
Exploitation d'images satellitaires Landsat de la région du Cap (Afrique du Sud) pour le calcul et la cartographie d'indices de végétation à l'aide du logiciel GRASS GIS

Vegetation indices calculated using Landsat satellite images and GRASS GIS for environmental mapping of the Cape Town region, South Africa

Polina Lemenkova



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/physio-geo/17018>

ISBN : 978-2-8218-0427-2

ISSN : 1958-573X

Éditeur

Claude Martin

Édition imprimée

Pagination : 113-129

Référence électronique

Polina Lemenkova, « Exploitation d'images satellitaires Landsat de la région du Cap (Afrique du Sud) pour le calcul et la cartographie d'indices de végétation à l'aide du logiciel GRASS GIS », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 20 | 2024, mis en ligne le 26 mai 2024, consulté le 26 mai 2024. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/17018>



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY-NC-ND 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

EXPLOITATION D'IMAGES SATELLITAIRES LANDSAT DE LA RÉGION DU CAP (AFRIQUE DU SUD) POUR LE CALCUL ET LA CARTOGRAPHIE D'INDICES DE VÉGÉTATION À L'AIDE DU LOGICIEL GRASS SIG

Polina LEMENKOVA ^(1, 2)

- (1) : Paris Lodron Universität Salzburg (PLUS), Fachbereich Geoinformatik, Fakultät für Digitale und Analytische Wissenschaften (Université Paris Lodron de Salzbourg, Département de Géoinformatique, Faculté des Sciences Numériques et Analytiques), Schillerstraße 30, A-5020 SALZBOURG, AUTRICHE.
Courriel : polina.lemenkova@plus.ac.at
- (2) : Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali (Alma Mater Studiorum - Université de Bologne, Département des Sciences Biologiques, Géologiques et Environnementales), Via Irnerio 42, 40126 BOLOGNE, ITALIE.
Courriel : polina.lemenkova2@unibo.it

RÉSUMÉ : Le développement de techniques de programmation et de langages de script intégrés aux SIG a amélioré le traitement des images satellitaires pour obtenir des informations spatiales à partir des données de télédétection. Dans cet article, l'efficacité de l'intégration des données multi-temporelles d'observation spatiale avec des techniques de script est démontrée à travers un exemple pris en Afrique du Sud. Quatre images Landsat couvrant la région côtière du Cap ont été acquises auprès de l'USGS pour les années 2016, 2018, 2021 et 2023. Leur traitement a permis le calcul de quatre indices de végétation à l'aide du module 'i.vi' de GRASS SIG : DVI, NDVI, SAVI et CI. Les valeurs des indices ont été cartographiées pour chacune des images traitées. Ces cartes traduisent les changements de l'occupation du sol depuis 2016, notamment la déforestation et l'expansion des terres agricoles.

MOTS-CLÉS : image satellitaire, traitement d'image, langage de script, land use, indices de végétation, cartographie, péninsule du Cap, Afrique du Sud.

ABSTRACT : Vegetation indices calculated using Landsat satellite images and GRASS GIS for environmental mapping of the Cape Town region, South Africa

The development of the programming techniques and scripting languages integrated in GIS, facilitated satellite image processing for obtaining information from the remote sensing data. In this paper, the effectiveness of integration of space observation multi-temporal data with scripting techniques is demonstrated with an example from South Africa. Four Landsat images covering the coastal region of Cape Town were acquired from the USGS for years 2016, 2018, 2021 and 2023. Their processing enabled the calculation of four vegetation indices using 'i.vi' module of GRASS GIS: DVI, NDVI, SAVI and CI. The index values were mapped for each of the processed images. These maps reflect changes in land use since 2016, such as deforestation and expansion of agricultural land.

KEY-WORDS : satellite image, image processing, scripting language, land use, vegetation indices, cartography, Cape peninsula, South Africa.

I - INTRODUCTION

Le traitement des données de télédétection à l'aide des SIG permet de mieux comprendre notre planète : les types, la distribution et la structure des paysages sur la Terre. L'utilisation des images satellitaires permet de révéler les dynamiques de transformation des paysages : distribution des surfaces agricoles, déforestation, étalement urbain. Dans ce contexte, le traite-

ment des données géospatiales a fait l'objet d'une attention considérable et continue depuis le lancement des premières missions satellitaires (C. BARDINET et J. TRICART, 1981 ; E.E. LAMBIN, 2001 ; D.W. LAMB et R.B. BROWN, 2001 ; I. MELENDEZ-PASTOR *et al.*, 2010 ; T. PEI *et al.*, 2021 ; M.E. FAGAN et R.S. DEFRIES, 2024). Depuis lors, les images satellitaires sont utilisées dans diverses tâches de recherche dans les domaines de la géographie (R. BARIOU, 1992 ; C. CASTAÑEDA *et al.*, 2005 ; CHEN *et al.*, 2013), de l'environnement (C. BARDINET, 1992 ; A.M. ADEOLA *et al.*, 2017 ; P. LEMENKOVA, 2023-a ; T.D. BHAGA *et al.*, 2023) et des sciences de la Terre (C. MUNYATI et G. RATSHIBVUMO, 2010 ; M. MINN *et al.*, 2015).

Depuis maintenant plus de quarante ans, de multiples discussions ont été tenues sur les avantages du traitement des images satellitaires par les techniques SIG, y compris les méthodes géomatiques (topologie, requêtes SQL) ou de télédétection (signal optique, radar), l'accent étant mis sur le potentiel d'intégration dans la gestion des ressources naturelles, le suivi environnemental des terres (J.P. AMAT et M. HOTYAT, 1985 ; Z.S. VENTER *et al.*, 2020) et l'analyse du type d'occupation du sol (C. DURBIANO, 1981 ; M.O. MABUDA *et al.*, 2024). D'autres études (G. JOLY, 1982 ; A. FRÉMONT, 1984 ; G.Q. KING, 1991 ; Y. CHEUNG *et al.*, 2011 ; H. COX *et al.*, 2014) ont examiné les problèmes liés à l'intégration de la télédétection et des SIG dans l'enseignement géographique, en s'interrogeant sur la manière dont la technologie SIG devait faire face à la capacité accrue d'acquisition de données de télédétection.

Le présent travail a été motivé par le petit nombre de recherches sur la répartition spatiale de différents types de couvert végétal dans la partie occidentale de l'Afrique du Sud (C. MASEMOLA *et al.* ; 2016 ; K. PEERBHAY *et al.*, 2019), alors que les écosystèmes ont été étudiés de manière intensive dans la partie orientale, par exemple dans le Parc National Kruger (C. MUNYATI *et al.*, 2013), la région du KwaZulu-Natal (S. LOTTERING *et al.*, 2022) ou la zone nord de la Réserve Nationale de Vhembe (T.I. JAURO *et al.*, 2020). Cette absence de données est d'autant plus préjudiciable que le secteur entre Cape Town et Saldanha, à forte valeur environnementale, est soumis à une forte pression humaine et à de lourds changements écosystémiques.

II - LA ZONE D'ÉTUDE

Bordée par l'océan Atlantique et l'océan Indien (Fig. 1), l'Afrique du Sud a un littoral long de plus de 2500 km. Dans ce pays situé à des latitudes entre 22 et 35° Sud et à des longitudes entre 16 et 33° Est, la disposition du relief influence le climat et la répartition des types de végétation (T. HARMSE, 2013). À l'intérieur du pays, au-dessus du Grand Escarpement africain, s'étend un vaste plateau dont les altitudes croissent vers l'est, jusqu'à dépasser 3400 m. Cette région est soumise à un climat semi-aride à aride, particulièrement sec vers le nord où s'étend le désert du Kalahari. Au sud du Grand Escarpement, plusieurs chaînes de montagnes parallèles à la côte constituent les Cape Fold mountains constituées de quartzites et de grès. Cette zone bordée par les océans bénéficie d'un climat plus doux et plus humide, favorable aux activités agricoles dans les plaines (K. PAYET *et al.*, 2013) et dont les reliefs portent des forêts verdoyantes riches en biodiversité (A.F. SELL *et al.*, 2024).

Des changements de l'occupation du sol ont été mis en évidence dans le pays sur les dernières décennies (B. BOMHARD *et al.*, 2005 ; S. MANI *et al.*, 2021), soit sous l'effet de contraintes climatiques (M.E. MEADOWS et T.M. HOFFMAN, 2003 ; M.L. MASUBELELE *et al.*, 2015 ; V.P. GRONER *et al.*, 2022), soit en raison des impacts humains, qu'il s'agisse en particulier des progrès de l'urbanisation ou de l'évolution des pratiques agricoles (P. HEBINCK

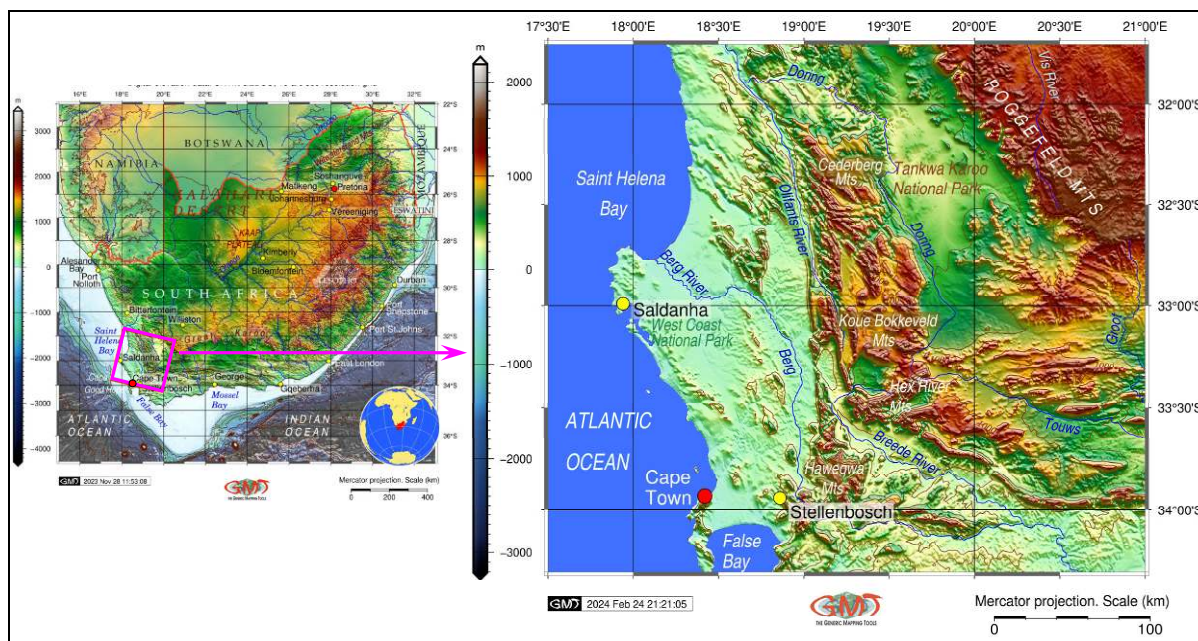


Figure 1 - Localisation et présentation de la région côtière de la péninsule du Cap, entre Le Cap et Saldanha.

Données numériques de terrain : SRTM/GEBCO, grille de résolution de 15" d'arc (soit 388 m dans la zone d'étude). URL : <https://download.gebco.net/> ou <https://www.gebco.net/>.

Logiciel : Generic Mapping Tools (GMT). Réalisation des cartes : Polina LEMENKOVA.

et al., 2011 ; B. O'LAUGHLIN *et al.*, 2013). Ainsi différentes recherches spécifiques ont-elles été menées, par exemple par P. NZUZA *et al.* (2022), qui en utilisant l'indice de surface foliaire calculé (LAI) et l'indice de végétation ajusté au sol (SAVI) ont mis en évidence des terrains dégradés par le surpâturage dans les zones basses, ou par C. MUNYATI et D. MAKGALE (2009), qui ont observé la dégradation des pâturages et l'augmentation concomitante des terrains nus.

La zone d'étude est située à l'extrémité sud de la bande côtière le long de l'océan Atlantique. Il correspond à la péninsule du Cap, de la ville du Cap à Saldanha (Fig. 1), entre 31,5 et 34,5° de latitude Sud et entre 17,5 et 21,0° de longitude Est. Le secteur bénéficie d'un climat méditerranéen. On y trouve des forêts de feuillus ou de conifères sur les reliefs, des terres cultivées, des prairies ou des broussailles dans les plaines (T. DUBE et O. MUTANGA, 2015 ; M. BESSINGER *et al.*, 2022) (Fig. 2).

III - DONNÉES ET MÉTHODES

La recherche combine l'interprétation cartographique de quatre images Landsat d'une résolution de 30 m, l'analyse de la végétation à l'aide d'indices de végétation et la prise en compte de divers travaux antérieurs portant sur la zone d'étude. En revanche, il ne nous a pas été possible d'effectuer de vérification sur le terrain. Les cartes qui ont été produites à partir d'une analyse d'images par ordinateur en utilisant le logiciel GRASS SIG, n'ont donc qu'un caractère exploratoire.

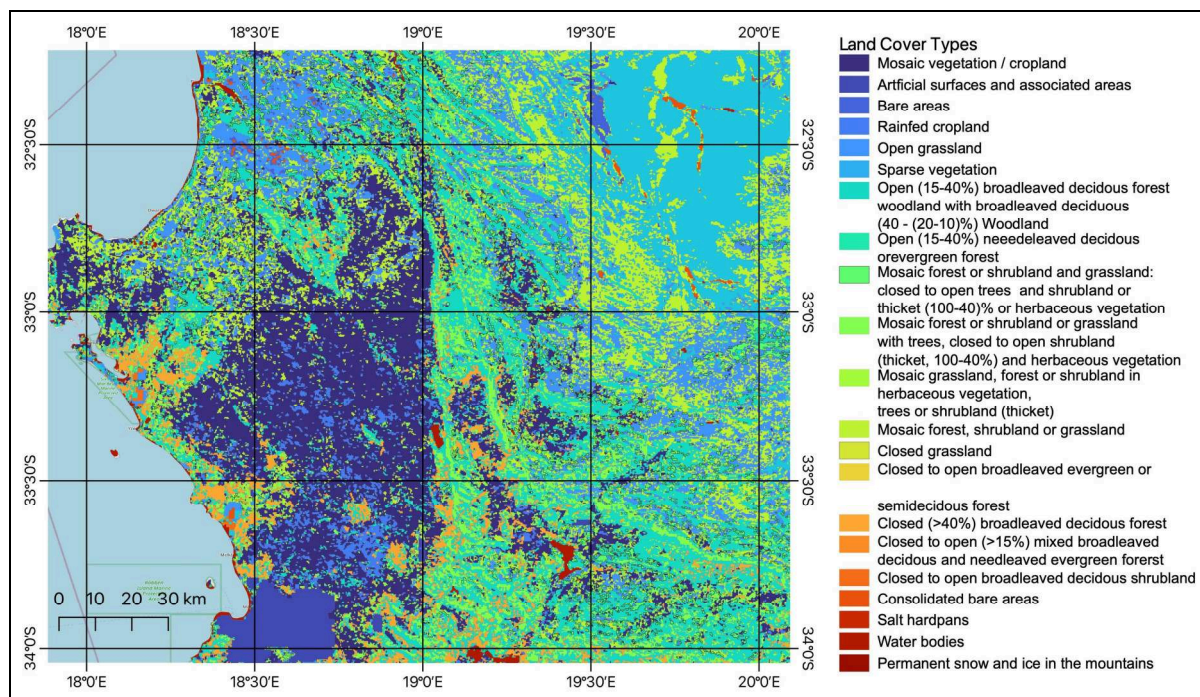


Figure 2 - Principaux types d'occupation du sol dans la zone d'étude (région du Cap jusqu'à Saldanha) selon la classification de la FAO.

Source des données : FAO – <https://data.apps.fao.org/catalog/iso/a2665995-df58-44a8-9bc0-d9c30a63c850>. Unité minimale de cartographie : 10 ha. La FAO a établi la carte en 2009 à partir de données recueillies dans la première moitié des années 2000.

Réalisation de la figure : Polina LEMENKOVA. Logiciel : QGIS.

Les images ont été prises les 23 octobre 2016, 13 octobre 2018, 5 octobre 2021 et 19 octobre 2023 (Fig. 3), les trois premières par le satellite Landsat 8, la quatrième par le satellite Landsat 9. Les deux satellites ont un capteur OLI/TIRS. La projection des images est UTM Zone 34. La couverture nuageuse est inférieure à 10 % pour toutes les images. L'angle de roulis est de 1° pour l'image de 2023, de 0° pour les autres.

L'imagerie satellitaire Landsat est une source d'information fiable et gratuite, même si les résultats seraient meilleurs avec une résolution plus fine, telle que celle de Sentinel-2A (10 m). Toutes les images sont prises pendant la journée avec un nadir (c'est-à-dire la géométrie de visualisation orientée vers le bas d'un satellite en orbite), ce qui indique que les images ont été capturées avec un passage direct au-dessus d'une zone d'intérêt.

Divers algorithmes de détection de changements numériques ont été développés au fil des années. Ils incluent des techniques de traitement d'image : segmentation des images, classification des images (supervisée et non supervisée) et calcul des indices de végétation. Des détails sur ces méthodes, ainsi que leurs avantages et inconvénients pour la cartographie de l'occupation du sol, sont rapportés dans les études existantes (Y. TOFFA *et al.*, 2022 ; P. LEMENKOVA, 2023-b, 2023-c).

1) Détection des types d'occupation du sol

Les types de couverture terrestre et les objets peuvent être détectés sur les images satellitaires en utilisant différentes combinaisons de bandes, avec les approches les plus courantes

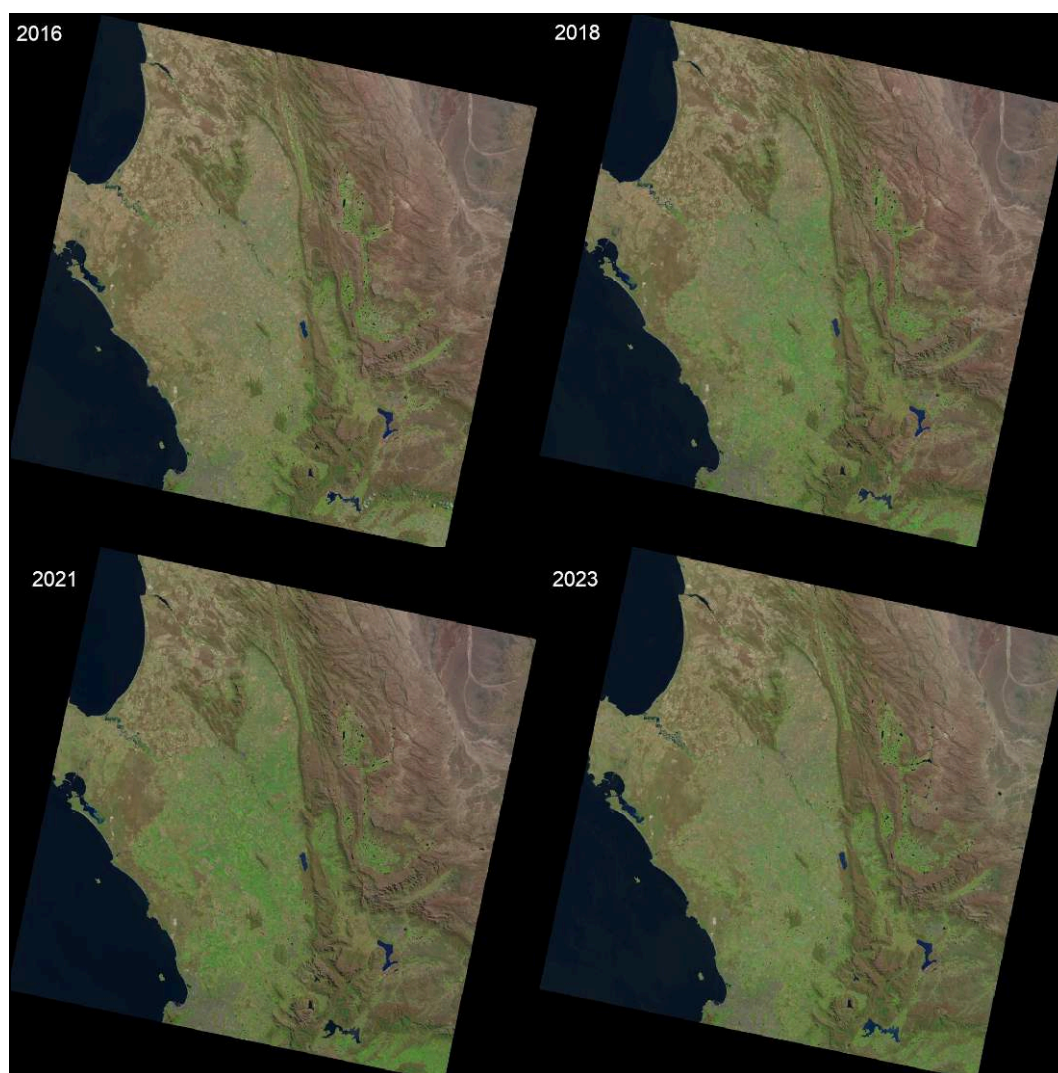


Figure 3 - Données originales de télédétection : images satellitaires Landsat 8-9 OLI/TIRS des 23 octobre 2016, 13 octobre 2018, 5 octobre 2021 et 19 octobre 2023.

Source : United States Geological Survey (USGS).

de composites naturels et faux (Fig. 4). Dans une approche similaire, les indices de végétation tirent parti de différents canaux spectraux pour l'identification et la détection de la végétation, qui se distingue des autres types de couverture terrestre par ses propriétés de réflectance spectrale spécifiques.

L'indice de végétation par différence (*Difference Vegetation Index*, DVI) et l'indice de végétation par différence normalisé (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI – C.J. TUCKER, 1979), l'un des indices les plus utilisés en télédétection, exploitent les réflectances (R) mesurées dans les bandes proche infrarouge (PIR) et rouge (ROUGE) :

$$DVI = R_{PIR} - R_{ROUGE} \quad [1]$$

$$NDVI = (R_{PIR} - R_{ROUGE}) / (R_{PIR} + R_{ROUGE}) \quad [2]$$

La chlorophylle des feuilles vertes leur conférant une réflectance plus faible dans les longueurs d'onde rouge, alors qu'elles ont une réflectance proche infrarouge plus élevée, ces deux indices sont sensibles à la densité et à l'état du couvert végétal. Les dates d'acquisition

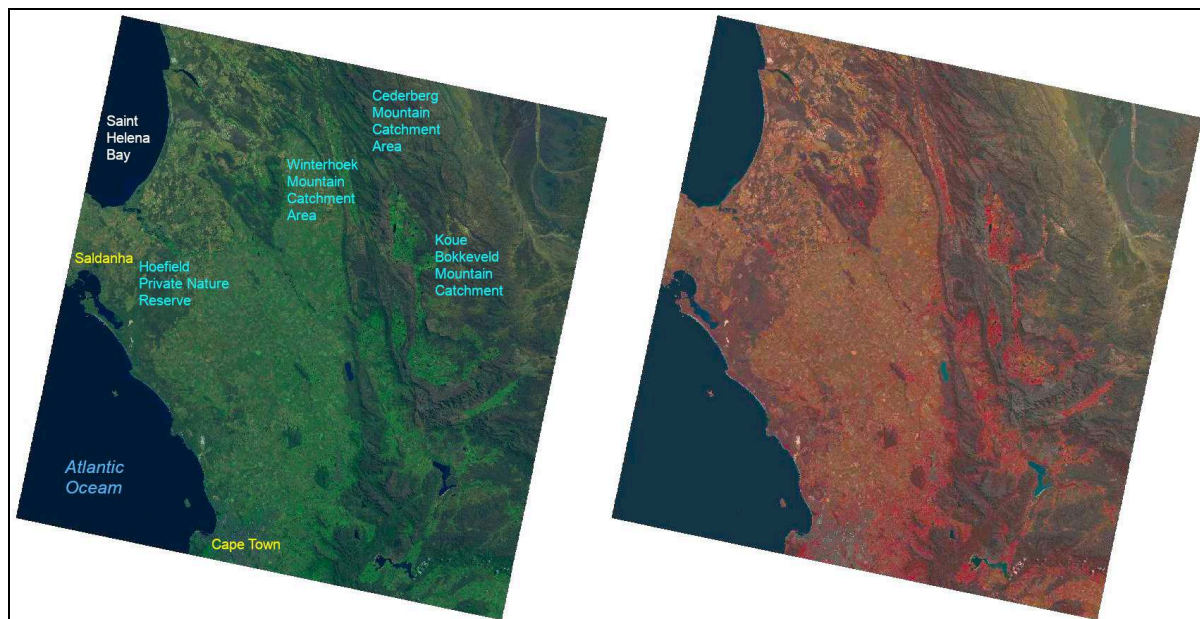


Figure 4 - Image Landsat-8 OLI/TIRS en composite de couleurs naturelles (7-5-3) avec les principaux noms et lieux géographiques annotés et en composite de fausses couleurs (bandes 5-4-3).

Source des données : United States Geological Survey (USGS).

des images satellitaires utilisées dans cette étude sont suffisamment avancées dans le printemps (du 5 au 23 octobre) pour que les végétaux caducifoliés portent des feuilles.

Afin de minimiser l'influence des caractères du sol, particulièrement forte dans les régions où la couverture végétale est clairsemée, un nouvel indice a été créé en ajoutant un paramètre correcteur au NDVI (A.R. HUETE, 1988). Dans le cas de la version de base de l'indice de végétation ajusté au sol (*Soil Adjusted Vegetation Index*, SAVI), la valeur de ce paramètre est fixée à 0,5 :

$$\text{SAVI} = [(R_{\text{PIR}} - R_{\text{ROUGE}}) / (R_{\text{PIR}} + R_{\text{ROUGE}} + 0,5)] \times (1 + 0,5) \quad [3]$$

Le dernier indice utilisé dans cette étude, est l'indice de croûte (*Crust Index*, CI) :

$$\text{CI} = 1 - [(R_{\text{ROUGE}} - R_{\text{BLEU}}) / (R_{\text{ROUGE}} + R_{\text{BLEU}})] \quad [4]$$

Cet indice repose sur l'absorption de la lumière bleue par la phycobiline des cyanobactéries des croûtes biologiques superficielles (A. KARNIELI, 1997). Il utilise les bandes spectrales 2 (bleu) et 4 (rouge) des satellites Landsat 8-9 OLI/TIRS (A. RÖDER *et al.*, 2005). Approprié pour détecter la matière organique (B. WEBER *et al.*, 2008), ses applications spécifiques concernent les terrains où les caractéristiques spectrales de cette dernière prennent le pas sur les autres éléments (Z. WANG *et al.*, 2023). Les propriétés de cet indice sont donc particulièrement précieuses dans les environnements arides et semi-arides (S. CHAMIZO *et al.*, 2012). Mais il peut être appliqué dans tous les milieux.

2) Techniques de script SIG GRASS

Les méthodes de classification de l'occupation du sol basées sur les SIG ont fourni des résultats cartographiques solides, notamment en Afrique du Sud (A.A OBAID *et al.*, 2021 ;

G.T. NWAILA *et al.*, 2022). Toutefois l'utilisation d'approches et de méthodes de programmation augmente l'objectivité et la précision de l'identification de la végétation.

GRASS GIS est un logiciel sous licence "open source". Utilisant des scripts pour la cartographie, il propose des méthodes de programmation beaucoup plus simples et directes que celles de beaucoup d'autres logiciels. L'avantage des scripts GRASS SIG réside dans l'automatisation du flux de travail cartographique, ce qui permet d'éliminer les erreurs d'origine humaine liées à la subjectivité de la classification et de la cartographie (M. NETELER et M. MITASOVA, 2008 ; GRASS Development Team, 2023 ; Y. AUDA, 2018).

Le script principal utilisé pour le traitement des images et le calcul des indices de végétation est présenté dans l'Annexe 1 (un cas de l'image Landsat de 2021). Les noms des indices de végétation ont été ajustés à l'aide de la commande intégrée dans le module 'i.vi' de GRASS GIS, par exemple : *viname = savi* pour SAVI, *viname = ndvi* pour NDVI, *etc.* Les indices de végétation ont été calculés de cette manière pour les quatre images satellitaires de 2016, 2018, 2021 et 2023.

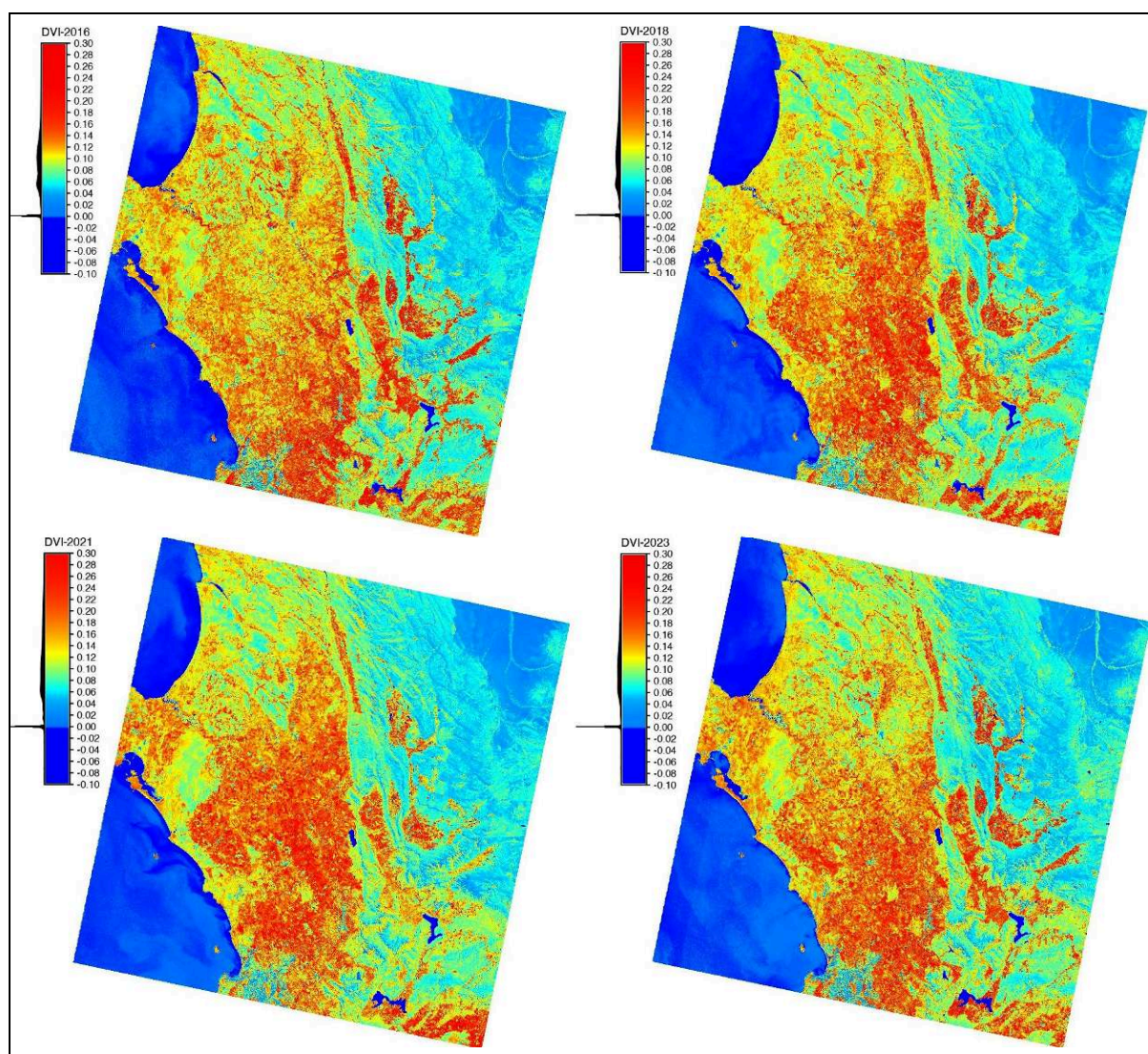
IV - RÉSULTATS ET COMMENTAIRES

Sur la base de l'approche de script GRASS GIS, les indices de végétation calculés sont visualisés sur les figures 5 à 8. Dans l'ensemble, ces indices confirment ce que l'on sait du couvert végétal de la région (voir Fig. 2).

Sur la figure 5, les histogrammes de fréquence des valeurs du DVI montrent une représentation des valeurs allant de 0,05 à 0,11 plus forte pour les années 2016 et 2018 que pour les années 2021 et 2023. On peut en conclure que les types d'occupation du sol correspondant à cette plage de valeurs (forêt mosaïque, maquis fermé à ouvert, prairie arborée) ont régressé au cours des années récentes.

Sur la figure 6 (NDVI), les valeurs les plus élevées (en vert vif) indiquent les régions de forêts mosaïques avec un couvert très dense (taux de couverture supérieur à 40 %). Viennent ensuite les maquis et les prairies denses, puis les fourrés. La couleur jaune (NDVI de 0,25 à 0,35) désigne un couvert arbustif et la couleur orange (NDVI de 0,18 à 0,25) une végétation clairsemée. Les valeurs positives les plus faibles correspondent aux terres nues et aux zones désertes, tandis que les valeurs négatives indiquent l'eau (représentée par des couleurs rouges sur la figure).

Les valeurs négatives de l'indice SAVI, en bleu sur la figure 7, correspondent soit à de l'eau soit à des zones urbaines, sans végétation. Plus les valeurs sont élevées (couleur rouge), plus la végétation est dense et saine. Les valeurs entre 0,00 et 0,10 (couleur gris-vert) indiquent les zones à végétation rare ou clairsemée couvrant certains reliefs. Les valeurs de 0,10 à 0,20 (couleur vert clair vif) indiquent soit les terres cultivées et les prairies soit une végétation arbustive disséminée parmi les herbacées. Les valeurs de 0,20 à 0,25 (couleur jaune vif) signalent des forêts décidues ou semi-décidues ouvertes. Les valeurs plus élevées (couleur orange jusqu'à 0,30, puis rouge) correspondent à des forêts de feuillus ou de conifères de plus en plus denses.



**Figure 5 - Indice de végétation par différence (DVI)
sur les années 2016, 2018, 2021 et 2023.**

Les histogrammes à gauche des échelles des couleurs traduisent l'importance des superficies en fonction des valeurs de l'indice.

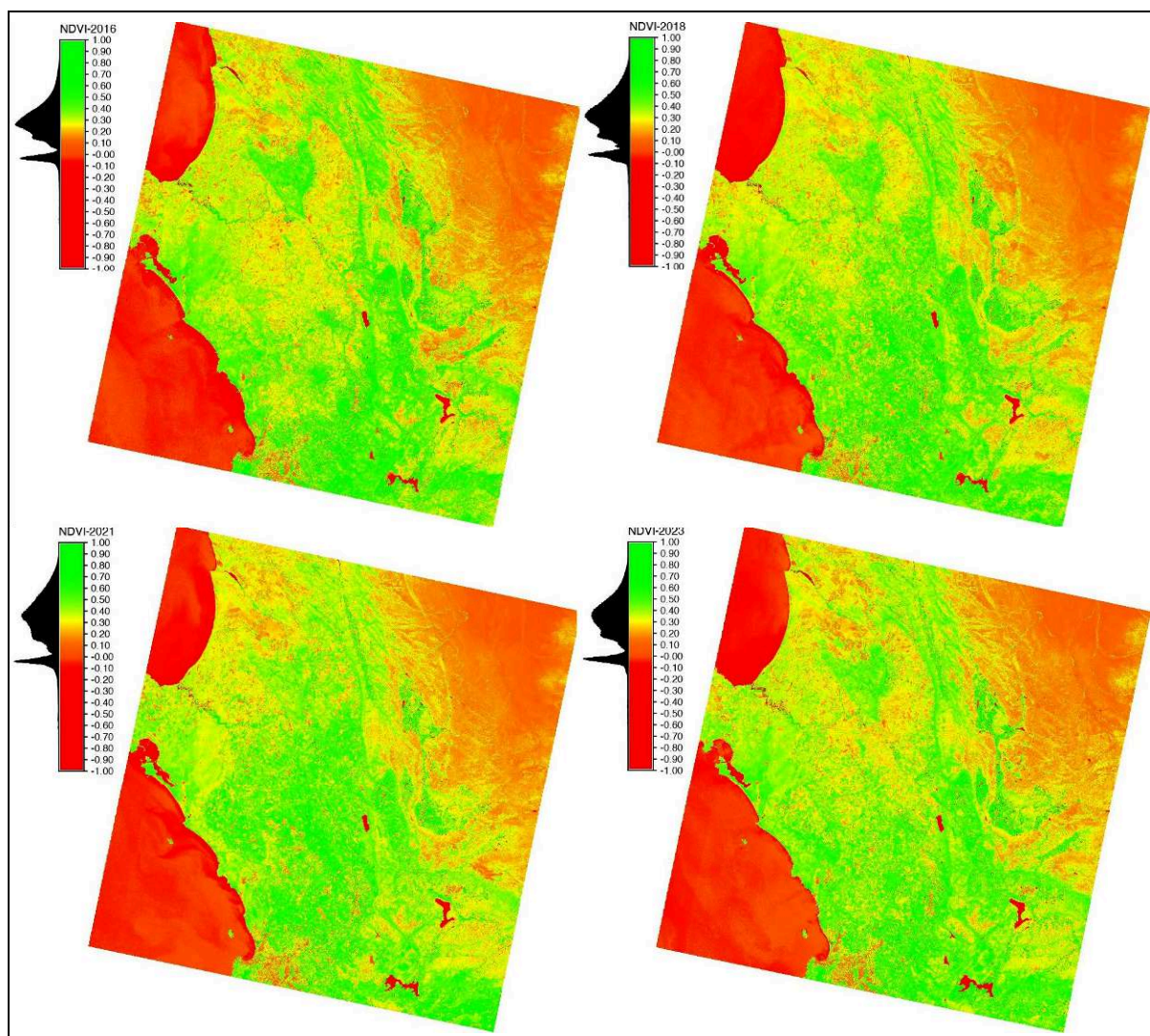
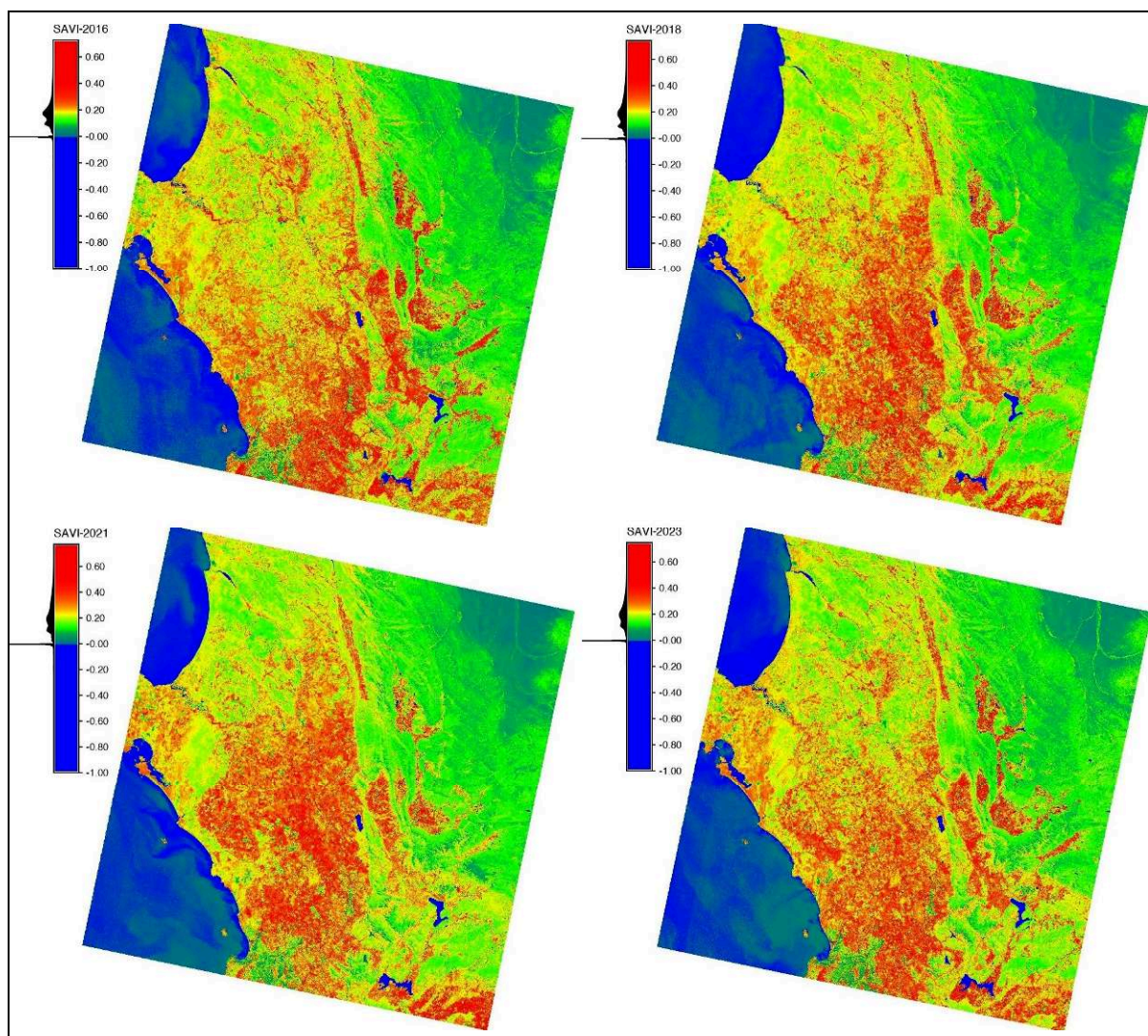


Figure 6 - Indice de végétation par différence normalisée (NDVI) sur les années 2016, 2018, 2021 et 2023.

Les histogrammes à gauche des échelles des couleurs traduisent l'importance des superficies en fonction des valeurs de l'indice.



**Figure 7 - Indice de végétation ajusté au sol (SAVI)
sur les années 2016, 2018, 2021 et 2023.**

Les histogrammes à gauche des échelles des couleurs traduisent l'importance des superficies en fonction des valeurs de l'indice.

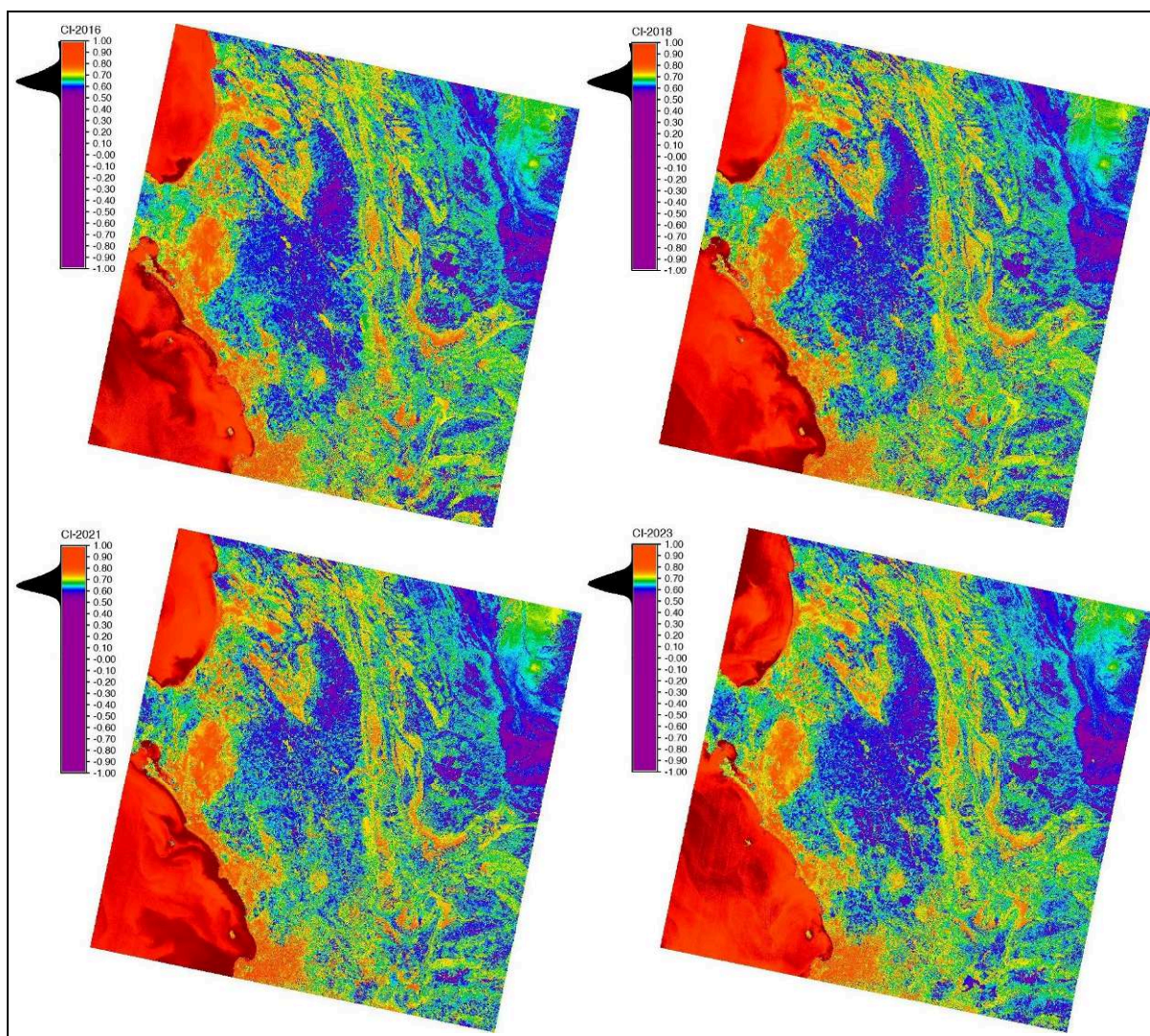


Figure 8 - Indice de croûte (CI) sur les années 2016, 2018, 2021 et 2023.

Les histogrammes à gauche des échelles des couleurs traduisent l'importance des superficies en fonction des valeurs de l'indice.

La comparaison des histogrammes établis pour le NDVI (Fig. 6) et le SAVI (Fig. 7) montre que ce dernier atteint sa limite vers 0,40, contre 0,70 pour le NDVI. Pour une végétation dense et saine, le SAVI est donc moins discriminant que le NDVI.

Les valeurs de l'indice de croûte (Fig. 8) se situent pour la plupart dans la plage 0,45-0,85, les autres valeurs n'étant pratiquement pas représentées. Les valeurs les plus faibles (en violet) sont enregistrées dans quelques secteurs montagneux dénudés, notamment dans l'ouest du secteur d'étude. Les valeurs les plus fortes, correspondant à la zone forestière (couleur tirant vers le rouge), sont surtout représentées à proximité de l'océan.

V - CONCLUSION

L'étude réalisée sur le couvert végétal de la presqu'île du Cap est restée limitée, focalisée sur la cartographie d'indices de végétation établis à partir d'images satellitaires. Mais elle a été l'occasion de tester une nouvelle fois la facilité et la rapidité du traitement des images à l'aide du logiciel GRASS GIS. Celui-ci propose des scripts, QGIS et GMT, mis en œuvre à partir d'une console de programmation, pour le calcul automatisé et la traduction cartographique des indices. Outre leur vitesse d'exécution, les scripts offrent l'avantage d'une meilleure précision par rapport aux SIG traditionnels.

Les indices calculés mettent en évidence une réduction des couverts végétaux spontanés, forestiers, arbustifs ou herbacés. Mais d'autres investigations, notamment sur le terrain, seraient nécessaires pour affiner les résultats.

Nota bene : L'auteur déclare ne pas avoir de conflit d'intérêt avec la société productrice du logiciel GRASS GIS.

Annexe 1 - Script du SIG GRASS pour le traitement d'images et le calcul des indices de végétation (année 2021).

La légende de cette annexe est donnée par l'Annexe 2.

```
# importer dans GRASS GIS les 11 bandes spectrales du satellite Landsat 8 OLI/TIRS (notées
X ci-dessous) à l'aide de la bibliothèque GDAL :
r.in.gdal
/Users/polinalemenkova/grassdata/SouthAfrica_2021/LC08_L2SP_175083_20211005_20211
013_02_T1_SR_B1.TIF out=L8_2021_X
g.region raster=lsat8_2021_toar.X -p
# copier les bandes Landsat pour qu'elles correspondent à la structure d'entrée de i.landsat.toar
(répéter pour les 11 bandes spectrales, pour chaque image) :
g.copy raster=L8_2021_X,lsat8_2021.X
# convertir les nombres numériques (DN) des valeurs de pixels en valeurs de réflectance à
l'aide de DOS1 :
i.landsat.toar input=lsat8_2021. output=lsat8_2021_toar. sensor=oli8 \
method=dos1 date=2021-10-05 sun_elevation=54.96134606 \
product_date=2021-10-13 gain=HHHLHLHHL --overwrite
```

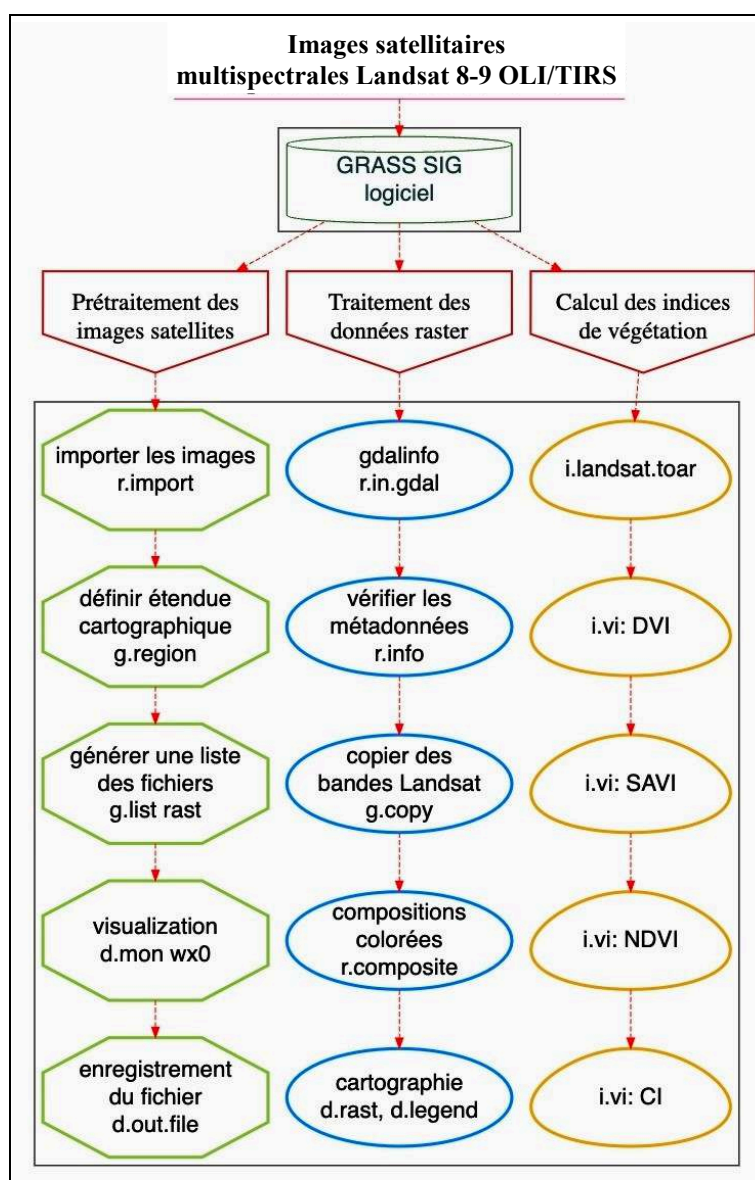
```

# calculer l'indice, par exemple le DVI :
g.region raster=lsat8_2021_toar.1 -p
i.vi blue=lsat8_2021_toar.2 red=lsat8_2021_toar.4 nir=lsat8_2021_toar.5 viname=dvi
output=lsat8_2021.dvi --overwrite
r.colors lsat8_2021.dvi color=bcyr -e

# visualiser la carte, par exemple pour les valeurs de -0,1 à 0,3 :
d.mon wx0
d.rast lsat8_2021.dvi
d.legend raster=lsat8_2021.dvi range=-0.1,0.3 title="DVI-2021" title_fontsize=14
font="Helvetica" fontsize=12 -t -b bgcolor=white label_step=0.02 border_color=white thin=8
-d
d.out.file output=ZA_DVI_2021 format=jpg --overwrite

```

Annexe 2 - Modèle conceptuel de la chaîne méthodologique.



Logiciel : RStudio.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEOLA A.M., OLWOCH J.M., BOTAI J.O., DEW RAUTENBACH C.J., KALUMBA A.M., TSELA P.L, ADISA O.M. et NSUBUGA F.W.N. (2017) - Landsat satellite derived environmental metric for mapping mosquitoes breeding habitats in the Nkomazi municipality, Mpumalanga Province, South Africa. *South African Geographical Journal*, vol. 99, n° 1, p. 14-28.
- AMAT J.P. et HOTYAT M. (1985) - Paysage forestier et télédétection. *Revue Géographique de l'Est*, vol. 25, n° 4 "Du paysage aux paysages", p. 379-389.
- AUDA Y. (2018) - *Systèmes d'information géographique Cours et exercices corrigés avec les logiciels libres Grass et Qgis*. Édit. Dunod, collection "Sciences Sup", Paris, 212 p.
- BARDINET C. (1992) - Place de la télédétection dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour le "Global Change". *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, vol 69, n° 5, p. 359-373.
- BARDINET C. et TRICART J. (1981) - Télédétection - Géographie. *Annales de Géographie*, vol. 90, n° 499. p. 257-259.
- BARIOU R. (1992) - Télédétection et géographie. *Norois*, vol. 39, n°155, p. 251-254.
- BESSINGER M., LÜCK-VOGEL M., SKOWNO A. et CONRAD F. (2022) - Landsat-8 based coastal ecosystem mapping in South Africa using random forest classification in Google Earth Engine. *South African Journal of Botany*, vol. 150, n° 2, p. 928-939.
- BHAGA T.D., DUBE T., SHEKEDE M.D. et SHOKO C. (2023) - Investigating the effectiveness of Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI satellite data in monitoring the effects of drought on surface water resources in the Western Cape Province, South Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 32, article 101037.
- BOMHARD B., RICHARDSON D.M., DONALDSON J.S., HUGHES G.O., MIDGLEY G.F., RAIMONDO D.C., REBELO A.G., ROUGET M. et THULLER W. (2005) - Potential impacts of future land use and climate change on the Red List status of the *Proteaceae* in the Cape Floristic Region, South Africa. *Global Change Biology*, vol. 11, n° 9, p. 1452-1468.
- CASTAÑEDA C., HERRERO J. et AUXILIADORA CASTERAD M. (2005) - Landsat monitoring of playa-lakes in the Spanish Monegros desert. *Journal of Arid Environments*, vol. 63, n° 2, p. 497-516.
- CHAMIZO S., STEVENS A., CANTÓN Y., MIRALLES I., DOMINGO F. et VAN WESEMAEL B. (2012) - Discriminating soil crust type, development stage and degree of disturbance in semiarid environments from their spectral characteristics. *European Journal of Soil Science*, vol. 63, n° 1, p. 42-53.
- CHEN Y., LI X., LIU X. et AI B. (2013) - Analyzing land-cover change and corresponding impacts on carbon budget in a fast developing sub-tropical region by integrating MODIS and Landsat TM/ETM+ images. *Applied Geography*, vol. 45, p. 10-21.
- CHEUNG Y., PANG M., LIN H. et LEE C.K.J. (2011) - Enable spatial thinking using GIS and satellite remote sensing - A teacher-friendly approach. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, vol. 21, p. 130-138.
- COX H., KELLY K. et YETTER L. (2014) - Using remote sensing and geospatial technology for climate change education. *Journal of Geoscience Education*, vol. 62, n° 4, p. 609-620.
- DUBE T. et MUTANGA O. (2015) - Evaluating the utility of the medium-spatial resolution

- Landsat 8 multispectral sensor in quantifying aboveground biomass in uMgeni catchment, South Africa. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 101, p. 36-46.
- DURBIANO C. (1981) - La télédétection et l'information agricole. *Méditerranée*, 3^{ème} série, vol. 42, n° 2-3 : "Télédétection II", sous la direction de P. OLIVA, p. 98-99.
- FAGAN M.E. et DEFRIES R.S. (2024) - Remote sensing and image processing. In : *Encyclopedia of Biodiversity*, S.M. SHEINER édit., Édit. Elsevier, 3^{ème} édition, tome 5, p. 432-445.
- FRÉMONT A. (1984) - La télédétection spatiale et la géographie en France aujourd'hui. *L'Espace Géographique*, vol. 13, n° 3, p. 285-287.
- GRASS Development Team (2023) - *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) software, version 8.3*. Édit. Open Source Geospatial Foundation, en ligne : <https://grass.osgeo.org/grass83/manuals/index.html>.
- GRONER V.P., OWEN N., TAFADZWANASHE M., SLOTOW R., REŞIT AKÇAKAYA H., MACE G.M. et PEARSON R.G. (2022) - Climate change, land cover change, and overharvesting threaten a widely used medicinal plant in South Africa. *Ecological Applications*, vol. 32, n° 4, article e2545.
- HEBINCK P., FAY D. et KONDLO K. (2011) - Land and agrarian reform in South Africa's Eastern Cape Province: caught by continuities. *Journal of Agrarian Change*, vol. 11, n° 2, p. 220-240.
- HUETE A.R. (1988) - A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, n° 1, p. 295-309.
- JAURO T.I., TESFAMICHAEL S.G. et RAMPEDI I.T. (2020) - Tracking conservation effectiveness in the Vhembe Biosphere Reserve in South Africa using Landsat imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, article 469, 22 p.
- JOLY G. (1982) - Le traitement d'image de télédétection au laboratoire de géographie de l'école normale supérieure. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, vol. 489-490, p. 274-276.
- KARNIELI A. (1997) - Development and implementation of spectral crust index over dune sands. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, n° 6, p. 1207-1220.
- KING G.Q. (1991) - Geography and GIS Technology. *Journal of Geography*, vol. 90, n° 2, p. 66-72.
- LAMB D.W. et BROWN R.B. (2001) - PA - Precision Agriculture: remote-Sensing and mapping of weeds in crops. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 78, n° 2, p. 117-125.
- LEMENKOVA P. (2023-a) - A GRASS GIS scripting framework for monitoring changes in the ephemeral salt lakes of chotts Melrhir and Merouane, Algeria. *Applied System Innovation*, vol. 6, n° 4, article 61, 25 p.
- LEMENKOVA P. (2023-b) - Using open-source software GRASS GIS for analysis of the environmental patterns in Lake Chad, Central Africa. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, vol. 74, n° 1, p. 49-64.
- LEMENKOVA P. (2023-c) - Monitoring seasonal fluctuations in saline lakes of Tunisia using earth observation data processed by GRASS GIS. *Land*, vol. 12, n° 11, article 1995, 24 p.
- LOTTERING S., MAFONGOYA P. et LOTTERING R. (2022) - Detecting and mapping drought severity using multi-temporal Landsat data in the uMsinga region of KwaZulu-Natal, South Africa. *Geocarto International*, vol. 37 n° 6, p. 1574-1586.

-
- MABUDA M.O., SHOKO C., DUBE T. et MAZVIMAVI D. (2024) - An analysis of the effects of changes in land use and land cover on runoff in the Luvuvhu catchment, South Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 33, article 101144.
- MANI S., OSBORNE C.P. et CLEAVER F. (2021) - Land degradation in South Africa: justice and climate change in tension. *People and Nature*, vol. 3, n° 5, p. 978-989.
- MASUBELELE M.L., HOFFMAN M.T. et BOND W.J. (2015) - A repeat photograph analysis of long-term vegetation change in semi-arid South Africa in response to land use and climate. *Journal of Vegetation Science*, vol. 26, n° 5, p. 1013-1023.
- MEADOWS M.E. et HOFFMAN T.M. (2003) - Land degradation and climate change in South Africa. *Geographical Journal*, vol. 169, n° 2, p. 168-177.
- MELLENDEZ-PASTOR I., NAVARRO-PEDREÑO J., GÓMEZ I. et KOCH M. (2010) - Detecting drought induced environmental changes in a Mediterranean wetland by remote sensing. *Applied Geography*, vol. 30, n° 2, p. 254-262.
- MINN M., CUTTS B.B., GREENBERG J.A., PAVLOVIC N., FRATERRIGO J.M., KELLY TURNER V. (2015) - Detection of foreclosure-related landscape management changes using Landsat. *Applied Geography*, vol. 62, p. 217-224.
- MUNYATI C. et MAKGALE D. (2009) - Multitemporal Landsat TM imagery analysis for mapping and quantifying degraded rangeland in the Bahurutshe communal grazing lands, South Africa. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, n° 14, p. 3649-3668,
- MUNYATI C. et RATSHIBVUMO T. (2010) - Differentiating geological fertility derived vegetation zones in Kruger National Park, South Africa, using Landsat and MODIS imagery. *Journal for Nature Conservation*, vol. 18, n° 3, p. 169-179.
- MUNYATI C., RATSHIBVUMO T. et OGOLA J. (2013) - Landsat TM image segmentation for delineating geological zone correlated vegetation stratification in the Kruger National Park, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 55-57, p. 1-10.
- NETELER M. et MITASOVA M., sous la direction de (2008) - *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Édit. Springer, 3^{ème} édition, New York (USA), XX + 406 p.
- NWAILA G.T., ZHANG S.E., BOURDEAU J.E., GHORBANI Y. et CARRANZA E.J.M. (2022) - Artificial intelligence-based anomaly detection of the Assen iron deposit in South Africa using remote sensing data from the Landsat-8 Operational Land Imager. *Artificial Intelligence in Geosciences*, vol. 3, p. 71-85.
- NZUZA P., RAMOELO A., ODINDI J., MWENGE KAHINDA J.M. et LINDEQUE L. (2022) - A triangulation approach for assessing and mapping land degradation in the Lepellane catchment of the greater Sekhukhune District, South Africa. *South African Geographical Journal*, vol. 104, n° 4, p. 514-538,
- OBAID A.A., ALI K.A., ABIYE T.A. et ADAM E.M. (2021) - Assessing the utility of using current generation high-resolution satellites (Sentinel 2 and Landsat 8) to monitor large water supply dam in South Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 22, article 100521.
- O'LAUGHLIN B., BERNSTEIN H., COUSINS B. et PETERS P.E. (2013) - Introduction: agrarian change, rural poverty and land reform in South Africa since 1994. *Journal of Agrarian Change*, vol. 13, p. 1-15.
- PAYET K., ROUGET M., ESLER K.J., REYERS B., REBELO T., THOMPSON M.W. et VLOK J.H.J. (2013) - Effect of land cover and ecosystem mapping on ecosystem-risk assessment in the

- Little Karoo, South Africa. *Conservation Biology*, vol. 27, n° 3, p. 531-541.
- PEERBHAY K., GERMISHUIZEN I. et ISMAIL R. (2019) - Can remote sensing detect, monitor and track baboon-damaged Pinus plantations located in South Africa? *Journal of Spatial Science*, vol. 64, n° 3, p. 535-549.
- PEI T., XU J., LIU Y., HUANG X., ZHANG L., DONG W., QIN C., SONG C., GONG J. et ZHOU C. (2021) - GIScience and remote sensing in natural resource and environmental research: Status quo and future perspectives. *Geography and Sustainability*, vol. 2, n° 3, p. 207-215.
- RÖDER A., KUEMMERLE T. et HIL J. (2005) - Extension of retrospective datasets using multiple sensors. An approach to radiometric intercalibration of Landsat TM and MSS data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 95, n° 2, p. 195-210.
- SELL A.F., von MALTITZ G.P., AUDEL H., BIASTOCH A., BODE-DALBY M., BRANDT P., DUNCAN S.E. *et al.* (2024) - Unique Southern African terrestrial and oceanic biomes and their relation to steep environmental gradients. In : *Sustainability of Southern African ecosystems under global change*, G.P. von MALTITZ, G.F. MIDGLEY, J. VEITCH, C. BRÜMMER, R.P. RÖTTER, F.A. VIEHBERG et M. VESTE édit., Édit. Springer, collection "Ecological studies", vol. 248, Cham (Suisse), p. 23-88.
- TOFFA Y., IDOHO R. et FANDOHAN A.B. (2022) - Modélisation de la distribution des espèces en Afrique : état de l'art et perspectives. *Physio-Géo*, vol. 17, p. 43-65.
- TUCKER C.J. (1979) - Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, vol. 8, n° 2, p. 127-150.
- VENTER Z.S., SCOTT S.L., DESMET P.G. et HOFFMAN M.T. (2020) - Application of Landsat-derived vegetation trends over South Africa: potential for monitoring land degradation and restoration. *Ecological Indicators*, vol. 113, article 106206.
- WANG Z., WU B., MA Z., ZHANG M., ZENG H. et YANG L. (2023) - Spectral determinants of biological soil crusts in the Gurbantungut Desert. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 44, n° 7, p. 2273-2293,
- WEBER B., OLEHOWSKI C., KNERR T., HILL J., DEUTSCHEWITZ K., WESSELS D.C.J., EITEL B. et BÜDEL B. (2008) - A new approach for mapping of Biological Soil Crusts in semidesert areas with hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, n° 5, p. 2187-2201.

Article soumis le 6 décembre 2023.

Accepté après révision le 26 mars 2024.

Mis en ligne, après échanges avec le directeur de publication, le 26 mai 2024.