



Disparition annoncée du Lac de Salt Lake City

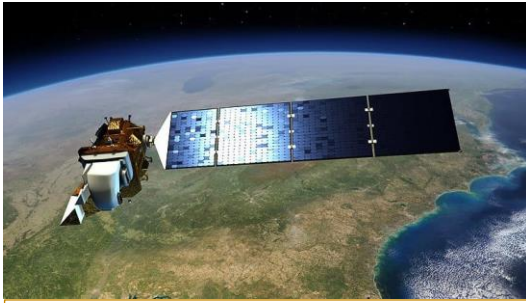
TRAVAIL SUR LA BAISSSE DU NIVEAU D'EAU DU PLUS GRAND LAC DE L'UTAH,
AUX ETAT-UNIS

Table des matières

Les caractéristiques des satellites et des images	2
Compositions colorées	5
Analyse des signatures spectrales	9
Validation de la classification avec les méthodes statistiques (indice de Kappa)	10
Classification supervisée	12
Analyse des changements	15
Les causes socio-économiques de ces changements	17
Conclusion	18

Les caractéristiques des satellites et des images

1. Les caractéristiques optiques de Landsat-8



Satellite Landsat-8 en orbite, (<https://www.onda-dias.eu/>)

Le satellite Landsat-8 a été lancé le 11 février 2013. Ce satellite est le fruit d'une collaboration entre deux agences : la NASA et United States Geological Survey (USGS). Landsat est un programme d'observation de la Terre qui se base sur les images de 8 satellites déjà en orbites.

Ce satellite dispose de deux capteurs : un Imageur Fonctionnel de la Terre (OLI) et d'un Capteur Infrarouge Thermique (TIRS)

La résolution spatiale est la taille du plus petit élément qu'il est possible de distinguer sur l'image. Elle est également couramment définie comme étant la taille du pixel. Le satellite Landsat-8 tourne autour de la terre en Héliosynchrone, en tenant compte d'une distance de 170km sur 185km par images, avec une inclinaison de 98.2 degrés. Par ailleurs, on observe pour Landsat-8 une capacité de 14 orbites complètes par jour.

La résolution spectrale est la capacité d'un capteur à distinguer deux longueurs d'ondes voisines. La partie du spectre à laquelle est sensible le capteur constitue la largeur de bande. Plus la largeur de bande est élevée et moins le capteur peut discriminer des longueurs d'ondes voisines. On parle de haute résolution spectrale la largeur de bande est étroite de basse résolution spectrale lorsque la largeur de bande est importante. Sur le satellite landsat-8 on dispose de 11 bandes spectrales, dont 9 visibles. Sur ces bandes visibles 8 sont dites multispectrales disposant d'une résolution de 30 mètres, autrement dit un pixel représente un carré de 30m sur 30m sur Terre. Une autre bande est dite panchromatique avec une résolution de 15m.

La résolution temporelle d'un capteur, ici Landsat-8, est sa faculté à fournir des informations espacées dans le temps sur un changement géographique. De surcroît, plus la résolution temporelle est grande, plus la perception temporelle d'un changement est précise. Concernant Landsat-8, la résolution temporelle s'établit à un passage à tous les 16 jours sur un même endroit, offrant une grande résolution temporelle.

Pour terminer, Landsat-8 offre également **une résolution radiométrique**. Cette résolution correspond à la capacité d'un capteur à distinguer deux quantités d'énergies voisines. Sur les 11 bandes spectrales, deux sont destinées à une résolution thermique, avec une résolution de 60 mètres. Cette partie de résolution est assurée par le capteur OLI, produisant des images brutes à hauteur de 12bits, ce qui correspond à 4096 niveaux de gris différents.

Satellite	Capteur	Bande	Longueur des Bandes en μm	Amplitude	Résolution spatiale
Landsat 8	OLI	Band 1 Visible	0.43 - 0.45	0,02	30
		Band 2 Visible	0.45 - 0.51	0,06	30
		Band 3 Visible	0.53 - 0.59	0,06	30
		Band 4 Red	0.64 - 0.67	0,03	30
		Band 5 Near-Infrared	0.85 - 0.88	0,03	30
		Band 6 SWIR 1	1.57 - 1.65	0,08	30
		Band 7 SWIR 2	2.11 - 2.29	0,18	30
		Band 8 Panchromatic (PAN)	0.50 - 0.68	0,18	15
		Band 9 Cirrus	1.36 - 1.38	0,02	30
	TIRS	Band 10 TIRS 1	10.60 - 11.19	0,59	100
		Band 11 TIRS 2	11.50 - 12.51	10,01	100

2. Les caractéristiques optiques de Landsat-5



Satellite Landsat-5 en dessin,
(<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-5/>)

Le satellite Landsat 5 a été lancé le 1^{er} Mars 1985, il transporte les instruments MSS (Multispectral Scanner) et TM (Thematic Mapper). Il a fourni pendant presque 29 ans des images. Il est d'ailleurs le recordman de longévité du satellite d'observation de la Terre le plus long en fonctionnement. Il aura effectué 150 000 fois le tour de la Terre et réalisé plus de 2,5 millions de clichés de la surface de la planète.

La résolution spatiale est comprise entre 185 * 172 km avec une inclinaison de 98,2°. Toujours en héliosynchrone, le satellite permet d'avoir une révolution de 14,5 pat jours. Par ailleurs il parcourt un temps complet de la terre en seulement 98,9 min.

La résolution spectrale de Landsat 5 correspond à une taille de pixel de 57x59 mètres. Elle correspond à l'intervalle d'échantillonnage au sol. De plus, Landsat5 dispose de 7 bandes, les 3 premières dans le visible, les bandes 4 et 5 dans le proche infrarouge. La bande 6 dans le thermique et la Bande 7 dans l'infrarouge moyen.

La résolution temporelle de Landsat 5 s'établie à une fréquence de passage de 16 jours.

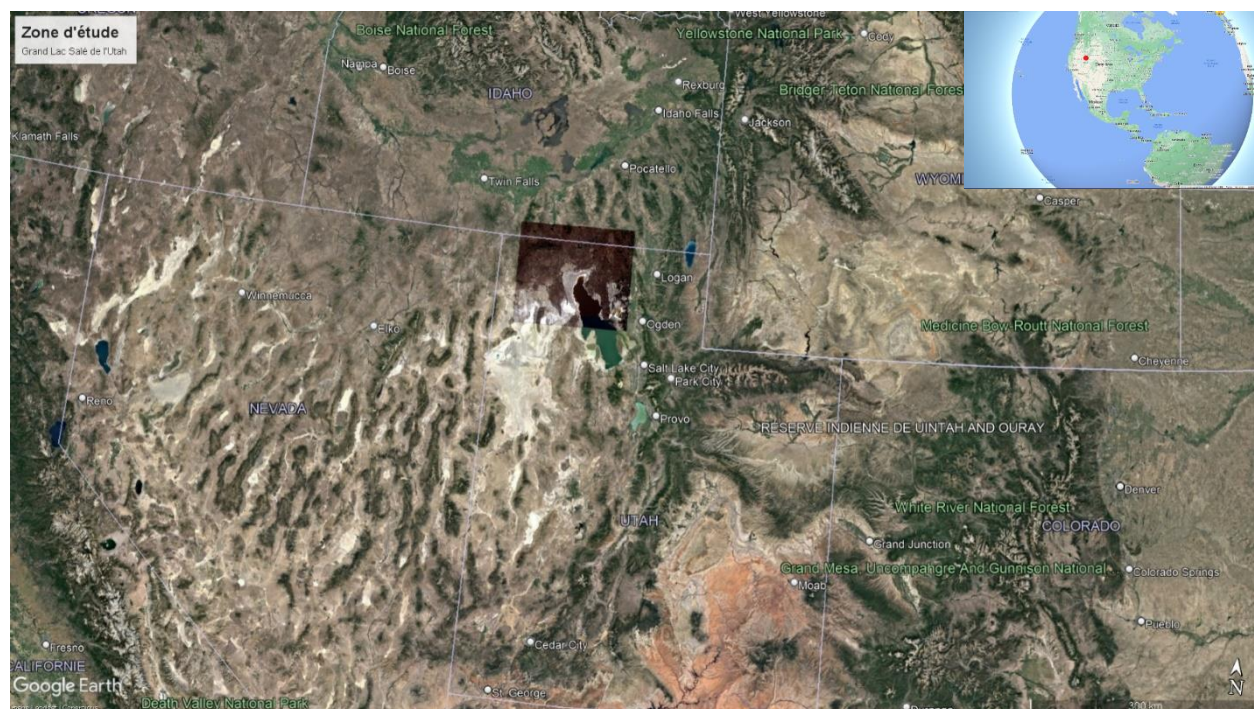
La résolution radiométrique de Landsat 5 s'établie à 8bits qui correspond à 256 niveaux de gris.

<i>Satellite</i>	<i>Capteur</i>	<i>Bande</i>	<i>Longueur des Bandes en μm</i>	<i>Résolution spatiale</i>
Landsat 5	TM (Thematic Mapper)	Band 1 - Blue	0.45-0.52	30
		Band 2 - Green	0.52-0.60	30
		Band 3 - Red	0.63-0.69	30
		Band 4 Near Infrared (NIR)	0.76-0.90	30
		Band 5 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.55-1.75	30
		Band 6 - Thermal	10.40-12.50	120*(30)
		Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.08-2.35	30

3. Le territoire occupé

Salt Lake City porte ce nom en raison de sa proximité avec le grand lac salé qui a pour superficie 4400 km² (en moyenne). Sa taille est due essentiellement à toute l'eau qu'il a accumulé depuis des millénaires. Il est considéré alors comme le 4^{ème} plus grand lac endoréique du monde, autrement dit, il n'est pas relié à une mer. Sa plus grande particularité est sa salinité du fait de sa particularité qu'il n'est relié à aucune mer, son eau ne peut sortir de cette cuvette que par évaporation ou pompage. Il est par ailleurs le poumon de vie de la région de l'Utah avec l'alimentation de sa capitale Salt Lake City mais également de toutes les plantations agricoles environnantes.

La région a un climat tempéré continental. Elle subit des saisons chaudes longues avec des températures très élevées, avec notamment des records de chaleurs allant jusqu'à plus de 40° sur les mois de juin à Aout. Les précipitations sont relativement peu nombreuses sur l'ensemble de l'année. Par ailleurs, avec un lac de cette taille le climat est aussi affecté, 8% des précipitations sur les chaînes de montagnes aux alentours sont dues aux lacs qui permet la formation de nuages avec le phénomène d'évapotranspiration.



Aujourd'hui le lac est à son niveau le plus bas depuis les premières observations de 1875. Cela est dû aux captages nombreux pour alimenter Salt Lake City mais également les zones agricoles. L'Utah est l'Etat consommant le plus d'eau par habitants avec 750 litres d'eau, en 2015. Le lac a perdu presque 44% de sa surface, d'autant plus que le lac est aujourd'hui coupé en deux avec la ligne de chemin de fer passant en plein milieu et créant un différentiel de 60 mm d'hauteur d'eau entre les deux côtés.

4. *Méthodologie des traitements.*

Pour le téléchargement de ces images, nous avons utilisé la plateforme gouvernementale Etatsunienne USGS. C'est une plateforme d'institut géologique des Etats-Unis, liée aux sciences de la terre. Elle produit aussi de nombreuses cartes. De part cette plateforme nous pouvons donc télécharger des produits de la gamme Landsat allant du premier satellite au Landsat 9. Via une carte interactive projetant le globe terrestre, nous avons la possibilité d'obtenir des images de nombreux endroits en vue satellitaire.

Ainsi, pour le téléchargement des images nous avons opté pour le Nord-Ouest où se trouve les surfaces ayant eu la plus grosse baisse d'eau. Nous avons donc choisi pour le téléchargement les plages de dates allant des années 85 aux années 2000 pour Landsat 5 avec un indice de **couverture nuageux de maximum 0%**. Pour Landsat 8, nous avons pris de 2010 à 2022. De plus, aux vues des temps météorologique nous avons opté pour la période estivale allant du mois de juillet à septembre dans cette partie du globe permettant de réduire au maximum la présence de nuages et déterminer les plages temporelles du lac lorsque les sécheresses sont les plus importantes, **toujours avec 0% de couverture nuageuse.**

Pour le choix des prétraitements, nous avons opté pour le choix des collections 2 level 1-T1, les images sont projetées dans le **système de projection : EPSG : 32612 – WGS 84 / UTM zone 12N**. Nous avons également gardé ce même système de projection pour toutes les couches créées par la suite. La précision de ce système est de 2 mètres aux mieux. La résolution est de 7881 pixels de largeurs et 7991 de hauteurs ce qui donne 63 millions de pixels. Ainsi pour connaître la superposition, il faut multiplier cette hauteur et largeur par 30 soit la résolution de Landsat, ce qui donne 236 kilomètres de largeurs sur 239 kilomètres, **la surface est de 56 404 en km².**

*De ces images « sources », nous avons **découpé** sur QGIS la zone qui nous intéressait, celle proche du lac. Ainsi nous sommes arrivés à une zone de 12 000 km²*

Par la suite après avoir eu toutes les bandes d'images découpées nous les avons stackées une deuxième fois afin d'avoir le dernier stack sur lequel nous allons travailler.

Tous les traitements sur QGIS ont été réalisés sur l'extension SCP développé par Luca Congedo.

Compositions colorées

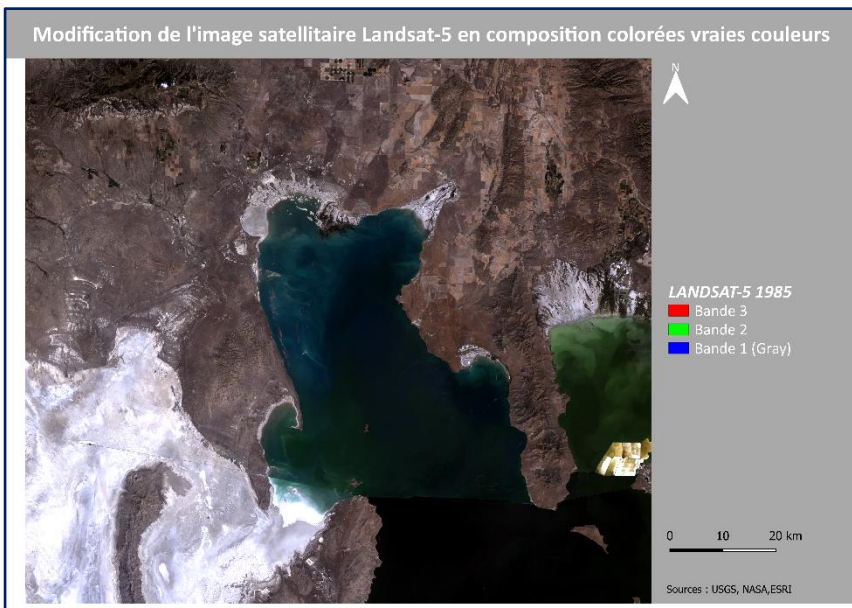
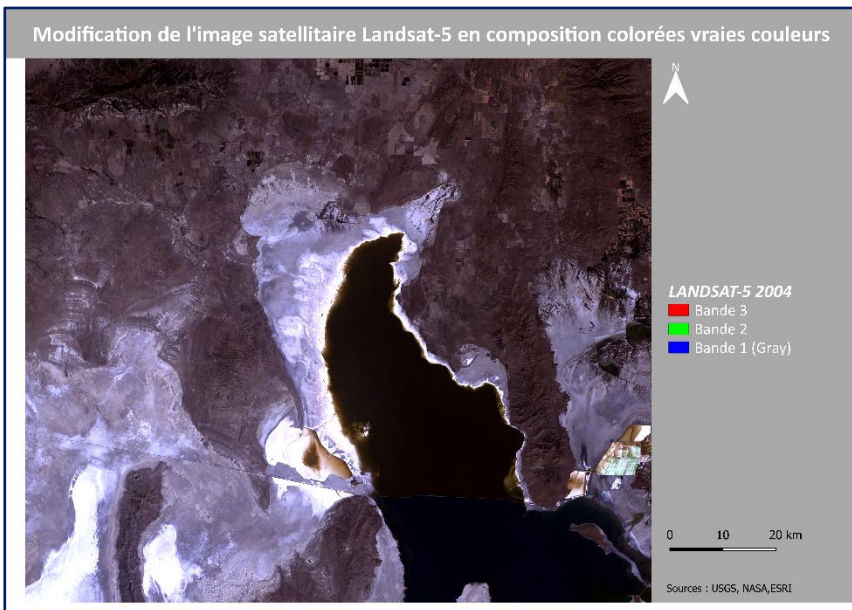
5. Composition en vraies couleurs

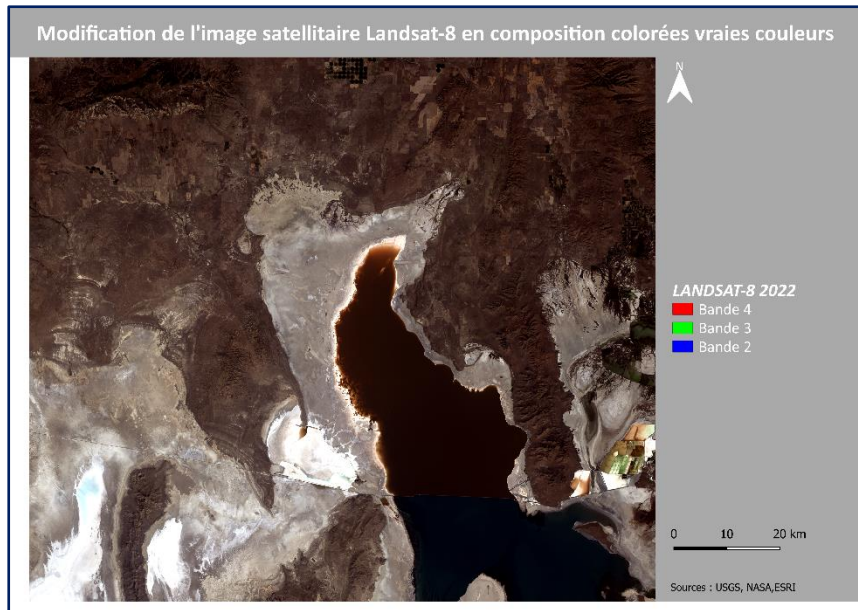
Dans cette partie, nous allons analyser les résultats pour les compositions colorées pour notre zone d'étude. Pour obtenir ces résultats, il suffit de superposer les couleurs de différentes bandes. Ces bandes changent en fonction du résultat souhaité mais aussi du Landsat utilisé. Nos différents choix amènent alors soit à des compositions colorées dites vraies couleurs ou dites fausses couleurs.

Dans un premier temps, nous allons alors regarder les résultats obtenus pour les compositions colorées de vraies couleurs. Il s'agit ici de l'utilisation des bandes du spectre du visible. Le domaine visible de l'œil humain est composé de 3 spectres

lumineux, le rouge, le vert et le bleu. Pour se trouver dans le domaine de la couleur réelle, on associe pour Landsat-8, la bande 4 avec le canal rouge, la bande 3 avec le vert, la bande 2 avec la couleur bleue. Pour Landsat-5 ce domaine du visible est décalé d'une bande en moins en passant du 3 pour le canal rouge, 2 pour le canal vert et 1 pour le canal bleu. **De manière générale, ce décalage de bande va s'opérer sur quasiment toutes les compositions colorées entre les images de Landsat-5 et 8.** Ainsi on peut apprécier les vraies couleurs de l'image satellitaire.

On peut distinguer la couleur la plus sombre qui correspond aux espaces d'eau profonde, cette dernière absorbe les ondes, la réflectance n'est donc pas élevée d'où cette couleur sombre. Pour les zones d'eau peu profonde, on remarque des couleurs plus claires qui vont donc avoir une absorption des rayons plus faibles. On peut aussi remarquer les zones fortement minéralisées qui apparaissent en couleurs très claires sur nos trois résultats. Plus les couleurs sont blanches, plus les zones sont fortement minéralisées. On peut ainsi commencer à distinguer les zones de recul de l'eau. Les surfaces de couleurs plutôt marrons correspondent quant à elles aux surfaces désertiques de notre zone d'étude. Cependant, étant la surface majoritaire présente sur la zone, nous avons du mal à distinguer les surfaces agricoles et végétalisées qui ressortent légèrement en vert.





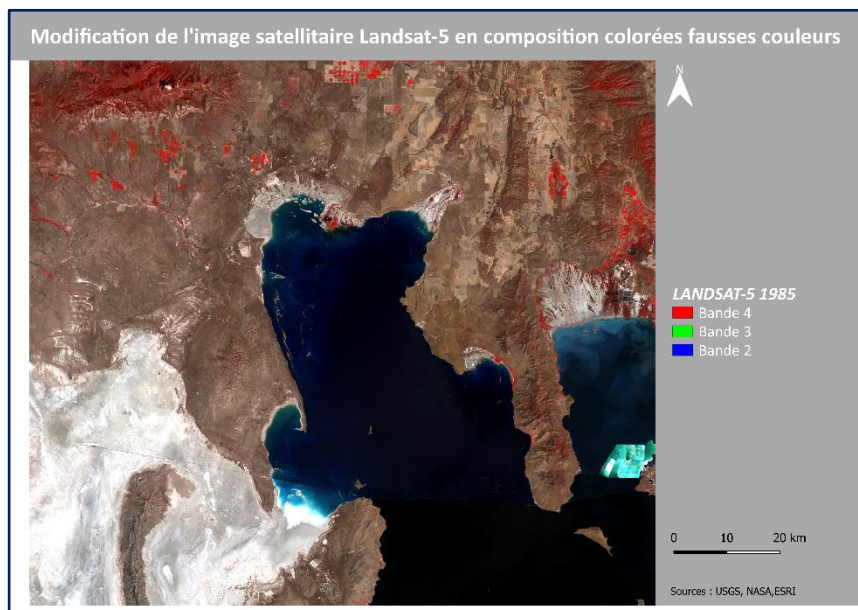
L'analyse de ces trois cartes est similaire malgré des couleurs légèrement différentes. Elles permettent déjà de faire un constat sur le fort recul de l'eau pendant ces 37 années.

Ainsi, comme on peut l'apercevoir les images en couleurs dites naturelles peuvent nous aider à distinguer, nous repérer sur un espace en évolution. Même si la lecture en est plus difficile pour distinguer les éléments de l'image, on peut d'ores et déjà apercevoir des changements sur la taille du lac qui s'en retrouve réduite.

6. Composition en fausses couleurs

Les compositions colorées en **fausses couleurs** vont permettre de dissocier les différentes surfaces de notre zone d'étude. Nous avons donc réalisé 2 cartes en fausse couleur pour nos trois années afin d'approfondir notre analyse. En effet, en ne s'appuyant plus sur les caractéristiques réflectances des couleurs naturelles, mais sur les canaux de l'infrarouge, l'étude des images s'en trouve facilitée. Ainsi, selon la destination des différentes bandes associées aux différents canaux, on peut apercevoir la végétation sous différentes teintes allant d'un vert vif ou vers un rouge.

Le plus important alors est de trouver la bonne association de bande afin de faire ressortir ce qui nous intéresse. Ici, nous avons donc utilisé les combinaisons de bandes sur l'extension SCP de QGIS.

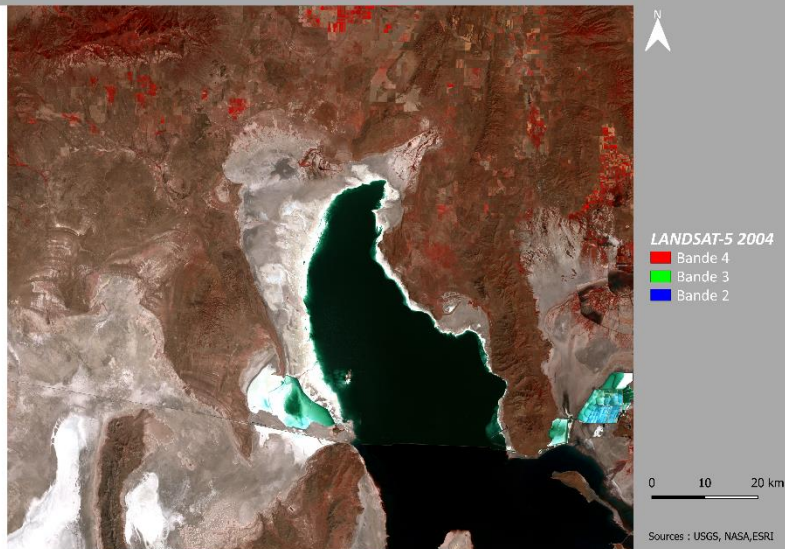


Pour la première composition colorée, l'idée est de faire ressortir les éléments importants de l'analyse de cette image en utilisant l'infrarouge. Ici la bande 4 a été associée sur la bande rouge, la 3 sur la bande verte et la bande 2 sur la couleur bleue. Décalage d'une bande pour landsat-8, mais même principe.

Cette composition colorée permet de voir les sols nus et végétalisés.

Les fortes activités sont repérées dans une teinte rouge plus ou moins vive selon l'activité chlorophyllienne. Le sol nu apparaît comme rouge légèrement rosé. L'eau quant à ressort en bleu plus ou moins clair selon la profondeur.

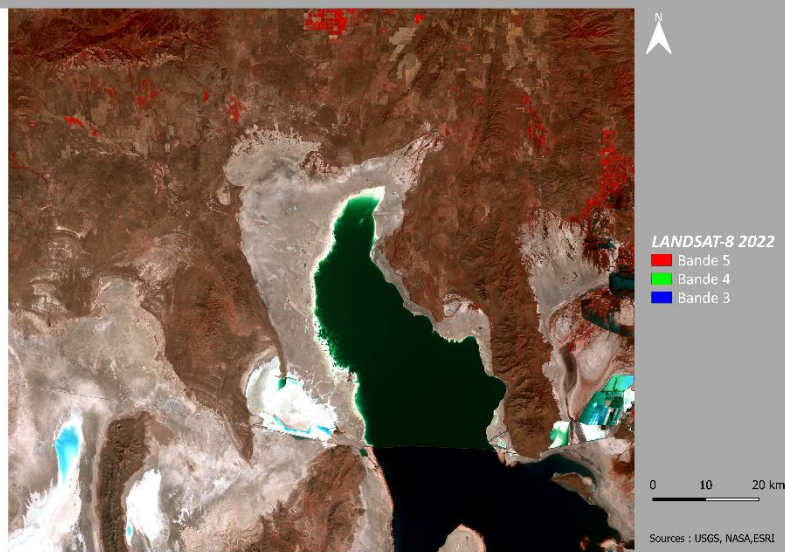
Modification de l'image satellitaire Landsat-5 en composition colorées fausses couleurs



On peut tout d'abord remarquer sur les deux images de 1985 et 2004, une eau peu trouble avec une teinte bleu forte et une teinte verte peu présente. Mais cela est un peu plus troublé tout de même sur l'image de 2004.

Les zones agricoles à forte activité chlorophyllienne restent quant à elles relativement stables sur les 3 images.

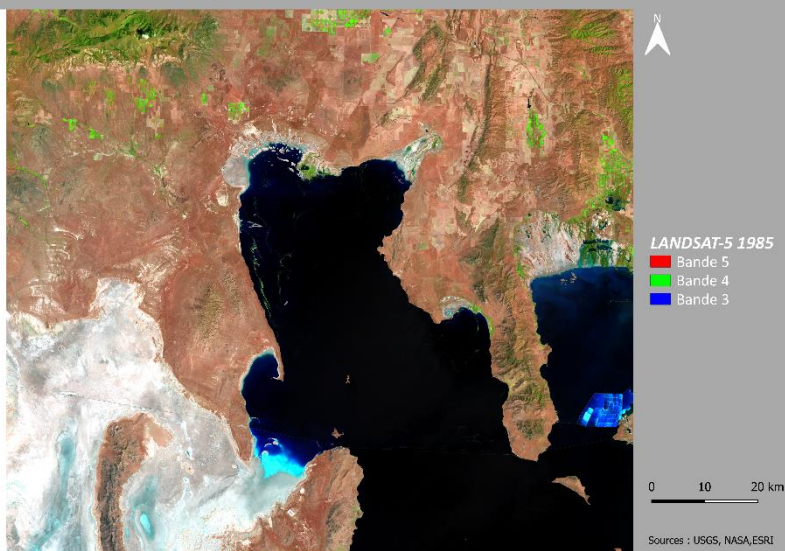
Modification de l'image satellitaire Landsat-8 en composition colorées fausses couleurs



Ici, nous remarquons surtout la turbidité sur les bords du lac, avec une réflectance d'une activité dans la bande du bleu.

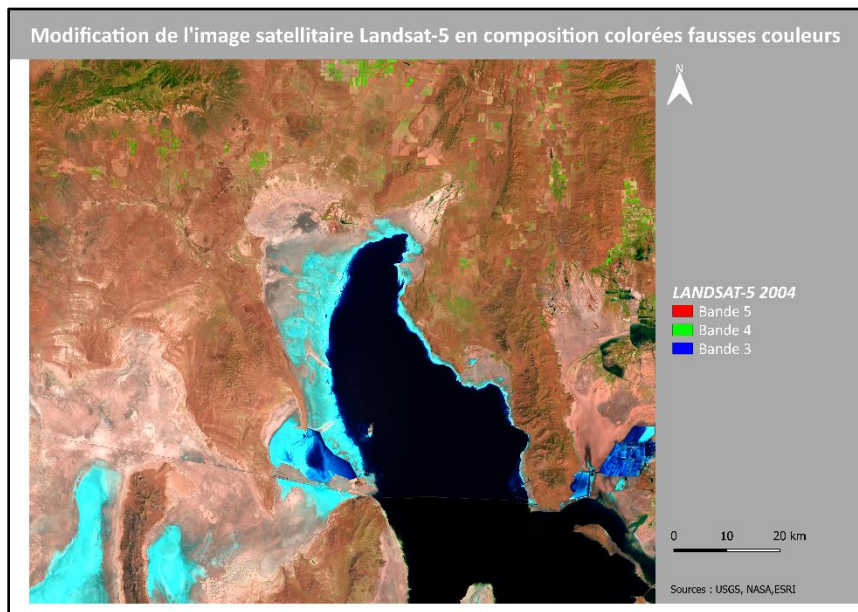
Cette activité est normale dans un lac asséché avec une eau peu profonde mais très trouble, remuant des sédiments.

Modification de l'image satellitaire Landsat-5 en composition colorées fausses couleurs

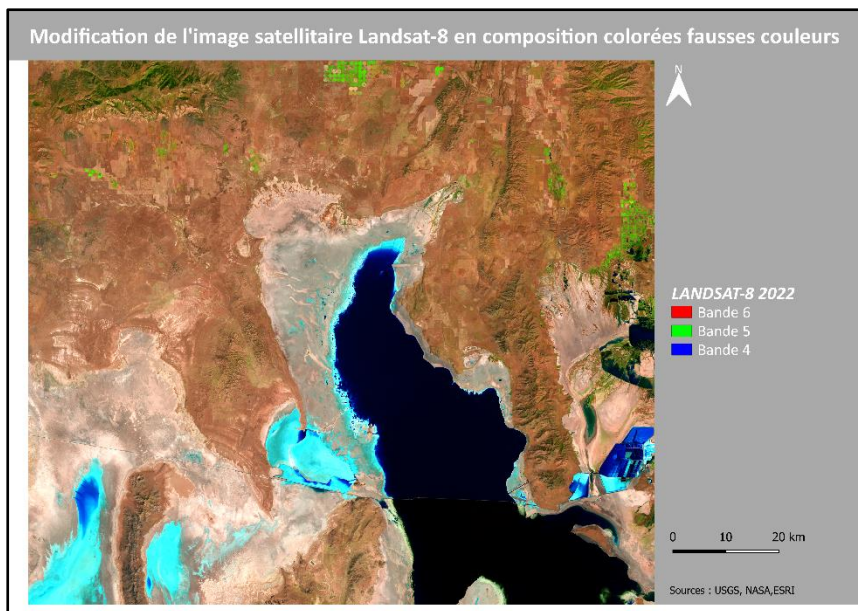


Ici la bande 5 a été associée sur la bande rouge, la 4 sur la bande verte et la bande 3 sur la couleur bleue. Décalage d'une bande pour landsat-8, mais même principe. L'eau est en bleu foncé et l'eau peu profondes en bleu clair.

Cette fois-ci, les surfaces végétalisées et chlorophylliennes ressortent en vert, avec un vert plus foncé pour les zones végétalisées. Ainsi, on peut différencier les principaux foyers végétalisés au Nord-Ouest mais aussi les principales zones d'agriculture en plein Nord et dans la partie Est de notre zone d'étude.



Les choix de la composition colorée mettent davantage en avant le recul de l'eau. En effet, les espaces en bleu très clair correspondent aux surfaces peu profondes, avec un début de recul de l'eau. Ces zones sont très faibles sur l'image de 1985, puis prennent une place plus importante en 2004 avec d'importantes zones d'eau peu profondes. En 2022, ces zones disparaissent pour laisser place à d'importantes zones minéralisées représentées en marron très clair.



Sur cette image les eaux peu profondes sont très nombreuses
Encore plus que sur celles de 2004.

Sur ces deux compositions, on peut apprécier plus convenablement la baisse du niveau général de l'eau dans le Lac. En effet, la turbidité observée avec un vert plus présent sur la composition colorées 5/4/3 de Landsat 8 en 2022 était représentatif d'une eau peu profonde même vers le centre du lac. Cela est confirmé avec la seconde fausses couleurs avec des eaux peu profondes bien plus avancées. Pour cette analyse nous avons regardé les deux images de 2022.

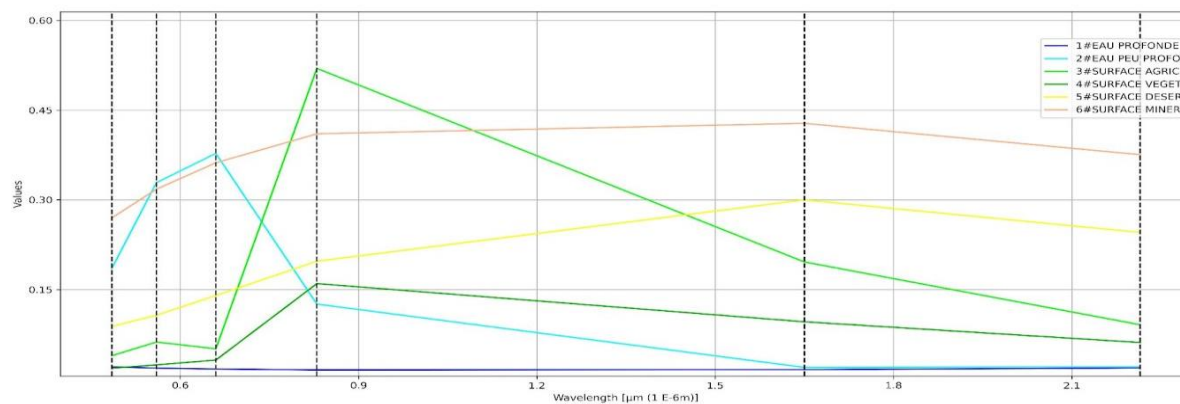
Ces images en fausses couleurs sont très utiles pour effectuer un échantillonnage. En effet, selon la réflectance, on peut distinguer et créer des polygones sur les surfaces qui ont la même couleur. Un échantillonnage doit permettre de généraliser, de simplifier la lecture d'une image en catégorisant les réflectances des pixels. Quand on crée un polygone, il doit contenir des réflectances de pixels relativement similaires, mais au sein d'une classe, d'une MC classes, chaque nuance de pixels pouvant se trouver dans ces classes doivent être représentées. Ici pour exemple, nous avons opté pour le choix de considérer les surfaces agricoles avec une forte activité chlorophyllienne, mais aussi de considérer des sols de cultures nus et ou avec une faible activité chlorophyllienne aussi dans la classe surface agricole. Il nous a fallu donc

prendre plusieurs polygones contenant des pixels de surfaces agricoles nues et des polygones avec des surfaces agricoles avec de l'activité chlorophyllienne.

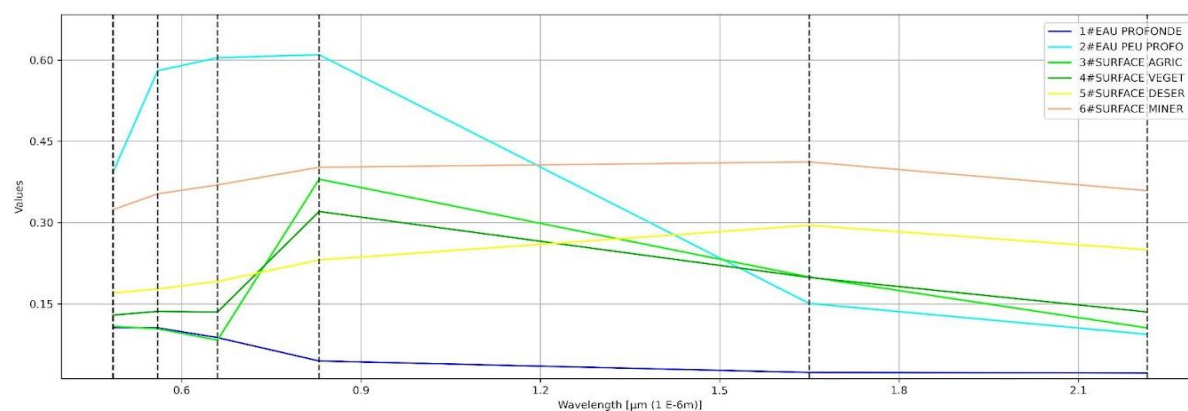
Pour chaque classe, le nombre de polygones a été de 5.

Analyse des signatures spectrales

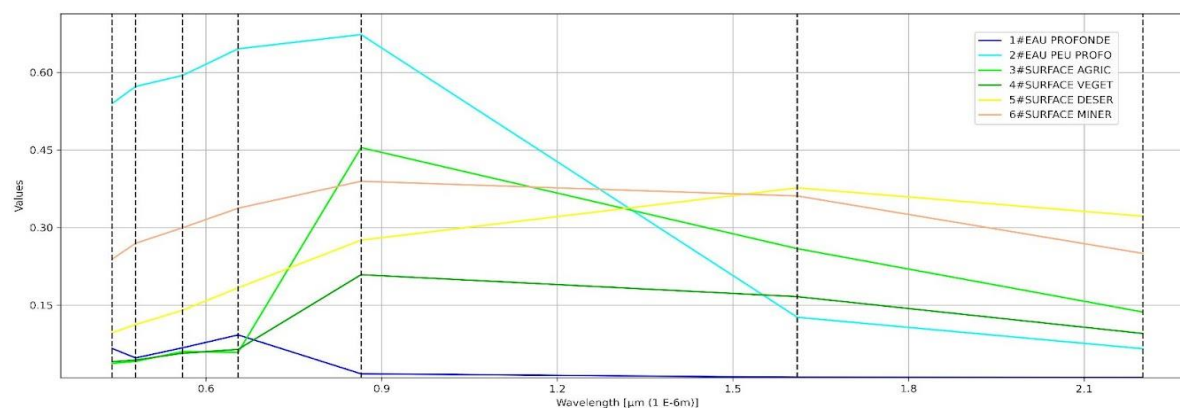
1985



2004



2022



Grâce aux résultats obtenus pour nos différentes signatures spectrales, nous pouvons voir les réflectances de chacune de nos classes faites auparavant. Elles seront par la suite utiles pour nos classifications. La lecture d'une signature est assez simple, plus les courbes sont hautes sur l'axe Y plus leurs réflectances sont fortes. La réflectance correspond à la capacité du sol, de la surface à absorber les rayons, plus elle est forte moins les rayons sont absorbés.

Pour nos trois signatures spectrales, on aperçoit quelques nuances entre les différentes classes que nous avons établies. Tout d'abord, nous pouvons remarquer une forte réflectance sur les quatre première bandes pour les surfaces d'eau peu profonde, c'est-à-dire que sur ces bandes, les rayons sont très faiblement absorbés. A l'inverse si on prend le cas des surfaces d'eau profonde, on s'aperçoit que la réflectance est en majorité très faible sur toutes les bandes, ce type de surface va alors mieux absorber les différents rayons. Pour ce qui est des classes de surface agricole et de surface végétalisée, on remarque un pic sur nos cinquièmes bandes, caractéristique de la végétation. Cependant il est intéressant de préciser que le pic pour les surfaces agricoles est plus élevé dû à une réflectance plus forte. Quant aux réflectances des surfaces désertes et minérales, elles sont relativement similaires sur l'ensemble des bandes et ne varient que légèrement.

Sur les longueurs d'onde d'infrarouge moyen, les réflectances ont tendance à diminuer ou à stagner. Par ailleurs, toutes ces signatures permettent une lecture plus aisée du terrain. En effet, en ayant des fortes réflectances comme ceci l'analyse s'en retrouve facilitée avec de vraie distinction entre le sol minéral et le désert par exemple.

Validation de la classification avec les méthodes statistiques (indice de Kappa)

7. Les classes d'échantillonnages

1. EAU PROFONDE
2. EAU PEU PROFONDE
3. SURFACE AGRICOLE
4. SURFACE VEGETALISEE
5. SURFACE DESERT
6. SURFACE MINERALE

8. Les dates des échantillonnages.

1985

	1	2	3	4	5	6	Area
1	0,2408	0	0	0	0	0	2951013600
2	0	0,0466	0	0	0	0	570975300
3	0	0	0,0591	0,0006	0,0006	0	739669500
4	0,0004	0	0,0032	0,0452	0	0	598275900
5	0	0	0	0	0,4435	0	5435898300
6	0	0,0001	0	0	0	0,1599	1960048800
Total	0,2412	0,0466	0,0623	0,0458	0,4442	0,1599	12255881400
Précision globale [%]99.5075							
Kappa hat classification = 0.9931							

Précision globale [%]99.5075
Kappa hat classification = 0.9931

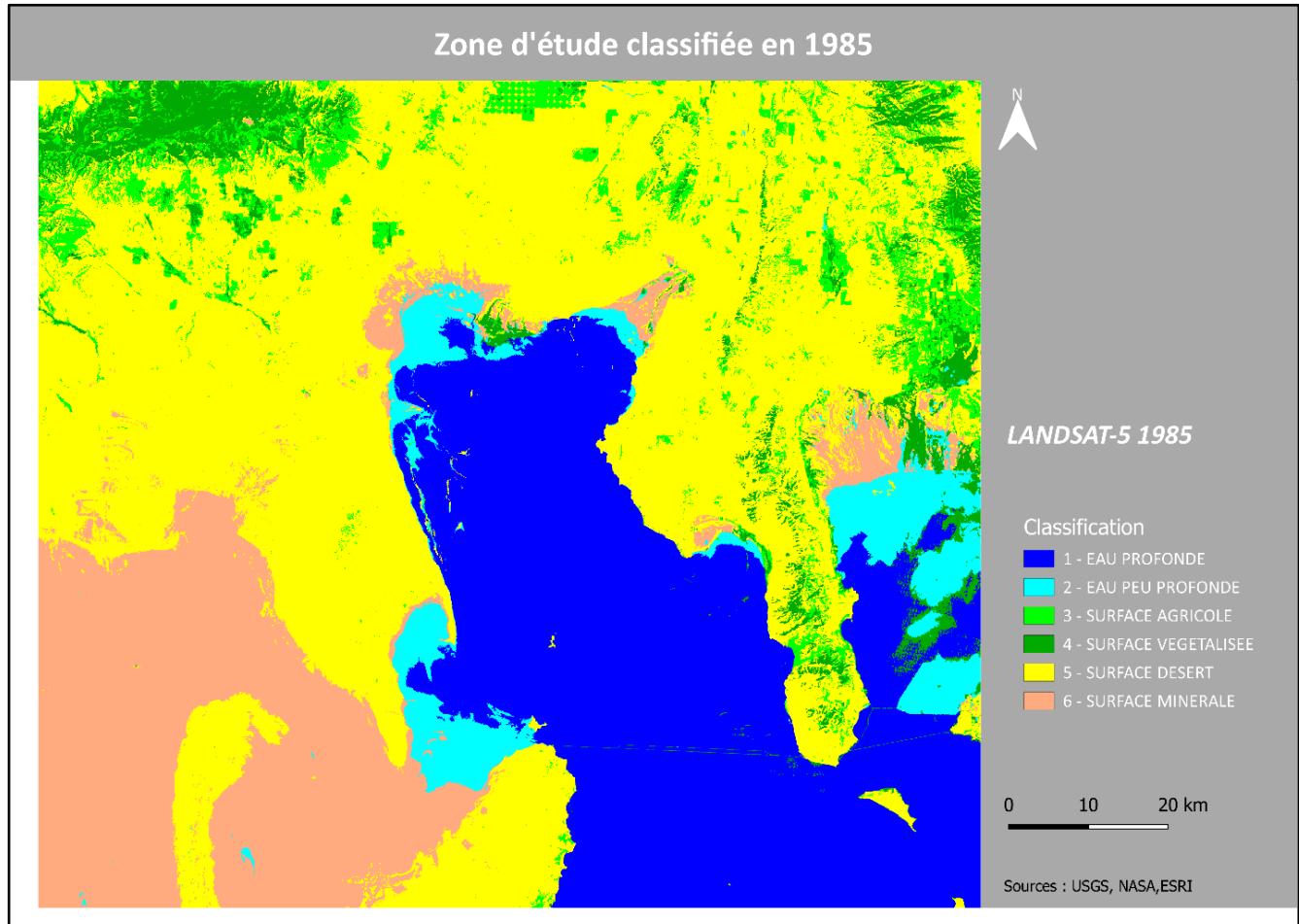
2004

	1	2	3	4	5	6	Area
1	0,1388	0	0	0	0	0	1701576900
2	0	0,0649	0	0	0	0	795713400
3	0	0	0,0789	0,0001	0	0	968486400
4	0	0	0	0,0235	0	0	288382500
5	0	0	0	0	0,4633	0,0253	5988613500
6	0	0,0001	0	0	0	0,205	2513108700
Total	0,1388	0,065	0,0789	0,0237	0,4633	0,2302	12255881400
Précision globale [%]97.4442							
Kappa hat classification = 0.9633							
Précision globale [%]97.4442							
Kappa hat classification = 0.9633							

2022

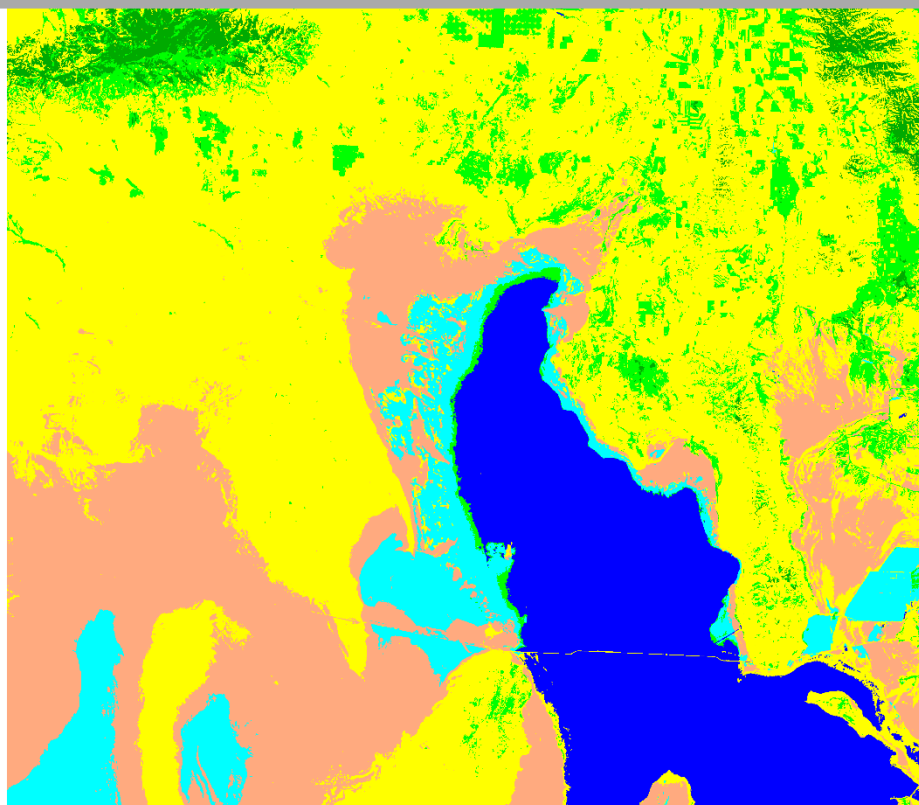
	1	2	3	4	5	6	Area
1	0,1172	0	0	0	0	0	1436947200
2	0	0,0525	0	0	0	0	643878000
3	0	0	0,0931	0,0141	0,0091	0,0005	1430356500
4	0,0003	0	0,0005	0,1124	0,0036	0	1430334000
5	0	0	0	0	0,3256	0,0001	3992180400
6	0	0	0	0	0,0282	0,2429	3322185300
Total	0,1175	0,0525	0,0935	0,1266	0,3664	0,2435	12255881400
Précision globale [%]94.3749							
Kappa hat classification = 0.9272							
Précision globale [%]94.3749							
Kappa hat classification = 0.9272							

Classification supervisée



Le but de notre classification ici est de regrouper les pixels de chaque image en différentes classes que nous établissons. Cela nous permet d'étudier plus précisément les différentes surfaces présentes dans la zone d'étude. Nous avons décidé de mettre en place 6 classes : "Eau profonde", "Eau peu profonde", "Surface agricole", "Surface déserte" et "Surface minérale". Ces six classes nous semblent être les plus intéressantes à étudier au vu de l'évolution du territoire entre 1985 et 2022. ***Après la réalisation de nos trois classifications, nous avons effectué un criblage avec un seuil de taille de 10 et nombres de voisins 4 sur chacune d'entre elles afin de lisser et d'homogénéiser nos résultats.*** Cette manipulation a été faite sur l'extension SCP de QGIS.

Zone d'étude classifiée en 2004



LANDSAT-5 2004

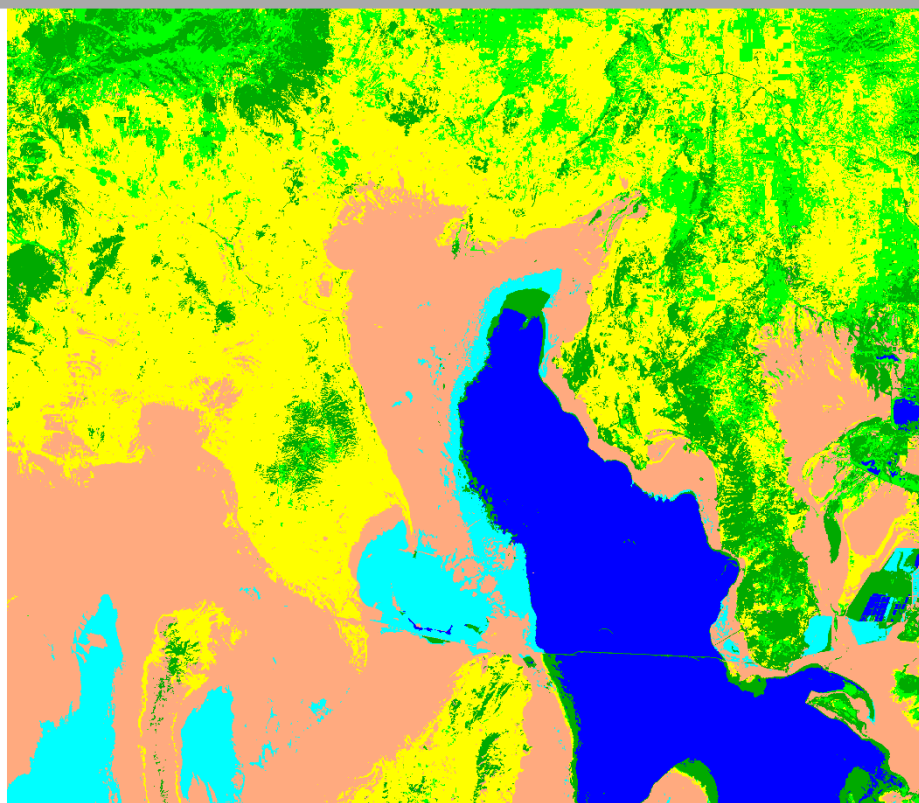
Classification

- 1 - EAU PROFONDE
- 2 - EAU PEU PROFONDE
- 3 - SURFACE AGRICOLE
- 4 - SURFACE VEGETALISEE
- 5 - SURFACE DESERT
- 6 - SURFACE MINERALE

0 10 20 km

Sources : USGS, NASA, ESRI

Zone d'étude classifiée en 2022



LANDSAT-8 2022

Classification

- 1 - EAU PROFONDE
- 2 - EAU PEU PROFONDE
- 3 - SURFACE AGRICOLE
- 4 - SURFACE VEGETALISEE
- 5 - SURFACE DESERT
- 6 - SURFACE MINERALE

0 10 20 km

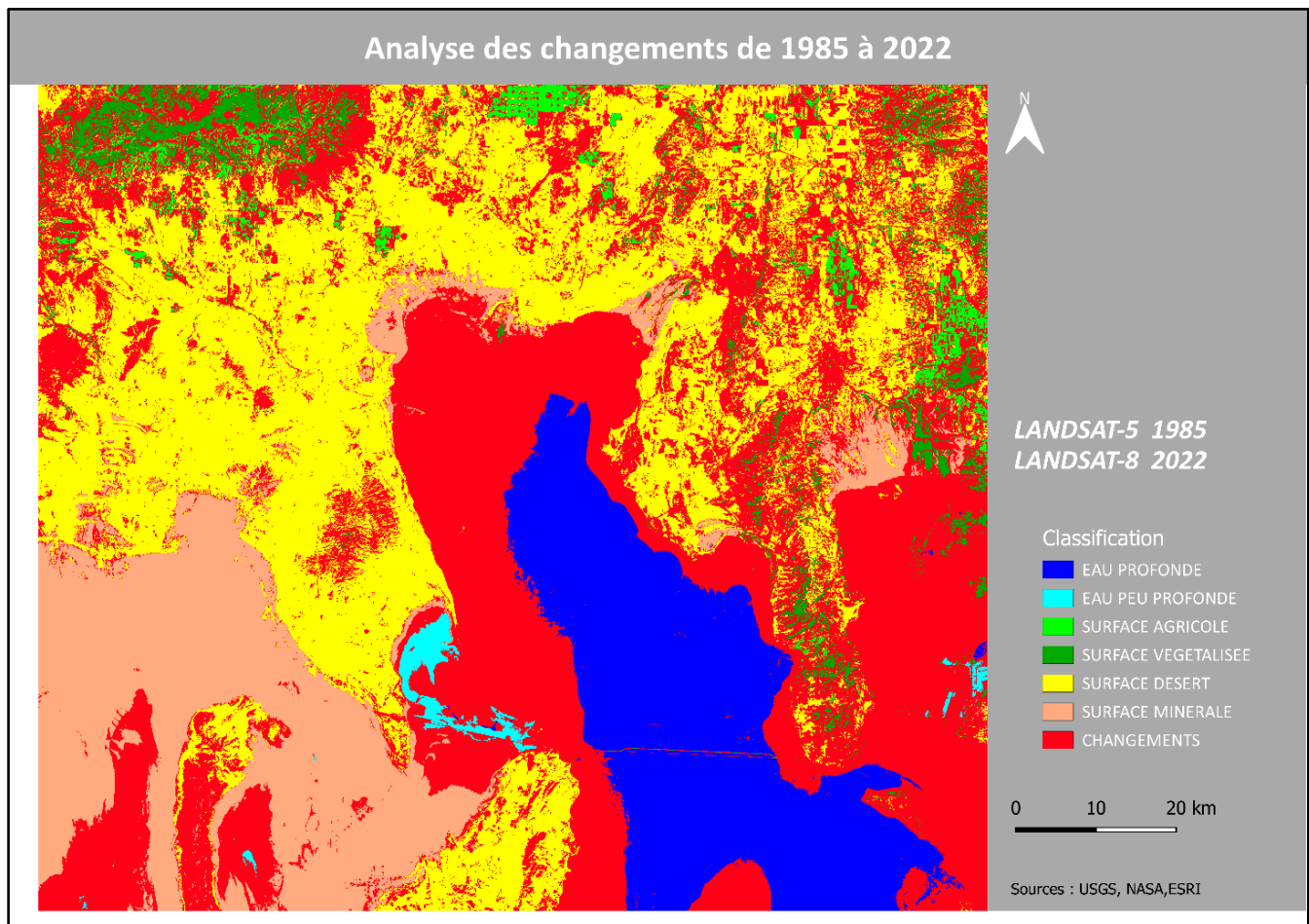
Sources : USGS, NASA, ESRI

On peut maintenant analyser l'évolution des surfaces du sol entre nos trois années. Tout d'abord, en 1985, on remarque que le lac est très majoritairement composé d'eau profonde, allant du centre de notre zone d'étude jusqu'à l'Est. Ces eaux viennent même entourer l'avancée de la terre sur le lac. On remarque aussi la présence de quelques zones d'eau peu profonde au Nord du lac accompagnées de petite surface de zone minéralisée, nous verrons grâce aux prochaines cartes que ces zones ont grandement évolué. Pour ce qui est du reste des zones minéralisées, elles sont largement présentes dans la partie Ouest de la zone d'étude. En 1985, le reste des surfaces est très majoritairement désertique, on le voit grâce à la couleur jaune sur une grande partie du territoire. Ces surfaces sont coupées par des zones végétalisées et agricoles que l'on retrouve principalement au Nord et à l'Est.

A partir de 2004, on constate déjà des changements. En effet, le lac évolue nettement avec une réduction importante des zones d'eau profonde. Elles laissent place tout d'abord à des zones d'eau peu profonde mais surtout à des zones d'eau minérale. Ces eaux ont totalement disparu dans certains endroits. C'est le cas par exemple dans la partie Est de la zone d'étude, l'eau qui auparavant longeait la terre a disparu et a laissé place à des espaces minéralisés. Cependant il est intéressant de signaler que de légères zones d'eau peu profonde sont apparues de la Sud-Ouest de notre zone, venant remplacer quelques surfaces minérales présentes en 1985. Pour ce qui est des surfaces végétalisées, l'évolution semble peu flagrante, alors que les terres agricoles s'emparent de nombreuses auparavant désertiques.

En 2022, le recul du lac s'aggrave, les zones d'eau profonde aperçues en 1985 sont nettement réduites. Les zones d'eau, autant celles profondes que celles peu profondes sont remplacées par des surface minéralisé reconnaissable grâce leurs couleurs marron pâle. Cette couleur se remarque maintenant tout autour du lac, au à l'Est, au Nord et même maintenant très nettement dans le Sud de notre zone d'étude. Par ailleurs, ce territoire qui semble se dessécher et petit à petit perdre ses ressources en haut, connaît une grande augmentation de ses surfaces végétalisées et surfaces agricoles. Ainsi on comprend que la réduction du lac n'a pas empêché les végétaux de croître dans la zone d'étude.

Analyse des changements.



La détection des changements est un moyen très intéressant de faire ressortir les zones qui ont évolué. Nous avons décidé de montrer ces changements seulement sur l'ensemble de notre période d'étude, c'est-à-dire de 1985 à 2022 car nous n'avons pas trouvé pertinent de montrer l'évolution entre 2004 et 2022 qui est beaucoup moins importante que de 1985 à 2004.

L'information visuelle qui nous intéresse principalement ici est la couleur rouge. Elle concerne les changements de surface au cours des années. On remarque ainsi que les principales zones ayant évolué sont les zones autour du Lac. Le recul de l'eau est assez impressionnant, on se rend compte que les zones rouges sont de nombreuses zones qui étaient auparavant composées d'eau profonde ou peu profonde, comme nous avons pu le voir lors de l'analyse des classifications. On se rend compte que la partie Est du territoire et du lac n'est pas celle connue il y a 37 ans.

Il est aussi intéressant de signaler que de nombreuses surfaces auparavant désertiques ont nettement changées ; Comme on a pu le voir précédemment, ces surfaces désertiques sont soit devenues des surfaces végétalisées, soit sont devenues des surfaces agricoles.

Pour approfondir notre analyse, nous avons décidé de représenter ces changements à travers un tableau de croisement des classifications. Grâce à ce dernier nous pouvons voir le pourcentage d'évolution de chaque classe entre 1985 et 2022.

Code Change	2022	1985	Surface (Ha)	Pourcentage
1	1	1	141031,35	11,5 %
2	1	2	2350,26	0,2 %
4	1	3	5,4	0,0 %
7	1	4	529,47	0,0 %
16	1	6	2,88	0,0 %
3	2	1	28610,19	2,3 %
5	2	2	7169,13	0,6 %
8	2	3	0,36	0,0 %
12	2	4	158,76	0,0 %
17	2	5	13,77	0,0 %
22	2	6	28307,97	2,3 %
6	3	1	3447,09	0,3 %
9	3	2	2718,18	0,2 %
13	3	3	31330,53	2,6 %
18	3	4	23347,17	1,9 %
23	3	5	75181,86	6,1 %
27	3	6	293,76	0,0 %
10	4	1	17427,51	1,4 %
14	4	2	6556,05	0,5 %
19	4	3	11703,15	1,0 %
24	4	4	25667,46	2,1 %
28	4	5	75693,24	6,2 %
31	4	6	633,78	0,1 %
15	5	1	5220,36	0,4 %
20	5	2	1496,97	0,1 %
25	5	3	23958,63	2,0 %
29	5	4	5765,13	0,5 %
32	5	5	373464,18	30,5 %
34	5	6	1542,69	0,1 %
21	6	1	100897,83	8,2 %
26	6	2	36800,55	3,0 %
30	6	3	306,27	0,0 %
33	6	4	3426,39	0,3 %
35	6	5	26085,24	2,1 %
36	6	6	164444,58	13,4 %

Ce tableau représente l'importance des changements entre 1985 et 2022.

Il vient compléter nos analyses grâce aux cartes en apportant quelques chiffres importants.

Les valeurs des pourcentages peuvent paraître faibles mais elles restent significatives compte tenu de l'emprise et de l'étendue de notre image de départ.

Pour expliquer ce résultat, nous allons prendre quelques exemples significatifs et en accord avec le sujet de l'étude.

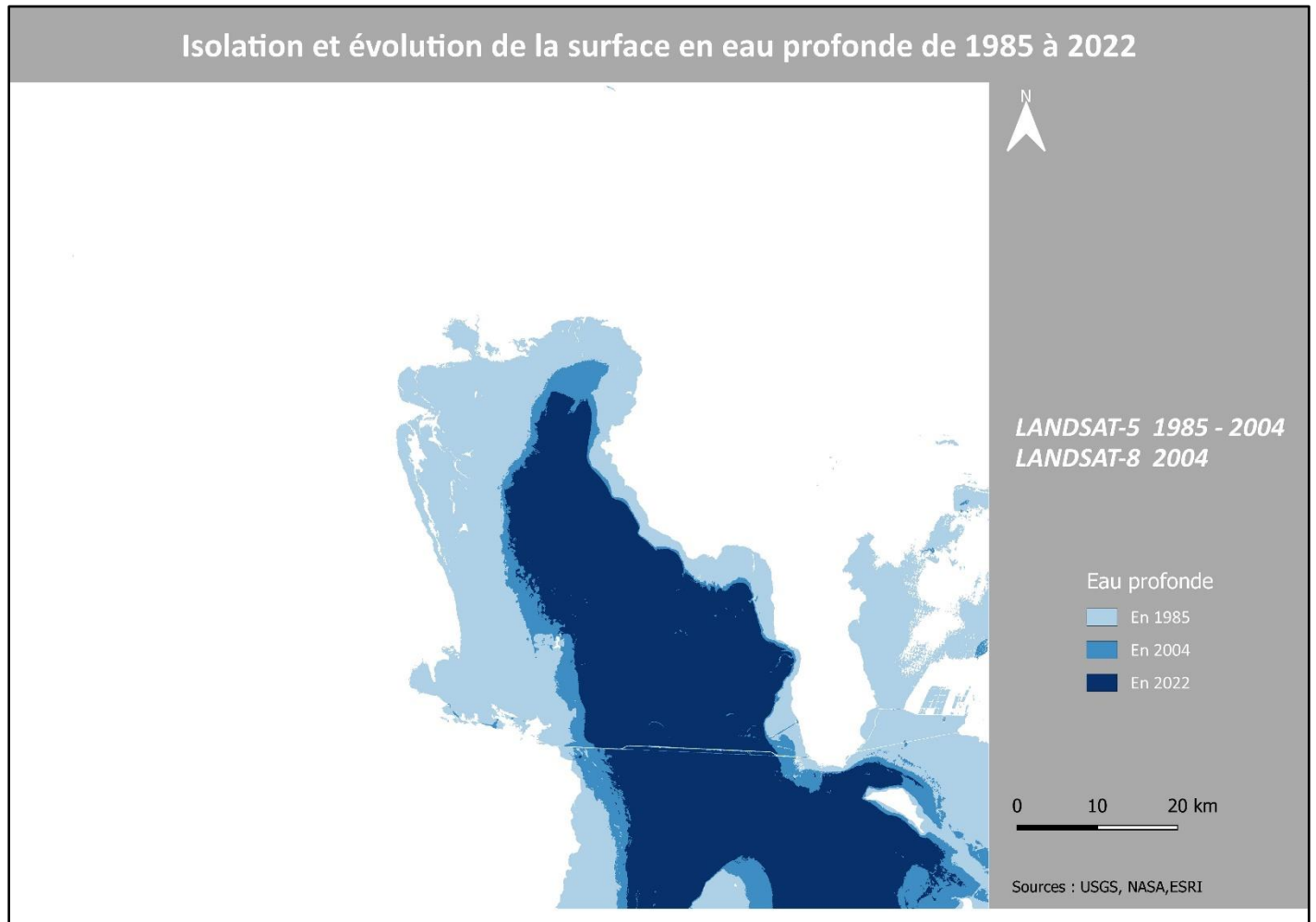
Par exemple, 11,5% de la surface est resté de l'eau profonde en 2022.

Ou bien, **8.2% de la surface du territoire est passé de la catégorie "Eau profonde" à la catégorie "Surface minérale"** traduisant ce que nous montrait nos classifications, c'est-à-dire, un recul net du lac et une transformation de l'eau en surface minérale.

Classes	Pourcentage 1985 (%)	Pourcentage 2022 (%)
Eau profonde	24,2	11,7
Eau peu profonde	4,7	5,2
Surface agricole	5,5	11,1
Surface végétalisée	4,8	11,2
Surface désert	44,9	33,6
Surface minérale	15,9	27,1

Ce tableau représente les pourcentages d'occupation du sol en fonction de nos classes lors de la classification. Ainsi on remarque nettement l'évolution de chaque classe. Par exemple, pour ce qui nous intéresse principalement, on peut voir que les eaux profondes, c'est-à-dire le lac, ont très nettement diminué en perdant plus de 10 points de pourcentage. En 1985, le lac représentait 28,7% (Eau profonde + Eau peu profonde), en 2022, il représente seulement 16,9%.

La surface minérale à quant à elle nettement augmenté, elle représente en 2022 un peu plus d'un quart (27,1%) de la composition des sols de notre zone d'étude. Les surfaces désertiques ont diminué laissant place aux surfaces agricoles et végétalisées qui représentent chacun environ 11% en 2022.



Les causes socio-économiques de ces changements.

Cette carte est le résultat d'une addition de raster. Après avoir reclassifié nos trois couches pour ne garder que l'eau en attribuant la valeur 1 à la surface en eau profonde et 0 aux autres. Puis, nous les avons additionnées entre elles afin d'obtenir une couche compilant la surface en eau de chaque année.

Elle démontre bien l'assèchement du lac au fil des années mais on remarque qu'il est plus marqué entre 1985 et 2004 qu'entre 2004 et 2022.

Pour donner suite à toutes ces différentes analyses, le résultat est flagrant : Salt Lake se dégrade et s'assèche d'année en année. Ce lac subit chaque année les sécheresses de l'ouest des Etats-Unis qui deviennent de plus en plus fortes à la suite du changement climatique. Le lac se dirige vers sa disparition, cela représente d'énormes enjeux sur différents points dans ce territoire. En effet, de nombreuses espèces profitent de ces eaux et se retrouvent menacées par cet assèchement.

Les principaux animaux concernés sont les oiseaux tels que les Pélican d'Amérique, l'échasse d'Amérique, le cygne siffleur ... ou des espèces de crustacés comme les artémies.

De nombreuses activités humaines souffrent aussi des changements du lac avec d'importants risques pour l'économie de la ville. Tout d'abord, nombreuses activités agricoles sont concernées, qu'elles soient aquatiques avec les cultures de crustacé ou terrestre avec les cultures de fleurs, de céréales par exemple. Mais ces dernières sont aussi une des raisons de l'assèchement du lac. En effet, les agriculteurs utilisent l'eau du lac ou des rivières en amont, accélérant ainsi la problématique actuelle de Salt Lake. Cette problématique est aussi un vrai frein au tourisme dans la ville, nombreux étaient les touristes qui venaient profiter de ce paysage, de cette nature. Aujourd'hui avec son recul de l'eau beaucoup s'en sont désintéressé et cet assèchement entraîne des odeurs aux alentours du lac rendant plus compliqué l'attractivité connus dans le passé.

Conclusion

Pour conclure, Salt Lake est un exemple grave de l'impact du changement climatique et des activités humaines. En 37 ans, le recul de son eau est impressionnant, nos différentes images satellites nous l'ont prouvé. Grâce à notre classification à six classes, qui nous a permis de mieux distinguer les types de sol, on remarque directement les eaux profondes et peu profondes qui dès 2004 sont réduite, et en 2022 continue d'empirer.

Au vu du changement climatique qui semble s'aggraver d'année en année et des agriculteurs qui ne semblent pas freiné dans l'utilisation de l'eau du lac, la situation n'est pas près de s'améliorer. Si le lac venait à disparaître d'ici plusieurs années, c'est un écosystème autant naturel qu'économique qui s'effondrerait.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier non plus que la seule présence du lac permet de développer des activités touristiques, agricoles et y maintenir une activité économique générale dans une région considérée comme peu hospitalière. La disparition du lac pourrait coûter presque 2 milliards de dollars par an à l'Utah. Au-delà du seul coût monétaire d'une telle disparition se trouve des enjeux environnementaux. En effet, selon le magazine scientifique IFLScience « *sa disparition pourrait exposer des millions de personnes et de poussières toxiques contenant des particules d'arsenic et de mercure, entre autres métaux dangereux* ».

Malheureusement, et c'est sur cette dernière constatation que nous allons terminer notre dossier, il faudrait 3 000 milliards de litres d'eau par an au lac pour inverser la tendance selon les estimations scientifique. Dans un pays qui ne s'accorde plus sur les engagements climatiques, et dans un état consommant le plus d'eau potable par habitants aux Etats-Unis, où ce dernier est l'un des principaux consommateurs d'eau par habitants au niveau mondiale, la tendance qui se verrait être inversée nous paraît utopique au mieux lointain.

Les Etats-Unis, fer de lance d'une société finie, nous montre une fois de plus qu'il reste encore des choses à faire disparaître en oubliant qu'ils peuvent être aussi les futures victimes de leurs propres actes.

Bibliographie

- ◆ Signatures spectrales des principales surfaces naturelles. <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvd/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-7-signatures-spectrales.html>. Consulté le 20 avril 2023.
- ◆ Exploitation combinée de VENμS, Sentinel-2 and Landsat-8 : les bandes spectrales – Séries Temporelles. <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/exploitation-combinee-de-ven%c2%b5s-sentinel-2-and-landsat-8-les-bandes-spectrales/>. Consulté le 20 avril 2023.
- ◆ EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Consulté le 20 avril 2023.
- ◆ Point.fr, Le. « Sans mesure « d’urgence », le Grand Lac Salé américain disparaîtra dans 5 ans ». Le Point, 6 janvier 2023, https://www.lepoint.fr/monde/sans-mesure-d-urgence-le-grand-lac-sale-americain-disparaitra-dans-5-ans-06-01-2023-2503971_24.php.
- ◆ Géographe, Yohan Demeure, expert. « États-Unis : ce grand lac et son écosystème pourraient bientôt disparaître ». Sciencepost, 13 octobre 2022, <https://sciencepost.fr/etats-unis-grand-lac-et-ecosysteme-pourraient-disparaitre/>.