont majoritairement autour des valeurs moyennes tandis que la gamme de variation des teneurs en LREE couvre presque l'entièreté de la gamme observée pour l'ensemble des dunites de la DTZ avec des valeurs normalisées à la chondrite systématiquement inférieures à 0,1.

Les dunites imprégnées montrent en revanche une variabilité de leur composition chimique significativement plus faible qu'à proximité de l'axe de dorsale (Figure 6.137C et D). On observe par exemple beaucoup moins de spectres clairement concaves qui expriment une abondance importante du clinopyroxène. Cette caractéristique, qui reflète un degré d'imprégnation globalement plus faible dans les dunites de la zone périphérique, se traduit par des teneurs en terres rares, surtout en HREE, parmi les plus basses de l'ensemble des dunites imprégnées analysées (Figure 6.137C). Cette observation est également valable pour le Ti et, dans une moindre mesure, pour le Zr et le Hf, mais les autres éléments en traces incompatibles (LILE, Th, U, Nb, Ta) montrent des teneurs globalement moyennes par rapport aux gammes de variations des dunites imprégnées de la bande dunitique de Tuff-Buri (Figure 6.137D).

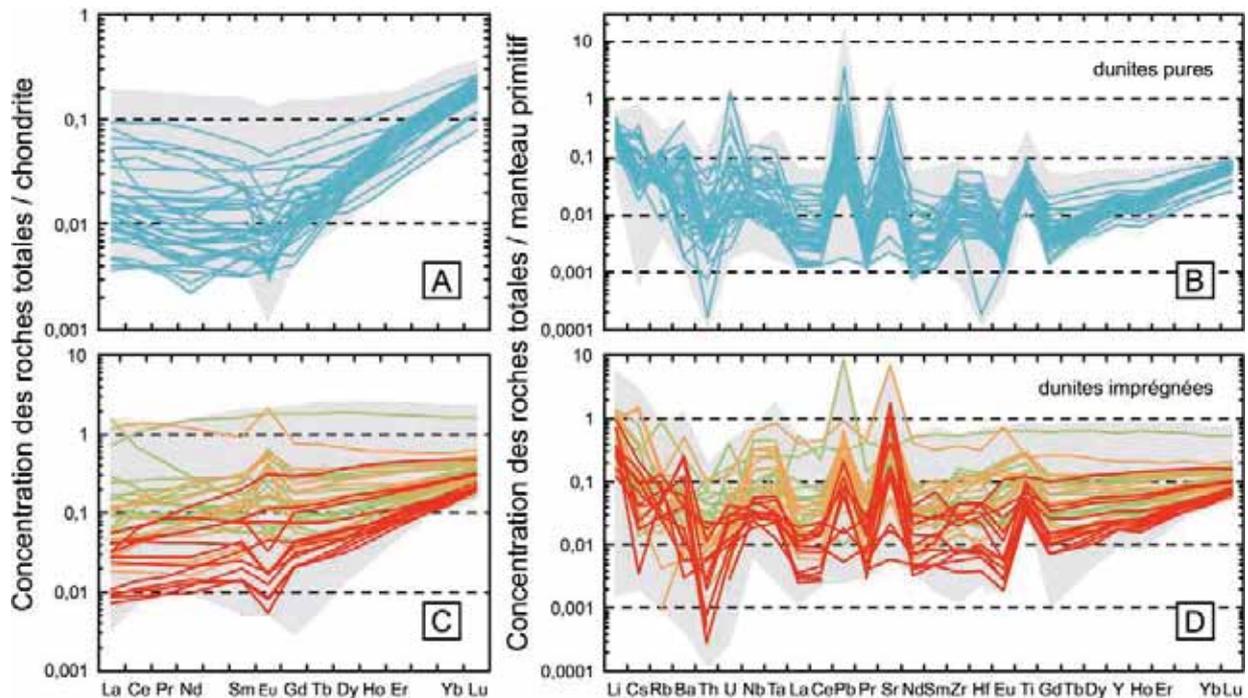


Figure 6.137 : Comparaison des spectres de terres rares et multiélémentaires des dunites pures (A et B) et imprégnées (C et D) de la zone périphérique au diapir de Maqсад par rapport à l'ensemble des dunites de la DTZ (champs grisés). Les concentrations sont normalisées à la chondrite pour les spectres de terres rares (valeurs de Barrat *et al.*, 2012) et au manteau primitif pour les spectres étendus (valeurs de Sun et McDonough, 1989).

Les coupes levées en périphérie du diapir de Maqсад montrent la même structuration verticale que les coupes levées à l'axe, avec l'alternance de tendances chimiques évoluant sur des épaisseurs d'une cinquantaine à une centaine de mètres (Figure 6.138). Les coupes levées dans le secteur d'Al Juyaynah, secteur le plus proche du diapir de Maqсад parmi l'échantillonnage effectué en périphérie (Figure 6.4), montre une continuité latérale des évolutions chimiques légèrement moins nette qu'à l'axe de paléodorsale (Figure 6.138A). Entre les deux coupes d'Al Juyaynah 2014 et d'Arrière Al Juyaynah, on observe par exemple une baisse commune des rapports Fo et XCr et une augmentation de la teneur en CaO dans l'olivine entre environ 950 et 1000 m d'altitude. La teneur en TiO₂ des chromites est en revanche anticorrélée d'une coupe à l'autre le long de cet intervalle. A noter que le décalage important du rapport Fo vers 975 m d'altitude (Figure 6.138A), ainsi que la transition des portions pures ou imprégnées des coupes (Figures 6.71 et 6.73), correspondent une nouvelle fois à des zones de failles, comprenant notamment l'important accident N150 le long duquel est localisé le plus gros gisement de chromite du secteur de Maqсад.

Les deux coupes d'Al Felgain 2012 et d'Al Felgain - 1000 vasques, levées le long de la bordure ouest de la zone périphérique non loin du cisaillement ductile de Muqbariah (Figure 6.70), montrent elles-aussi des évolutions sur plusieurs dizaines de mètres des différents indicateurs chimiques (Figure 6.138B). On observe cependant ici des évolutions très différentes entre ces deux coupes distantes de 1,5 km. Le rapport Fo décrit par exemple une tendance à la hausse entre environ 850 et 925 m d'altitude le long de la coupe d'Al Felgain 2012 tandis que ce même indicateur baisse entre 850 et 900 m le long de la coupe d'Al Felgain - 1000 vasques. Les teneurs en CaO dans l'olivine et en TiO₂ dans les chromites

ainsi que le rapport XCr décrivent également une succession d'évolutions plus complexes dans la première coupe et ne montrent qu'une tendance, à la hausse ou à la baisse, le long de la deuxième.

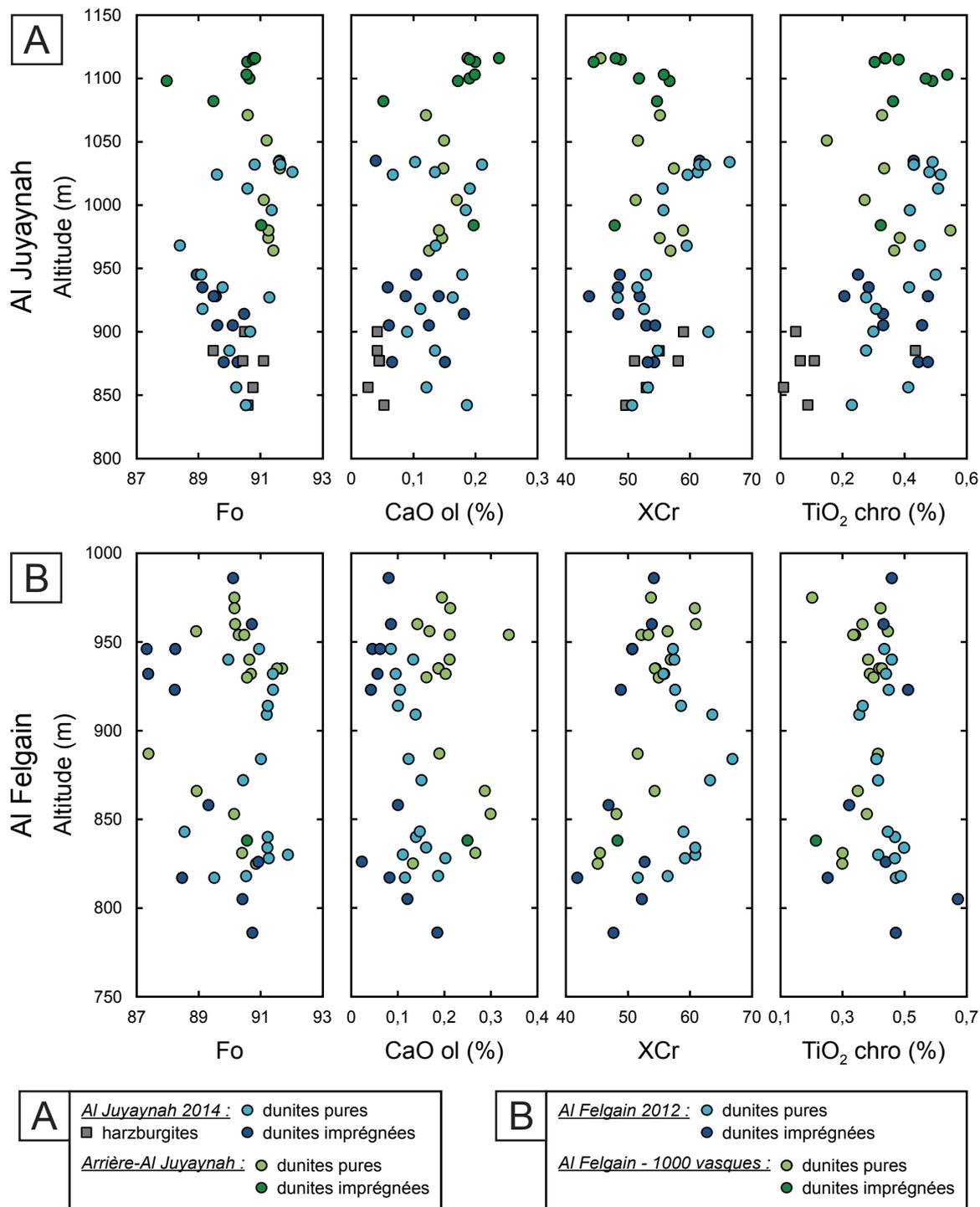


Figure 6.138 : Evolution du rapport Fo et de la teneur en CaO des olivines et du rapport XCr et de la teneur en TiO₂ des chromites le long de la DTZ dans les secteurs d'Al Juyaynah (coupes d'Al Juyaynah 2014 et d'Arrière-Al Juyaynah) (A) et d'Al Felgain (coupes d'Al Felgain 2012 et d'Al Felgain - 1000 vasques) (B).

Ces différentes tendances mettent donc en évidence une corrélation latérale des évolutions chimiques de moins en moins nette, voire disparaissant, à l'approche du cisaillement ductile de Muqbariah. Cet accident majeur limite par ailleurs, dans le massif de Sumail, le segment de dorsale d'affinité MORB de la lithosphère océanique plus ancienne dans laquelle il s'est développé (Abily, 2011; Amri *et al.*, 1996; Python et Ceuleneer, 2003).

L'observation de tendances chimiques similaires à ce qui a été observé le long de la bande dunitique de Tuff-Buri indique un processus de dunitisation commun à l'ensemble de la DTZ développée par l'activité du diapir de Maqсад. Notamment, on observe à la base de la coupe d'Al Juyaynah 2014 des tendances communes aux dunites et aux harzburgites (Figure 6.138A), similairement à ce qui a été observé à la base de la coupe d'Arrière-Buri 1 (Figure 6.128). Cette observation, qui peut être considérée comme l'enregistrement de la dernière phase de dunitisation pour la DTZ de ce secteur, est importante car elle signifie que la plus faible épaisseur de la DTZ en périphérie du diapir de Maqсад ne résulte pas d'une transposition hors-axe en lien avec le fluage mantellique sous-jacent comme proposé par de précédents travaux (Ceuleneer, 1991; Jousset et Nicolas, 2000b) - un tel processus aurait délaminé la base de la DTZ qui ne montrerait plus des harzburgites figées lors de leur transformation (Figure 6.3). En revanche, deux autres hypothèses non mutuellement exclusives peuvent être proposées pour expliquer cette plus faible épaisseur :

i) Tout d'abord, le jeu tectonique post- ou tardi-magmatique s'avère avoir été assez important dans la zone périphérique pour amener au redressement des gabbros lités de la base de la croûte, et peut également avoir oblitéré la partie la plus supérieure de la DTZ. Nous interprétons en tout cas cette tectonique tardive, plus importante que le long de la bande dunitique de Tuff-Buri, comme responsable de la déstructuration partielle des tendances chimiques d'une portion de la DTZ à l'autre (Figure 6.138B). La plus faible abondance de minéraux marqueurs d'un magmatisme hydraté peut refléter soit la plus faible empreinte de ce magmatisme lors de la construction de la DTZ de ce secteur, et/ou la disparition par tectonique de la partie haute de la DTZ qui concentre davantage ce type de minéraux par rapport aux parties plus profondes tel qu'observé le long de la bande dunitique de Tuff-Buri.

ii) Ensuite, une activité magmatique plus faible a pu amener à la formation des dunites périphériques par rapports aux dunites situées à proximité du diapir de Maqсад, amenant à l'édification d'une DTZ moins épaisse ; on peut imaginer que la DTZ hors-axe reflète l'activité magmatique d'un stade plus précoce du fonctionnement du diapir, moins actif que lors du développement de la bande dunitique de Tuff-Buri. Les signatures chimiques traçant la percolation de magmas légèrement moins évolués dans ce secteur vont dans ce sens, pouvant refléter une zone de transition originellement moins épaisse qu'à l'axe au sein de laquelle la cristallisation fractionnée et la différenciation des magmas parents ont pu être moins poussées. Si l'hydrothermalisme, ou en tout cas une forte composante hydratée, favorise la dunitisation, la plus faible implication de cette composante, et donc la plus faible abondance des minéraux marqueurs (orthopyroxène, amphibole, diopside, grenat), peut éventuellement être mise en lien avec la plus faible épaisseur de la DTZ.

6.3.5.5. Conclusions

L'ensemble des variations chimiques verticales observées au sein de la zone de transition traduit une structuration à deux échelles. A l'échelle de la DTZ tout d'abord, une structuration commune ressort

pour l'ensemble des coupes. Ceci permet de généraliser le modèle précédemment proposé d'un front de dunitisation des harzburgites progressant vers le bas (Abily et Ceuleneer, 2013) progressivement par horizons successifs d'une cinquantaine à une centaine de mètres d'épaisseur. A une échelle plus locale ensuite, on observe un lien presque systématique entre la distribution spatiale des faciès lithologiques composant la DTZ et sa structuration chimique d'une part, et la présence de zones de failles d'autre part. Les observations de terrain ont permis de mettre en évidence l'initiation précoce de ces failles qui affectent la DTZ dès le stade magmatique, lors de la percolation magmatique au sein de la matrice dunitique et qui ont pu focaliser et/ou contraindre la migration des magmas dans certaines zones tandis que d'autres portions de la DTZ étaient préférentiellement compactées. Les évolutions verticales pluridécamétriques des teneurs en éléments chimiques immobiles vers les zones de failles confirment ces observations de manière indirecte, ce type de variations chimiques ne pouvant être expliqué que par l'implication de processus magmatiques à haute température. L'étude d'un affleurement spécifique a montré la concordance entre la présence de fractures et le passage en quelques mètres seulement d'une signature MORB des minéraux cristallisés à partir des magmas percolants à une signature que nous attribuons à leur hybridation avec des fluides hydrothermaux. Le métamorphisme de faciès schistes verts enregistré par les intrusions troctolitiques affectées par ces mêmes fractures quelques dizaines de mètres plus haut dans la section (coupe de Buri 2014) atteste par ailleurs de la circulation de fluides de plus basse température. Ces observations nous amène à proposer que les failles assistent à la fois l'extraction, ou au moins la migration, des magmas MORB délivrés par le diapir de Maqсад et ayant été impliqués dans le processus dunitisation, mais aussi à l'introduction de fluides hydrothermaux jusqu'au Moho. Ces fluides, probablement d'origine océanique et devenus réducteurs par interaction avec la croûte traversée, semblent par ailleurs avoir eu un rôle prépondérant dans la dissolution, le transport, et la précipitation du Cr sous la forme de chromite à travers la formation des magmas hybrides hydratés.

6.4. Conclusions de l'étude de la DTZ dans le massif de Sumail

L'étude de la DTZ autour de Maqсад a montré une variabilité importante des faciès lithologiques qui était jusqu'ici insoupçonnée avec la découverte d'imprégnations d'orthopyroxène et d'amphibole et la présence, parfois très fréquente, de diopside et grenat en position interstitielle. Cette minéralogie variée implique la percolation de magmas hydratés ou de fluides supercritiques riches en silice dans la porosité des dunites de la DTZ. Cette composante hydratée peut avoir plusieurs origines, comme discuté dans Rospabé *et al.* (2017). Sa présence observée uniquement à la transition manteau-croûte (majoritairement dans sa partie haute) et son absence (ou encore non mise en évidence) dans les cumulats remplissant les structures de migration de la section mantellique de cette zone ont amené à formuler l'hypothèse d'une hybridation des magmas issus de la fusion par décompression du manteau avec des fluides hydrothermaux introduits *via* les failles résultant de l'expansion océanique. L'évidence de circulations de fluides hydrothermaux au moins de basse température, majoritairement au sommet de la DTZ, et l'association failles syn-magmatiques - hydrothermalisme - cristallisation des gabbros lités à la base de la croûte (Abily *et al.*, 2011) va dans ce sens. Par ailleurs la mise en évidence de failles syn-magmatiques affectant la DTZ, à la fois par des arguments de terrain et par leur influence sur des éléments chimiques supposés immobiles en dehors d'une mobilisation par magmatisme à haute température, nous amène à interpréter la formation de la DTZ dans un environnement régi par trois

composantes majeurs : le magmatisme, la tectonique et l'hydrothermalisme. Dans ce contexte, la DTZ apparaît comme une interface réactionnelle d'importance majeure qui peut avoir joué un rôle prépondérant dans les échanges chimiques et thermiques entre la lithosphère profonde et les couches superficielles (croûte océanique, hydrosphère). Notamment, la circulation de fluides hydrothermaux est supposée être responsable du refroidissement rapide de la lithosphère après l'arrêt de l'activité magmatique (Coogan *et al.*, 2002a; Dygert *et al.*, 2017; VanTongeren *et al.*, 2008).

L'étude structurale et la répartition spatiale des faciès lithologiques et des signatures géochimiques nous permettent de proposer un scénario de formation de la DTZ à l'axe de la paléo-dorsale de Maqсад. Il apparaît que la dunitisation s'est préférentiellement faite vers le nord dans un environnement en transtension, par l'implication contemporaine de failles normales d'orientation N130, en lien avec le développement du segment de dorsale centré sur le diapir de Maqсад, et de failles N165-N180 en transtension, la composante cisailante étant dextre. A plus large échelle, les études antérieures avaient également montré la même cinématique pour le cisaillement ductile de Muqbariah qui limite le segment de dorsale MORB par rapport à l'ancienne lithosphère océanique dans lequel il s'est développé (Abily, 2011; Amri *et al.*, 1996). Il semble ainsi que l'ensemble de l'expansion océanique autour de ce segment se soit effectué dans cet environnement transtensif, et les structures observées dans la bande dunitique de Tuff-Buri reproduisent la même géométrie à plus fine échelle. Il est intéressant de poser la question, à ce stade, de savoir si c'est la mise en place du diapir mantellique de Maqсад qui a conduit à une telle structuration de la lithosphère le long du segment de dorsale d'affinité MORB, où si c'est l'environnement structural particulier de cette zone de l'ophiolite d'Oman au moment de sa formation qui a provoqué une remontée mantellique dans un couloir particulièrement aminci de la lithosphère ancienne. Les études structurales récentes portant sur le nord de l'ophiolite d'Oman tendent dans ce sens à proposer une expansion océanique dans un contexte de bassins en pull-apart par la suite résorbés le long de la marge arabe, davantage qu'une accréation clairement océanique (Nicolas et Boudier, 2017).

L'étude portant sur la zone périphérique a montré de légères différences par rapport à la DTZ située à l'axe de la dorsale : une plus faible épaisseur, une composante hydratée et évoluée du magmatisme moins exprimée, une tectonique tardive mieux marquée. Nous proposons que la DTZ du secteur périphérique correspond à un premier cycle magmatique lié à l'activité précoce du diapir de Maqсад et qui a part la suite été éloigné peu à peu de l'axe du segment de dorsale. Ce qui est observé actuellement à l'axe peut ainsi correspondre à une phase plus tardive, potentiellement plus active et amenant à une DTZ un peu plus épaisse et dont le démembrement tectonique a été moins important. Il apparaît cependant difficile à ce stade de déterminer laquelle des trois composantes, magmatique (plus ou moins forte activité du diapir de Maqсад), tectonique (plus moins forte déstructuration du sommet de la DTZ) ou hydrothermale (qui peut favoriser le processus de dunitisation) est davantage responsable de l'intense dunitisation le long de l'axe de dorsale. Dans ce scénario, la plus forte épaisseur de la zone de transition à l'axe pourrait témoigner de la formation d'un *mush*, zone de stockage des magmas lors de leur migration, plus épais et au sein de laquelle la différenciation magmatique a été plus efficace pour amener à la formation de magmas plus évolués.

Par ailleurs, nous avons effectué un exercice simple de positionnement des gisements de chromites exploités actuellement ou par le passé sur une carte géologique du massif de Sumail dans le but de décrire la relation entre la distribution spatiale des chromites et chromitites et les accidents structuraux à l'échelle de la section mantellique (Figure 6.139). La construction de cette carte a profité de l'absence de végétation du fait du climat désertique et qui a permis, grâce à Google Earth, de suivre la continuité latérale des failles - ce qui a été très utile pour parfaire la carte de synthèse structurale de la figure 6.124 - ainsi que de localiser très facilement les mines à ciel ouvert. Aucune différence n'a été faite quant à la taille apparente des gisements du fait de la méconnaissance de la structuration en profondeur, certains pouvant être la continuité d'un autre.

Les gisements de chromite exploités dans le massif de Sumail se situent en grande partie au sein de la DTZ ou le long de la bordure NW du massif. Ils sont localisés le long ou à proximité d'une zone de faille ou à la jonction de deux failles, comme à l'extrémité du cisaillement ductile de Muqbariah (Figure 6.139) (voir également Boudier et Al-Rajhi, 2014). Cette observation avait été faite dans la DTZ concernant le dike de chromitite de Maqsad (paragraphe 6.3.3.3) et le pod de la coupe d'Al Felgain 1000 vasques (Figure 6.76), mais également pour l'ensemble des pods ou occurrences de moindre importance (par exemple la figure 6.126). Ce relevé systématique ne montre cependant pas de logique selon la direction des failles associées, montrant que les systèmes N130 et 165-180 ont tous les deux joué un rôle important dans la préconcentration du Cr.

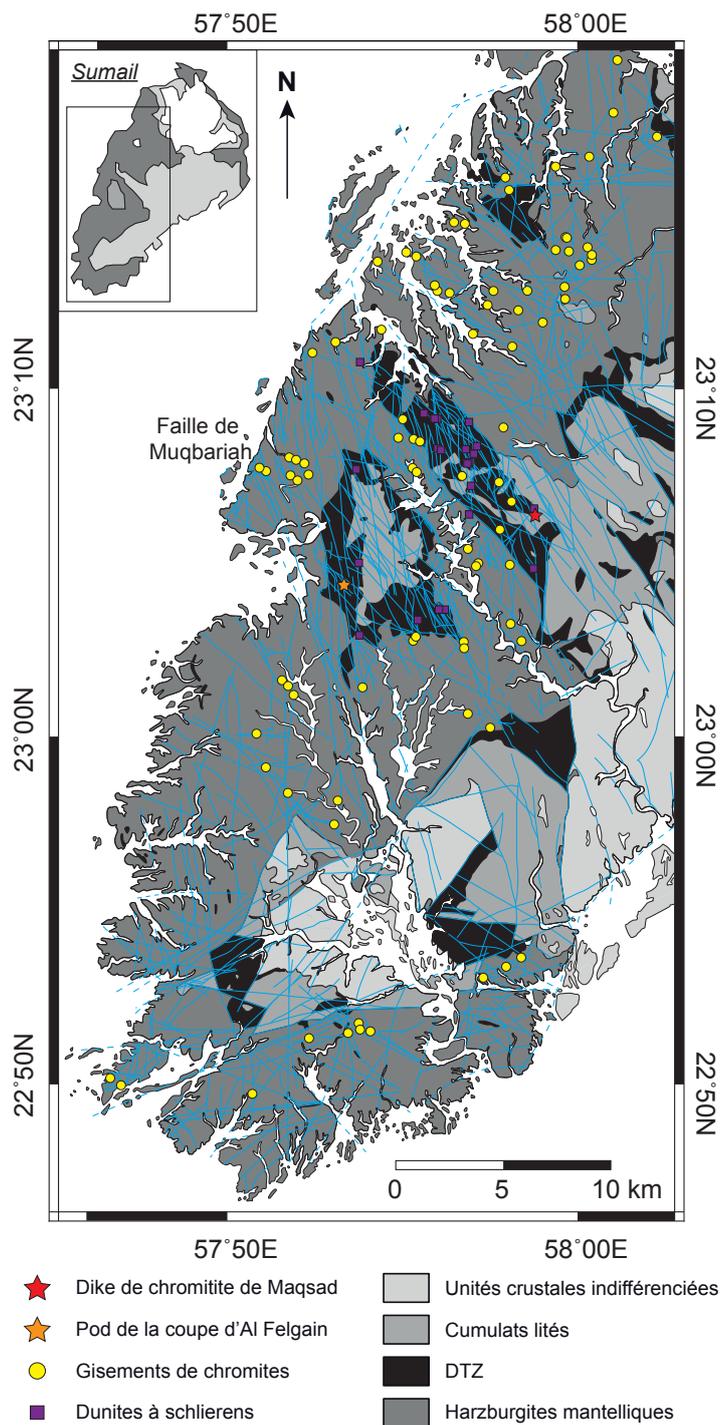


Figure 6.139 : Carte géologique du massif de Sumail montrant la répartition des gisements de chromites exploités et des dunites à schlierens de cette étude. Les failles (traits bleus) correspondent aux failles relevées par les cartes géologiques de la zone, à celles découvertes sur le terrain et à celles facilement détectables sur Google Earth.