

Utilisation de l'image multispectrale Landsat 7 et 8 pour l'exploration minière : Cas de la boutonnière de Bou-Azzer-El Graara, Maroc

[Use of Landsat 7 and 8 Multispectral Image for Mineral Exploration : Case of Bou-Azzer-El Graara inlier, Morocco]

Abdessamad EL ATILLAH, Zine El Abidine EL MORJANI, and Mustapha SOUHASSOU

EGERNE, Faculté Polydisciplinaire de Taroudant, Hay Mohammadi, BP : 271 – C.P : 83000, Taroudant, Morocco

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Remote sensing is an indirect tool for prospecting the Earth's surface. It is very powerful especially in its applications related to the field of geology. This work is part of the use of remote sensing as a tool to direct prospectors to areas that may contain mineral concentrations, saving both time and cost. We will limit ourselves mainly to the study of a Landsat 8 satellite image captured on 22 July 2016 around the Precambrian inlier of Bou-Azzer-El Graara, Anti Atlas Central region in Morocco and another Landsat 7 image. The latter did not give good results considering the problem at the level of the image sensor unlike that of the Landsat 8; the Optimum Index Factor (OIF) calculation makes it possible to detect that the most important colored components are, in the order of priority, 567 (with the OIF = 8830), 467 (with the OIF = 8446), 456 (with OIF = 8387) and 367 (with OIF = 8063); The reports of the bands, ratios, and the Principal component analysis PCA, made it possible to carry out a cartography lithological and hydrothermal alteration as well as maps of lineaments by means of the directional filters; the assembly and the interpretation of these information plans allow us to know the zones with mining potential. The validity of the models is tested by comparison with field data and geological maps of the studied site.

KEYWORDS: Anti-Atlas, Landsat 7, Landsat 8, Lineament, lithologic mapping, hydrothermal alteration, Mineral Exploration.

RÉSUMÉ: La télédétection spatiale est un outil indirect de prospection de la surface terrestre. Elle est très performante surtout dans ses applications liées au domaine de la géologie. Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'utilisation de la télédétection comme outil visant à orienter les prospecteurs vers des zones susceptibles de renfermer des concentrations des minéraux, en économisant à la fois du temps et du coût. Nous allons limiter principalement à l'étude d'une image satellitaire Landsat 8 captée le 22 juillet 2016 autour de la boutonnière précambrienne de Bou-Azzer-El Graara, région de l'Anti Atlas Central au Maroc et une autre image du Landsat 7. Ce dernier n'a pas donné des bons résultats vu le problème au niveau du capteur d'image au contraire de celle du Landsat 8 ; le calcul d'Optimum Index Factor (OIF) permet de déceler que les composantes colorées les plus importantes sont, dans l'ordre de priorités, 567 (avec l'OIF= 8830), 467 (avec l'OIF=8446), 456 (avec l'OIF=8387) et 367 (avec l'OIF=8063) ; Les rapports des bandes, ratios, et l'analyse en composante principale ACP, ont permis la réalisation d'une cartographie lithologique et d'altération hydrothermale ainsi que des cartes de linéaments par le biais des filtres directionnels ; l'assemblage et l'interprétation de ces plans d'information nous permettent de connaître les zones à potentiel minier. La validité des modèles est testée par comparaison avec les données de terrain et les cartes géologiques du site étudié.

MOTS-CLEFS: Anti-Atlas, Landsat 7, Landsat 8, Linéament, cartographie lithologique, altération hydrothermale, Exploration minière.

1 INTRODUCTION

L'approche adoptée dans le cadre de cette communication est l'utilisation des techniques de la télédétection spatiale qui peuvent être déployées en aval des programmes d'exploration conventionnels qui nécessitent des moyens techniques et financiers important et surtout une accessibilité qui reste très difficile dans l'Anti-Atlas central. Un aspect auquel cette approche peut répondre aisément.

2 PROBLÉMATIQUE

Les méthodes conventionnelles de la prospection minière, avec ses charges de réalisation très élevées, présentent une majeure difficulté et un grand défi pour les opérateurs miniers. D'où la nécessité d'utiliser de nouvelles technologies, comme la géomatique et ses outils, qui nous permettent en même temps d'orienter la recherche minière conventionnelle, de diminuer le coût et le temps des travaux et d'atteindre des zones à accès difficile.

3 OBJECTIF

L'objectif de ce travail est d'évaluer le potentiel de l'imagerie multispectrale du Landsat 7 et 8 OLI/TIRS pour la cartographie lithologique et la détection des ressources minérales autour de la boutonnière précambrienne de Bou-Azzer-El Graara, région de l'Anti Atlas Central.

4 SITUATION GÉOGRAPHIQUE

On va se limiter à l'étude de deux image satellitaire Landsat 7 du 1 juillet 2016 et Landsat 8 OLI/TIRS du 22 juillet 2016 captées autour de la boutonnière précambrienne de Bou-Azzer-El Graara, région de l'Anti Atlas Central, Maroc. On choisit deux images pendant l'été afin éviter l'existence des nuages.

Ces deux images ont été choisi pour plusieurs raisons à savoir : leur résolution de 30 m et qui peut être à 15 m grâce au bande panchromatique ; elles sont gratuites et accessibles via le site : <https://earthexplorer.usgs.gov> [1]; elles appartiennent à la nouvelle gamme du programme Landsat et en fin les résultats du Landsat 8 sont déjà utilisés, vérifiés et validés par un grand nombre des productions scientifiques. La carte, ci-après, décrit l'emplacement de l'image satellitaire qui se trouve au centre du Maroc. Cette image a une taille rectangulaire de 185 km-180km qui englobe une grande partie de l'Anti Atlas central.



Fig. 1. Situation géographique de l'Image [2]

Source: Google, 03 10 2019

5 CADRE GÉOLOGIQUE LOCAL

L'Anti-Atlas s'étend selon une direction WSW-ESE de l'Atlantique à l'Ouest jusqu'au Tafilalt sur une superficie de 200 x 700 Km². Géographiquement, la chaîne de l'Anti-Atlas peut être subdivisée en trois parties : occidentale, centrale et orientale. Et administrativement, cette chaîne relève de trois régions : Guelmim-Oued Noun (les provinces : Guelmim, Sidi Ifni et Tan-Tan), Sous-Massa (les provinces : Tata et Taroudant) et Draa -Tafilalt (les provinces : Ouarzazate, Zagora, Tinghir et Er-Rachidia).

Il est composé par terrière boutonnières : Bas-Draa, Ifni, Kerdous, Tagragra d'Akka, Tagragra de Tata, Igherm, Agadir Melloul, Iguerda, Zenaga, Bou-Azzer, Sirwa, Saghro, Ougnat (figure 2). Tout en signalant que ce domaine a connu deux accidents : le premier est l'accident Sud Atlasique entre le Haut Atlas et l'Anti Atlas, et le deuxième est l'accident Majeur de l'Anti Atlas qui subdivise ce dernier en deux grandes parties au niveau de Sirwa jusqu'à la localité nommée Zagora, la partie ouest est nommée domaine éburnéen stable et la partie est est nommée panafricain mobile.

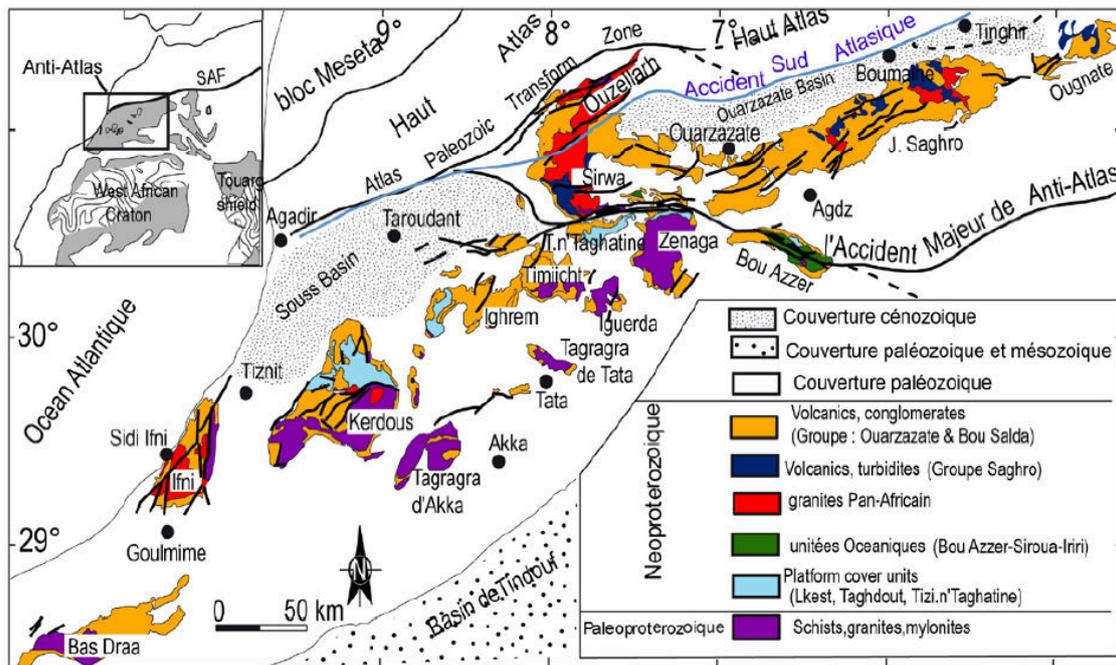


Fig. 2. Schéma géologie de l'Anti-Atlas [2]

Selon Levresse et Gasquet, le modèle géodynamique du domaine panafricain de l'Anti-Atlas a passé par quatre principaux stades, mentionnés à la figure 3 :

1. Distension et mise en place d'une croûte océanique.
2. Subduction (mise en place d'un magmatisme calco-alcaïn à l'origine des formations d'arc de Saghro).
3. Fermeture du bassin et collision d'arc avec le craton ouest africain.
4. Extension post-orogénique.

La figure, ci-après, montre une carte géologique simplifiée de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

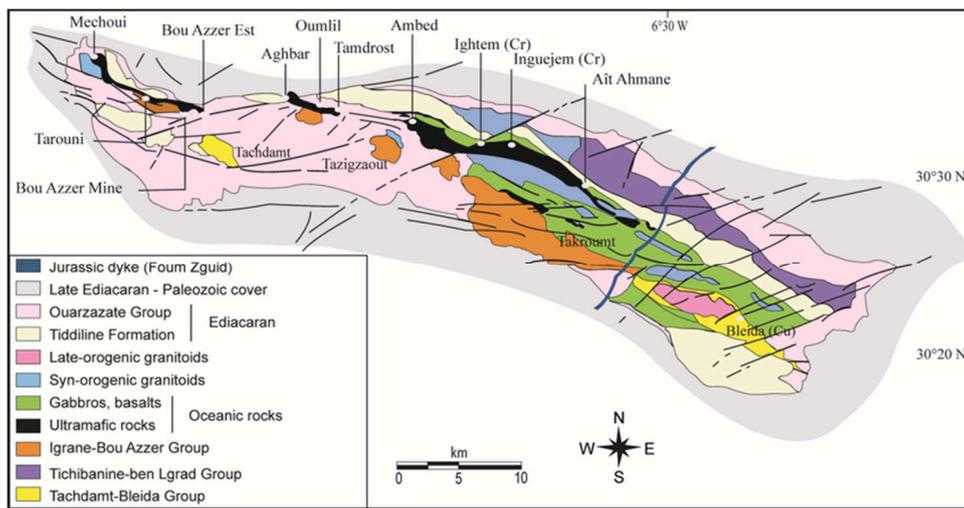


Fig. 3. Carte géologique simplifiée de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (modifiée, d'après [4])

6 MÉTHODE

6.1 CHOIX DES COMPOSANTES COLORÉES PLUS IMPORTANTES

Les images de télédétection sont en mode RASTER ; en codant les canaux de même résolution spatiale d'une image Landsat 8 avec les trois couleurs fondamentales (rouge, vert et bleu), on peut élaborer plusieurs compositions colorées. Pour choisir les compositions RVB les plus importants, on doit effectuer une étude statistique pour les six bandes et calculer le coefficient de corrélation des bandes et leurs déviations standards [3].

Cependant, pour un choix réellement quantitatif des meilleures combinaisons de bandes pour l'extraction d'un maximum d'information, [4] ont introduit la notion d' « Optimum Index Factor » qu'est une valeur statistique qui peut être utilisée pour sélectionner la combinaison optimale de trois bandes dans une image satellite avec laquelle nous souhaitons créer un composite couleur. La combinaison optimale de bandes parmi toutes les combinaisons possibles à 3 bandes est celle qui présente le plus grand nombre d'informations (= la somme la plus élevée des écarts types), avec le moins de duplication (la plus faible corrélation entre les paires de bandes) (spatial-analyst.net). L'OIF est calculé selon l'équation suivante :

$$OIF = \frac{\sum_{K=1}^3 S_K}{\sum_{j=1}^3 |r_j|}$$

Équation 1. Optimum Index Factor [5]

Où

$\sum S_k$ = Somme des écarts types (déviations standards) des combinaisons des 3 bandes k1, k 2, k 3.

$\sum |r_j|$ = Somme des valeurs absolues du coefficient de corrélation.

La combinaison qui a l'OIF le plus élevé est susceptible de fournir le maximum d'informations lithologiques puisqu'elle utilise les données ayant le moins de redondances.

Pour déterminer les composantes colorées les plus importantes dans notre zone d'étude, nous avons calculé l'OIF, en choisissant deux images satellitaires du Landsat 7 et 8 qui couvrent la région de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Elles sont captées pendant l'été (juillet 2016).

Pour trouver la matrice de corrélation de cette image, on va choisir les bandes de même résolution comme donnée d'entrée d'éditeur de modèle spatial. La figure 4 présente le modèle utilisé.

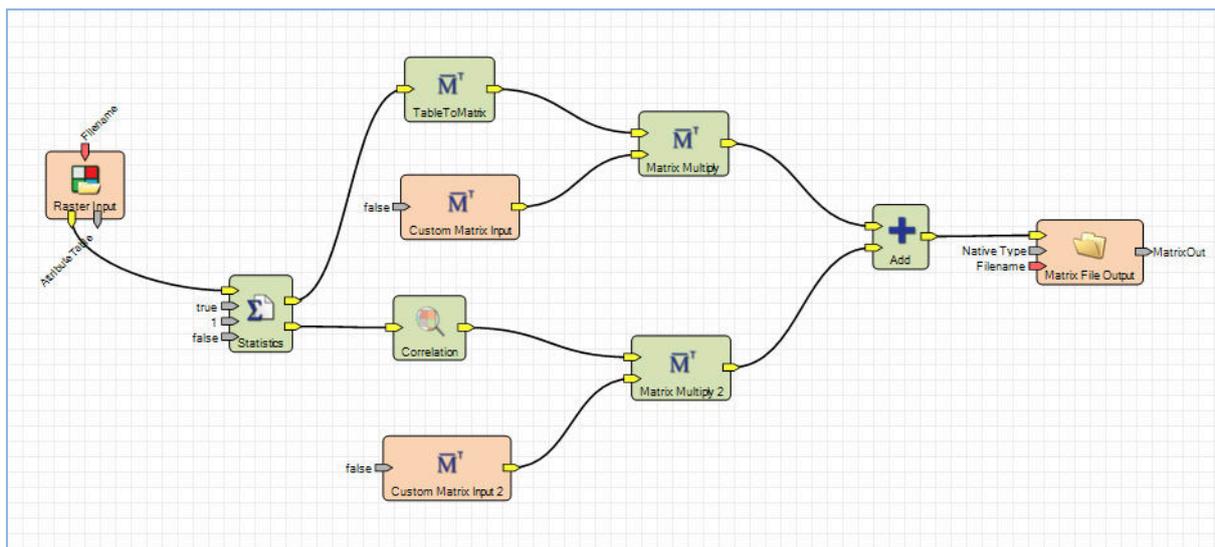


Fig. 4. Modèle spatial

Ce modèle est illustré par la formule suivante :

$$(\text{Matrice de covariance} * \text{Matrice d'identité}) + (\text{Matrice de déviations standards} * [0...0 1]) = \text{Matrice de corrélation.}$$

Durant le calcul, on prend $p = 3$ puisque chaque combinaison constitue au plus 3 bandes, et n est égale le nombre des bandes.

Tableau 1. Nombre des combinaisons possibles.

	Landsat 7 ETM+	Landsat 8	Observations
Nombre des bandes	8	11	Nous devons choisir trois bandes
Arrangements avec répétition	$8^3=512$	$11^3=1331$	L'ordre et la répétition ne sont pas demandés
Arrangements sans répétition	336	990	L'ordre n'est pas demandé
Combinaison avec répétition	120	286	La répétition n'est pas demandée
Combinaison sans répétition	56	165	Pour notre cas, combinaison sans répétition est plus adaptée.
Nombre des bandes de même résolution	6 (30m)	8 (30m)	
Combinaison sans répétition	20	56	

6.2 LES RAPPORTS DES BANDES (RATIOS)

D'après la littérature, il existe plusieurs rapports des bandes déjà validés par leurs bons résultats. En général, on peut calculer le nombre des possibilités des rapports des bandes, on prend $p = 2$ puisque chaque rapport constitue de deux bandes, et n est égale le nombre des bandes.

Tableau 2. Nombre des rapports des bandes possibles

	Landsat 7 ETM+	Landsat 8
Nombre des bandes de même résolution	6 (30m)	8 (30m)
Combinaison sans répétition	15	28
Ratios possibles	1/2 1/3 1/4 1/5 1/6 2/3 2/4 2/5 2/6 3/4 3/5 3/6 4/5 4/6 5/6	1/2 1/3 1/4 1/5 1/6 1/7 1/9 2/3 2/4 2/5 2/6 2/7 2/9 3/4 3/5 3/6 3/7 3/9 4/5 4/6 4/7 4/9 5/6 5/7 5/9 6/7 6/9 7/9

Les rations, mentionnées ci-dessus, sont des nouvelles bandes qui peuvent constituer la base pour l'application de l'OIF pour déterminer les combinaisons les plus importantes.

Ainsi, le nombre des composites colorés possibles sont illustrés dans le tableau 3.

Tableau 3. Nombre des composites colorés possibles des ratios

	Landsat 7 ETM+	Landsat 8
Nombre des bandes de même résolution	6 (30m)	8 (30m)
Nombre des rations	15	28
Nombre des composantes colorées possibles	455	3276

D'après la littérature, il existe plusieurs rapports des bandes déjà validés par leurs bons résultats, les rapports de bande obtenus à partir de spectres d'images (4/2, 6/7, 5 et 10 en RVB) permettent l'identification de roches altérées, d'unités lithologiques et de végétation à l'échelle régionale [5]. Les rations proposées, (6/5, 7/6, 4/7 en RVB), démontrent un potentiel élevé de données Landsat 8 dans la discrimination des unités lithologiques [6].

6.3 ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE

L'Analyse en Composantes principales, ACP, fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles. Elles sont apparues aux années 30 et ont été développées par Jean-Paul Benzécri dans les années 60 [8]. Elles ne s'appuient pas sur un modèle probabiliste, mais elles dépendent d'un modèle géométrique. L'ACP servira à mieux connaître les données sur lesquelles on travaille, et aidera à formuler des hypothèses de résolution qu'il faudra étudier et faciliter les représentations fournies pour illustrer certains résultats [8].

6.4 ANALYSE STRUCTURALE ET CARTES DE LINÉAMENTS

Les filtres directionnels peuvent être, ensuite, appliqués aux différentes bandes spectrales et aux néo-canaux (CP, et bandes ratios) en vue d'obtenir les cartes de linéaments. Filtrer une image c'est lui appliquer une fonction mathématique qui modifie les valeurs du gris de tout ou une partie des pixels. Si la fonction est linéaire on parle de filtrage linéaire, si elle prend en compte les valeurs du gris au voisinage de chaque pixel transformé, elle est dite fonction de convolution. Dans notre cas d'étude, les méthodes utilisées sont de type convolution. Il s'agit généralement de : 1) Le filtre Sobel : utilisé pour détecter les contours d'objets dans une image, en faisant deux balayages l'un horizontal et l'autre vertical. Il donne souvent de bons résultats pour la détection des linéaments. Et, 2) Les filtres directionnels : améliorent la perception des linéaments, correspondant à des discontinuités lithologiques ou structurales, en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image.

On peut synthétiser la méthode de traitement selon le schéma suivant :

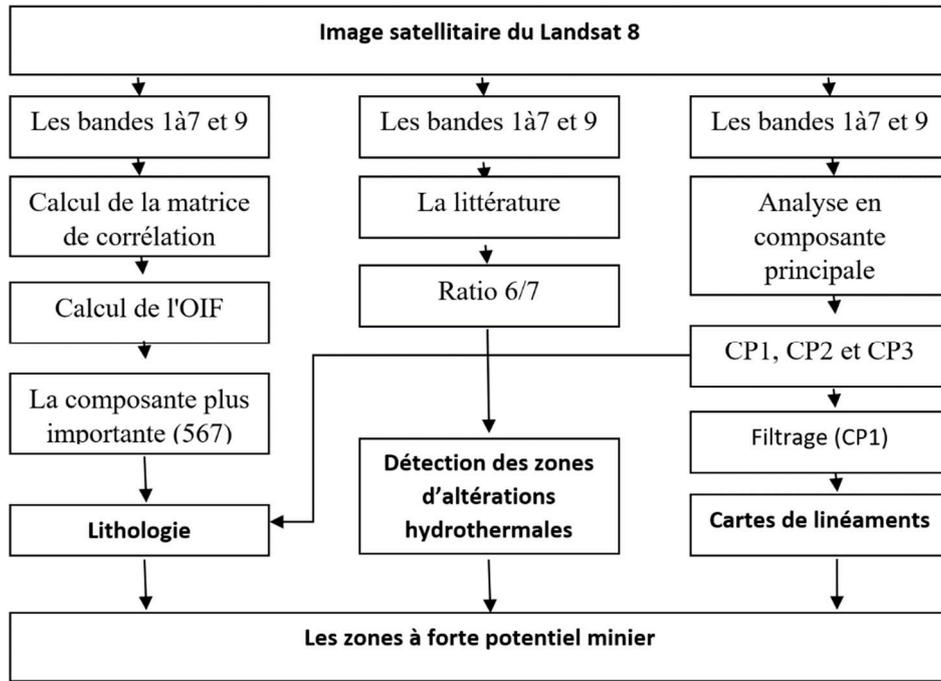


Fig. 5. Méthode de traitement

7 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS DU LANDSAT 7

Tableau 4. Matrice de corrélation de Landsat 7

Bande	1	2	3	4	5	7	SD
1	1	0,985785	0,9684024	0,952764	0,905776	0,9128731	39,42145
2	0,985785015	1	0,9860701	0,970896	0,920319	0,9267562	40,98873
3	0,968402406	0,98607	1	0,985431	0,930067	0,9368561	57,44277
4	0,952764261	0,970896	0,9854311	1	0,934255	0,9396688	45,93842
5	0,90577562	0,920319	0,9300668	0,934255	1	0,9854494	59,73722
7	0,912873122	0,926756	0,9368561	0,939669	0,985449	1	53,20088

Dans ce travail, nous avons utilisé les données de tableaux 1 pour calculer OIF :

Tableau 5. OIF de 1^{er} cas (Landsat 7)

N° des combinaisons possibles (20)	Combinaison des bandes	SOMME (Écart-type)	SOMME (Corrélation)	OIF	Rang de l'OIF
1	357	170,38	2,85	59,73	1
2	345	163,12	2,85	57,24	2
3	135	156,60	2,80	55,84	3
4	235	158,17	2,84	55,76	4
5	457	158,88	2,86	55,56	5
6	347	156,58	2,86	54,71	6
7	257	153,93	2,83	54,34	7
8	157	152,36	2,80	54,33	8
9	137	150,07	2,82	53,25	9
10	237	151,63	2,85	53,21	10
11	145	145,10	2,79	51,95	11
12	245	146,66	2,83	51,91	12
13	125	140,15	2,81	49,84	13
14	147	138,56	2,81	49,39	14
15	247	140,13	2,84	49,39	15
16	134	142,80	2,91	49,13	16
17	234	144,37	2,94	49,07	17
18	127	133,61	2,83	47,29	18
19	123	137,85	2,94	46,88	19
20	124	126,35	2,91	43,43	20

La figure 6 expose le coefficient de corrélation absolu entre les bandes du Landsat 7.

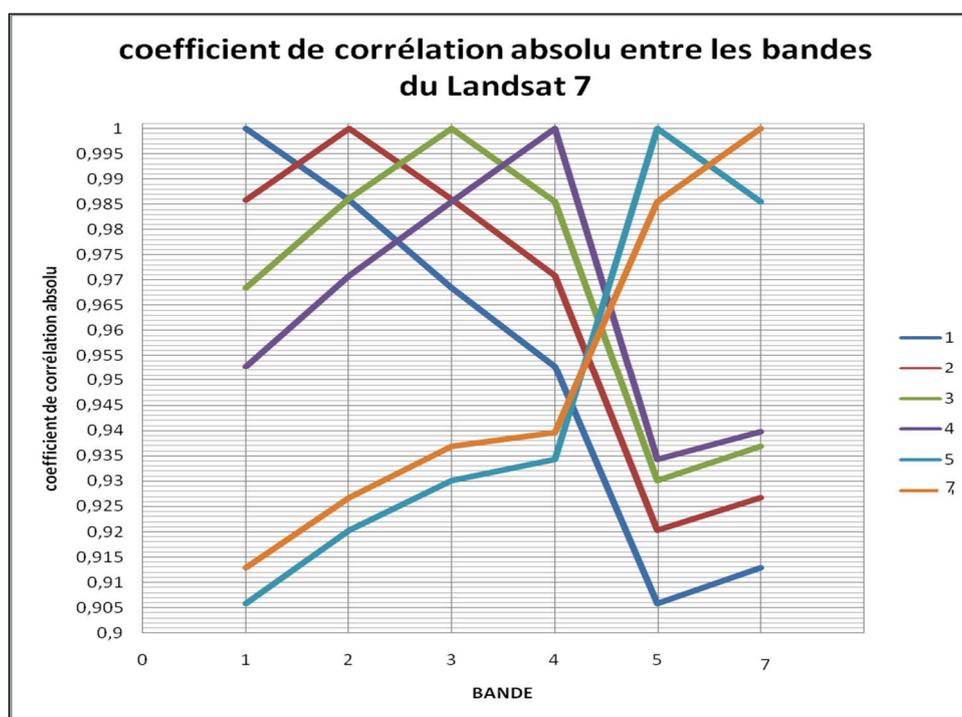


Fig. 6. Coefficient de corrélation absolu entre les bandes du Landsat 7

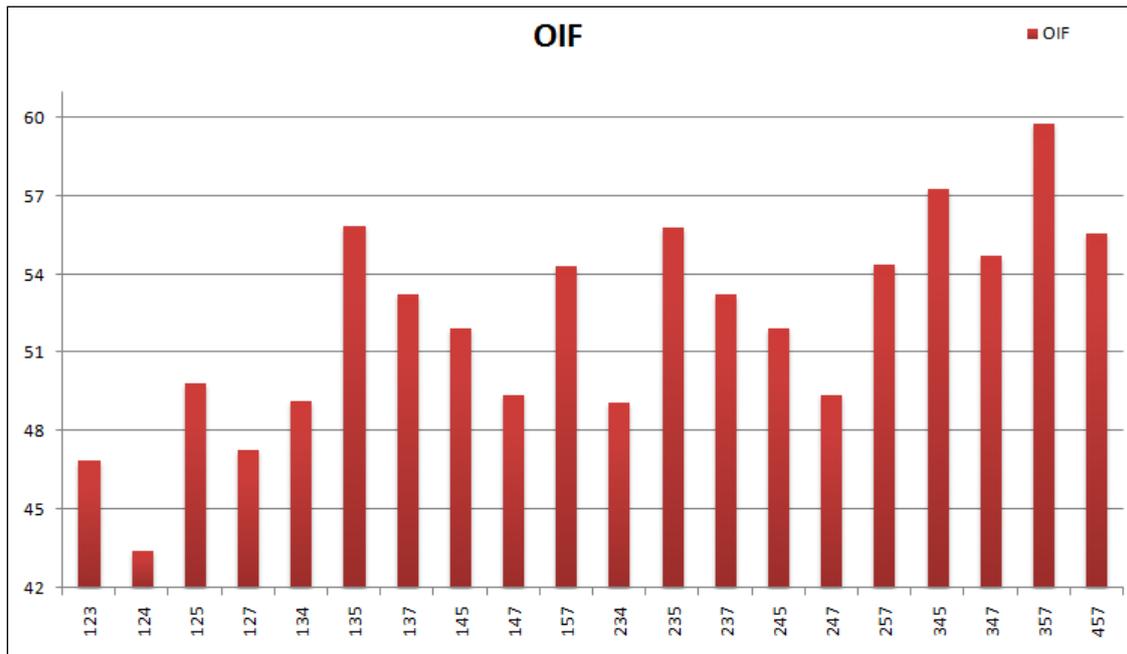


Fig. 7. OIF d'image Landsat 7

D'après le calcul d'OIF, les composantes colorées les plus importantes qui ne représentent pas des redondances sont, dans l'ordre de priorités, 357, 345, 135, 235 et 457.

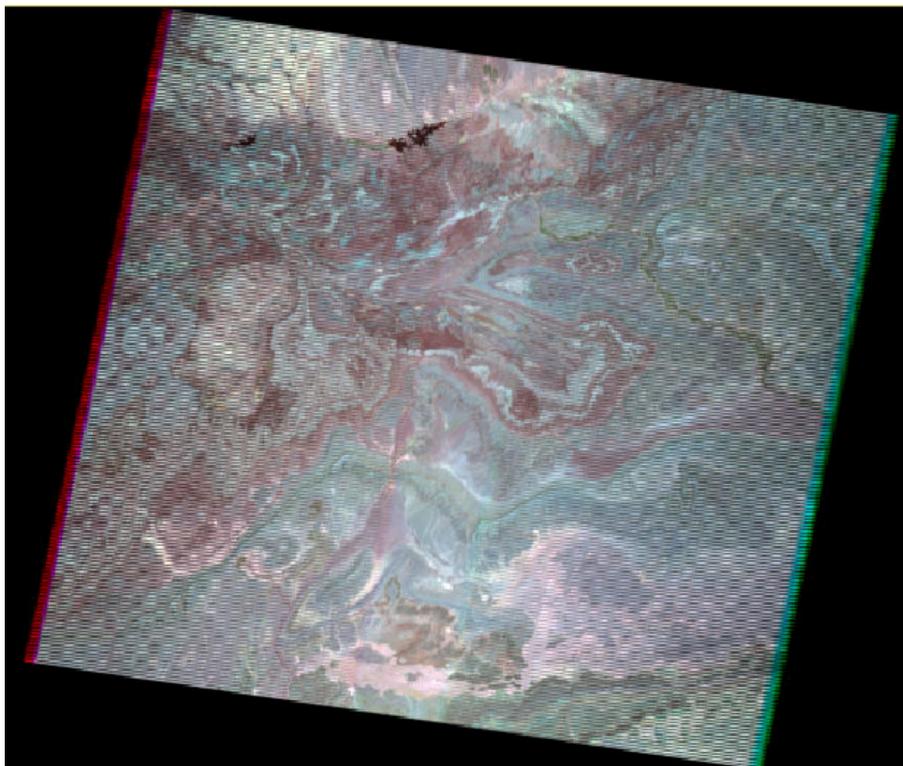


Fig. 8. Composante colorée des bandes 357 en RVB du Landsat 7

Les images résultantes du Landsat 7 n'ont pas donné une bonne discrimination à cause du problème au niveau du capteur d'image. Ces images défectueuses, pixels noirs, nuisent le processus de traitement.

8 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS DU LANDSAT 8

La matrice de covariance et la matrice de standard déviation sont des données de l'image raster.

Tableau 6. Matrice de corrélation de l'image

Bande	1	2	3	4	5	6	7	9	SD
1	1	0,99961135	0,99619715	0,98895755	0,98055777	0,97429022	0,97606679	0,99484379	5623,94007
2	0,99961135	1	0,99801701	0,99208969	0,98449624	0,97806086	0,97929018	0,99259135	5529,87533
3	0,99619715	0,99801701	1	0,99736266	0,99156466	0,98630461	0,98645846	0,98547858	5957,53694
4	0,98895755	0,99208969	0,99736266	1	0,99647919	0,991127	0,99088154	0,97513291	7174,5294
5	0,98055777	0,98449624	0,99156466	0,99647919	1	0,9909711	0,98900164	0,96662253	8301,50065
6	0,97429022	0,97806086	0,98630461	0,991127	0,9909711	1	0,99774155	0,96037153	9505,60403
7	0,97606679	0,97929018	0,98645846	0,99088154	0,98900164	0,99774155	1	0,96303402	8488,12116
9	0,99484379	0,99259135	0,98547858	0,97513291	0,96662253	0,96037153	0,96303402	1	2310,68879

La figure, ci-après, expose le coefficient de corrélation absolu entre les bandes du Landsat 8.

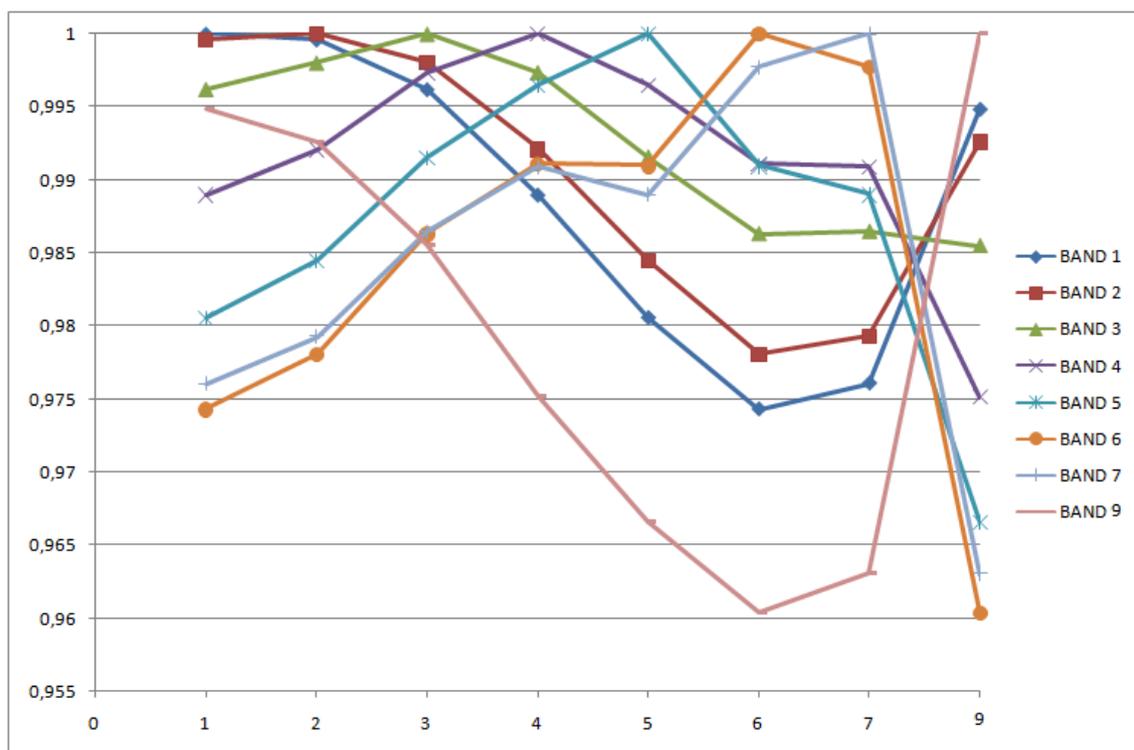


Fig. 9. Coefficient de corrélation absolu entre les bandes du Landsat 8

8.1 LE COMPOSITE LE PLUS IMPORTANT

Après avoir procéder au calcul de la matrice de corrélation, nous constatons trouve que les bandes de cette image ont une très grandes corrélation entre elles, elle varie entre 0,96 (bande 6 et bande 9) et 0,99 (bande 1 et bande 2); dans ce cas, la parfaite corrélation apparait évidente entre les bandes limitrophes et vice versa de plus que toutes les bandes utilisées sont captées par le même instrument (OLI). L'écart type a une remarquable différence puisqu'il altéré entre 2310 (Bande 9) et 9505 (bande 6). Le tableau suivant détaille le résultat de calcul de l'OIF de toutes les 56 combinaisons possibles de composantes colorées de trois bandes.

Tableau 7. Calcul de l'OIF des 56 combinaisons possibles

N° des combinaisons possibles (56)	Combinaison des bandes (56)	SOMME (écart-type)	SOMME (corrélation)	OIF
1	123	17111,3523	2,99	5715,54766
2	124	18328,3448	2,98	6149,09232
3	125	19455,3161	2,96	6562,39868
4	126	20659,4194	2,95	6998,53739
5	127	19641,9366	2,95	6647,08872
6	129	13464,5042	2,99	4507,63129
7	134	18756,0064	2,98	6288,64953
8	135	19882,9777	2,97	6698,39521
9	136	21087,081	2,96	7131,74317
10	137	20069,5982	2,96	6783,19742
11	139	13892,1658	2,98	4667,2517
12	145	21099,9701	2,97	7113,96128
13	146	22304,0735	2,95	7549,50715
14	147	21286,5906	2,96	7201,37634
15	149	15109,1583	2,96	5106,28387
16	156	23431,0447	2,95	7953,9999
17	157	22413,5619	2,95	7609,09917
18	159	16236,13	2,94	5518,6936
19	167	23617,6653	2,95	8011,15186
20	169	17440,2329	2,93	5953,30257
21	179	16422,75	2,93	5597,49835
22	234	18661,9417	2,99	6246,73911
23	235	19788,9129	2,97	6653,79775
24	236	20993,0163	2,96	7086,53137
25	237	19975,5334	2,96	6739,91665
26	239	13798,1011	2,98	4636,32325
27	245	21005,9054	2,97	7065,40372
28	246	22210,0088	2,96	7500,14425
29	247	21192,5259	2,96	7154,17142
30	249	15015,0935	2,96	5072,98559
31	256	23336,98	2,95	7901,39062
32	257	22319,4971	2,95	7558,78737
33	259	16142,0648	2,94	5483,57824
34	267	23523,6005	2,96	7960,35991
35	269	17346,1681	2,93	5918,12613
36	279	16328,6853	2,93	5563,59631
37	345	21433,567	2,99	7179,44671
38	346	22637,6704	2,97	7609,8272
39	347	21620,1875	2,97	7268,01632
40	349	15442,7551	2,96	5220,72009
41	356	23764,6416	2,97	8004,68826
42	357	22747,1588	2,97	7666,65618
43	359	16569,7264	2,94	5628,94284
44	367	23951,2621	2,97	8063,02808
45	369	17773,8298	2,93	6061,69574
46	379	16756,3469	2,93	5709,20345
47	456	24981,6341	2,98	8387,10285

48	457	23964,1512	2,98	8051,48978
49	459	17786,7188	2,94	6053,5393
50	467	25168,2546	2,98	8446,43137
51	469	18990,8222	2,93	6488,96951
52	479	17973,3393	2,93	6136,23829
53	567	26295,2258	2,98	8830,67458
54	569	20117,7935	2,92	6894,4598
55	579	19100,3106	2,92	6544,20949
56	679	20304,414	2,92	6950,83587

Le tableau, ci-dessus, monte une somme d'écart type très distinctes pour les 56 combinaisons des bandes (13464 pour la composante 129 et 26295 pour la composante 567) ; et une somme de corrélation presque constante (2,91 pour la composante 569 et 2,99 pour la composante 123). La figure 10 exhibe les composantes selon leur OIF.

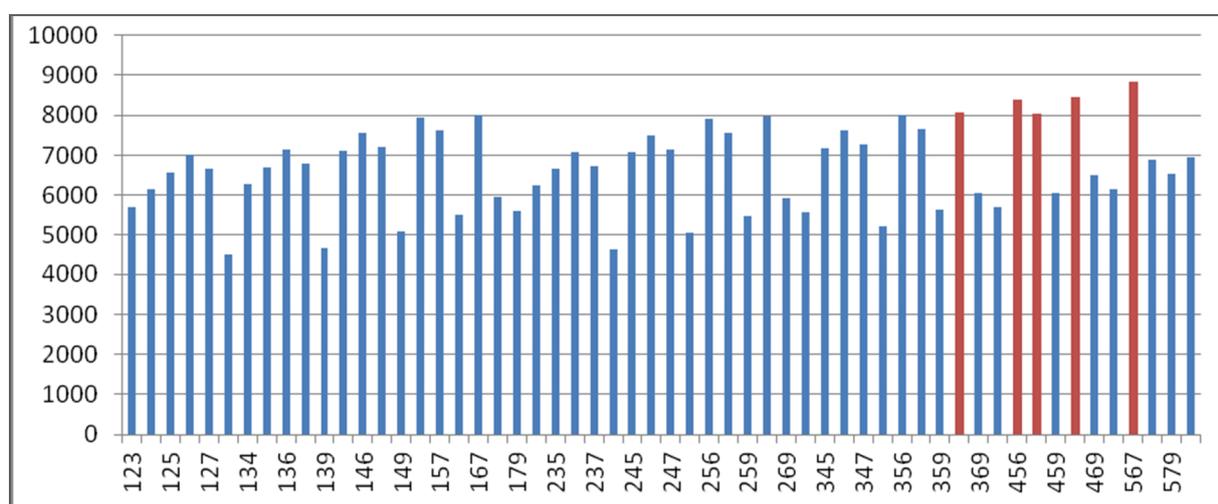


Fig. 10. L'OIF d'image Landsat 8

La valeur d'Optimum Index Factor (OIF), allant du 4507 pour la composante colorée 129 au 8830 pour la composante 567, permet de déceler que les composantes colorées les plus importantes sont, dans l'ordre de priorités, 567 (avec l'OIF= 8830), 467 (avec l'OIF=8446) et 456 (avec l'OIF=8387). Les trois composantes colorées locomotives gardent le même ordre dans la somme écart type ce qui montre l'influence de celle-ci surtout avec la présence d'une très bonne corrélation entre les bandes.

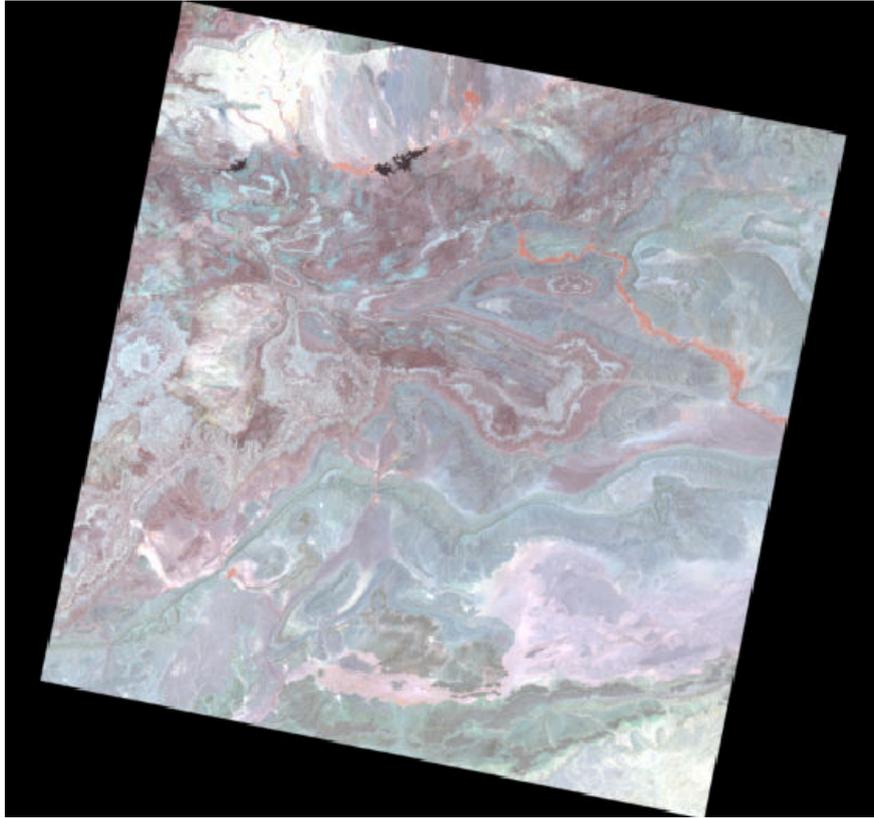


Fig. 11. Composante colorée des bandes 567 en RVB du Landsat 8

La composante colorée des bandes 567 en RVB (figure 11) nous permet clairement de différencier, surtout autour de la boutonnière de Bou Azzar objet de cette étude, entre les formations géologiques à savoir Pléistocène moyen de l'Holocène (couleur vert de gris) ; cambrien moyen (couleur rose Mountbatten), cambrien inférieur (couleur fumée) ; Taliwinien (série lie devin) (couleur pelure d'oignon), syénites, trachytes, andésites de l'Adoudounien (couleur violet d'évêque) et Adoudounien : dolomites inférieurs(couleur pervenche) qui appartient au domaine précambrien supérieur et terminal. A l'intérieur de cette dernière formation géologique existe plusieurs autres formations d'âge protérozoïque d'une manière un peu hétérogène à l'œil nu peut être bien distingués à travers une classification supervisée ou non supervisée. Cela nous permet de dire que cette image montre une bonne discrimination lithologique et peut faire l'objet d'une cartographie géologique.

8.2 LES RAPPORTS DES BANDES (RATIOS)

Le rapport des bandes 6 et 7 du Landsat 8 donne un indice sur les zones d'altérations hydrothermales [8] ; l'image, ci-après, présente ce rapport et montre ces zones en couleur gris perle.

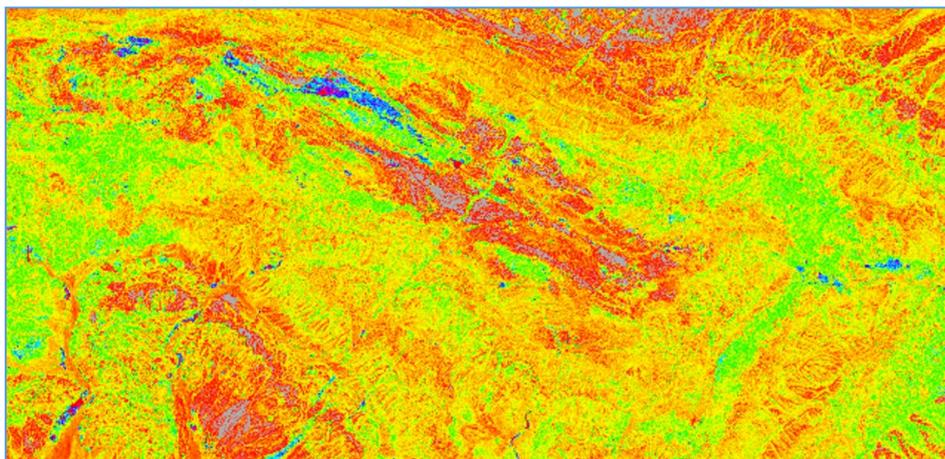


Fig. 12. Ratio 6/7 du Landsat 8 de la Boutonnière de Bou-Azzer

Ce résultat nous apparaît logique surtout quand on superpose les sites miniers de la figure 13, sur la figure 12, nous trouverons que ces sites se situent dans la zone en couleur gris perle qui représente la zone d'altérations hydrothermales.

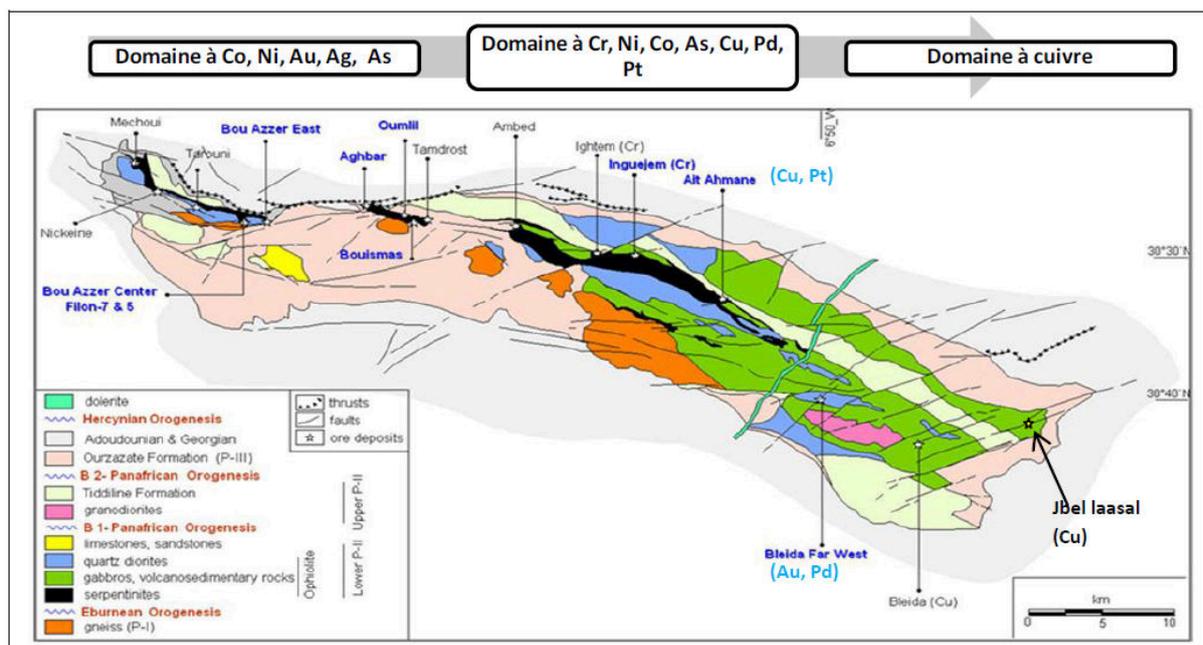


Fig. 13. Domaines métallifères de la boutonnière de Bou Azzer Elgraara et les principaux gisements de la boutonnière [10]

8.3 ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE

L'Analyse en Composantes principales, ACP, fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles. Elles sont apparues au années 30 et ont été développées par Jean-Paul Benzécri dans les années 60. Elles ne s'appuient pas sur un modèle probabiliste, mais elles dépendent d'un modèle géométrique. L'ACP propose, à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de p variables quantitatives pour n unités, des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. L'ACP servira à mieux connaître les données sur lesquelles on travaille, et aidera à formuler des hypothèses de résolution qu'il faudra étudier et facilite les représentations fournies pour illustrer certains résultats [7].

La figure 14 montre l'image résultante trois premières composantes principales CP1, CP2 et CP3 en RVB.

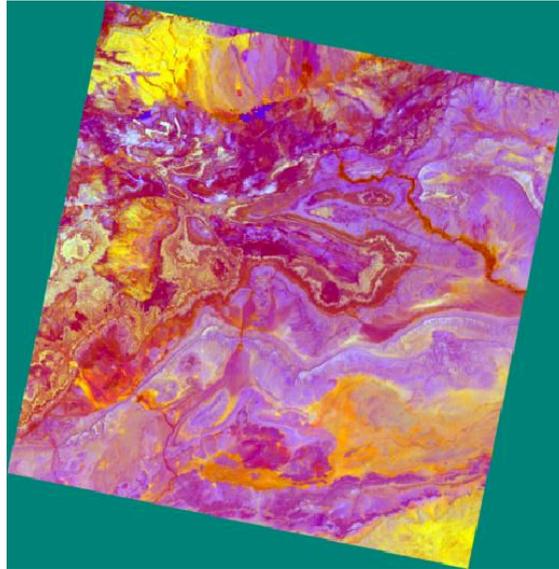


Fig. 14. Les composantes principales CP1, CP2 et CP3 en RVB

La composante colorée de CP1, CP2 et CP3 en RVB donne une très bonne discrimination géologique visuelle mieux que la composante résultante de calcul de l'OIF. Dans ce composite, Pléistocène moyen de l'Holocène se manifeste en couleur d'Améthyste ; cambrien moyen (couleur magenta et orange), cambrien inférieur (couleur ivoire) ; Taliwinien (série lie devin) (couleur magenta et orange), syénites, trachytes, andésites de l'Adoudounien (couleur violette), Adoudounien : dolomites inférieurs (couleur topaze) ; précambrien I (couleur bleu majorelle) et précambrien II (couleur mandarine).

8.4 ANALYSE STRUCTURALE ET CARTES DE LINÉAMENTS

Après une étude comparative présentée dans les figures ci-dessous, des filtres de type convolution et de taille 3×3, précisément le filtre détecteur des bords et filtres directionnels horizontale et verticale, sont appliqués à la première composante principale issus des différentes bandes spectrales (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 9) en vue d'obtenir les cartes de linéaments (images ci-dessous).

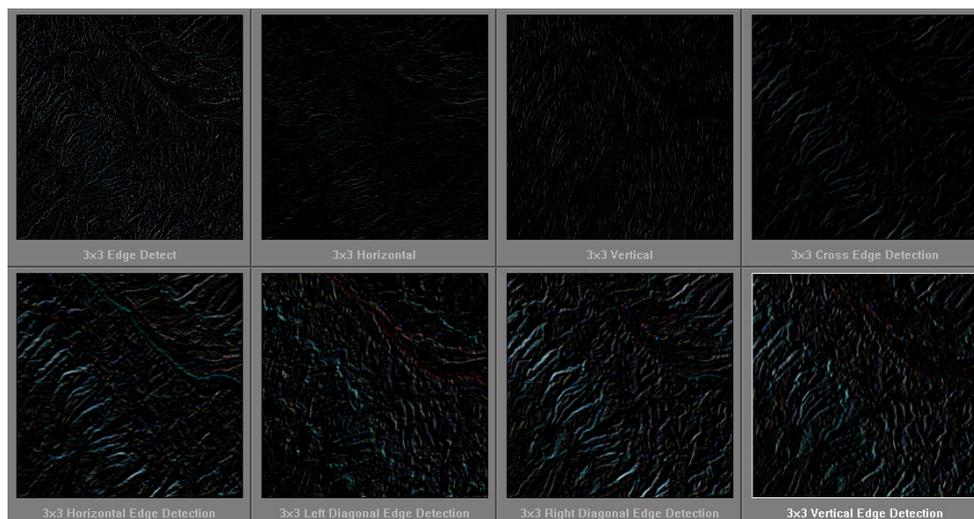


Fig. 15. Un exemple du choix des filtres par comparaison

Ces filtres nous permettent de visualiser tout type de linéaments qui peuvent être des failles, des structures géologiques, des routes, des bords, des sommets des reliefs, ... etc. mais généralement, on peut connaître la majorité des failles à travers l'assemblage des points de discontinuités lithologique (figure 16).

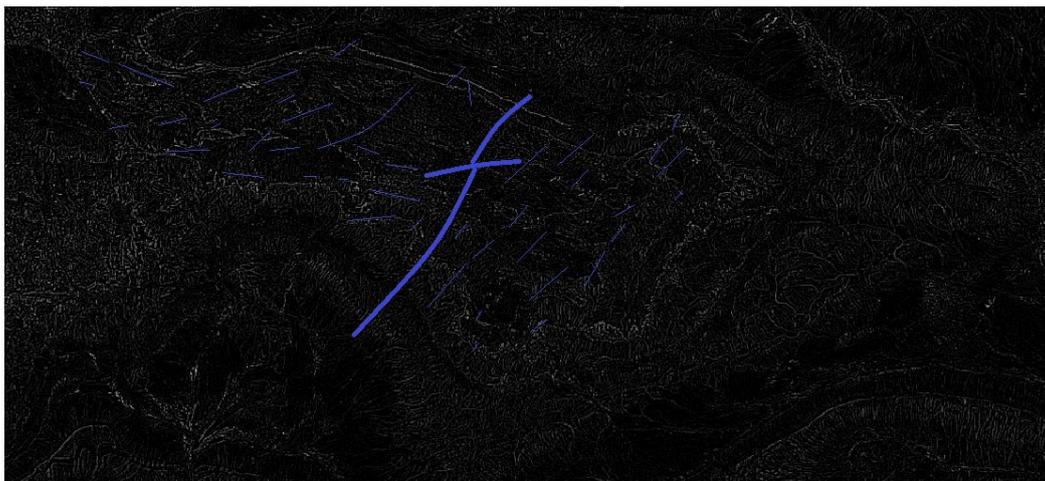


Fig. 16. Les failles détectées à partir des filtres

9 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons essayé de rassembler les données lithologiques et structurales résultantes de la méthode de traitement d'image pour contribuer à la cartographie lithostructurales et interpréter ces plans d'information, qui sont liés à la zone d'altération hydrothermale, pour identifier les sites potentiellement miniers. Ces plans sont confrontés, par la suite à des données existantes du terrain afin de les valider.

Ces résultats positifs de l'imagerie Landsat 8 OLI avec sa résolution de 15 m, en utilisant l'amélioration spatiale par fusion des bandes de 30 m avec la bande panchromatique de 15 m, permettent d'identifier les zones qui peuvent contenir la minéralisation. Cette méthode de traitement des images satellitaires ne substitue pas les méthodes conventionnelles de la recherche minière (la géophysique, la géochimie, sondage et les travaux minier), cependant reste un très bon guide de la prospection pour réduire à la fois le coût et le temps surtout dans les sites à accès difficile comme notre cas.

Dans ce travail, nous avons procédé au traitement d'image sans correction atmosphérique parce que on a choisi une image pendant l'été (22 Juillet 2016) dans un milieu connu par un climat semi-aride très chaud, très sec et très ensoleillé ; la zone d'études ne contient aucuns nuages ni précipitations et avec un très faible taux d'humidité et de vent durant cette journée. Les travaux futurs seront développés pour l'imagerie multispectrale Sentinel (10m).

REFERENCES

- [1] USGS, [En ligne]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov>.
- [2] Google, 03 10 2019. [En ligne].
- [3] D. Gasquet, N. Ennih, J. P. Liégeois, A. Soulaïmani, & A. Michard, « The pan-african belt. In Continental evolution: the geology of Morocco » (pp. 33-64). Springer, Berlin, Heidelberg. 2008.
- [4] N. Imessaoudene, «Utilisation de la télédétection pour la cartographie géologique du Massif des Eglab et de sa bordure sédimentaire (Sud-Ouest algérien),» 2012.
- [5] P. S. CHAVEZ, G. BERLIN, L. Graydon, et, B. SOWERS Lynda, «Statistical method for selecting landsat MSS, » J. Appl. Photogr. Eng, 8(1), 23-30, 1982.
- [6] A. Pour et M. Hashim, «Hydrothermal alteration mapping using Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, SE Iran,» Journal of Taibah University for Science, 2014.
- [7] Z. Adiri, A. El-Harti, A. Jellouli, L. Maacha et E. M. Bachaoui, «Lithological mapping using Landsat 8 and ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas», Journal of Applied Remote Sensing, 2016.
- [8] C. Duby et S. Robin, Analyse en Composantes Principales, AgroParisTech.
- [9] A. M. Eldosouky, M. Abdelkareem et S. O. Elkhateeb, «Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, South Eastern Desert of Egypt,» Journal of African Earth Sciences, 2017.
- [10] L. Maacha, M. Elghorfi, M. Zouhair et O. Sadiqui, «Reconsidérations des systèmes métallogéniques de la Boutonnière de Bou Azzer-El Grâara (Anti-Atlas occidental). Maroc.,» 2013.