

Sommaire

Résumé	5
Introduction.....	7
1 Présentation de l'organisation hôte.....	7
2 Structure du mémoire	8
3 Généralités.....	9
3.1 Télédétection: domaines d'observation.....	9
3.2 Les processus d'observation de la Terre	10
3.3 SIG	11
3.4 Télédétection limnologique	12
3.4.1 Classification "Case 1" et "Case 2"	14
3.5 Eau et législation	15
3.5.1 En Suisse	16
3.5.2 La CIPEL	17
4 Recherche bibliographique	18
4.1 Thèmes.....	18
4.2 Revue des paramètres de qualité de l'eau étudiés par télédétection	18
5 Données d'images satellitaires	23
5.1 Satellite NOAA-9, capteur AVHRR-2	23
5.1.1 Procédure	24
5.2 Base de données Landsat 1972 à 2015 du Léman	24
5.2.1 Où obtenir les données ?	24
5.2.2 Gestion de la base de données.....	26
6 Méthodes.....	29
6.1 Zone d'étude.....	30
6.1.1 Evolution trophique du Léman	31
6.1.2 Choix des paramètres	31
6.2 Choix de la période d'étude.....	34
6.3 Sélection des images	34
6.4 Caractéristiques des satellites	34
6.5 Acquisition des données.....	35
6.5.1 Données <i>in situ</i>	35
6.5.2 Images satellites	36
6.5.3 Données météorologiques.....	36
6.6 Traitement des images Landsat	36
6.6.1 Projection	36

6.6.2	Masque	37
6.6.3	Positionnement du point de prélèvement <i>in situ</i> SHL2	37
6.6.4	Zone tampon	37
6.6.5	Ratios de bandes.....	38
6.7	Analyse statistique	39
6.7.1	Statistiques zonales dans ArcGIS	39
6.7.2	Statistiques dans Excel.....	39
7	Résultats et discussion.....	40
7.1	Corrélation entre télédétection et données <i>in situ</i>	40
7.1.1	Projet sans correction atmosphérique.....	41
7.1.2	Projet avec correction atmosphérique	43
8	Conclusion et recommandations	45
9	Perspectives	46
	Bibliographie.....	48
	Sites internet	52
	Liste des figures	56
	Liste des tableaux.....	56
	Acronymes	57
	Annexes	58
Annexe 1	Principes de base de la télédétection	59
Annexe 2	Qu'est-ce qu'un Système d'information géographique ?	76
Annexe 3	Analyse dans Web of Knowledge	78
Annexe 4	Procédure de traitement des données AVHRR de l'Université de Berne	80
Annexe 5	Satellites Landsat.....	97
Annexe 6	Utilisation du programme Eoli-SA	99
Annexe 7	Fiche signalétique du Léman et de son bassin versant.....	100
Annexe 8	Données <i>in situ</i> de référence	103
Annexe 9	Données météorologiques des scènes Landsat.....	105
Annexe 10	Procédure de traitement d'images Landsat 1972 à 2005	109
Annexe 11	Présentation complète des résultats (I).....	119
Annexe 12	Présentation complète des résultats (II)	143
Annexe 13	Cartographie thermique du lac.....	149
Annexe 14	Images composite Landsat 1972-2005	153
	Remerciements.....	160

Source des données

Données satellites :

Avec l'aimable autorisation de l'U.S. Geological Survey (USGS) et de l'European Space Agency (ESA)

Les données *in situ* concernant le lac Léman :

« © SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains, CIPEL, [téléchargement d'octobre 2015 à janvier 2016], développé par le dispositif Eco-Informatique ORE de l'INRA »

https://si-ola.inra.fr/si_lacs/login.jsf

Les données *in situ* de moyennes annuelles ont été extraites du dernier rapport de la CIPEL (2015).

Données météorologiques :

Application Climap-Net de MétéoSuisse, licence du groupe Climat, ISE, UNIGE

Couche du lac Léman :

SHP_GEO_LAC_LEMAN_SITG

Open source : téléchargée du site SITG: <http://ge.ch/sitg/>

Logiciels SIG et autres:

ArcGIS, ver. 10.3, ESRI ©

Open source GRASS GIS 7.0.1

Microsoft Excel 2007

Résumé

La qualité de l'eau du lac Léman est contrôlée régulièrement depuis la fin des années 1950. Sa courbe de concentration de phosphore total est bien connue et nous sommes partis de l'hypothèse que les images satellites pourraient faire ressortir une même tendance. Nous avons testé trois paramètres de la qualité de l'eau (phosphore total, chlorophylle-*a* et transparence).

Une série temporelle de neuf images Landsat (1972 à 2005) a été réalisée. Elles sont issues d'une base de données d'images Landsat couvrant la période de 1972 à 2015 constituée dans le cadre de ce travail. Différents ratios de bandes spectrales des images satellites ont été testés et comparés aux données *in situ*. Pour y parvenir, plusieurs fonctionnalités du SIG (système d'information géographique) ont été utilisées (buffer, raster calculator, zonal statistics). La sélection d'images satellites a été intégrée au SIG et le point de prélèvement *in situ* géoréférencé sur les images. Une zone tampon a été créée autour de ce point et des statistiques zonales calculées. Enfin, les résultats ont été analysés dans Excel afin de trouver une corrélation.

Il en ressort que le ratio des bandes TM4/TM1 a une très bonne corrélation avec les données *in situ* de concentration de phosphore total ($r=0.94$, $R^2=0.895$). Les résultats pour les autres paramètres ne sont pas suffisamment satisfaisants.

Même si ces résultats sont à prendre avec prudence car il ne s'agit pas, statistiquement, d'un grand échantillon, ils ouvrent une porte à de futures recherches. Grâce à la base de données constituée, il faudrait refaire une sélection d'une plus grande série d'images et affiner le processus, comme l'élimination systématique des images avec cirrus qui biaisent les résultats et, idéalement, coordonner les prélèvements *in situ* avec les passages des satellites afin de valider les analyses.

En faisant ce travail de comparaison de données *in situ* des trois paramètres de qualité de l'eau du lac Léman aux images satellites, nous avons voulu montrer ce que l'on peut réaliser avec un système d'information géographique (SIG).

Mots clés: télédétection, SIG, Landsat, AVHRR, lac Léman, bandes ratio, données *in situ*, corrélation, phosphore, chlorophylle-*a*, transparence

Avertissement: Les hyperliens n'apparaissent pas avec Foxit Reader, veuillez utiliser Adobe Reader.

Introduction

Ce mémoire de stage constitue la dernière étape pour l'obtention du certificat complémentaire en géomatique.

Par le biais d'images satellitaires et d'un SIG¹ (système d'information géographique), nous avons voulu étudier l'évolution trophique du lac Léman sur une période définie (1972 à 2005) en émettant l'hypothèse que les images satellitaires pourraient mettre en évidence un patron identique à celui de la courbe de concentration du phosphore total (prélèvements *in situ*). La chlorophylle et de la transparence seront aussi comparées. En effet, nous disposons de données *in situ* du Léman depuis la fin des années 1950 ce qui permet de faire une étude comparative temporelle avec les données satellitaires disponibles.

Une base de données d'images satellites Landsat centrée sur la région lémanique (1972-2015) a été constituée dans le but d'avoir à disposition, en interne, des archives qui pourraient être utiles pour diverses futures études, non seulement en limnologie mais aussi dans d'autres domaines comme la géographie (évolution de l'utilisation du territoire, par exemple).

Grâce à cette base de données, une série temporelle de neuf images a pu être sélectionnée. Cette série a l'avantage d'avoir une résolution de 30 m. Quant à la résolution spectrale (les différentes bandes du capteur) elle nous a permis de tester plusieurs bandes ratios avec l'objectif de trouver une corrélation avec les données *in situ* mises à disposition par [SOERE](#)² [OLA](#)-IS, (INRA de Thonon-les-Bains, CIPEL).

1 Présentation de l'organisation hôte

Le stage s'est déroulé au sein de l'[ISE](#) (Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève) au laboratoire [enviroSPACE](#) sous la direction des D^{rs} Gregory Giuliani et Jean-Michel Jaquet. Le laboratoire enviroSPACE est dédié aux analyses d'environnements complexes au sein de l'ISE. Son objectif est de promouvoir la recherche interdisciplinaire basée sur des informations spatiales explicites et des indicateurs de l'état de changements environnementaux passés, présents et futurs.

Le travail s'est effectué à l'ISE dans un cadre agréable, avec un suivi régulier et un aiguillage ponctuel par les deux responsables.

L'interdisciplinarité de l'ISE a aussi permis de prendre contact avec le groupe Climat afin d'obtenir des données météorologiques nécessaires à l'analyse des images satellites.

Ce travail entre dans le cadre du projet de portail pour le monitoring des lacs de Suisse en train d'être mis sur pied par le laboratoire enviroSPACE.

¹ Liste complète des acronymes en page 60

² SOERE : *Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement*

OLA: *Observatoire des lacs alpins*

INRA: *Institut national de recherche agronomique*

CIPEL: *Commission internationale pour la protection des eaux du Léman*

2 Structure du mémoire

Plusieurs axes ont ponctué ces trois mois de stage:

i) *Recherche bibliographique*

Une recherche bibliographique étendue a été réalisée centrée sur la télédétection et son application en limnologie privilégiant les publications à partir de l'an 2000. En effet, lors de son travail de Master, (Giuliani, 2001) avait déjà couvert une grande partie de la littérature à ce sujet.

ii) *Données d'images satellitaires*

Cette partie traite des problèmes d'obtention d'images satellites AVHRR (§ 5.1), mais aussi de la constitution d'une la base de données d'images Landsat (§ 5.2).

iii) *Travail de comparaison des données in situ et satellitaires*

Il s'agit de la partie SIG pour laquelle il aura fallu rassembler des données *in situ* selon les paramètres choisis et traiter les images dans ArcGIS. (Section 6 et ses annexes 4 et 10)

Les meilleurs résultats de la comparaison des images satellitaires et des données *in situ* seront présentés à la section 7.

Avant d'aborder les axes mentionnés ci-dessus et la partie SIG à proprement parler, quelques généralités vont être présentées.

3 Généralités

L'Homme a toujours aimé avoir une vue d'ensemble de sa région. Les châteaux étaient généralement construits sur les points les plus hauts. A l'âge moderne, c'est par les satellites que les hommes contrôlent leur environnement (Aronoff, 2005).

L'imagerie satellitaire permet d'acquérir des images de régions trop éloignées, dangereuses d'accès ou tout simplement, dans le cas du lac Léman, d'objet d'étude très vaste et ainsi d'offrir une vue d'ensemble unique. De plus, l'imagerie satellitaire permet de capter ce que les yeux humains ne peuvent discerner: en effet, avec leurs bandes infrarouges ou thermales, des phénomènes invisibles à l'œil humain peuvent être mis en évidence (chlorophylle, température).

3.1 Télédétection: domaines d'observation

La télédétection est la source principale d'informations pour l'observation de la Terre. Elle permet d'observer plusieurs domaines comme:

- Les terres émergées (la couverture végétale, le réseau hydrographique, les lacs, les aquifères, la couverture neigeuse, les volcans, les eaux côtières, les zones humides, les déserts, la topographie)
- Les océans (vent et vagues, couleur de l'océan et bloom algal, température de la mer, augmentation du niveau de la mer, salinité)
- La glace (épaisseur des calottes glaciaires, retrait des glaciers et leurs mouvements)
- L'atmosphère (vapeur d'eau et nuages, aérosols, trou d'ozone, changements climatiques)
- La biosphère (déforestation, calcul de la biomasse, feux, prédiction du cycle du carbone)

Toutes ces observations permettent de cartographier, de mesurer, de comparer, de contrôler et de prédire par exemple la météo et les changements climatiques de notre planète mais aussi d'aider à la gestion post-catastrophes naturelles ou non.

Comparés aux méthodes traditionnelles de prélèvement sur le terrain qui mobilisent main-d'œuvre et moyens financiers parfois importants, la télédétection présente divers avantages (liste non-exhaustive):

- Vision globale du terrain (plutôt que réduite à quelques points de prélèvements)
- Répétitions dans le temps (suivi temporel automatique)
- Diversités de canaux (au-delà du visible)
- Gratuité des données pour la plupart (étude à moindre coût)

La télédétection représente aussi un puissant outil d'aide à la décision.

Pour mémoire, les données d'observation de la Terre par satellites ont joué un rôle central dans les événements qui ont mené à la signature du protocole de Montréal en 1987, contribuant ainsi à interdire la production et l'utilisation des CFCs afin de protéger

la couche d'ozone. Les observations faites par les instruments satellitaires ont fourni une information puissante et ont confirmé les premières observations faites de la couche d'ozone par des ballons ([source](#)).

3.2 Les processus d'observation de la Terre

Classiquement, l'observation de la Terre par les satellites (fig. 1) est présentée en cinq processus (tiré de : [source](#)):

1. La source d'énergie

Trois sources d'énergie sont utilisées en télédétection:

La principale est le Soleil qui illumine la surface terrestre et dont la partie du rayonnement réfléchi par la Terre sera enregistré par les capteurs du satellite. Il s'agit de la télédétection optique dans le domaine du visible et du proche infrarouge.

Une autre source d'énergie, la surface terrestre elle-même émet un rayonnement qui peut être capté par les satellites équipés de capteurs thermiques et micro-ondes. Il s'agit de la télédétection thermique ou micro-ondes passives.

Finalement, le capteur peut devenir lui-même source d'énergie en envoyant des ondes sur la surface terrestre qui seront rétrodiffusées et enregistrées. Il s'agit de la télédétection active dans le domaine des hyperfréquences.

2. Les interactions du rayonnement avec l'atmosphère

Lors de son trajet aller-retour la source d'énergie traverse l'atmosphère et son rayonnement subit des perturbations.

3. Les interactions du rayonnement avec la surface terrestre

Ce phénomène est à la fois fonction du rayonnement et des propriétés spectrales des surfaces terrestres.

4. L'enregistrement du signal par le capteur

L'énergie réfléchie, émise ou rétrodiffusée par la surface terrestre est enregistrée et numérisée au niveau des capteurs qui peuvent être de deux types en fonction de la source d'énergie:

- i) capteurs passifs dans le domaine de la télédétection optique utilisant les propriétés de réflexion du rayonnement solaire et celles de l'émission dans l'infrarouge thermique.
- ii) capteurs actifs dans le domaine des hyperfréquences, énergie émise par le capteur lui-même et rétrodiffusée par la surface terrestre, en d'autres termes, il s'agit de capteurs radars.

5. La transmission et la réception des données

Des [stations au sol](#) réceptionnent les données transmises par les satellites. Elles subissent les premiers traitements appliqués aux images brutes: les corrections de types radiométrique et géométrique.

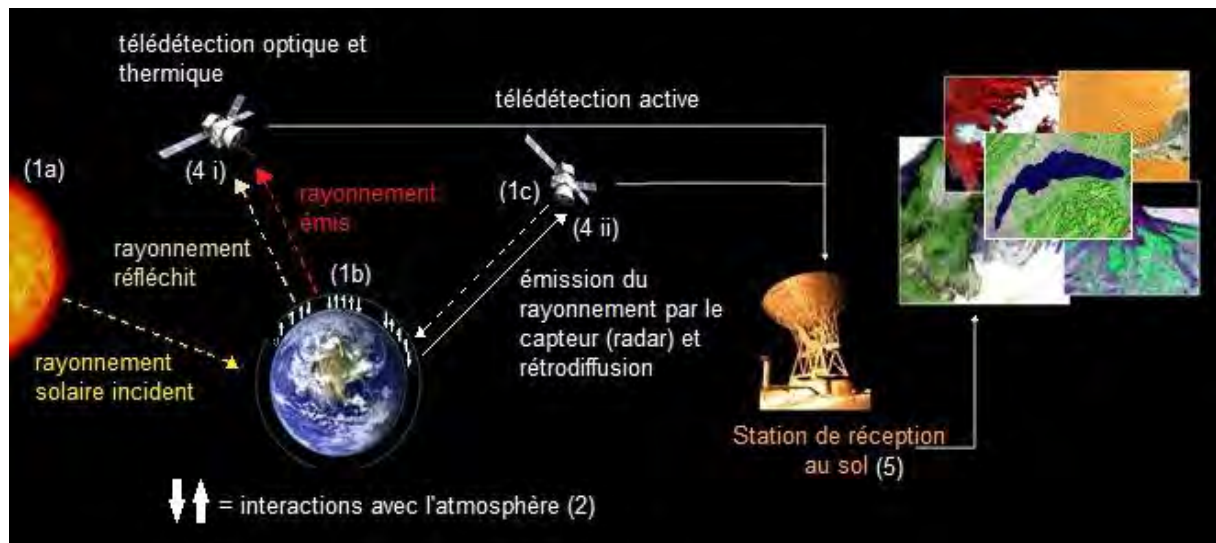


fig. 1 Les processus d'observation de la Terre par la télédétection: 1) a, b, c sources d'énergie, 2) interactions du rayonnement avec l'atmosphère, 3) interactions du rayonnement avec la surface terrestre (non représenté ici), 4) enregistrement du signal par le capteur i) passif ou ii) actif, 5) transmission et réception des données (tiré et adapté de [npoc.ch](#))

3.3 SIG

C'est après le dernier processus (§ 3.2, fig. 1), que le système d'information géographique (SIG) intervient.

La scène enregistrée est restituée sous forme de grille de pixels. Après téléchargement des données satellites géoréférencées à partir des accès web de distribution (§ 5.2.1), elles pourront être intégrées à un SIG où l'analyse proprement dite pourra commencer (traitement d'images, requêtes, analyses, etc.).

Du fait que les données satellites sont numériques, elles peuvent facilement être traitées par ordinateurs et être copiées sans altérer les données d'origines ([source](#)).

Afin d'illustrer l'utilisation de la télédétection et des SIG, on pourra se référer à l'article de Ferratini *et al.*, (AIOL, 2001) qui expose la création d'un SIG pour les eaux lacustres du lac de Garde (I) où des données limnologiques, radiométriques et satellitaires ont été rassemblées et organisées pour fournir un exemple d'outil de gestion de la qualité des eaux du lac. Grâce à ce SIG, la gestion du bassin versant hors frontières administratives est rendue possible. De plus, les données s'y trouvant peuvent être étudiées et utilisées dans des modèles qui permettent d'approfondir la connaissance des processus et interdépendances des différentes parties du système, tant pour des applications scientifiques que pour la gestion des ressources en eau par les administrations locales (AIOL, 2001).

Pour des informations plus détaillées sur la télédétection et le SIG, on se reportera aux annexes 1 et 2.

3.4 Télédétection limnologique

Même si l'eau douce ne représente qu'un petit pourcentage de l'eau de surface sur Terre (fig. 4, § 3.5), la compréhension des conditions de sa qualité est primordiale en raison des fréquentes interactions humaines et des impacts écologiques et économiques qui en découlent (Chang *et al.*, 2015).

Les méthodes traditionnelles de suivi de qualité de l'eau sont limitées à une échelle locale, sont coûteuses financièrement, chronophages, et peuvent aussi sous-échantillonner la variable spatiale nécessaire pour la surveillance et la gestion de la qualité de l'eau. La télédétection offre une méthode efficace pour améliorer l'efficacité des mesures limnologiques *in situ*, permettant l'extension des paramètres enregistrés à l'ensemble de la surface du lac (vision synoptique). Les applications de la télédétection ont le potentiel pour évaluer la qualité des plans d'eau intérieurs (lacs, réservoirs, étangs, rivières) (Mancino *et al.*, 2009).

Les instruments de télédétection passive mesurant la lumière dans la partie visible et le proche infrarouge du spectre électromagnétique (400-1000 nm) sont le plus souvent utilisés pour des applications liées à l'eau. Les constituants de l'eau optiquement actifs, y compris le phytoplancton, le tripton, CDOM (également appelé gelbstoff ou substances jaunes) et l'eau elle-même, ont tous un impact sur la signature optique de l'eau dans les longueurs d'onde visibles (Matthews, 2011).

Les bandes d'intérêt pour la télédétection aquatiques sont les bandes (Chang *et al.*, 2015; Jaquet, 1989):

- visible (400-700 nm)
- infrarouge + infrarouge thermique (700-1400 nm)
- micro-ondes (23.5 cm)

Le signal radiométrique subit une atténuation en traversant l'eau selon la longueur d'eau et la pureté de l'eau (turbidité organique ou minérale). Puisque le canal bleu est moins altéré par la pureté de l'eau, il est le canal privilégié pour la télédétection aquatique (Bonn, 1996).

La profondeur de pénétration des canaux dans l'eau varie entre 10 à 20 m lorsque l'eau est pure mais dépend aussi de la largeur de bande spectrale du canal. Le canal bleu (TM1, 450-520 nm) pénètre entre 0-10 m (fig. 2) alors que le canal PIR (TM4, 760-900 nm) entre 0-10 cm (Jaquet, comm. pers., août 2015).

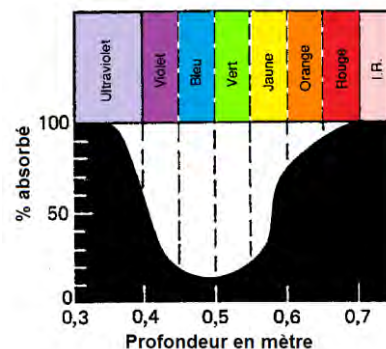


fig. 2 Absorption de la lumière par 10 m d'eau pure en fonction de la longueur d'onde. (D'après P.K. Weyl, 1970, [source](#))

Au début des années 80, la seconde génération de satellites pour l'observation de la Terre est lancée avec une résolution spatiale de 20-30 m au sol et 5 à 7 bandes (AIOL, 2001). Cette amélioration de la résolution spatiale a permis d'étudier des surfaces qui ne représentaient jusqu'ici parfois qu'un pixel ou deux (fig. 3). Quant à la résolution spectrale avec des bandes plus étroites (largeurs de 20 nm pour le CZCS installé sur Nimbus-7 et lancé en 1978 [fin de mission 1994]) elle permet de mieux couvrir la réflectance de l'eau ouvrant ainsi la porte à la télédétection des eaux dites intérieures et optiquement complexes (Case 2, voir § 3.4.1).

[SeaWiFS](#) a suivi de 1997 à 2010 avec 5 bandes spectrales dans le visible de largeurs variant entre 20 μm et 0.02 μm ($\sim 0.40 \mu\text{m}$ - $\sim 0.75 \mu\text{m}$) et deux dans le proche infrarouge ($\sim 0.75 \mu\text{m}$ - $\sim 1.3 \mu\text{m}$) mais avec une résolution de 1.1 km.

Un compromis doit souvent être fait (fig. 3) entre la résolution spatiale et l'étendue. Ainsi, la série Landsat avec une résolution spatiale de 30 m est un bon compromis. Les principaux satellites pour l'observation des eaux sont Landsat 5 et 7 (Chipman *et al.*, 2009). Landsat 5 a terminé sa mission en 2013 et Landsat 8 a été lancé la même année avec plus de bandes spectrales. L'an passé, le satellite Sentinel-2A a été lancé et a aussi des bandes spectrales adaptées à l'étude des lacs.

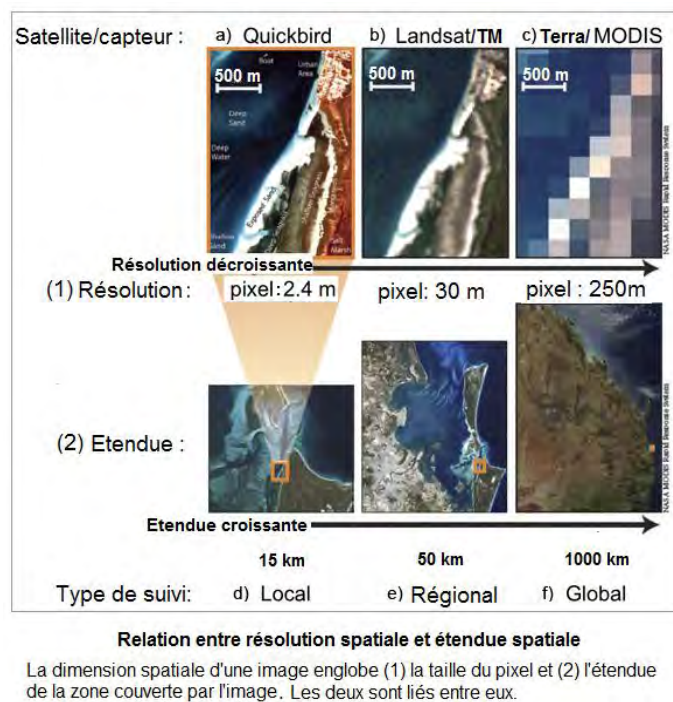


fig. 3 Résolution spatiale et étendue spatiale. En orange, la section de l'image capturée pour chaque capteur.
 Tiré de [source](#)

Matthews (2011) dresse la liste (Tableau 1) des capteurs des satellites d'observation de la Terre qui peuvent être utilisés pour l'évaluation de la qualité de l'eau.

Tableau 1 Liste des capteurs pouvant être utilisés pour l'évaluation de la qualité de l'eau (état en 2011, tiré de Matthews, 2011)

Satellite	Sensor	Spectral resolution (μm)	Spatial resolution	Temporal resolution	Example of study
LM900	IKONOS	0.45–0.85 (4 bands)	4 m	3/5 days	Hellweger <i>et al.</i> (2007)
IRS-P6	LISS 4	0.52–0.68 (3 bands)	5.8 m	5 days	–
SPOT 5	HRG	0.48–1.75 (5 bands)	10 m	26 days	Dekker <i>et al.</i> (2002)
Proba-1	CHRIS	0.415–1.050 (19 bands)	18 m	~7 days	Miksa <i>et al.</i> (2004)
SPOT 4	HRVIR	0.50–0.89 (3 bands)	20 m	26 days	Lathrop and Lillesand (1989)
IRS-P6	LISS 3	0.52–1.70 (4 bands)	23.5 m	24 days	Thiemann and Kaufmann (2000)
<i>EnMAP</i>	HIS	0.420–2.450 (200 bands)	30 m	4 days	–
EO-1	Hyperion	0.4–2.5 (220 bands)	30 m	16 days	Giardino <i>et al.</i> (2007)
EO-1	ALI	0.43–2.35 (9 bands)	30 m	16 days	Kutser <i>et al.</i> (2005)
Landsat 5	TM	0.45–2.35 (6 bands)	30 m	16 days	Vincent <i>et al.</i> (2004)
Landsat 7	ETM+	0.45–2.35 (8 bands)	30 m	16 days	Olmanson <i>et al.</i> (2008)
ISS	HICO	0.3–1.0 (128 bands)	100 m	–	–
Terra/Aqua	MODIS	0.620–0.876 (2 bands)	250 m	1–2 days	Chen <i>et al.</i> (2007)
EnviSAT	MERIS	0.412–0.900 (15 bands)	~300 m	2–3 days	Giardino <i>et al.</i> (2005)
<i>Sentinal 3</i>	<i>OLC</i>	0.413–1.020 (16 bands)	~300 m	2–3 days	–
IRS-P4	OCM	0.400–0.885 (8 bands)	360 m	2 days	–
<i>COMS</i>	<i>GOCI</i>	0.400–0.900 (8 bands)	500 m	~15 min	–
<i>TRAQ</i>	<i>OCAPI</i>	0.320–2.13 (8 bands)	4 km	14 min	–
SeaWiFS	WiFS	0.402–0.885 (8 bands)	1 km	2 days	Vos <i>et al.</i> (2003)

3.4.1 Classification "Case 1" et "Case 2"

Morel & Prieur (1977) ont classé les eaux en deux catégories en fonction de leurs propriétés optiques soit: Case 1 et Case 2.

Depuis le début de la télédétection aquatique, une classification théorique s'est faite selon celle de (Morel & Prieur, 1977): Case 1 se réfère aux eaux chargées de phytoplancton et Case 2 aux eaux dominées par des particules inorganiques. Aujourd'hui, à l'usage, Case 1 fait plutôt référence aux eaux océaniques dont les propriétés optiques sont dominées par le phytoplancton et associées aux substances organiques (Odermatt, 2011) alors que le Case 2, fait référence aux eaux intérieures ou côtières influencées non seulement par le phytoplancton mais aussi par des matières organiques ou inorganiques en suspension (Chang *et al.*, 2015; Oyama *et al.*, 2007) d'origine terrestre (érosion) ou aquatique (sédiments remis en suspension). Les eaux

intérieures sont aussi désignées comme eaux optiquement complexes (« optically complex waters » en anglais).

A cause de la complexité optique de l'eau, les algorithmes développés pour le Case 1 ne sont pas appropriés pour les eaux du Case 2 (Chang *et al.*, 2015).

La bibliographie thématique (§ 4) a par ailleurs été classée de la sorte.

3.5 Eau et législation

L'eau est la ressource principale pour la vie sur Terre. Elle est un bien inestimable et essentiel à la vie. 97% de l'eau sur Terre est salée (fig. 4 a). Les 3% restant sont de l'eau douce.

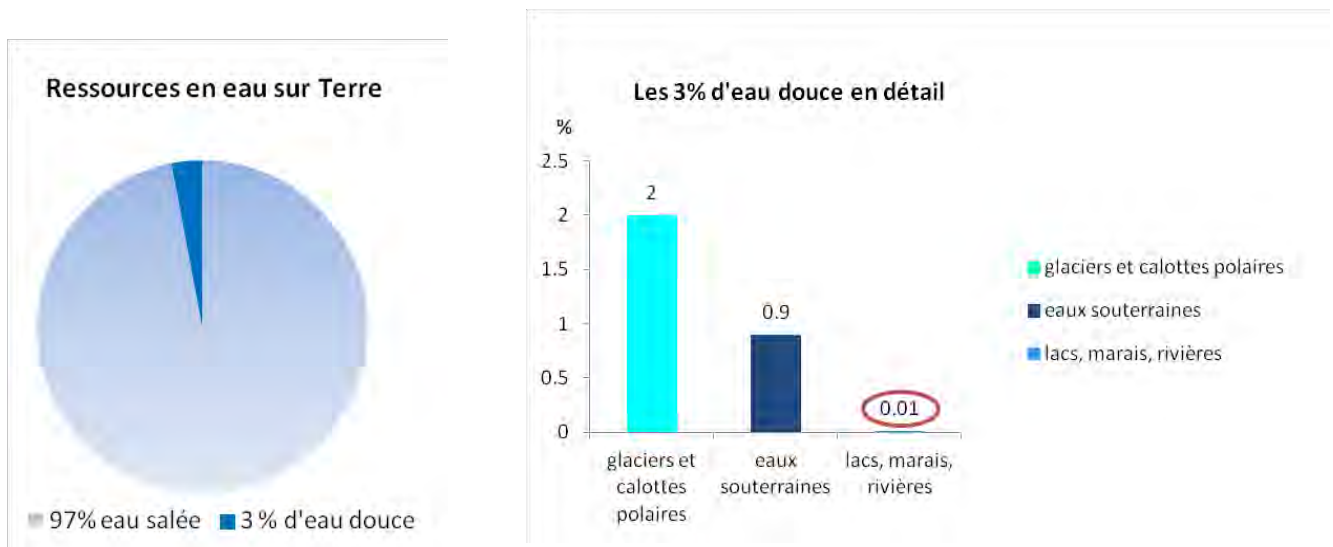


fig. 4 (a) Répartition de l'eau sur Terre (selon Gleick, 1996) (b) détail des 3 % d'eau douce

Sur ces 3% d'eau douce (fig. 4 b), 2% sont à l'état solide constitués par les glaciers et les calottes polaires et donc inexploitable, viennent ensuite les eaux souterraines (0.9%) et enfin l'eau douce stockée dans les lacs, marais et rivières (0.01%) (Gleick, 1996).

La croissance démographique met cette ressource sous haute pression. Il faut toujours plus d'eau potable pour satisfaire à tous nos besoins. Au niveau mondial, entre 1996 et 2005, 9084 milliards m³ d'eau ont été consommés chaque année soit l'équivalent de 102 fois le lac Léman (89 km³). 92% de cette eau a été utilisée par l'agriculture : 27% pour l'irrigation intensive des céréales (maïs, blé et riz), 22% pour la production de viande et 7% pour les produits laitiers (Hoekstra & Mekonnen, 2012).

Les menaces principales sur la qualité de cette ressource essentielle sont des charges accrues en nutriments (principalement l'azote et le phosphore), les changements de température, de pH, la pollution par les métaux lourds et autres composés persistants, (pesticides) qui ont pour conséquences directes l'eutrophisation ou l'acidification de l'eau (UNEP, 2010).

La surveillance de la qualité de l'eau est donc fondamentale. Au niveau international, le Global Environment Monitoring System (GEMS) des Nations Unies rassemble les

données de qualité des eaux de plus de 100 pays. Dans l'Union Européenne, la Directive-Cadre sur l'eau (Water Framework Directive [WFD]) a pour objectif d'ici à 2015 de protéger toutes les formes d'eau, de réduire la pollution de l'eau, de garantir une utilisation durable de l'eau par les particuliers et les entreprises.

3.5.1 En Suisse

Au niveau suisse, la protection des eaux n'a pas toujours été évidente. Ce n'est qu'en 1953 que le peuple suisse accepte avec une nette majorité un nouvel article constitutionnel sur la protection des eaux contre la pollution car la situation est critique en Suisse³. Le 1er janvier 1957, la première loi fédérale sur la protection des eaux contre la pollution entre en vigueur. Elle met l'accent sur l'épuration des eaux usées. A cette époque, la situation est grave. Bien que l'article 21 de la loi sur la pêche de 1888⁴ interdise déjà la pollution des eaux par des substances nocives pour les poissons (Houriet, 2006) elle n'avait pas été appliquée comme il se doit. En effet, un règlement spécial d'application de 1925 édicté par la Confédération ne concernait exclusivement que les rejets industriels. Dans les années 50, certains lacs suisses comme le Greifensee (ZH), le lac de Pfäffikon (ZH), le Rotsee (LU), le lac d'Hallwil (AG), le lac de Baldegg (LU) et le lac de Morat (FR/VD) reçoivent de grandes quantités d'eaux usées. Leur couleur est verdâtre voire rougeâtre et ils dégagent des odeurs nauséabondes. Il est déconseillé de s'y baigner – qui le désirerait dans des eaux verdâtres ? Le lit des rivières est recouvert d'une couche grisâtre de matière organique en décomposition provoquant la mort des poissons (Houriet, 2006).

En 1957, le lac Léman échappe encore à ces problèmes, certainement grâce à son grand volume d'eau (89 km³) qui parvient encore peut-être à diluer la pollution, mais pas pour longtemps.

En effet, de plus en plus d'habitants viennent s'installer dans la région lémanique : entre 1950 et 1980, il s'agit d'une augmentation en 30 ans de plus de 356'000 résidents entre les cantons de Genève, Vaud et Valais (source : Office fédéral des statistiques). Et c'est à la fin des années 1970 que le Léman enregistre sa plus haute concentration de P_{tot} (90 µgP/L). Les conséquences de cette eutrophisation des eaux du Léman sont la diminution de la moyenne annuelle de transparence de l'eau, d'avantage de fleurs d'eau en juillet-août, mais aussi une chute de l'exploitation des poissons nobles comme la Corégone (*Coregonus lavareus*) et l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*). Une des causes est le développement algal souillant les filets des pêcheurs (Anneville *et al.*, 2002) mais également le manque d'oxygène et la sédimentation sur les ombrières en profondeur : ainsi, les œufs des ombles ne peuvent-ils plus se développer jusqu'au stade embryonnaire (Gerdeaux, 1996; Rubin, 1990).

³ Art. 24^{quater} de la Constitution de 1874 « La Confédération a le droit de légiférer pour protéger contre la pollution les eaux superficielles et souterraines. L'exécution de ces dispositions est réservée aux cantons, sous la surveillance de la Confédération ».

⁴ Art. 21, Loi fédérale sur la pêche de 1888 « Il est interdit de verser ou de faire couler dans les eaux poissonneuses des résidus de fabrique ou d'autres matières d'une nature et en quantités telles qu'il en résulte un dommage pour les poissons et écrevisses. Ces résidus doivent être déversés de manière à ne pas nuire au poisson ».

En 1962, grâce aux subventions fédérales, les STEP se multiplient. Dix ans plus tard, en 1972, la première STEP pratiquant la déphosphatation est mise en service, ce qui aura pour conséquence positive de faire diminuer fortement le taux de concentration du phosphore dans le lac.

La loi fédérale sur la protection des eaux contre la pollution continue d'évoluer en 1970, en 1992 et en 2015. La nouvelle loi sur la protection des eaux entrera en vigueur le 1^{er} janvier 2016. Une centaine de STEP sur les 700 que compte le territoire suisse seront modernisées et tenues d'éliminer 80% des micropolluants de leurs rejets (Minet, 2015). Aujourd'hui, il y a 226 STEP en service dans le bassin versant du Léman (CIPEL, 2015)

3.5.2 La CIPEL

C'est sous la direction de l'Union Générale des Rhodaniens (UGR) que des observations systématiques de la qualité de l'eau du lac Léman commencent en 1957. L'UGR sera remplacée en 1960 par la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman (CIPEL) (Anneville *et al.*, 2002) qui, jusqu'à ce jour, effectue des analyses d'eau (physico-chimiques, bactériologiques ainsi que les variables biologiques [phyto- et zooplancton]). Une de ses missions est de surveiller l'évolution de la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant lémanique (départements de l'Ain (F) et de la Haute-Savoie (F) ainsi que les cantons de Vaud, du Valais et de Genève) (fig. 5). Des échantillons d'eau sont prélevés chaque mois au point SHL2 (WGS84 6.58872 °E, 46.4527 °N; profondeur: 309 m) sur toute la colonne d'eau, ainsi qu'au point GE3 dans le Petit-Lac.



fig. 5 Le territoire de la CIPEL, d'une superficie de 10'300 km² (source : www.cipel.org)

4 Recherche bibliographique

Premier axe de ce mémoire, la recherche bibliographique s'est opérée sur internet en entrant des mots clés dans la barre de recherche scholar.google.ch, www.sciencedirect.com et apps.webofknowledge.com.

La gestion de la bibliographie, quant à elle, a été réalisée par l'outil open source Zotero (www.zotero.org) qui permet de mettre des marqueurs pour une recherche thématique des articles. Comme la quasi-totalité des articles sont publiés en anglais, les marqueurs le sont aussi (Tableau 2).

4.1 Thèmes

Une arborescence s'est organisée autour des mots « Remote sensing » et « General ». La distinction a été faite entre les articles portant sur les eaux dites intérieures et côtières (Case 2) et les eaux extérieures (Case 1) comme expliqué au paragraphe 3.4.1.

Tableau 2 Liste non exhaustive des marqueurs utilisés dans la bibliographie thématique

Articles concernant	Marqueur en anglais
la télédétection	Remote sensing
Les eaux océaniques	Case 1
Les eaux intérieures et côtières	Case 2
Les paramètres mesurés	Parameters
Les satellites et capteurs	Satellite/Sensors
Divers sujets hors télédétection mais concernant le présent travail	General

La totalité de cette base de données bibliographique sera transmise via format Zotero et Endnote.

On trouvera en annexe 3 une analyse réalisée dans Web of Knowledge concernant le regain d'intérêt de la télédétection dans la littérature scientifique.

4.2 Revue des paramètres de qualité de l'eau étudiés par télédétection

La recherche bibliographie élargie a permis de mettre en évidence la multitude de paramètres utilisés par la télédétection aquatique, spécifiquement pour les eaux dites intérieures et côtières (Case 2).

Classiquement, la télédétection aquatique se penche sur les variables actives optiquement (He *et al.*, 2008; Kloiber *et al.*, 2002; Matthews, 2011) telles que :

- La chlorophylle,
- La turbidité,
- La matière en suspension totale (MST ou TSS en anglais)

Mais peu se sont concentrées sur les variables optiquement non actives comme (*Gao et al.*, 2015):

- Le phosphore total (P_{tot}),
- L'azote total (N_{tot}),
- L'oxygène dissous,
- Le carbone organique dissous (COD)
- La demande biochimique en oxygène (DBO)

Bien que la télédétection soit susceptible d'estimer généralement les variables de la qualité de l'eau, l'estimation de la concentration de phosphore est quant à lui un défi (*Wu et al.*, 2010).

Chang *et al.* (2015) reprennent les constituants clés de la qualité de l'eau, tels que:

- l'azote total (N_{tot}),
- le phosphore total (P_{tot}),
- la concentration de chlorophylle-a,
- la matière organique dissoute colorée (MODC ou CDOM en anglais),
- les bloom algaux nuisibles⁵ (toxines cyanobactériennes et la concentration de microcystine)

ainsi que les descripteurs de l'état de l'écosystème, comme:

- la matière en suspension totale (MST),
- la transparence (mesurée avec un disque de Secchi, en anglais Secchi disk depth=SDD) et
- la température

qu'ils présentent à travers un état des lieux des connaissances de technologies satellitaires de ces 40 dernières années (Tableau 3).

A la figure 6, Chang *et al.*, (2015) résument quels satellites sont utilisés et pour quels paramètres de la qualité de l'eau.

⁵ HAB en anglais, "harmful algal blooms"

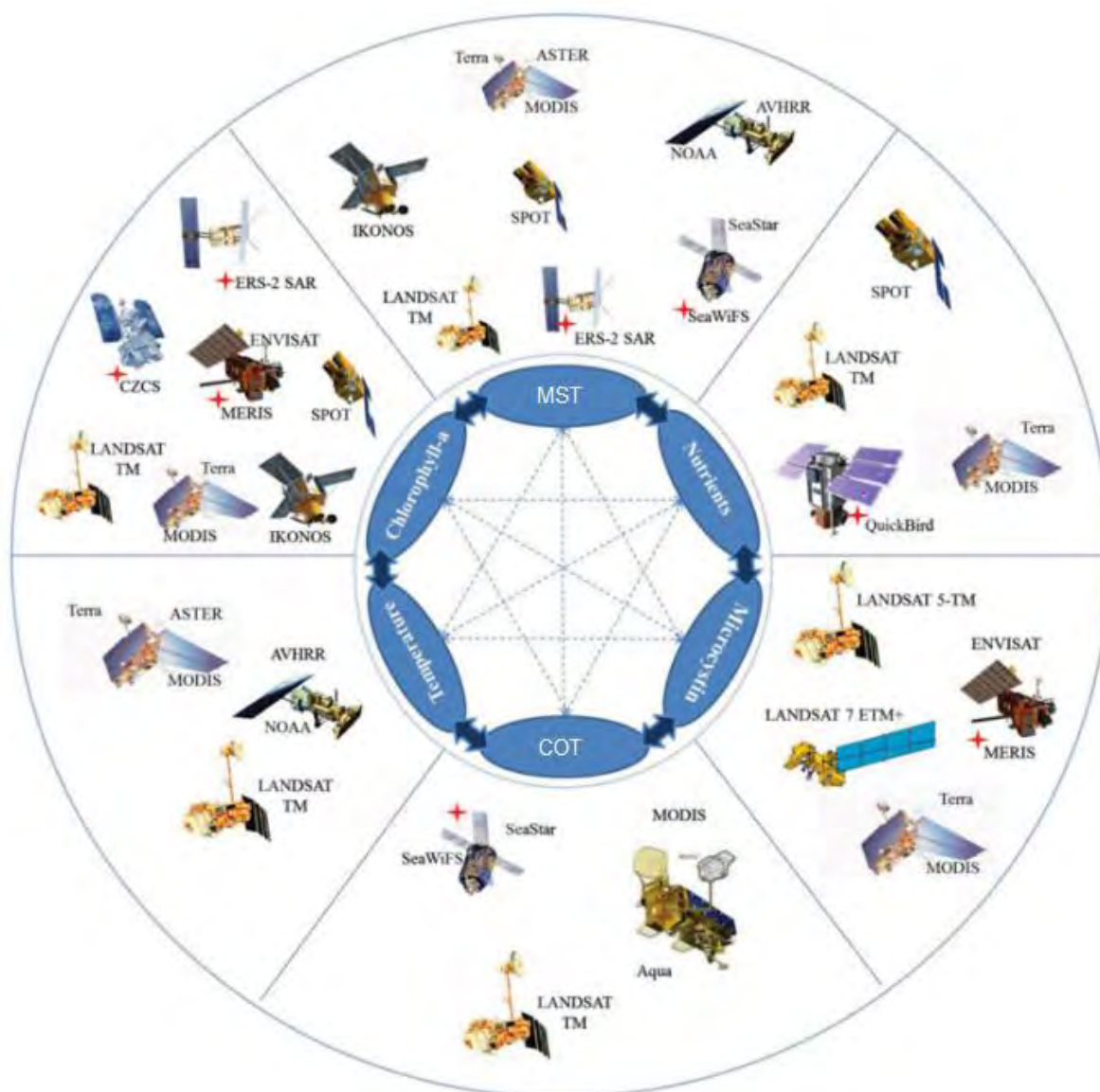


fig. 6 Mesures d'évaluation et les satellites associés pour la surveillance de différents paramètres de la qualité de l'eau (MST, nutriments, microcystine, COT, température, chlorophylle-a).
Remarque: Les croix rouges indiquent les satellites qui ne sont plus utilisés (tiré de Chang et al., 2015).

Tableau 3 Evolution des satellites des années 1970 aux années 2000 (tiré de Chang et al., 2015)

Launch date		Remote sensing platforms	Sensor (s)	Spatial resolution (m)	Band range (nm or band)	Spectral bands (# bands)	Revisit (days)
1970s	1972	Landsat 1 (ERTS 1)	RBV	185	500–750	3	18
			MSS	82	500–1100	4	
	1975	Landsat 2 (ERTS 2)	RBV	185	500–750	3	18
			MSS	82	500–1100	4	
1980s	1978	Landsat 3	RBV	40	500–750	3	18
			MSS	82	500–12,400	5	
	1978	Nimbus 7	CZCS	825	433–12,500	6	2–3
	1982	Landsat 4	MSS	82	500–1100	4	16
			TM	30–120	450–12,500	7	
	1984	Landsat 5	MSS	82	500–1100	4	16
TM			30–120	450–12,500	7		
1990s	1986	SPOT 1	HRV	10–20	500–890	4	26
	1990	SPOT 2	HRV	10–20	500–890	4	26
	1991	ERS-1	AMI	26	C	1	35
			ATSR	1000		4	
	1992	ER-2/Twin Otter/ Proteus, and WB-57	AVRIS	20	400–2,500	224	Any Time
	1992	JERS-1	SAR	18	1275 MHZ	1	44
			OPS	18–24	OPS	18–24	
					SWIR	4	
	1993	SPOT 3	HRV	10–20	500–890	4	26
					500–600	4	
	1994	RESURS-01–3	MSU-SK	170	600–700		
					700–800		
	1995	ERS-2	SAR	6–30	C	1	2–7
					C	1	
	1995	Radarsat 1	SAR	8–100	C	1	2–3
	1996	IRS P3	MOS	500	408–1600	18	
	1996	ADEOS	OCTS	700	402–12,500	12	2–3
			POLDER	6,000	433–910	9	
	1997	Orbview 2	SeaWiFS	1100	402–885	8	1
	1998	SPOT 4	HRVIR	10–20	500–1,750	5	26
			Veg.	1000	430–1,750	4	
	1998	NOAA	AVHRR	500–1000	580–12,500	6	1
	1999	Landsat 7	ETM+	15–60	450–12,500	8	16
	1999	Ikonos 2	OSA	1–4	450–900	5	1.5–3
	1999	Terra (EOS AM-1)	MODIS	250–1000	405–14,385	36	1
			ASTER	520–11,650	15–90	15	
	1999	KITSAT-3 (Korea Institute of Technology Satellite-3)	CCD	15	Red, Green, Near Infrared	3	67
		1999	CBERS (China–Brazil Earth Resources Satellite)	WFI	15		1
				260	660	2	
			CCD	20	830		5
					510–730		
					450–520		
					520–590		
					630–690		
					700–890		
			IR-MSS	160	500–1,100		4
					1,550–1,750		
					2,080–2,350		
					1,040–1,250		
	500–900						
2000s	2000	EROS-1		1.8		1	1–4
2000	EO-1	ALI	30	400–2,400	10	16	
		Hyperion	30	400–2,400	220		
		AC	250	900–1,600	256		
2001	Quickbird 2	PAN	0.61–2.44	445–900	5	1–3.5	
		CHRIS	17 or 34	400–1,050	18 or 63		
2001	PROBA	HRS	2.5	510–730	1	1	
2002	SPOT 5	Veg.	1000	430–1,750	4	26	
		HRG	5–20	500–1,750	5		
Launch date		Remote sensing platforms	Sensor (s)	Spatial resolution (m)	Band range (nm or band)	Spectral bands (# bands)	Revisit (days)
	2002	Aqua (EOS PM-1)	MODIS	250–1000	405–14,385	36	1
	2002	Envisat	MERIS	300–2360	390–1,040	15	3
	2006	ALOS	PALSAR	10–100	L	1	46
	2007	TerraSAR-X	SAR	1–18	X	1	2.95
	2007	Radarsat 2	SAR	3–100	C	1	12–24
	2007	Worldview 1	—	0.5	400–900	1	1.7–4.5
	2009	Worldview 2	HRV	0.5–1.84	400–1040	9	1.1–3.7
	2013	Landsat 8	OLI	15–30	433–2,300	9	16
			TIRS	100	10,300–12,500	2	

Dans le tableau 4, les auteurs résument les applications des différentes méthodes d'inversion pour la surveillance des constituants de la qualité de l'eau.

Tableau 4 Application des différents méthodes d'inversion et différents constituants de la qualité de l'eau, tendance selon les dernières décennies (tiré de Chang et al., 2015)

	Empirical Methods	Analytical Methods	Semi-Empirical/Semi-Analytical Methods
1990s	<ul style="list-style-type: none"> Chlorophyll-<i>a</i> Pigment Concentration TSS 	<ul style="list-style-type: none"> CDOM Phytoplankton Chlorophyll-<i>a</i> Dissolved Organic Matter 	<ul style="list-style-type: none"> Chlorophyll-<i>a</i> SDD CDOM
2000s	<ul style="list-style-type: none"> Chlorophyll-<i>a</i> TSS DO TP TN Sediment Turbidity 	<ul style="list-style-type: none"> TSS Chlorophyll-<i>a</i> CDOM Tripton (TR) SDD 	<ul style="list-style-type: none"> Cyanobacteria SDD Chlorophyll-<i>a</i> Phytoplankton CDOM TSS
2010s	<ul style="list-style-type: none"> Chlorophyll-<i>a</i> TSS CDOM Phycocyanin Turbidity TP 	<ul style="list-style-type: none"> Chlorophyll-<i>a</i> 	<ul style="list-style-type: none"> CDOM Turbidity Chlorophyll-<i>a</i>

Dans un autre article, (Zhang *et al.*, 2002) ont montré l'application de combiner des données micro-ondes et des données optiques pour récupérer les paramètres de surface de qualité de l'eau dont:

- la turbidité,
- la transparence (disque de Secchi)
- la matière en suspension totale (MST).
- Le phytoplancton,
- le tripton,
- Gelbstoff (ou CDOM)

et l'eau elle-même qui a un impact sur la signature spectrale de l'eau dans les ondes visibles.

Enfin, dans l'article "A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters" (Matthews, 2011) on trouve un tableau (p. 6857-6865) listant toutes les études récentes pour les eaux du Case 2 utilisant les méthodes empiriques pour mesurer les paramètres de l'eau qui sont:

- MST (TSS en anglais)
- Chl-*a*
- SD
- CDOM
- Turbidité
- Phycocyanine (PC – pigment des cyanobactéries)
- Clarté de l'eau

On se référera à cet article pour plus de détails.

5 Données d'images satellitaires

Ce deuxième axe met en avant les problèmes d'obtention des données AVHRR (fournisseur: Université de Berne) mais aussi la mise en place de la base de données d'images satellitaires Landsat, couvrant une période de 43 ans d'archives.

5.1 Satellite NOAA-9, capteur AVHRR-2

Le premier instrument AVHRR a été lancé avec le satellite TIROS-N en 1978 dans le but de mesurer la température des océans.

Par la suite, AVHRR-2 a été installé sur NOAA-9 (en mission de 1984 à 1997) avec 5 bandes spectrales (Tableau 5). En plus de l'étude des océans, le capteur va calculer l'indice de végétation normalisé (NDVI), surveiller les feux, mesurer la couverture nuageuse et la glace.

Le satellite NOAA-9 a une fauchée d'environ 3000 km et une résolution temporelle d'un demi-jour. La résolution spatiale peut-être de trois formats: HRPT de 4.4 km ou LAC et GAC de 1.1 km. Les données reçues de l'Université de Berne correspondent à un pixel de 1.1 km.

Tableau 5 Caractéristiques spectrales des bandes du capteur AVHRR-2 (tiré de: [source](#))

Bande	Longueur d'onde centrale (µm)	Largeur de bande (µm)
1 Rouge	0.63	0.58 - 0.68
2 IR 1	0.862	0.725 – 1.1
3 IR 2	3.74	3.55 - 3.93
4 Thermique 1	10.8	10.30 - 11.30
5 Thermique 2	12	11.50 - 12.50

Au départ, notre travail se dirigeait vers la couleur et la température du Léman afin de trouver des patrons spatiaux entre eux. Il avait ainsi été décidé d'utiliser des données d'images du satellite NOAA et du capteur AVHRR captées par l'Université de Berne et déjà corrigées atmosphériquement sur une période s'étendant de 1979 à 2005. L'Université de Berne a pu fournir quelques images de plusieurs mois en 1988 et nous gardions espoir d'en obtenir plus. Cependant, ils ne sont pas en possession d'une grande archive entre 1984 et 1988 et de plus, des problèmes techniques sont apparus de leur côté concernant le traitement des images de 1987 à 1991. Pour information concernant de futures études, une archive plus complète devrait être accessible chez eux dès l'été 2016.

Sans savoir que nous allions avoir des problèmes d'obtention de données, les images reçues ont été traitées. Nous avons pu ainsi établir une procédure de traitement des images AVHRR (Annexe 4). A cette occasion, nous avons été confrontés à plusieurs problèmes, notamment de projection.

5.1.1 Procédure

L'annexe 4 présente en détails la procédure de préparation et de traitement d'images qui sera, sur certains points, identique au traitement des images Landsat et à la base de tout ce présent travail.

Les données AVHRR n'ont pas pu véritablement être exploitées: dans l'idée d'une série temporelle, sur les quelques mois de 1988, elles ne sont pas vraiment représentatives. Aucun résultat ne sera présenté.

Ainsi, nous sommes partis sur une autre source : les images Landsat (§ 5.2).

5.2 Base de données Landsat 1972 à 2015 du Léman

Comme expliqué précédemment, nous nous sommes dirigés sur la constitution d'une base de données d'images Landsat de 1972 à 2015 nommée INDEX BD LANDSAT.

Dans un premier temps, nous avons réuni plus de 300 images Landsat, de 1972 à 2015. Une base de données a été créée pour de futures études du Léman ou de la région lémanique. Enfin, une sélection de quelques années (une image tous les 3-4 ans dans la mesure du possible, au total 9 images) entre 1972 à 2005, a servi de base au travail d'analyse à proprement parler, effectué avec le logiciel ArcGIS, ver. 10.3, ESRI © et le logiciel open source GRASS GIS 7.0.1. En annexe 5 on trouvera les caractéristiques des satellites Landsat.

5.2.1 Où obtenir les données ?

Depuis 2008, l'USGS a décidé d'ouvrir au public son archive Landsat. On peut actuellement télécharger les images satellites gratuitement avec leurs métadonnées sur les sites suivants. En gras, ceux utilisés dans le cadre de ce travail:

Pour y accéder, il faut s'enregistrer sur : <http://earthexplorer.usgs.gov>

USGS – Earth Resources Observation and Science (EROS) Center

<http://glovis.usgs.gov/>

USGS – EarthExplorer

<http://earthexplorer.usgs.gov/>

USGS- LandsatLook View (que les images Landsat)

<http://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>

Global Land Cover Facility - Earth Science Data Interface (ESDI)

<http://glcfapp.glc.f.umd.edu:8080/esdi/>

Agence spatiale européenne (ESA):

Il faut aussi s'enregistrer sur My Earthnet. <https://earth.esa.int/web/guest/home> pour accéder aux données.

On trouve une **application Java à télécharger EOLI-SA** de consultation et de téléchargement d'images satellite de l'Agence spatiale européenne (ESA) (voir en annexe 6 son utilisation) :

<https://earth.esa.int/web/guest/eoli>

Source principale

Quantitativement, la source principale du nombre de scènes téléchargées provient de l'ESA (fig. 7).

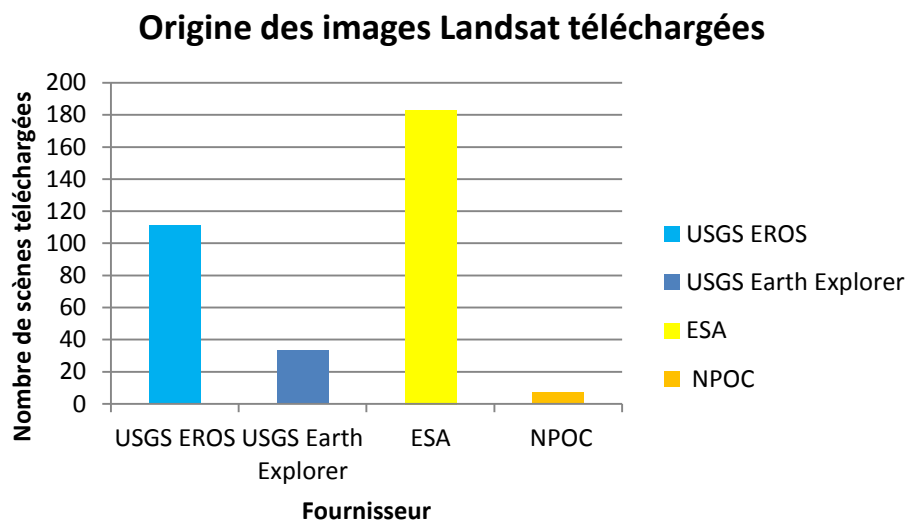


fig. 7 Origine des images Landsat téléchargées. La différence est faite entre les sites internet USGS. Une même scène peut avoir été enregistrée sur des stations au sol différentes pour les données ESA

Sur certaines plateformes de téléchargements, les données sont livrées en fichier zippés en extension *.tar.gz. Dans l'annexe 10 (§ 10.1), il a été expliqué comment ouvrir ces fichiers.

Du fait de l'utilisation de plusieurs plateformes, il y a 28 doublons dans la base de données, mais cela est parfois aussi dû aux données reçues par différentes stations (fig. 8) de réception au sol (International Ground Stations – IGS).

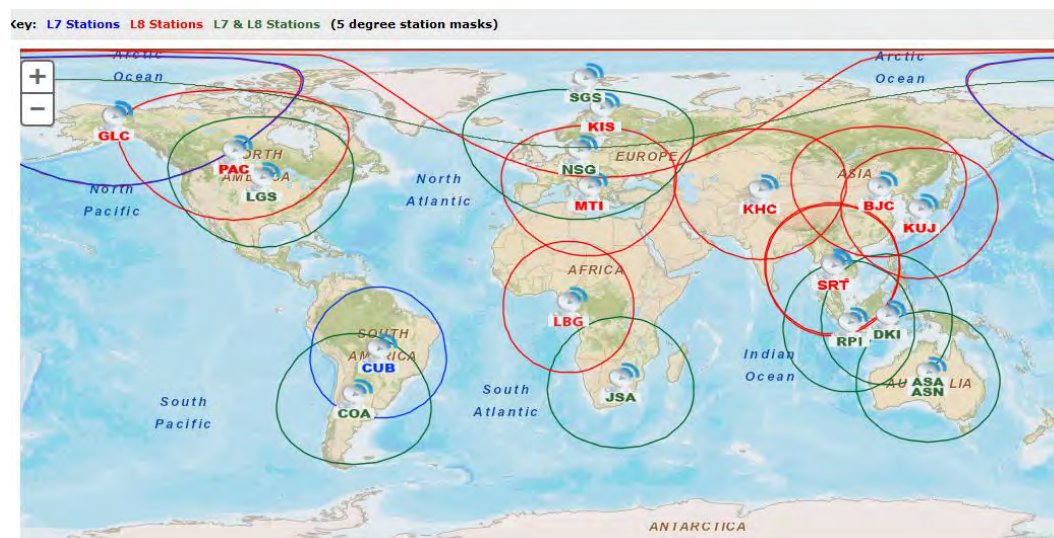


fig. 8 Les différentes stations de réception au sol travaillant en collaboration avec l'USGS et collectant les données Landsat 7 et 8 selon leur situation géographique (sans les stations qui recueillent régulièrement les données pour l'US ground network), (tiré de: [source](#))

Niveau

Toutes les données téléchargées sont du niveau L1T (Standard Terrain Correction ou Level 1T) excepté quelques images du niveau L1G (Systematic correction ou Level 1G). La correction L1G est appliquée lorsque les scènes ne disposent pas de données nécessaires pour la correction L1T de contrôle au sol ou d'élévation.

La correction standard de terrain (L1T) fournit des précisions radiométriques et géométriques systématiques en intégrant des points de contrôle au sol utilisant un modèle numérique d'élévation (MNE) pour une précision topographique.

Pour plus d'informations, se référer à la page "Landsat processing details": [http://landsat.usgs.gov//Landsat Processing Details.php](http://landsat.usgs.gov//Landsat%20Processing%20Details.php)

5.2.2 Gestion de la base de données

En faisant des recherches d'images Landsat, il a été mis en évidence qu'il y avait des trous dans la série temporelle et également aucune donnée pour certaines années : 1974, 1977 à 1983 et 1990 et très peu d'images dans les années 70. (fig. 9) En se renseignant directement auprès de l'USGS (USGS, comm. pers., 2015), une explication a été donnée: dans les années 1980 et 1990, le contrôle des acquisitions Landsat 5 a été donné à l'entreprise privée EOSAT, ce qui a eu pour conséquence une explosion des prix d'acquisition et pour la période 1984-1999, beaucoup de données n'ont pas été récoltées.

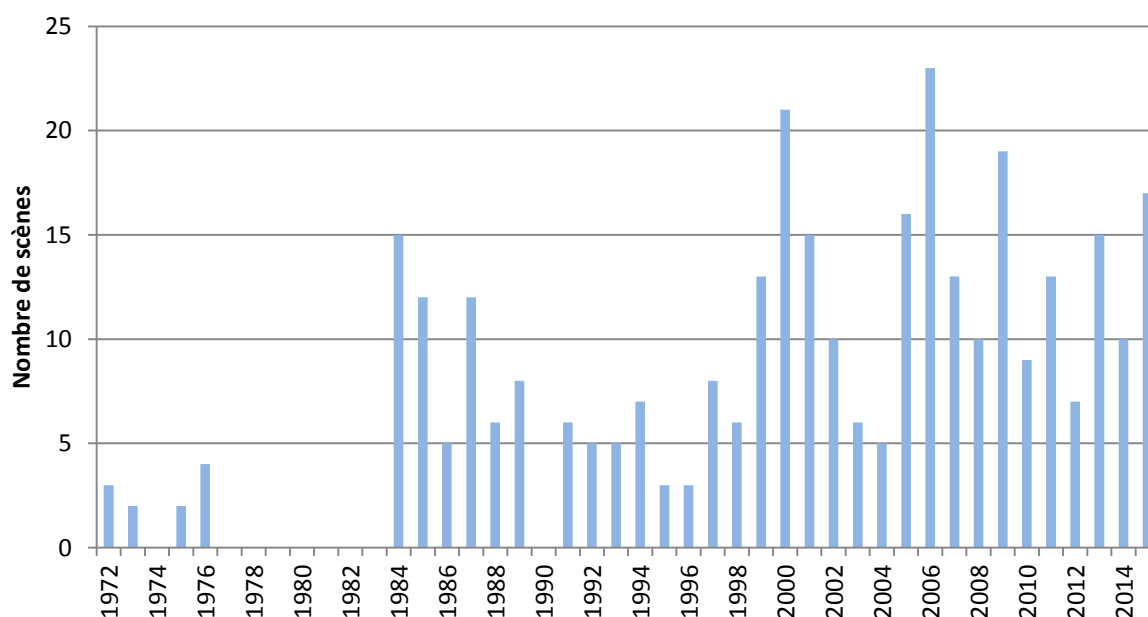


fig. 9 Analyse du nombre de scènes Landsat rassemblées dans notre base de données

Historiquement, USGS ne demandait pas de copie des données archivées dans les stations au sol, ainsi, une grande partie des données internationales n'ont pas été dupliquées dans les archives de l'USGS. Afin d'obtenir toutes les archives mondiales de la série Landsat et de rendre leur accès public, une initiative de consolidation a débuté en 2010 ([Landsat Global Archive Consolidation \(LGAC\)](#)) qui devrait durer jusqu'en 2016. Actuellement, l'USGS détient plus de 3 millions de scènes dans ses archives.

Il serait conseillé de contrôler périodiquement les archives EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>) et GloVis (<http://glovis.usgs.gov>) pour des compléments de mises à jour de notre base de données spécialement pour les années sans images.

INDEX BD LANDSAT

Afin de gérer cette grande quantité d'images (environ 330), une base de données a été constituée dans un fichier Excel (Tableau 6) nommé "INDEX BD LANDSAT" avec des liens relatifs qui amènent l'utilisateur instantanément dans le dossier où se trouve les bandes de l'image de la scène.

Tableau 6 Présentation de la base de données INDEX BD LANDSAT avec l'hyperlien reliant directement l'utilisateur aux bandes.

DATE_ACQUIRED	LANDSAT_SCENE_ID	DATA_TYPE	SPACECRAFT_ID	SENSOR_ID	WRS_PATH	WRS_ROW	Station_ID	CLOUD_COVER	IMAGE_QUALITY	Lien
21.09.1972	LM12110281972265GDS04	L1T	LANDSAT_1	MSS	211	028	XXX	0	0	Lien
09.10.1972	LM12110281972283AAA05	L1T	LANDSAT_1	MSS	211	028	XXX	0	0	Lien
09.10.1972	LM12110281972283AAA05	L1T	LANDSAT_1	MSS	211	028	XXX	0	0	Lien
20.03.1973	LM12110281973079AAA04	L1T	LANDSAT_1	MSS	211	028	XXX	0	0	Lien
20.03.1973	LM12110281973079AAA04	L1T	LANDSAT_1	MSS	211	028	XXX	0	0	Lien
24.04.1975	LM22110281975114GMD07	L1T	LANDSAT_2	MSS	211	028	XXX	0	0	Lien

Les entêtes des colonnes (Tableau 6) sont directement tirées des codes des fichiers de métadonnées (*.MTL.txt) accompagnant les images. Le fichier permet, d'une manière simple, de faire des recherches selon les critères de l'utilisateur notamment par date (DATE_ACQUIRED), par type de satellite (SPACECRAFT_ID), par type de capteur (SENSOR_ID) par numéro d'identification de la scène (LANDSAT_SCENE_ID), par la numérotation des orbites (WRS_PATH) et des lignes d'images (WRS_ROW) et par station de réception (Station_ID).

En plus, la qualité de l'image, tant d'un point de vue de couverture nuageuse (CLOUD_COVER), mais aussi de critère de qualité d'image (IMAGE_QUALITY) apparaît dans le fichier.

Tableau 7 Explication des entêtes du fichier INDEX BD LANDSAT

Informations générales			
DATE_ACQUIRED	LANDSAT_SCENE_ID	DATA_TYPE	SPACECRAFT_ID
Date d'acquisition au format DD.MM. YYYY	Numéro de la scène	Principalement L1T	Numéro Landsat, 1-8
SENSOR_ID	WRS_PATH*	WRS_ROW*	Station_ID
Type de capteur	Numérotation des orbites au total 233	Numérotation des lignes des images au total 248	Station de réception au sol
Information sur la qualité de l'image			
CLOUD_COVER		IMAGE_QUALITY	
% de couverture nuageuse		9 correspond à une scène parfaite	
Plus d'informations sur les métadonnées sur: http://landsat.usgs.gov/metadataatlist.php			

*Pour la région lémanique: path = 196, row = 28

Afin de compléter les images manquant de la série, le [NPOC](#) (Swiss National point of contact for Satellite images) a été contacté. Des données ont été transmises, cependant, elles sont d'assez mauvaise qualité (couverture nuageuse importante), pour la plupart, ne contiennent pas de métadonnées au format standard et ne couvrent que partiellement la région lémanique. De ce fait, cette petite collection (Tableau 8) de 7 images n'a pas été intégrée au fichier Excel mais transmise en tant que dossier à consulter à part.

Tableau 8 Liste des images Landsat reçues par NPOC

Date	Satellite/Capteur	Path/Row
20.09.1972	Landsat 1 MSS	210/028
13.07.1975	Landsat 1 MSS	210/028
14.07.1975	Landsat 1 MSS	211/027
25.11.1975	Landsat 2 MSS	210/028
17.04.1976	Landsat 1 MSS	210/028
16.07.1990	Landsat 4 TM	195/028
09.10.1990	Landsat 5 TM	195/028

Les fichiers de téléchargements de toutes les images seront transmis au Dr. Giuliani ainsi que le fichier INDEX BD LANDSAT.

6 Méthodes

La figure 10 représente schématiquement les étapes méthodologiques de ce présent travail pour ce qui est de la partie comparaison des données *in situ* et images satellitaires.

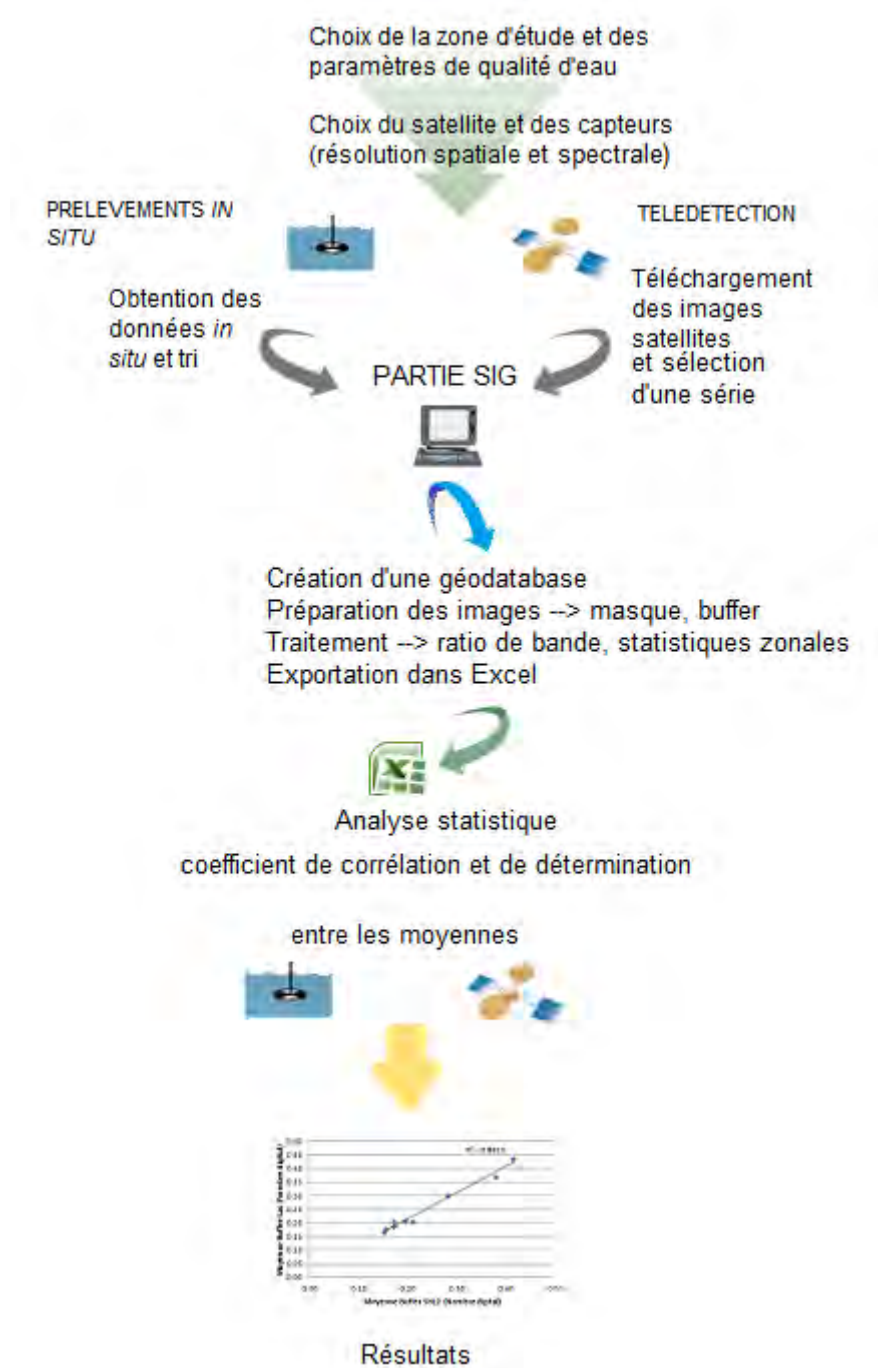


fig. 10 Résumé schématique du travail effectué (inspiré de : [source](#))

6.1 Zone d'étude

Le choix s'est porté sur le lac Léman qui est le plan d'eau le plus important d'Europe occidentale (580 km²) et assure l'alimentation en eau potable pour plus de 600'000 personnes (CIPEL, 2010).

Partagé entre la France et la Suisse (fig. 11), à une altitude de 372 m, le Léman est un lac profond au climat tempéré.



fig. 11 Localisation du lac Léman en Suisse (tiré de : [source](#))

Sa profondeur maximum est de 309.7 m et son volume d'eau est de 89 km³ (CIPEL, 2004). Il est communément séparé par sa forme en deux parties nommées (fig. 12): le Grand-lac et le Petit-lac.

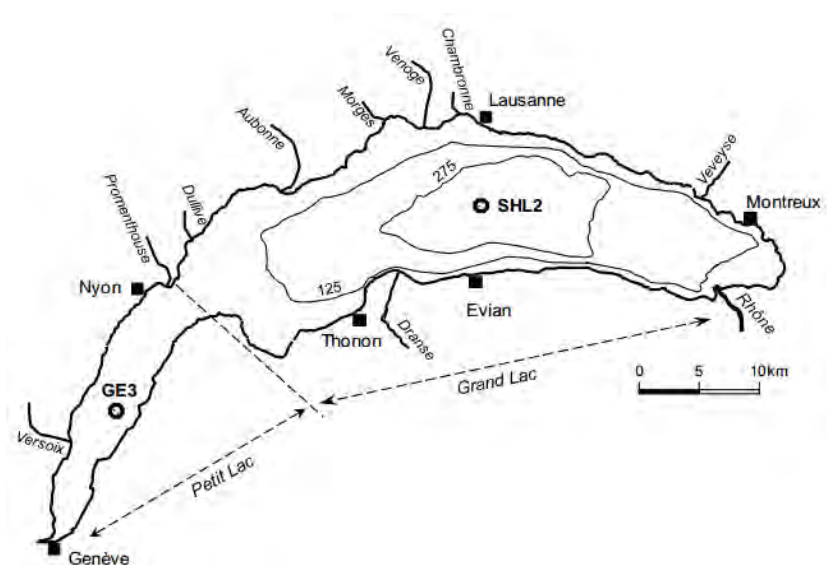


fig. 12 Carte du Léman avec localisation des points de prélèvement in situ SHL2 et GE3 (Source: CIPEL, 2015)

Le bassin versant du lac (7400 km² sans le lac) est constitué de roches cristallines peu érodables et de roches carbonatées et gypseuses qui sont elles à l'origine de la minéralisation moyenne des eaux. Réparti entre les territoires suisse (Genève, Vaud et Valais) et français (Pays de Gex et Chablais), le bassin versant du Léman est caractérisé par son altitude moyenne élevée (env. 1670 m) et son relief accentué. Actuellement, près d'un million de personnes vivent dans le bassin lémanique et y exercent des activités agricoles et industrielles (CIPEL, 2014) Le Rhône du Valais est l'affluent le plus important, ensuite viennent la Dranse du Chablais, la Venoge, la Promenthouse et l'Aubonne.

Une fiche signalétique du Léman et de son bassin versant avec plus de détails se trouve en annexe 7.

6.1.1 Evolution trophique du Léman

Pour définir le niveau trophique du Léman, on s'appuiera sur la classification définie par l'OCDE (OCDE, 1982) basée sur plusieurs paramètres (Tableau 9).

Tableau 9 Classification trophique des lacs en fonction des valeurs limites de certains paramètres (OCDE, 1982)

Moyenne/an	Ultra-oligotrophe	Oligotrophe	Mésotrophe	Eutrophe	Hypertrophe
Phosphore total (µg/L)	≤ 4	≤ 10	10-35	35-100	≥100
Chlorophylle- a (µg/L)	≤ 1	≤ 2.5	2.5-8	8-25	≥25
Profondeur de Secchi (m)	≥ 12	≥ 6	6-3	3- 1.5	≤ 1.5

Ce n'est que vers la fin des années 50 que la santé du Léman préoccupe les gouvernements riverains. Le Léman fait l'objet, depuis 1957, d'un suivi physico-chimique et biologique par la CIPEL (voir § 3.5.2), commission internationale, mandatée par les deux gouvernements.

Alors qu'en 1959 la concentration annuelle moyenne totale de phosphore (P_{tot}) était de 10 µg/L et que le lac était considéré comme oligotrophe, en 1979 elle passe à 90 µg/L (fig. 13). Aujourd'hui, elle s'élève à 20.5 µg/L (données 2014) et l'objectif 2020 de la CIPEL serait de pouvoir descendre à une concentration < 15 µgP/L (entre 10 et 15 µgP/L) afin d'éviter le développement algal excessif et garantir la production d'eau potable, un peuplement piscicole dominé par les poissons dits "nobles" (Salmonidés), la baignade et des concentrations d'oxygènes suffisantes dans les zones profondes (CIPEL, 2010).

6.1.2 Choix des paramètres

Ces trois variables (phosphore, Chl-*a*, transparence) sont les plus communément utilisées pour qualifier l'état trophique d'un lac (Chipman *et al.*, 2009; Kloiber *et al.*, 2002b) et seront utilisées dans le cadre de ce travail en tant que données *in situ* à comparer aux images satellites. Reste à noter que contrairement à la Chl-*a* et à la transparence (profondeur de Secchi), le phosphore, qui est le facteur limitant du développement algal, ne possède pas de propriétés optiques mesurables en

télédétection mais est fortement corrélé à la chlorophylle et peut être indirectement déduit (Li & Li, 2004).

C'est précisément en partant de la courbe de concentration du phosphore total (fig. 13) caractéristique, que nous émettons l'hypothèse que la télédétection pourrait montrer un même patron de tendance. La chlorophylle (fig. 14) et la transparence (fig. 15) vont aussi être testées.

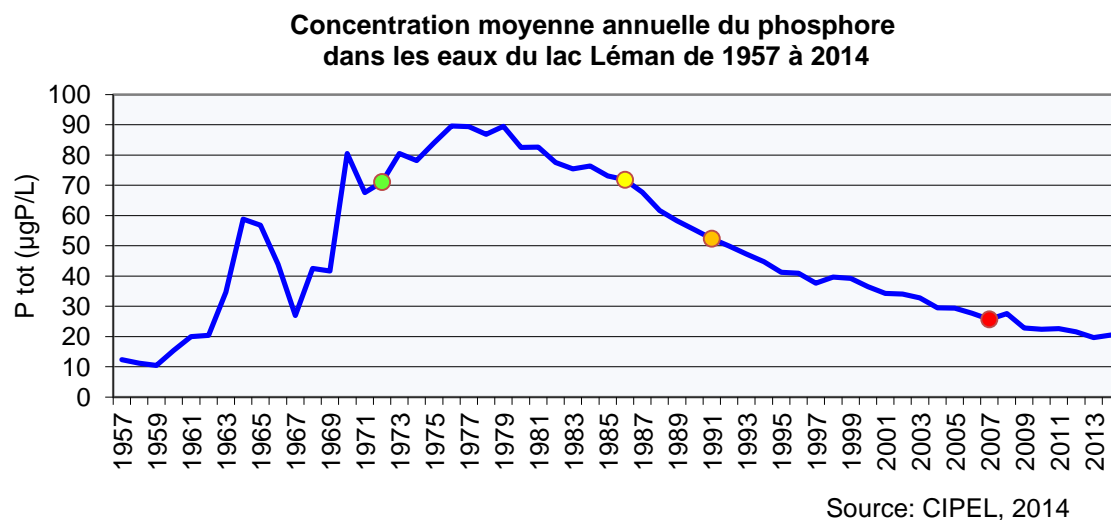


fig. 13 Concentration moyenne annuelle du phosphore total dans le Grand Lac 1957 à 2014

- Suisse, 1972: mise en service de la 1^{ère} STEP pratiquant la déphosphatation
- Suisse, 1986: interdiction des phosphates dans les lessives (toléré dans les détergents pour lave-vaisselles)
- 1991: Directive européenne 91/271 obligation pour les Etats membres à déphosphater les eaux usées
- France, 2007: interdiction de l'utilisation des phosphates dans les lessives

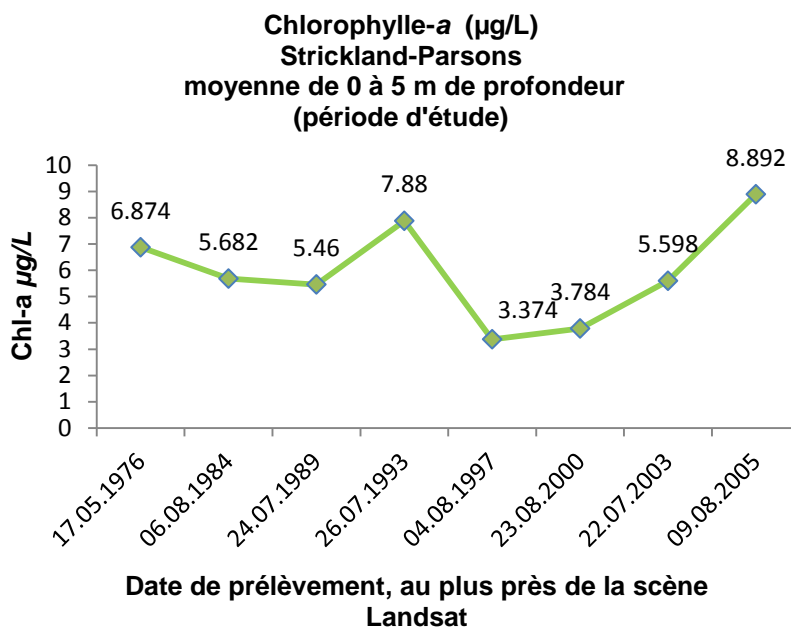


fig. 14 Concentration de Chl-a (moyenne de 0 à 5 m de profondeur) selon notre période d'étude (pas de données pour 1972)

(source: © SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains, CIPEL, 06.01.2016, développé par le dispositif Eco-Informatique ORE de l'INRA)

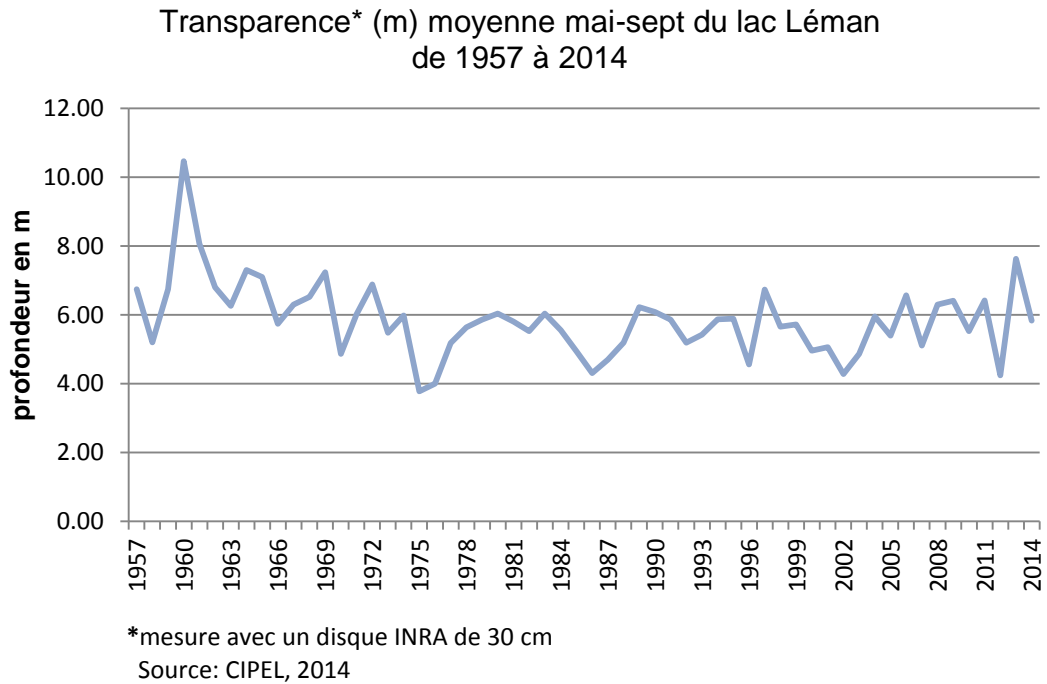


fig. 15 Transparence moyenne du lac Léman

On ne note aucune corrélation avec la courbe du P_{tot} (fig. 13), alors que l'on sait que le niveau trophique du lac a beaucoup changé durant 1957-1979-2013. Ainsi, la transparence moyenne ne décrit pas bien le niveau trophique qui est beaucoup mieux exprimé par le P_{tot} (Jaquet, comm. pers., janvier 2016).

6.2 Choix de la période d'étude

Afin d'avoir des données de concentrations du P_{tot} avant son pic en 1979 où la concentration était arrivée jusqu'à 90 $\mu\text{g/L}$ (fig. 13) il a été décidé de prendre les premières images disponibles de Landsat (1972, 1976). La période d'étude s'étend donc de 1972 à 2005. Sa fin a aussi été décidée en relation avec l'état trophique du lac, la profondeur du bloom algal (jusqu'à -23 m, Jaquet, comm. pers., août 2015) et donc la limitation de pénétration des capteurs des satellites.

6.3 Sélection des images

De préférence et dans la mesure de l'existence de telles images, la sélection s'est portée sur des images en été, plus au moins dans la même période, en général juillet et août, sauf pour les années 1972 et 1976 pour la raison évoquée ci-dessus (Tableau 10).

Tableau 10 Images sélectionnées avec indication de l'origine de la source

Date	N° d'identification de la scène	Satellite	Capteur	WRS Path/Row	Niveau de données	Source
09.10.1972	LM12110281972283AAA05	Landsat 1	MSS	211/028	L1T	USGS
06.05.1976	LM22110281976127GDS03	Landsat 2	MSS	211/028	L1T	USGS
30.07.1984	LM51960281984212AAA03	Landsat 5	MSS	196/028	L1T	USGS
28.07.1989	LT51960281989209ESA00	Landsat 5	TM	196/028	L1T	ESA
23.07.1993	LT51960281993204ESA00	Landsat 5	TM	196/028	L1T	ESA
03.08.1997	LT51960281997215ESA00	Landsat 5	TM	196/028	L1T	ESA
19.08.2000	LE71960282000232ESA00	Landsat 7	ETM	196/028	L1T	ESA
19.07.2003	LT51960282003200MTI01	Landsat 5	TM	196/028	L1T	USGS
09.08.2005	LT51960282005221KIS00	Landsat 5	TM	196/028	L1T	USGS

6.4 Caractéristiques des satellites

Chaque satellite a ses propres caractéristiques que cela soit d'un point de vue des résolutions spatiale, spectrale et temporelle. Pour ce qui est des satellites Landsat, leur résolution temporelle est de 16 jours. Se référer à l'annexe 5 qui décrit les principales caractéristiques des satellites Landsat et de leurs capteurs.

Il faut cependant porter une attention particulière notamment à la numérotation des bandes qui varie au cours du temps (par exemple entre Landsat 1 et 2 MSS et Landsat 5 MSS) et observer les largeurs de bandes. A ce propos, on remarquera que les largeurs de bandes de Landsat 5 TM sont beaucoup plus étroites que pour les capteurs précédents. Dès lors, il y a une bande bleue (450-520 nm) qui couvre le premier pic d'absorption de la chlorophylle-*a* (fig. 16), la bande verte est plus étroite (520-600 nm) qu'avant et la bande rouge (630-690 nm) recouvre le second pic. Ainsi, les bandes visibles de Landsat 5 sont en principe appropriées pour la détection de concentration de Chl-*a* dans les eaux lacustres (Mancino *et al.*, 2009).

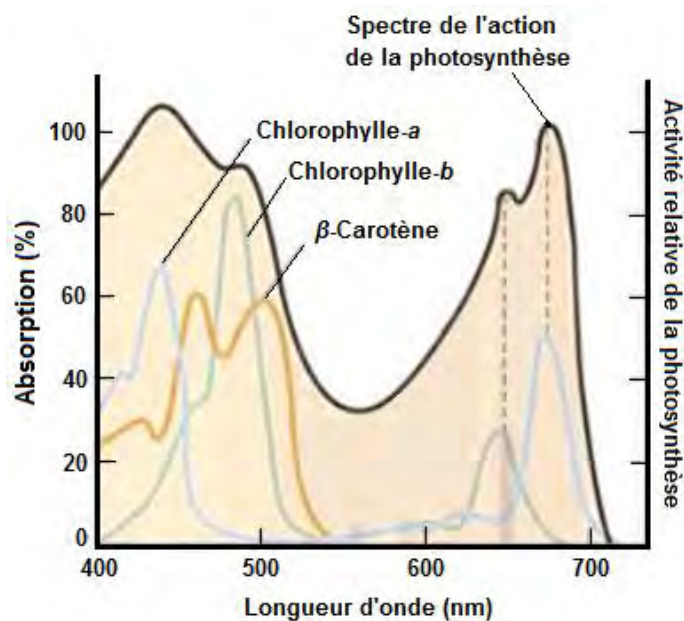


fig. 16 Spectre d'absorption minimum de la Chlorophylle-a à 520 et 550 nm et absorption maximale à 445 et 665 nm (tiré de Lodish *et al.*, 2005)

6.5 Acquisition des données

6.5.1 Données *in situ*

La CIPEL effectue un suivi de la qualité de l'eau du lac Léman depuis la fin des années 1950. La fréquence des mesures prises sur le lac Léman par la CIPEL aux points SHL2 et GE3 varient selon les saisons entre une à deux fois par mois (Kiefer *et al.*, 2015). Pour accéder à cette base de données, une demande a été faite à l'INRA de Thonon-les-Bains (France) qui gère les accès. Ces données auront été essentielles pour ce travail. La demande a été faite pour le point SHL2.

Dans le but de ce travail, nous avons pu obtenir les données mensuelles pour le P_{tot} , la transparence et la chlorophylle de 1972 à 2005. Nous notons uniquement une date correspondant au passage du satellite (Tableau 11). La liste détaillée des données *in situ* se trouve en annexe 8.

Tableau 11 Comparaison des dates de prélèvement et des scènes Landsat

P_{tot}	Prélèvement in situ		Télédétection	Différence (jour)
	Transparence	Chlorophylle	Image satellite	
18.10.1972	18.10.1972	No data	09.10.1972	9
17.05.1976	17.05.1976	17.05.1976	06.05.1976	11
06.08.1984	06.08.1984	06.08.1984	30.07.1984	7
24.07.1989	24.07.1989	24.07.1989	28.07.1989	4
26.07.1993	26.07.1993	26.07.1993	23.07.1993	3
04.08.1997	04.08.1997	04.08.1997	03.08.1997	1
23.08.2000	23.08.2000	23.08.2000	19.08.2000	4
22.07.2003	22.07.2003	22.07.2003	19.07.2003	3
09.08.2005	09.08.2005	09.08.2005	09.08.2005	0

6.5.2 Images satellites

Comme mentionné précédemment (§ 5.2.1), les images proviennent de l'USGS et de l'ESA.

6.5.3 Données météorologiques

Les données météorologiques (température, précipitations et vitesse du vent) ont été extraites avec l'application Climap-Net de MétéoSuisse dont le groupe Climat de l'ISE a la licence d'utilisation. Elles ont été tirées de la station de Pully en prenant une marge d'une semaine avant la date de passage du satellite dans l'optique de mieux comprendre l'influence de grosses précipitations sur la turbidité des eaux. Lors de la requête, le paramètre direction des vents n'a pas été extrait, ce qui aurait permis de mieux comprendre les images de température dont les patterns peuvent être fortement influencés par la direction des vents. Par manque de temps, une nouvelle requête n'a pas pu être réalisée.

On trouvera en annexe 9 le résultat de l'extraction qu'à partir de l'image de 1984 (pas de données disponibles avant cette date (Goyette, comm. pers., décembre 2015).

6.6 Traitement des images Landsat

Tout le travail SIG a été effectué avec le logiciel ArcGIS, ver. 10.3, ESRI © et le logiciel open source GRASS GIS 7.0.1.

Se référer à la procédure exhaustive qui se trouve en annexe 10 et qui est la base de notre travail. Quelques points essentiels sont cependant repris dans cette section.

Deux géodatabases ont été créées pour des projets différents:

La géodatabase "LS_utm.gdb" correspond au projet avec correction atmosphérique, cette dernière ayant été réalisée dans le logiciel opensource GRASS⁶. La correction atmosphérique est faite selon la méthode "Dark object subtraction (dos)" qui part du principe que sur chaque image il y a au moins un pixel avec une réflectance proche de 0 et que s'il n'y en a pas, la différence correspond à des perturbations atmosphériques. Ainsi, en soustrayant cette différence, on élimine en partie ces effets (IGEAT, s. d.). Les informations nécessaires à la correction sont tirées du fichier des métadonnées *.MTL.txt de l'image. Plusieurs corrections sont proposées, "dos3" a été appliquée (diffusion de Rayleigh).

L'autre géodatabase rassemblant les projets les plus importants pour nos analyses se nomme: LANDSAT_SANSCORR.gdb.

Plusieurs projets (*.mxd) ont par la suite été créés afin de préparer les images (§ 6.6.1 et suivants) et exécuter les statistiques zonales (§ 6.7.1).

6.6.1 Projection

Les images sont projetées selon la projection : Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 31N et le datum est l'ellipsoïde WGS84. Après un premier essai en reprojettant les images dans le système de coordonnées suisses et après discussion avec K. Allenbach (comm. pers. novembre 2015), une nouvelle géodatabase sans changement de projection a été refaite, ceci afin d'éviter les distorsions.

⁶ Avec l'aide précieuse de Nikos Alexandris

6.6.2 Masque

La fauchée des scènes Landsat mesurent environ 185 km. Afin de travailler avec une image correspondant à notre zone de travail, un masque est créé (rectangle rouge, fig. 17). Enfin, ce masque est utilisé pour extraire la zone d'intérêt avec l'outil ArcGIS: Extract by mask (ArcToolBox) sur chaque bande. Résultat: Création de rasters à la taille du Léman pour chaque bande.

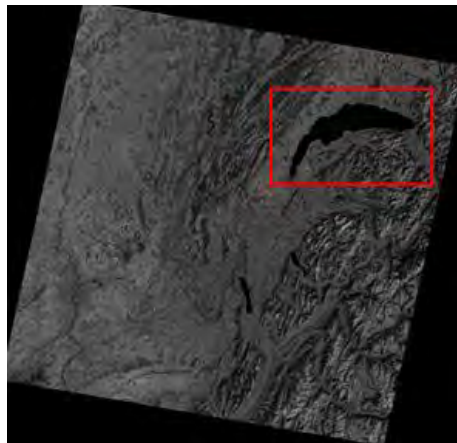


fig. 17 Exemple d'une scène entière Landsat et du masque

6.6.3 Positionnement du point de prélèvement *in situ* SHL2

Cette étape est essentielle puisque toute notre analyse se basera autour de ce point comme base de comparaison. Les coordonnées WGS84 du point SHL2 sont insérées dans un tableau Excel qui sera transformé en table lue par ArcGIS (voir annexe 10).

6.6.4 Zone tampon

Une zone tampon (buffer) autour de ce point a été créée ("buffer SHL2"). Il s'agit d'une zone tampon de 2x2 pixels pour les capteurs avec une résolution à 60 m et de 2x2 pixels pour les capteurs à 30 m de résolution. Pour le projet avec corrections atmosphériques, le buffer autour du point SHL2 a été utilisé pour couper la scène.

Un autre buffer a été créé avec la couche du SITG "SHP_GEO_LAC_LEMAN_SITG" intégrée dans notre projet. Nous avons retiré 150 m du contour du lac afin d'être sûr de ne pas avoir de perturbation des pixels des berges et des eaux peu profondes. Ce buffer lac sera utilisé plus tard (au § 11.3.2 de l'annexe 11). Il a aussi été utilisé dans un deuxième temps, pour couper les scènes dans le projet avec correction atmosphérique ce qui nous aura permis d'établir des cartes de température du lac (voir Annexe 13)

6.6.5 Ratios de bandes

Divers ratios de bandes sont testés afin de trouver une corrélation avec les paramètres de qualité de l'eau (Tableau 12).

Tableau 12 Présentation des divers ratios de bandes selon les projets

projet sans corrections atmosphériques	projet AVEC corrections atmosphériques
Bandes	Bandes
TM1/TM4 (Bleu/PIR)	TM1/TM3 (Bleu/Rouge)
TM1/TM3 (Bleu/Rouge)	TM2/TM4 (Vert/PIR)
TM2/TM4 (Vert/PIR)	TM2/TM3 (Vert/Rouge)
TM2/TM3 (Vert/Rouge)	TM4/TM1 (PIR/Bleu)
TM4/TM1 (PIR/Bleu)	TM3/TM1 (Rouge/Bleu)
TM3/TM1 (Rouge/Bleu)	
TM3/TM2 (Rouge/Vert)	
Bande TM 4 (PIR)	
Bande TM1 (Bleu)	

Ces ratios sont réalisés avec l'outil Raster calculator dans ArcToolBox>Spatial analyst.

Raster Calculator permet de faire des calculs sur les rasters. Le résultat sera la création d'un nouveau raster en sortie. Comme nous divisons les nombres digitaux (ND) des bandes brutes (0-255 pour une image à 8 bits), nous allons avoir des chiffres à virgule; il faut alors insérer « Float » dans la formule pour que cela fonctionne (exemple avec les bandes rouge et verte):

Float("1989_b3")/ Float("1989_b2")

Le résultat sera enregistré en indiquant les bandes.

En faisant un rapport de bandes, cela équivaut à des corrections atmosphériques (Jaquet, comm. pers., novembre 2015) (fig. 18).

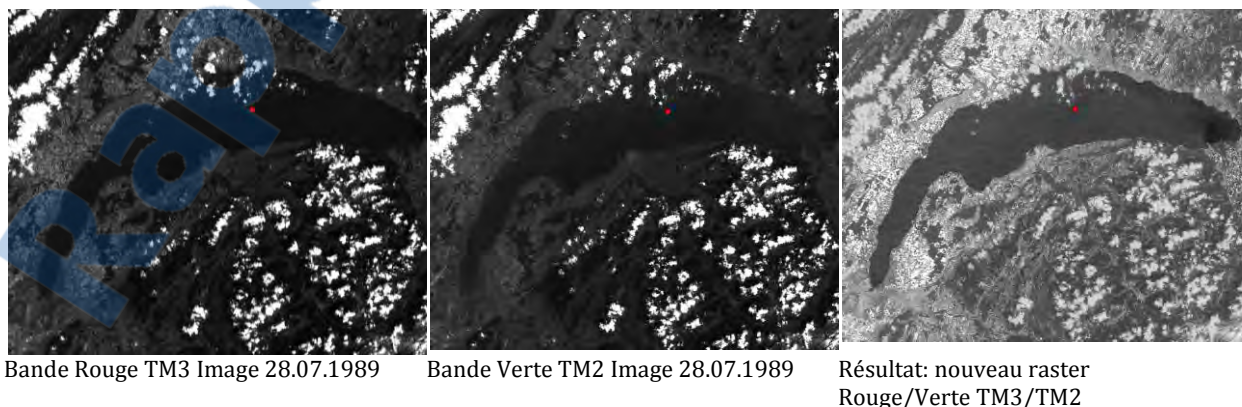


fig. 18 Exemple de l'effet du ratio de bandes : création d'un nouveau raster

Le travail de préparation est terminé, les statistiques sur ArcGIS peuvent commencer.

6.7 Analyse statistique

Cette section se compose de deux parties: la partie statistique compilée dans ArcGIS avec l'outil "Zonal statistics as table" et la seconde partie dans le logiciel Excel. Elles sont complémentaires.

6.7.1 Statistiques zonales dans ArcGIS⁷

Des statistiques zonales (Zonal Statistics as a table dans ArcToolBox>Spatial Analyst) ont été appliquées sur les rasters issus de Raster Calculator (§ 6.6.5). Cet outil permet de calculer toutes les statistiques sur le raster selon une zone définie et de donner les résultats sous forme de table. Notre zone est le buffer SHL2 (ou buffer lac selon les calculs) autour du point SHL2 où les mesures *in situ* sont réalisées.

Pour le projet sans correction atmosphérique, les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes, alors que les valeurs du projet avec correction atmosphérique, correspondent elles, à la réflectance ou à la température (pour la Bande 6).

La table des résultats est ensuite exportée dans un fichier Excel.

6.7.2 Statistiques dans Excel

Les données *in situ* auront été au préalable sélectionnées et choisies selon la date la plus proche de la scène (§ 6.5.1) (se référer à l'annexe 8 "Données *in situ*"). Pour le P_{tot} , après discussion avec J-M Jaquet (comm. pers., novembre 2015) plusieurs moyennes ont été calculées par profondeur de prélèvement (0-2.5 m, 0-5 m, 0-10 m et 0-20 m). Des corrélations ont été calculées entre la moyenne de concentration annuelle et ces diverses moyennes aux différentes profondeurs (voir annexe 8). Il ressort que la corrélation la plus forte est celle de la moyenne calculée aux profondeurs 0-20 m ($r=0.838$).

En représentant graphiquement toutes les courbes (fig. 19), on constate qu'elles ont la même forme caractéristique que celle de la concentration annuelle de P_{tot} dans le Léman (fig. 13). A noter qu'il n'y a pas de données pour 1972 et 1976 à la profondeur 0-2.5 m puisque les mesures à cette profondeur n'étaient pas encore relevées à ces dates-ci.

⁷ Information sur les statistiques zonales sur le site d'ESRI:

<http://desktop.arcgis.com/fr/desktop/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/zonal-statistics-as-table.htm>

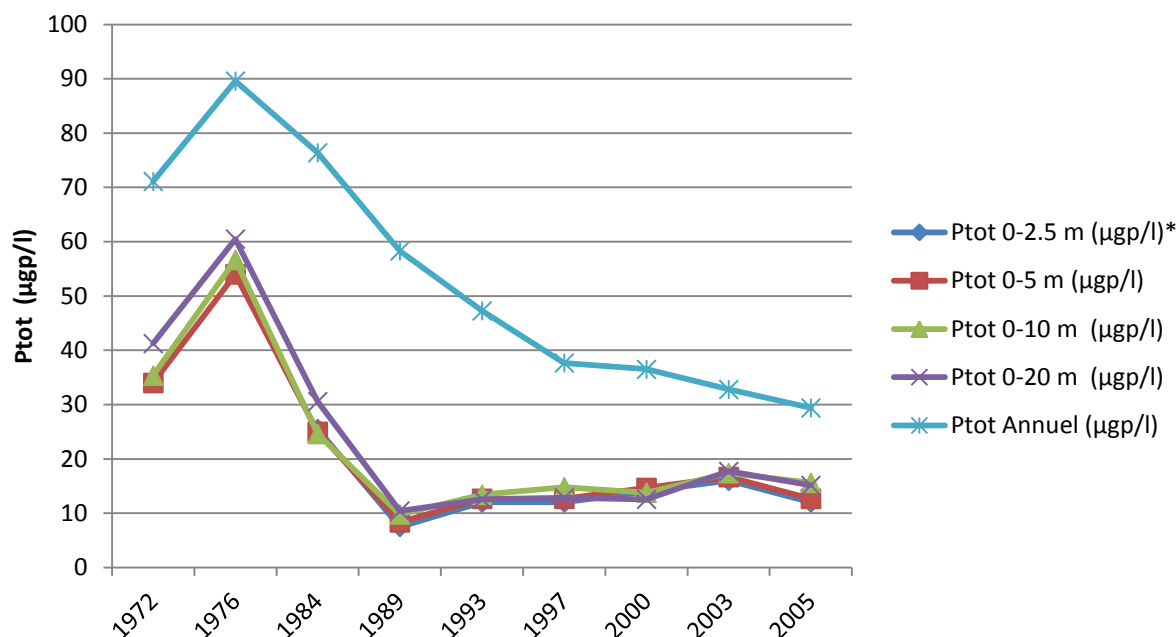


fig. 19 Comparaison des moyennes de P_{tot} pour différentes profondeurs et de P_{tot} annuel

La chlorophylle-*a* a été calculée en moyenne de 0-5 m de profondeur en relation avec la capacité de pénétration des capteurs dans l'eau selon la longueur d'onde.

Les résultats des statistiques zonales sont rassemblés dans un seul fichier Excel et l'analyse de comparaison des moyennes peut ainsi commencer. Nous avons utilisé la moyenne (MEAN) des tableaux des résultats des statistiques zonales que nous avons comparée aux moyennes calculées des données *in situ*.

L'analyse s'est effectuée dans Excel (Menu > Données --> Utilitaire d'analyses > Sélectionner Analyse de corrélation). Selon le résultat de la corrélation ($r > 0.5$), des graphiques (courbes) et des nuages de points avec indication du coefficient de détermination (R^2) ont été produits.

Pour le calcul de la corrélation, la variable dépendante (y) est le résultat de la moyenne des statistiques zonales (MEAN).

7 Résultats et discussion

Tous les résultats des analyses statistiques (Tableau 13 et Tableau 17) peuvent être consultés à l'annexe 11 (sans correction atmosphérique) et à l'annexe 12 (avec correction atmosphérique).

7.1 Corrélation entre télédétection et données *in situ*

La présentation se fait en deux parties, dans un premier temps avec les résultats pour le projet sans correction atmosphérique (§ 7.1.1) et enfin, ceux pour le projet avec correction atmosphérique (§ 7.1.2)

7.1.1 Projet sans correction atmosphérique

Seul le résultat de la plus forte corrélation est présenté dans cette section. Le tableau 13 résume les résultats du projet sans correction atmosphérique. Lorsque $r < 0.5$, R^2 n'a pas été calculé.

Tableau 13 Résultats finaux des analyses, projet sans correction atmosphérique

projet sans corrections atmosphériques						
<i>In situ</i>	P_{tot}		Chl- <i>a</i>		Transparence	
Bandes	<i>r</i>	R^2	<i>r</i>	R^2	<i>r</i>	R^2
TM1/TM4 (Bleu/PIR)	0.859	0.738	0.357	-	0.226	-
TM1/TM3 (Bleu/Rouge)	-0.77	0.593	0.578	0.334	0.195	-
TM2/TM4 (Vert/PIR)	0.485	-	0.324	-	0.094	-
TM2/TM3 (Vert/Rouge)	0.871	0.759	0.077	-	0.208	-
TM4/TM1 (PIR/Bleu)	0.946	0.895	0.139	-	0.115	-
TM3/TM1 (Rouge/Bleu)	0.875	0.765	0.499	-	0.132	-
TM3/TM2 (Rouge/Vert)	0.822	0.676	0.058	-	0.208	-
Bande TM 4 (PIR)	0.642	0.416	0.525	0.275	0.677	0.458
Bande TM1 (Bleu)	0.845	0.711	0.172	-	0.406	-

On constate d'une manière générale que la Chl-*a* et la transparence n'ont pas de coefficient de corrélation proche de 0.8 et que c'est avec le P_{tot} que nous trouvons les plus fortes corrélations positives et négatives.

Ratio TM4/TM1 et P_{tot}

On obtient la plus forte corrélation pour le ratio des bandes TM4/TM1.

Voici le tableau des résultats (Tableau 14) des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différents pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs correspondent au rapport des bandes brutes. Notons les très petits écarts-types (STD).

Tableau 14 Résultats des statistiques zonales, ratio des Bandes TM4/TM1

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b6b4	0.341	0.429	0.380	0.036
lm2_1976_b6b4	0.382	0.485	0.414	0.041
lm5_1984_b3b1	0.257	0.300	0.280	0.015
lt5_1989_b4b1	0.167	0.173	0.170	0.002
lt5_1993_b4b1	0.197	0.222	0.209	0.010
lt5_1997_b4b1	0.180	0.200	0.194	0.008
le7_2000_b4b1	0.167	0.174	0.171	0.003
lt5_2003_b4b1	0.140	0.158	0.151	0.007
lt5_2005_b4b1	0.145	0.170	0.153	0.010

A noter toutefois que les satellites de 1972 à 1984 n'ont pas de bande bleue, le ratio a donc été fait pour les 3 premières années sur du vert/PIR.

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Ce ratio a une très bonne corrélation avec la moyenne de concentration de P_{tot} calculée pour une profondeur de 0-20 m (coefficient de détermination de $R^2=0.8948$). Bien qu'avec un effectif de 9 images ($N=9$) les résultats des corrélations entre les moyennes calculées aux profondeurs 0-5 m, 0-10 m et la corrélation de P_{tot} (prof. 0-20 m) ne soient pas significativement différents (Tableau 15).

Tableau 15 Corrélation entre Moyenne (résultat des statistiques zonales) et moyenne de P_{tot} aux différentes profondeurs

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)*	0.735
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.929
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.923
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.946
P_{tot} Annuel ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.889

La moyenne (MEAN, résultat des statistiques zonales) est prise comme variable dépendante (y) lors du calcul de la corrélation.

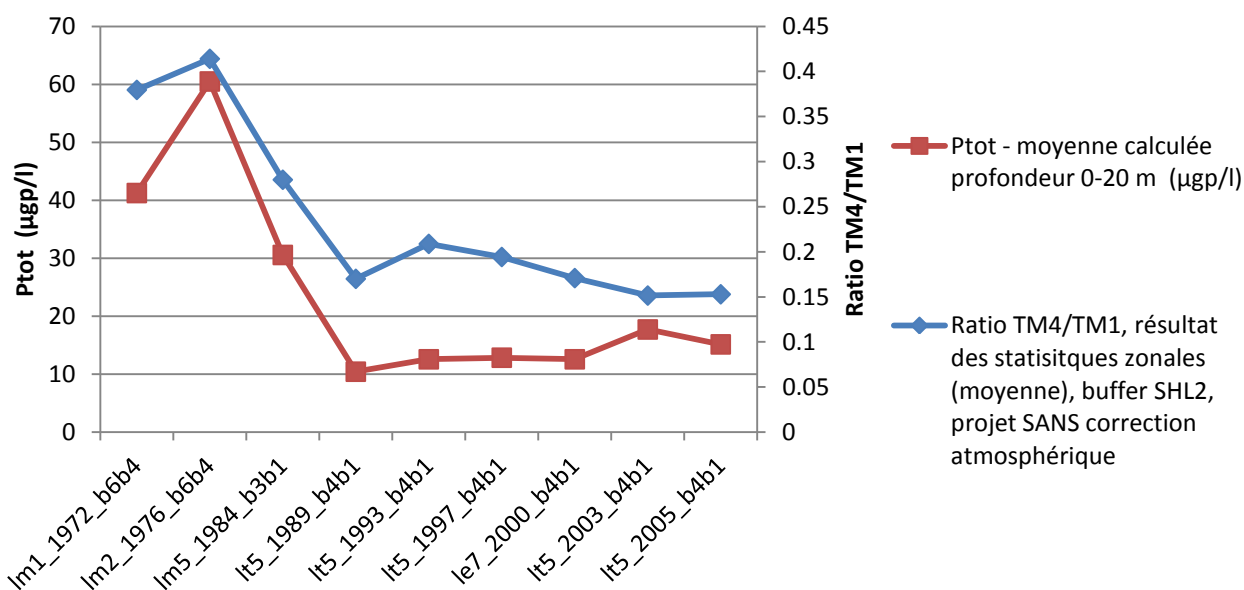


fig. 20 Graphique comparant les courbes de P_{tot} moyenne 0-20 m et le ratio $\text{TM4}/\text{TM1}$ (résultat des statistiques zonales)

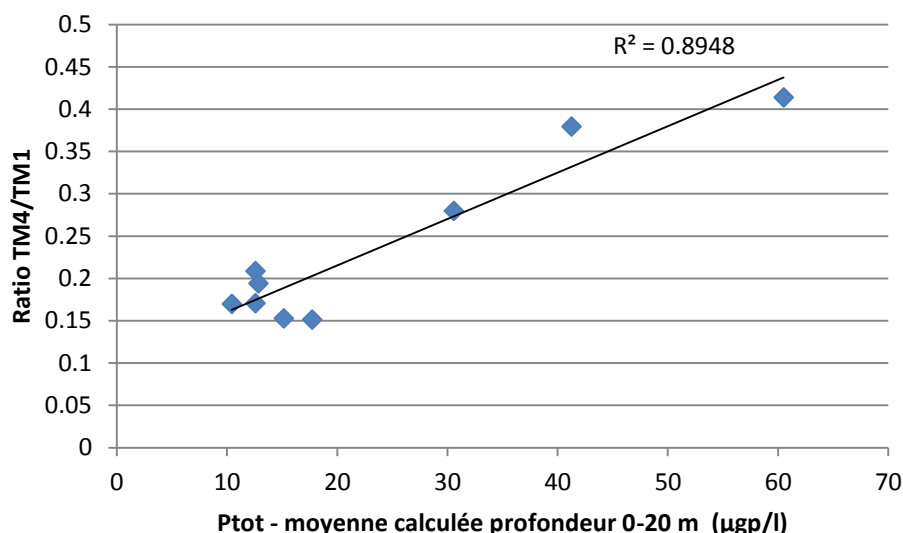


fig. 21 Nuage de points avec courbe de tendance et coefficient de détermination pour le ratio TM4/TM1 et Ptot (0-20 m)

Une analyse supplémentaire va être réalisée (consulter § 11.3.2 de l'annexe 11) et ceci afin d'essayer de nous conforter dans le résultat de la corrélation (TM4/TM1 avec P_{tot} 0-20 m).

Nous allons comparer les bandes TM4, TM1, TM4/TM1 avec le résultat d'une statistique zonale sur l'entier du lac. Au préalable, une zone tampon (buffer) a été déterminée en retirant 150 m depuis les berges afin d'avoir un minimum d'influence des pixels des rives mais aussi des eaux peu profondes qui peuvent fausser le signal. Ensuite, des statistiques zonales pour les bandes TM4, TM1, TM4/TM1 sont calculées. Enfin, nous comparons les deux moyennes des statistiques zonales, l'une du résultat avec le buffer du lac entier et l'autre avec le résultat du buffer autour du point de prélèvement.

Les corrélations des rapports entre les deux buffers (Tableau 16) sont très fortes (elles sont toutes entre $r=0.91$ et 0.99 et $R^2=0.84$ - 0.99).

Tableau 16 Résultats des corrélations faites entre les bandes et les différents buffers

Bandes Buffer SHL2	Buffer Lake -150 m	r	R ²
TM4/TM1 (PIR/Bleu)	TM4/TM1 (PIR/Bleu)	0.991	0.9815
Bande TM 4 (PIR)	Bande TM 4 (PIR)	0.917	0.8408
Bande TM1 (Bleu)	Bande TM1 (Bleu)	0.997	0.994

On peut ainsi déduire que le buffer autour du point SHL2 est représentatif.

7.1.2 Projet avec correction atmosphérique

Seul le paramètre *in situ* P_{tot} a été comparé au projet avec correction atmosphérique.

Cinq ratios de bandes ont été testés sur le projet avec correction atmosphérique. Il s'agit de: TM2/TM4, TM2/TM3, TM1/TM3, TM4/TM1, TM3/TM1.

Le tableau ci-dessous (Tableau 17) récapitule les résultats statistiques (coefficient de corrélation $=r$ et coefficient de détermination $=R^2$). Lorsque $r < 0.5$, R^2 n'a pas été calculé.

Tableau 17 Résultats du projet avec correction atmosphérique

projet AVEC correction atmosphérique		
<i>In situ</i>	P _{tot}	
Bandes	r	R ²
TM1/TM3 (Bleu/Rouge)	0.273	-
TM2/TM4 (Vert/PIR)	0.626	0.392
TM2/TM3 (Vert/Rouge)	0.930	0.864
TM4/TM1 (PIR/Bleu)	-0.857	0.734
TM3/TM1 (Rouge/Bleu)	-0.820	0.672

Il ressort de cette analyse que seul le ratio de bandes TM2/TM3 (voir § 12.1.3 Annexe 12) a une forte corrélation positive ($r=0.930$ et $R^2 = 0.864$) entre la concentration en P_{tot} et la réflectance (moyenne, issue des statistiques zonales sur le buffer autour du point SHL2).

Deux autres fortes corrélations négatives sont ressorties des ratios de bandes TM4/TM1 ($r= - 0.857$, $R^2 =0.734$) et TM3/TM1 ($r= - 0.820$, $R^2=0.672$).

Comparaison des mêmes bandes ratios entre projets

Si l'on compare à présent (Tableau 18) les mêmes ratios de bandes entre projets, on peut faire les observations suivantes:

Tableau 18 Comparaison des résultats pour les mêmes ratios de bandes (projet sans et avec correction atmosphérique)

projet sans correction atmo			projet AVEC correction atmo		
<i>In situ</i>	P _{tot}		<i>In situ</i>	P _{tot}	
Bandes	r	R ²	Bandes	r	R ²
TM1/TM3 (Bleu/Rouge)	-0.77	0.593	TM1/TM3 (Bleu/Rouge)	0.273	-
TM2/TM4 (Vert/PIR)	0.485	-	TM2/TM4 (Vert/PIR)	0.626	0.392
TM2/TM3 (Vert/Rouge)	0.871	0.759	TM2/TM3 (Vert/Rouge)	0.930	0.864
TM4/TM1 (PIR/Bleu)	0.946	0.895	TM4/TM1 (PIR/Bleu)	-0.857	0.734
TM3/TM1 (Rouge/Bleu)	0.875	0.765	TM3/TM1 (Rouge/Bleu)	-0.820	0.672

Au vu du faible effectif, (N=9), les différences de r entre les deux projets ne sont pas significatives.

Les rapports TM2/TM3, TM4/TM1, TM3/TM1 dans les deux projets ont de fortes corrélations positives et négatives ce qui renforce encore le résultat (TM4/TM1) du projet sans correction atmosphérique.

Nous avons testé la transparence, car selon Jaquet (comm. pers., décembre 2015), avec ce paramètre, on devrait obtenir une meilleure corrélation en télédétection. Nos résultats sont au contraire les moins bons des trois autres paramètres testés.

Concernant les résultats pour la Chl-*a* (pas de corrélation), une explication pourrait provenir, soit du mauvais choix de ratios de bandes, soit peut-être aussi de la mauvaise période d'étude puisque le premier pic de bloom algal dans le Léman apparaît entre mi-mars et mi-mai suivi d'une période d'eau claire en juin (communément nommé Juniloch). La croissance des algues en été est moins intensive (Kiefer *et al.*, 2015). L'estimation de la Chl-*a* par satellite est limitée à la profondeur de pénétration de la lumière reçue par le capteur du satellite correspondant approximativement à la profondeur de Secchi. Mais ce problème sera résolu dans le futur grâce au satellite Sentinel-3 (Kiefer *et al.*, 2015).

Les résultats pour le projet sans correction atmosphérique concernant la bande TM4/TM1 sont à prendre avec précaution. En effet, il faut se rappeler que pour les trois premières années (1972, 1976 1984), il n'y a pas de bande bleue (Annexe 5). Les statistiques zonales ont donc été effectuées sur la bande verte. De plus, l'échantillon est statistiquement de petite taille.

8 Conclusion et recommandations

Les ratios testés dans ce travail ont été expérimentaux même si certains se retrouvent dans la littérature (TM3/TM2 chez Wu *et al.*, 2010 comme meilleur prédicteur de Chl-*a*). Par ailleurs, on constate que les ratios testés sur certains milieux aquatiques, ne peuvent l'être sur d'autres aux caractéristiques différentes.

Il est trop tôt pour l'affirmer que le rapport TM4/TM1 représente réellement la concentration de P_{tot} dans le lac. Cependant, nous avons retrouvé le même pattern de la courbe de phosphore total tant dans les résultats *in situ* que dans les résultats issus de la télédétection avec le ratio TM4/TM1: notre hypothèse de départ pourrait ainsi s'avérer légitime. Reste encore à vérifier le paradoxe du résultat de la corrélation du ratio inverse à TM4/TM1 avec le P_{tot} (c.-à-d. TM1/TM4) puisque celui-ci devrait être identique à la corrélation TM4/TM1 mais négatif (Tableau 13).

Le fait de ne pas avoir fait de correction atmosphérique élaborée mais un simple ratio de bandes ne semble pas altérer nos résultats puisqu'en comparant les corrélations des ratios de bandes obtenues entre les deux projets avec le P_{tot} , avec et sans correction atmosphérique, nous constatons que pour chacun, les corrélations trouvées sont fortes (Tableau 18).

Pour de futures études, la bande thermique (TM6) devrait être utilisée en premier lieu pour éliminer les images comportant des cirrus. En effet, les capteurs mesurent le signal sur le cirrus et non au sol. Nous avons ainsi constaté à la fin du travail d'analyse que l'image de 1993 comportait des cirrus juste sur notre zone du buffer SHL2 (Annexe 13). Il n'est pas inutile non plus de créer des images composites (Annexe 14) pour bien étudier l'image satellite et faire ressortir des détails non visibles en regardant uniquement les bandes brutes.

En compléments aux données météorologiques de précipitations, de température et de vitesse du vent, l'information sur la direction des vents pour la bande TM6 et la connaissance du débit des affluents principaux du lac Léman (§ 6.1) sont d'autres indications qui devraient rentrer dans le processus de préparation d'analyse d'images satellitaires afin d'avoir une bonne compréhension globale de la scène.

Enfin, un plus grand nombre d'images pourrait être testé pour valider statistiquement la corrélation entre les données *in situ* du P_{tot} et le ratio des bandes TM4/TM1 en les choisissant, dans la mesure du possible et des disponibilités selon les dates des prélèvements *in situ*.

9 Perspectives

Par sa vue synoptique, l'imagerie satellitaire peut amener des compléments d'informations aux données *in situ* et améliorer la connaissance du fonctionnement écologique du lac Léman.

Une étude de faisabilité est actuellement en cours (juin 2015) à l'eSpace (Space Engineering Center de l'EPFL) avec divers partenaires pour l'envoi de six nouveaux satellites en orbite pour surveiller les lacs et d'autres environnements. Ces petits satellites seraient équipés de caméras capables de détecter la lumière sur un maximum de 100 bandes de fréquences et survoleraient le Léman plusieurs fois par jour. Si ce projet venait à passer, il ouvrirait incontestablement la porte à de nouvelles connaissances sur la dynamique du lac et offrirait une possibilité unique de suivi régulier de la qualité des eaux du Léman (EPFL, 2015). Un autre projet de station de prélèvement et d'analyses de la qualité de l'eau en continu au large de Pully est aussi en cours. Cela ouvre de belles perspectives de croisements de données.

Chang *et al.*, (2015) mentionnent les avantages de l'application de la fusion de données⁸, (par exemple des capteurs passifs et actifs comme le SAR) à la télédétection aquatique comme suit:

1. Le renforcement de la couverture globale des eaux de surface, ce qui donne des produits d'image aux résolutions spatiales et temporelles plus élevées.
2. Les données provenant de multiples capteurs satellitaires augmentent la validité statistique des paramètres extraits de la qualité de l'eau.
3. Les données sont acquises à partir d'une seule base de données au format de stockage et niveau de traitement uniformes à la place de multiples capteurs et plateformes aux degrés de traitements, de formats de stockage et de politiques d'acquisition différentes (Chang *et al.*, 2015).

Les [données de Sentinel-2A](#) sont depuis décembre 2015 téléchargeables gratuitement sur le site de l'ESA cela dégage de nouvelles perspectives avec une résolution temporelle de 5 jours. Ainsi, il serait envisageable d'utiliser les données Landsat 7, 8 et Sentinel-2A et de les fusionner.

Cependant, comme le font remarquer (Kloiber *et al.*, 2002b) et malgré des études qui ont démontré des relations empiriques fiables entre les données satellite et les observations

⁸ IDFM - Integrated Data Fusion and Machine-learning

in situ, l'imagerie satellitaire aquatique n'est pas automatiquement intégrée dans les programmes de routine de surveillance des lacs. Une étude a même été réalisée (Schaeffer *et al.*, 2013) afin de comprendre pourquoi les décisions de gestion ne s'appuient généralement pas sur les produits de qualité de l'eau issus des satellites.

Selon une communication personnelle de R. Bukata (juin 2015) :

"The future of satellite monitoring of inland lake and coastal water quality depends upon convincing end-user bureaucrats (academic, fiscal, and political end-users and funding agencies) that aquatic remote sensing indeed has added value."⁹

Nous espérons, par ce mémoire, avoir pu apporter un argument supplémentaire pour convaincre les gestionnaires que la télédétection est un fantastique moyen complémentaire aux prélèvements *in situ*. Il est cependant impératif de former des techniciens et des limnologues à cette technologie prometteuse et de coordonner les prélèvements *in situ* avec les passages des satellites.

⁹ Traduit par nos soins: "L'avenir de la surveillance de la qualité de l'eau par satellite des lacs et des eaux côtières dépend de la force de persuasion que l'on aura sur les utilisateurs finaux (universitaires, politiques et agences de financement) pour les convaincre que la télédétection aquatique a une valeur ajoutée".

Bibliographie

- AIOL. (2001). Proceedings of the Italian Association of Oceanography and Limnology (Vol. 14, p. 435). Présenté à Proceedings of the Italian Association of Oceanography and Limnology, Genova: Picacazzo Mauro.
- Allenbach, K. (2015). Communication personnelle. Collaboratrice scientifique SIG & Télédétection, UNEP/DEWA/GRID-Geneva, the Analytics Centre for the Environment (ACE), 11, Chemin des Anémones, CH-1219 Châtelaine
- Aronoff, S. (2005). *Remote sensing for GIS managers* (ESRI Press).
- Bonn, F. (1996). *Précis de télédétection* (Vol. 2). Presse de l'Université du Québec.
- Bonn, F., Caloz, R., Collet, C., & Rochon, G. (1992). *Précis de télédétection* (Vol. 1-4). Sillery (Que.) : Presses de l'Université du Québec, 1992-2001.
- Bukata, R. P. (2015). Courriel du 26 juin 2015. Canada Centre for Inland Waters, Environment Canada, 867 Lakeshore Road, Burlington, Ontario L7R 4A6, Canada
- Centre canadien de télédétection. (s.d.). Notions fondamentales de télédétection. Ressources naturelles Canada.
- Chang, N.-B., Imen, S., & Vannah, B. (2015). Remote Sensing for Monitoring Surface Water Quality Status and Ecosystem State in Relation to the Nutrient Cycle: A 40-Year Perspective. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(2), 101-166. (<http://doi.org/10.1080/10643389.2013.829981>)
- Chipman, J., Olmanson, L. G., & Gitelson, A. A. (2009). *Remote sensing methods for lake management: A guide for resource managers and decision-makers* (p. 132). NALMS.
- CIPEL. (2004). *Evolution physico-chimique et recherche de métaux et de quelques micropolluants dans les eaux du Léman - campagne 2003* (p. 28). Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution – CIPEL.
- CIPEL. (2010). *Plan d'action 2011-2015. En faveur du Léman, du Rhône et de leurs affluents* (p. 65). CIPEL.
- CIPEL. (2014). *Rapport sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique - Programme quinquennal 2011-2015- Campagne 2013* (p. 238). Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution – CIPEL.
- CIPEL. (2015). *Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique - Programme quinquennal 2011-2015 - campagne 2014* (p. 257). Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution – CIPEL.

- EPFL. (2015). Monitoring phytoplankton growth in lakes from orbit. Consulté 3 décembre 2015, à l'adresse <http://phys.org/news/2015-06-phytoplankton-growth-lakes-orbit.html>
- Gao, Y., Gao, J., Yin, H., Liu, C., Xia, T., Wang, J., & Huang, Q. (2015). Remote sensing estimation of the total phosphorus concentration in a large lake using band combinations and regional multivariate statistical modeling techniques. *Journal of Environmental Management*, 151, 33-43. (<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.036>)
- Gerdeaux, D. (1996). Exploitation et gestion des populations piscicoles lacustres. *INRA Productions animales*, (Hors série), 135-140.
- Giuliani, G. (2001). *Traitement et interprétation de l'imagerie satellitaire multispectrale des lacs subalpins*. Université de Genève.
- Gleick, P. H. (1996). *Encyclopedia of Climate and Weather* (Oxford University Press, Vol. 2). New York: S. H. Schneider.
- Goyette, S. (2015). Communication personnelle. Université de Genève, ISE, Groupe Climat, Blvd Carl-Vogt 66, 1205 Genève
- He, W., Chen, S., Liu, X., & Chen, J. (2008). Water quality monitoring in a slightly-polluted inland water body through remote sensing — Case study of the Guanting Reservoir in Beijing, China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2(2), 163-171. (<http://doi.org/10.1007/s11783-008-0027-7>)
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232-3237. (<http://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>)
- Houriet, J.-P. (2006). 50 ans de protection des eaux. *Environnement- OFEV*, (4), 6-9.
- IGEAT. (s. d.). Introduction à GRASS pour le traitement d'images - Télédétection. Consulté à l'adresse: http://cafesig.ulb.ac.be/pluginfile.php/1179/mod_resource/content/3/TraitementImages/GEORG425_TP_IntroductionAGRASSPourTraitementImages.pdf
- Jaquet, J.-M. (2015, 2016). Communication personnelle. Université de Genève, Département des sciences de la Terre, Université de Genève, 13, Rue des Maraîchers, 1205 Genève
- Jaquet, J.-M. (1989). Limnologie et télédétection: situation actuelle et développements futurs. *Revue des sciences de l'eau*, 2(4), 457-481. (<http://doi.org/10.7202/705039ar>)
- Kiefer, I., Odermatt, D., Anneville, O., Wüest, A., & Bouffard, D. (2015). Application of remote sensing for the optimization of in-situ sampling for monitoring of

- phytoplankton abundance in a large lake. *Science of The Total Environment*, 527–528, 493–506. (<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.011>)
- Kloiber, S. M., Brezonik, P. L., & Bauer, M. E. (2002). Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity. *Water Research*, 36(17), 4330–4340.
- Kloiber, S. M., Brezonik, P. L., Olmanson, L. G., & Bauer, M. E. (2002b). A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 82(1), 38–47.
- Li, R., & Li, J. (2004). Satellite remote sensing technology for lake water clarity monitoring: an overview. *Environmental Informatics Archives*, 2, 893–901.
- Lodish, Berk, Matsudaira, Kaiser, Krieger, Scott, ... Darnell. (2005). *Biologie moléculaire de la cellule* (3e éd.). Bruxelles.
- Mancino, G., Nolè, A., Urbano, V., Amato, M., & Ferrara, A. (2009). Assessing water quality by remote sensing in small lakes: the case study of Monticchio lakes in southern Italy. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2(1), 154–161. (<http://doi.org/10.3832/ifor0507-002>)
- Matthews, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6855–6899. (<http://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>)
- Minet, P. (2015). Halte aux micropolluants dans l'eau.
Consulté 4 décembre 2015, à l'adresse:
<http://www.letemps.ch/sciences/2015/09/07/halte-aux-micropolluants-eau>
- Morel, A., & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color1. *Limnology and Oceanography*, 22(4), 709–722. (<http://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>)
- OCDE. (1982). *Eutrophisation des eaux, méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte*. Paris: OCDE.
- Odermatt, D. (2011). *Spaceborne inland water quality monitoring* (Vol. 62). Zürich: Remote sensing laboratories.
- Oesch, D., Jaquet, J. -M., Klaus, R., & Schenker, P. (2008). Multi-scale thermal pattern monitoring of a large lake (Lake Geneva) using a multi-sensor approach. *International Journal of Remote Sensing*, 29(20), 5785–5808. (<http://doi.org/10.1080/01431160802132786>)
- Oyama, Y., Matsushita, B., Fukushima, T., Nagai, T., & Imai, A. (2007). A new algorithm for estimating chlorophyll- *a* concentration from multi-spectral satellite data in case II waters: a simulation based on a controlled laboratory experiment. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1437–1453. (<http://doi.org/10.1080/01431160600975295>)

- Rubin, J.-F. (1990). *Biologie de l'omble chevalier, Salvelinus alpinus (L.), dans le Léman (Suisse)* (Thèse de doctorat). Université de Lausanne.
- Schaeffer, B. A., Schaeffer, K. G., Keith, D., Lunetta, R. S., Conmy, R., & Gould, R. W. (2013). Barriers to adopting satellite remote sensing for water quality management. *International Journal of Remote Sensing*, 34(21), 7534-7544. (<http://doi.org/10.1080/01431161.2013.823524>)
- UNEP. (2010). *Clearing the waters a focus on water quality solutions*. Nairobi, Kenya; [Oakland, CA]: United Nations Environment Programme, Division of Environmental Policy Implementation ; [Pacific Institute].
- USGS. (2015). Courriel du 11 novembre 2015. Mrs Wolles, Customer Services. Long Term Archive (LTA), USGS Earth Resources Observation & Science (EROS) Center 47914 - 252nd Street, Sioux Falls, SD 57198, USA
- Wu, C., Wu, J., Qi, J., Zhang, L., Huang, H., Lou, L., & Chen, Y. (2010). Empirical estimation of total phosphorus concentration in the mainstream of the Qiantang River in China using Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 31(9), 2309-2324. (<http://doi.org/10.1080/01431160902973873>)
- Zhang, Y., Pulliainen, J., Koponen, S., & Hallikainen, M. (2002). Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the Gulf of Finland using combined optical data and microwave data. *Remote Sensing of Environment*, 81(2), 327-336.

Sites internet

Utilisés dans le mémoire:

ArcGIS Statistiques zonales

<http://desktop.arcgis.com/fr/desktop/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/zonal-statistics-as-table.htm>

Antenne Sykrock (pour l'annexe 1, figure 1.5)

<http://antennes.skyrock.com/544921038-Le-spectre-electromagnetique.html>

BMréunion SIG (pour l'annexe 2)

<http://www.bmreunion.com/sig/spip.php?rubrique1>

CIPEL

<http://www.cipel.org>

Copernicus

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Water_bodies

ESA - Stations au sol

http://download.esa.int/esoc/estrack/esa_estrack_brochure_2015_EN.pdf

enviroSPACE

<http://www.unige.ch/envirospace/>

EOLI-SA

<https://earth.esa.int/web/guest/data-access/catalogue-access>

FAO

<http://www.fao.org/docrep/003/t0355f/T0355F01.htm>

<http://www.fao.org/docrep/003/t0355f/T0355F02.htm>

France diplomatie (pour la carte de la Suisse)

<http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/dossiers-pays/suisse/>

Futurelearn

<https://www.futurelearn.com/courses/climate-from-space/2/steps/55318>

Global Land Cover Facility - Earth Science Data Interface (ESDI)

<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/>

GRASS

<https://grass.osgeo.org/grass70/manuals/i.landsat.toar.html>

https://grasswiki.osgeo.org/wiki/Atmospheric_correction

ISE

<https://www.unige.ch/environnement/fr/presentation-ise/>

Numerical Weather Prediction

https://nwpsaf.eu/deliverables/aapp/avhrr_2.html

Science Direct

www.sciencedirect.com

SeaWiFS

<http://database.eohandbook.com/database/instrumentsummary.aspx?instrumentID=423>

Sentinel-2

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Water_bodies

SOERE OLA-IS, (INRA de Thonon-les-Bains, CIPEL).

<http://www6.inra.fr/soere-ola>

Swiss National Point of Contact for Satellite Images

http://www.npoc.ch/internet/npoc/en/home/about/earth_observations.html

The University of Queensland – Biophysical Remote sensing Group

http://www2.gpem.uq.edu.au/CRSSIS/tools/rstoolkit_new/html/terrestrial/help/spatial-dimensions.html
<https://www.gpem.uq.edu.au/rsrc-rstoolkit>

Université Paris 1

<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/index.html>

USGS – Earth Resources Observation and Science (EROS) Center

<http://glovis.usgs.gov/>

USGS – EarthExplorer

<http://earthexplorer.usgs.gov/>

USGS - LandsatLook View (que les images Landsat)

<http://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>

USGS- Landsat Processing

http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php

USGS -LGAC

http://landsat.usgs.gov/Landsat_Global_Archive_Consolidation.php

Sentinel-2A open data

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/sentinel-data-access>

Spatial reference

www.spatialreference.org

The world coordinate converter

<http://twcc.fr/en/#>

Web of Knowledge

apps.webofknowledge.com

Zotero

www.zotero.org

D'autres sites d'intérêts

Léman

CIPEL : vers les rapports scientifiques

<http://www.cipel.org/publications/rapports-scientifiques/>

Principaux vents du Léman

<http://www.sisl.ch/vent.htm>

Cours sur la télédétection:

Centre canadien de télédétection

<http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/9310>

EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection

<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/index.html>

Université de Paris 8 – Vincent Godard

<http://margaux.ipt.univ-paris8.fr/vgodard/enseigne/teled2/memotele/mem11tel.htm>

Quelques utilisations de la télédétection

Utilisation de la télédétection pour la surveillance des lacs au Québec

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/rsvl/methodes.htm#evaluer>

Projet de suivi de la température des lacs dans le monde

<http://www.laketemperature.org/index.html>)

Changements à travers le temps en utilisant la télédétection

<http://earthshots.usgs.gov/earthshots/>

International ocean color coordinating group

<http://www.ioccg.org/>

Landsat

Stations historiques de réception au sol des satellites Landsat

http://landsat.usgs.gov/Historical_IGS.php

Dictionnaire des données Landsat

https://lta.cr.usgs.gov/landsat_dictionary.html

Toutes les métadonnées Landsat

<http://landsat.usgs.gov/metadatalist.php>

Satellites

Interactive satellite view - iSat: Carte interactive de localisation des satellites (NASA)

<http://science.nasa.gov/iSat/?group=SMD&satellite=39574>

et en version texte:

<http://science.nasa.gov/iSat/iSAT-text-only/>

CEOS Base de données des satellites et des capteurs

<http://database.eohandbook.com/database/missiontable.aspx>

Liste des figures

fig. 1	Les processus d'observation de la Terre par la télédétection.....	11
fig. 2	Absorption de la lumière par 10 m d'eau pure en fonction de la longueur d'onde.....	12
fig. 3	Résolution spatiale et étendue spatiale.....	13
fig. 4	Répartition de l'eau sur Terre.....	15
fig. 5	Le territoire de la CIPEL.....	17
fig. 6	Mesures d'évaluation et les satellites associé.....	20
fig. 7	Origine des images Landsat téléchargées.....	25
fig. 8	Les différentes stations de réception au sol.....	25
fig. 9	Analyse du nombre de scènes Landsat rassemblées dans notre base de données.....	26
fig. 10	Résumé schématique du travail effectué.....	29
fig. 11	Localisation du lac Léman en Suisse.....	30
fig. 12	Carte du Léman avec localisation des points de prélèvement in situ SHL2 et GE3.....	30
fig. 13	Concentration moyenne annuelle du phosphore total dans le Grand Lac 1957 à 2014.....	32
fig. 14	Concentration de Chl-a (moyenne de 0 à 5 m de profondeur).....	32
fig. 15	Transparence moyenne du lac Léman.....	33
fig. 16	Spectre d'absorption minimum de la Chlorophylle-a.....	35
fig. 17	Exemple d'une scène entière Landsat et du masque.....	37
fig. 18	Exemple de l'effet du ratio de bandes : création d'un nouveau raster.....	38
fig. 19	Comparaison des moyennes de P_{tot} pour différentes profondeurs et de P_{tot} annuel.....	40
fig. 20	Graphique comparant les courbes de P_{tot} moyenne 0-20 m et le ratio TM4/TM1.....	42
fig. 21	Nuage de points avec courbe de tendance et coefficient.....	43

Liste des tableaux

Tableau 1	Liste des capteurs pouvant être utilisés pour l'évaluation de la qualité de l'eau.....	14
Tableau 2	Liste non exhaustive des marqueurs utilisés dans la bibliographie thématique.....	18
Tableau 3	Evolution des satellites des années 1970 aux années 2000.....	21
Tableau 4	Application des différents méthodes d'inversion.....	22
Tableau 5	Caractéristiques spectrales des bandes du capteur AVHRR-2.....	23
Tableau 6	Présentation de la base de données INDEX BD LANDSAT.....	27
Tableau 7	Explication des entêtes du fichier INDEX BD LANDSAT.....	27
Tableau 8	Liste des images Landsat reçues par NPOC.....	28
Tableau 9	Classification trophique des lacs en fonction des valeurs limites de certains paramètres.....	31
Tableau 10	Images sélectionnées avec indication de l'origine de la source.....	34
Tableau 11	Comparaison des dates de prélèvement et des scènes Landsat.....	35
Tableau 12	Présentation des divers ratios de bandes selon les projets.....	38
Tableau 13	Résultats finaux des analyses, projet sans corrections atmosphériques.....	41
Tableau 14	Résultats des statistiques zonales, ratio des Bandes TM4/TM1.....	41
Tableau 15	Corrélation entre Moyenne (résultat des statistiques zonales) et moyenne de P_{tot}	42
Tableau 16	Résultats des corrélations faites entre les bandes et les différents buffers.....	43
Tableau 17	Résultats du projet avec corrections atmosphériques.....	44
Tableau 18	Comparaison des résultats pour les mêmes ratios de bandes.....	44

Acronymes

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CDOM	colored dissolved organic matter (matière organique dissoute colorée)
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
CFC	chlorofluorocarbures
Chl-<i>a</i>	Chlorophylle- <i>a</i>
CIPEL	Commission internationales pour la protection des eaux du Léman
COD	carbone organique dissous
COT	carbone organique total (TOC en anglais)
CZCS	Coastal Zone Color Scanner
DBO	demande biochimique en oxygène (BOD en anglais)
DEM	Digital Elevation Model (MNE en français)
ESA	European Space Agency
ETM	Enhanced Thematic (capteur sur Landsat)
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus (capteur sur Landsat)
GAC	Global Area Coverage (NOAA satellite, capteur AVHRR)
HRPT	High Resolution Picture Transmission (NOAA satellite, capteur AVHRR)
INRA	Institut national de recherche agronomique
IRT	infrarouge thermique
ISE	Institut des Sciences de l'Environnement
LAC	Local Area Coverage (satellite NOAA, capteur AVHRR)
Landsat	Land Remote-Sensing Satellite
MEAN	moyenne
MES	matières en suspension (TSM en anglais)
MNE	modèle numérique d'élévation (DEM en anglais)
MOD	matière organique dissoute (aussi appelée Gelbstoff)
MODIS	Moderate-resolution imaging spectrometer
MSS	Multipsectral Scanner (capteur sur Landsat1)
MST	matières en suspension totale (TSS en anglais)
Microcystine	toxine bactérienne produite par des cyanobactéries vivant en eau douce.
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
Nimbus	NASA Meteorological Satellites (1 à 7)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPOC	Swiss National point of contact for Satellite images
N_{tot}	Azote total
OLA	Observatoire des lacs alpins
P_{tot}	Phosphore total
SAR	synthetic aperture radar
SD	Secchi depth
SDD	Secchi disk depth
SDT	Secchi disk transparency
SeaWiFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SIG	système d'information géographique
SOERE	Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement
SST	sea surface temperature
STD	standard deviation (écart-type)
STEP	station d'épuration
SWIR	Short wave infra red
TM	Thematic mapper (capteur sur Landsat 4-5)
TOA	Top-of-atmosphere
TOC	total organic carbon (COT en français)
TSS	Total suspended solids
TSM	total suspended matter (MES en français)
TSS	Total suspended solids (MST en français)
UGR	Union Générale des Rhodaniens
USGS	U.S. Geological Survey
WKT	Well-known text

Annexes

Annexe 1	Principe de base de la télédétection
Annexe 2	Qu'est-ce qu'un système d'information géographique ?
Annexe 3	Analyse dans Web of Knowledge
Annexe 4	Procédure traitement des images AVHRR de l'Université de Berne
Annexe 5	Satellites Landsat
Annexe 6	Utilisation du programme Eoli-SA
Annexe 7	Fiche signalétique du Léman et de son bassin versant
Annexe 8	Données <i>in situ</i> de référence
Annexe 9	Données météorologiques des scènes Landsat
Annexe 10	Procédure de traitement des images Landsat 1972-2005
Annexe 11	Présentation complète des résultats (I) Sans corrections atmosphériques
Annexe 12	Présentation complète des résultats (II) Avec corrections atmosphériques
Annexe 13	Cartographie thermique du lac
Annexe 14	Images composite Landsat 1972-2005

Annexe 1

1 Principes de base de la télédétection

Remarque : cette annexe a été largement reprise de trois sites internet:

Université Paris 1

<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/index.html>

Université Paris 8

<http://margaux.ipt.univ-paris8.fr/vgodard/enseigne/teled2/memotele/mem11tel.htm>

Centre canadien de télédétection

<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309>

Selon la définition du dictionnaire Larousse (source: www.larousse.fr) la télédétection ou "remote sensing" en anglais est définie comme suit:

"Technique d'acquisition à distance d'informations sur la surface terrestre, principalement fondée sur l'analyse d'images obtenues dans différentes gammes de longueurs d'onde à partir d'aéronefs ou de satellites".

On pourrait rajouter que ces informations sont acquises par des capteurs permettant de mesurer l'énergie réfléchie et/ou émise par la surface de la Terre ou par l'atmosphère.

La principale source d'énergie utilisée en télédétection est le soleil (Figure 1.1 a) qui illumine la surface terrestre (télédétection optique dans le domaine du visible et du proche infrarouge).

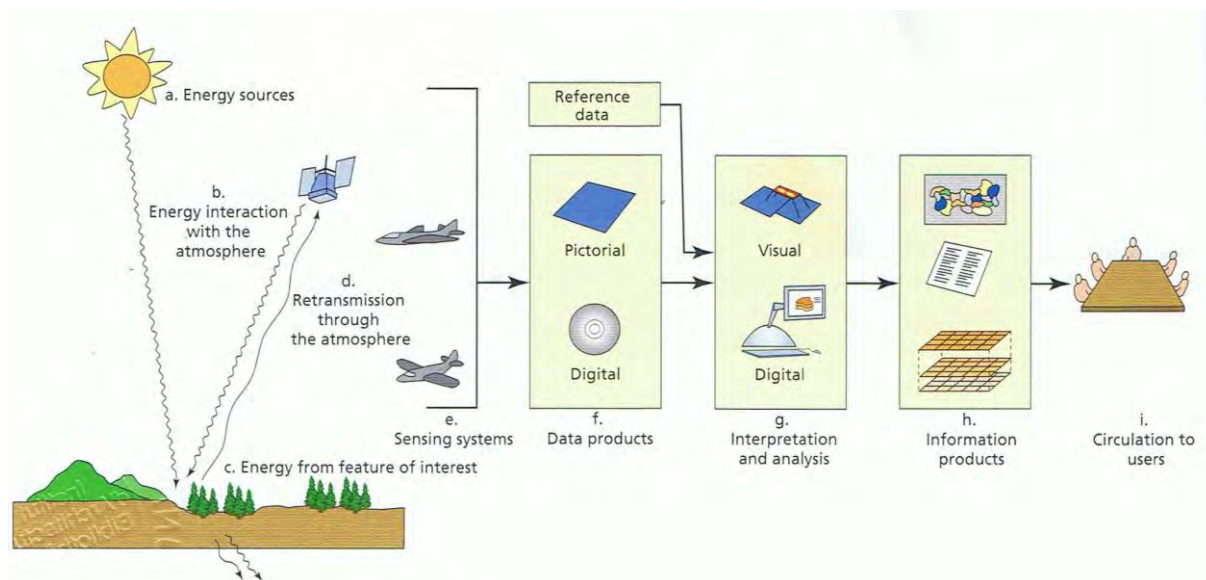


Figure 1.1 Processus de télédétection

(a) Sources d'énergie, (b) interaction avec l'atmosphère, (c) énergie de l'objet d'intérêt, (d) retransmission à travers l'atmosphère, (e) divers systèmes de télédétection, (f) les données, (g) interprétation et analyse, (h) produits d'information, (i) distribution aux utilisateurs (selon Lillesand & Kiefer, 1987, tiré de Aronoff, 2005)

Cette énergie (rayonnement électromagnétique) doit passer à travers l'atmosphère (Figure 1.1b) ce qui provoque, selon la longueur d'onde (infrarouge, visible, micro-ondes) et les conditions atmosphériques, des effets différents.

Une fois que l'énergie atteint l'objet (Figure 1.1 c), une partie est réfléchiée, une autre est transmise à travers l'objet et enfin, une autre partie est absorbée. Les objets réémettent l'énergie en tant que chaleur (télédétection dans le thermique) ou dans le domaine des micro-ondes passives.

Il y aura une seconde interaction avec l'atmosphère (Figure 1.1 d) des objets qui réfléchissent, émettent ou rétrodiffusent l'énergie. Enfin, cette énergie sera détectée (Figure 1.1 e) par les capteurs du système de télédétection.

On distingue deux types de capteurs (Figure 1.2) en fonction de la source d'énergie ([source](#)):

- Les capteurs passifs qui utilisent les propriétés de réflexion du rayonnement solaire (ou rayonnement incident) dans le domaine optique (visible et proche infrarouge) et celles de l'émission dans l'infrarouge thermique et dans le domaine des micro-ondes.
- Les capteurs actifs (radars) utilisés dans le domaine des hyperfréquences émise par le capteur lui-même et rétrodiffusées par la surface terrestre

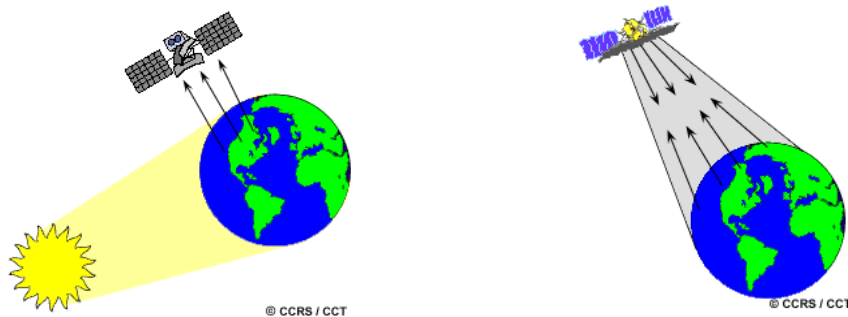


Figure 1.2 Capteur passif enregistrant la réflexion du rayonnement solaire et capteur actif (radar) enregistrant l'énergie rétrodiffusée (source: Centre canadien de télédétection)

Cette énergie est enregistrée en tant qu'image physique ou de manière digitale ce qui permettra de générer une image.

Par la suite, les données enregistrées (Figure 1.1 f) sont traitées pour générer des produits de données géoréférencées pour l'affichage ou une analyse plus approfondie (Aronoff, 2005)

Prêtes à être téléchargées (Figure 1.1 g), les images peuvent être analysées dans un système d'information géographique (SIG) et interprétées en utilisant différentes techniques de traitement d'images (rehaussement, classifications, etc.).

Le résultat de cette analyse et l'interprétation permet de créer des produits pour les utilisateurs (Figure 1.1 h).

Enfin, ces produits (Figure 1.1 i) sont distribués aux utilisateurs (décideurs, etc).

Sources d'énergie

La principale forme d'énergie détectée par la télédétection est le rayonnement électromagnétique (lumière visible, rayons-x, infrarouge, micro-ondes et ultraviolets). Le rayonnement électromagnétique (Figure 1.3) se comporte à la manière d'une onde composée d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M) oscillant sur deux plans. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière (C) en ondulant. Le champ

électrique est orienté de façon perpendiculaire à la direction de la propagation du rayonnement et varie en grandeur. Le champ magnétique est orienté perpendiculairement au champ électrique (Centre canadien de télédétection, s. d.). En télédétection, les sources d'énergie proviennent du Soleil, de la Terre elle-même et aussi des capteurs (radars).

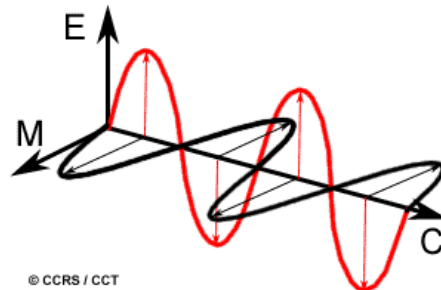


Figure 1.3 Rayonnement électromagnétique: champ électrique (E), champ magnétique (M), vitesse de la lumière (C) (source: Centre canadien de télédétection)

La compréhension de la télédétection passe par deux notions essentielles qui sont les deux composantes du rayonnement électromagnétique, à savoir, la longueur d'onde et la fréquence.

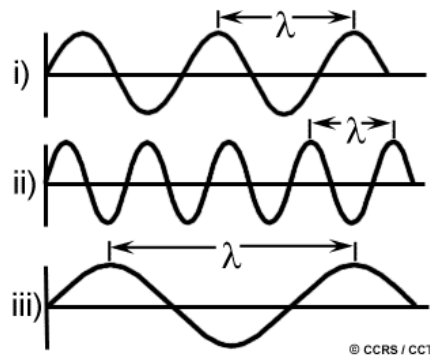


Figure 1.4 Lien entre longueur d'onde (λ) et fréquence (ν). Plus la longueur d'onde λ est courte (ii), plus la fréquence est élevée. (source: Centre canadien de télédétection)

La longueur d'onde (Figure 1.4) égale à la longueur d'un cycle d'une onde (distance entre deux crêtes successives), est représentée par la lettre grecque λ (lambda) dont l'unité est le mètre ou un de ses sous-multiples (nanomètres [nm, 10^{-9} m], micromètres [μm , 10^{-6} m], ou centimètre [cm, 10^{-2} m]).

La fréquence représentée par la lettre grecque ν (nu), quant à elle, représente le nombre d'oscillations par unité de temps qui est normalement mesurée en Herz ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$) ou un multiple de Herz (Centre canadien de télédétection, s. d.).

$$\lambda = C / \nu$$

Où:

λ est longueur d'onde électromagnétique

C est la vitesse de la lumière ($\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) ;

ν (nu) est la fréquence de l'onde.

Il en résulte que la longueur d'onde et la fréquence sont inversement proportionnelles : plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée (rayon gamma) et plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse (infrarouge).

On parle de spectre électromagnétique (Figure 1.5) pour qualifier l'ensemble des rayonnements.

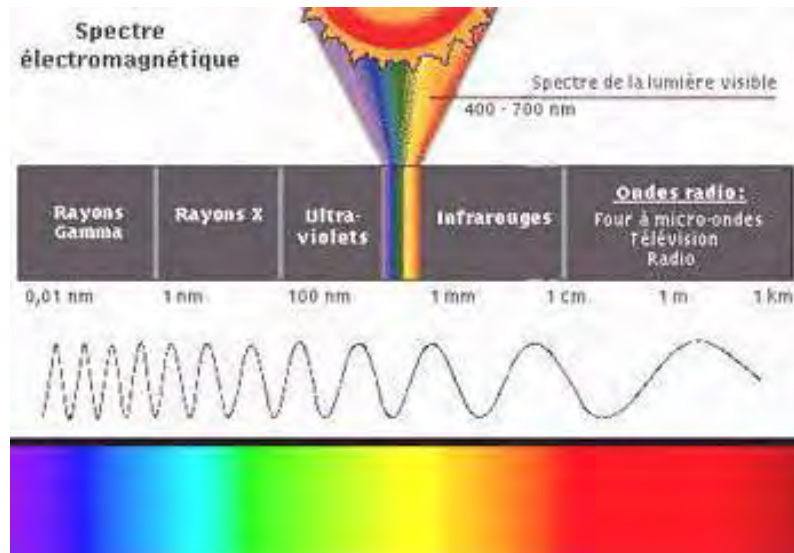


Figure 1.5 Spectre électromagnétique. Le spectre de la lumière visible s'étend uniquement entre 400 à 700 nm (tiré de : [source](#))

Pour l'observation de la Terre, on s'intéresse aux domaines du visible et du proche infra-rouge (PIR) mais aussi au moyen infra-rouge (MIR), à l'infra-rouge thermique (IRTh), aux micro-ondes et à l'ultra-violet (UV).

Le spectre du domaine visible s'étend entre 400 – 700 nm.

Le domaine de l'infrarouge se divise en deux parties:

- l'IR réfléchi (PIR de 750 nm à 1500 nm et MIR de 1500 nm à 3000 nm)
- l'IR émis (ou IR thermique de 3000 nm à 15'000 nm) qui correspond à la chaleur émise par la surface de la Terre.

Et finalement, l'IR lointain jusqu'à 1 mm.

- Au delà, en télédétection, sont les hyperfréquences encore appelées micro-ondes (1 mm à 1 m) ([source](#))

Absorption et diffusion atmosphériques

Comme vu auparavant, le rayonnement utilisé par la télédétection va traverser l'atmosphère chargée de gaz et de particules (aérosols, gouttelettes d'eau, poussières) qui peuvent bloquer ou dévier le rayonnement incident. C'est que l'on appelle les mécanismes d'absorption et de diffusion (Figure 1.6). Les molécules gazeuses et

particules présentes dans l'atmosphère vont provoquer un blocage et/ou une déviation du rayonnement, diminuant ainsi l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique ([source](#)).

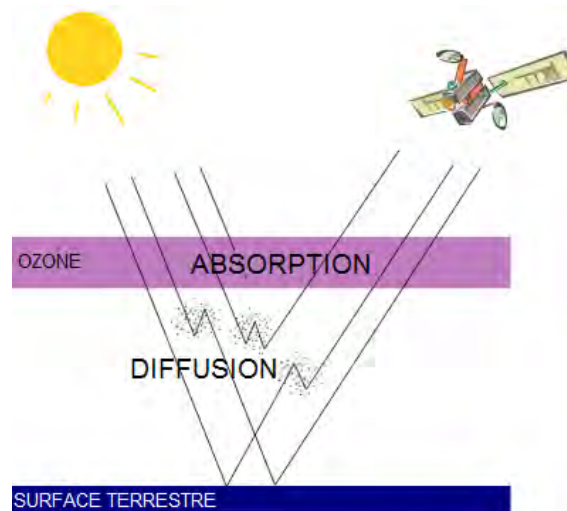


Figure 1.6 Absorption par l'ozone et diffusion atmosphérique du rayonnement électromagnétique lors de sa traversée de l'atmosphère (tiré de: [source](#)).

L'absorption

L'absorption atmosphérique se produit lorsque l'énergie de diverses longueurs d'onde est perdue dans les constituants de l'atmosphère comme l'ozone, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau.

L'atmosphère est constituée de gaz à concentration constante (azote N_2 - 78,1% -, oxygène O_2 - 21,8% -, argon Ar - 0,9% -) et de gaz dont la concentration varie spatialement et au cours du temps, comme la vapeur d'eau H_2O , le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 , le monoxyde de carbone CO , le protoxyde d'azote N_2O , les chlorofluorocarbones (CFC) ou l'ozone O_3 . Chacun des gaz constituant de l'atmosphère absorbe le rayonnement dans des longueurs d'onde sélectives délimitant ainsi de nombreuses bandes d'absorption :

- L'ozone absorbe essentiellement les rayonnements ultraviolets dont la longueur d'onde est inférieure à $0,29\mu m$, une très faible partie des rayonnements dans le rouge, ainsi que les rayonnements dans l'infrarouge thermique ($\lambda \sim 9,5\mu m$).
- L'oxygène absorbe le rayonnement proche infrarouge dans une bande très étroite autour de $0,75\mu m$.
- Les bandes d'absorption les plus larges sont dues aux gaz à effet de serre (H_2O , CO_2) qui absorbent le rayonnement dans les infrarouges, du proche infrarouge jusqu'aux infrarouges thermique et lointain.

Les longueurs d'onde pour lesquelles le rayonnement électromagnétique est peu ou pas absorbé constituent ce que l'on appelle les fenêtres de transmission atmosphériques (Figure 1.7). Dans ces fenêtres, pratiquement tout le rayonnement est transmis. Les

capteurs satellitaires dédiés à l'observation de la Terre utilisent ces fenêtres pour observer la surface terrestre et celle des océans ([source](#)).

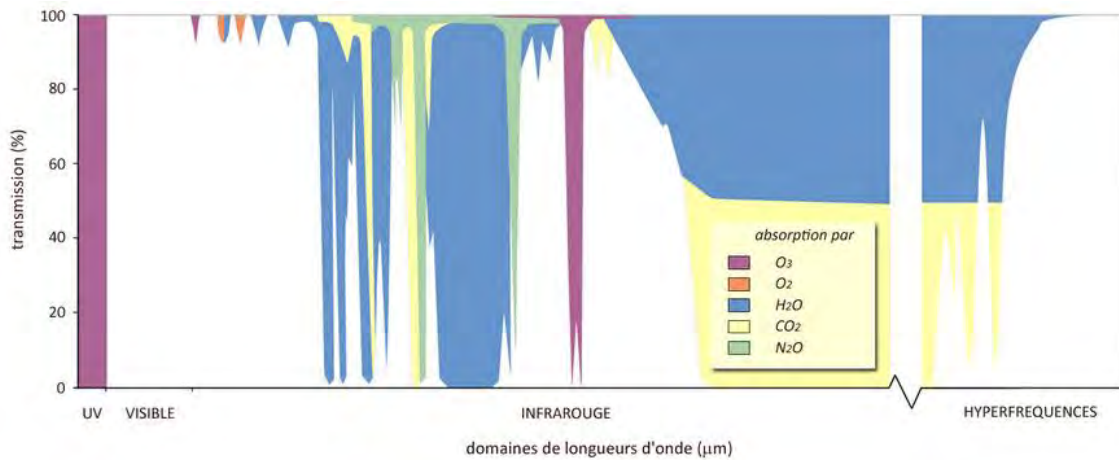


Figure 1.7 Fenêtre de transmission atmosphérique en blanc sur le schéma (tiré de : [source](#))

Les points essentiels à retenir du phénomène d'absorption :

- Les rayonnements ultraviolets ($\lambda \sim 0,29\mu\text{m}$) sont totalement absorbés par l'ozone.
- Les domaines spectraux du visible et du proche infrarouge présentent une très bonne transmission et sont par conséquent très largement utilisés par les capteurs satellitaires dédiés à l'observation de la Terre.
- Dans le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique, seules quelques bandes spectrales permettent la transmission du rayonnement.
- La vapeur d'eau et le dioxyde de carbone présents dans l'atmosphère absorbent la quasi-totalité du rayonnement dans l'infrarouge lointain.
- Dans le domaine des hyperfréquences, le phénomène d'absorption est inexistant et l'atmosphère est totalement transparente au rayonnement ([source](#)).

La diffusion

Lors de sa traversée atmosphérique, le rayonnement peut interagir avec les particules et molécules présentes dans l'atmosphère qui constituent des obstacles à la propagation de l'énergie ([source](#)).

Lorsque le rayonnement n'est pas absorbé, il peut être en partie dévié dans toutes les directions. C'est le phénomène de diffusion atmosphérique dont la nature dépend de plusieurs paramètres :

- la longueur d'onde du rayonnement
- la densité et la taille des particules et des molécules atmosphériques
- l'épaisseur de la couche atmosphérique à traverser ([source](#)).

Il existe trois types de diffusion en relation avec la taille des particules dans l'atmosphère :

1. La diffusion de Rayleigh – taille des particules inférieure à la longueur d'onde du rayonnement (particules de poussières, molécules d'azotes ou d'oxygène).

2. La diffusion de Mie – taille des particules presque aussi grandes que la longueur d'onde du rayonnement (particules de poussières, pollen, fumée et eau).
3. La diffusion non-sélective – taille des particules beaucoup plus grosses que la longueur d'onde du rayonnement (gouttes d'eau et grosses particules de poussière).

La diffusion de Rayleigh

La diffusion de Rayleigh disperse et dévie de façon plus importante les courtes longueurs d'ondes (comme le bleu ou le violet) que les grandes longueurs d'onde (rouge). L'intensité diffusée est inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde ($1/\lambda^4$) c'est-à-dire que plus la longueur d'onde est faible plus le rayonnement sera diffusé et moins l'intensité de la lumière transmise importante. Pour une lumière incidente blanche, le bleu (λ env. 400 nm) sera plus intensément diffusé et moins transmis que le rouge (λ env. 700 nm). C'est la forme de diffusion prédominante dans les couches supérieures de l'atmosphère (Centre canadien de télédétection, s. d.). Ce qui explique pourquoi nous voyons le ciel bleu durant la journée. Lorsque la lumière du Soleil traverse l'atmosphère (Figure 1.8), les courtes longueurs d'onde (bleu) du spectre visible sont dispersées et déviées de façon plus importante que les grandes longueurs d'onde (rouge). Au coucher et au lever du Soleil, comme le rayonnement doit parcourir une plus grande distance à travers l'atmosphère qu'au milieu de la journée, les courtes longueurs d'onde sont totalement diffusées et on ne voit plus qu'une portion de grandes longueur d'onde (rouge) ainsi le ciel apparaît rouge-orangé dans la direction du soleil.

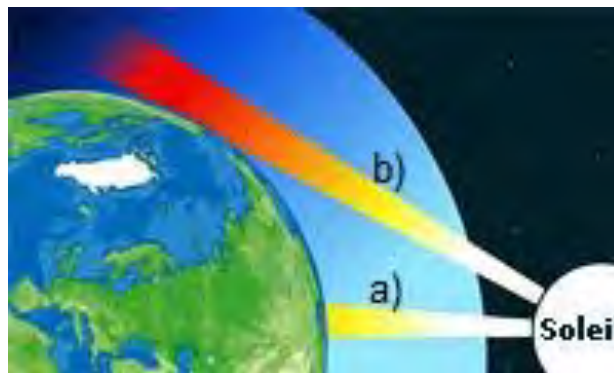


Figure 1.8 Effet de la diffusion de Rayleigh: Lumière du Soleil traversant l'atmosphère, selon la distance: a) courte distance=les courtes longueurs d'onde (bleu) sont dispersées, le ciel est bleu. b) longue distance=les courtes longueurs d'onde sont totalement diffusées, les grandes longueurs d'onde dominant (rouge)
(tiré de: [source](#))

La diffusion de Mie

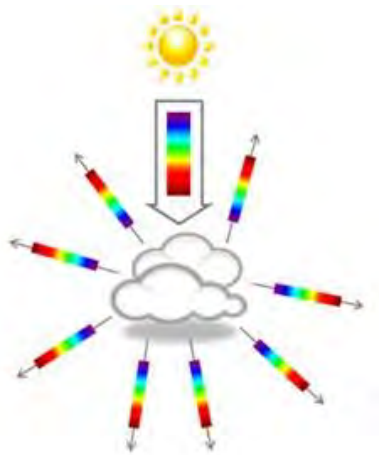
Dès que des molécules d'eau s'ajoutent en grand nombre, le bleu disparaît pour faire place à une lumière diffusée blanche, bleu délavé voire jaunâtre, toute la longueur d'onde étant diffusée de la même façon. C'est le cas de la diffusion de Mie.

La diffusion de Mie affecte les plus grandes longueurs d'onde (rouge) et se produit surtout dans les couches inférieures de l'atmosphère où l'on trouve en plus grande abondance les grosses particules (particules de poussières, pollen, fumée et eau). La

taille des particules et peu différente ou plus grande que la longueur d'onde du rayonnement. Ce processus domine lors de ciel nuageux.

La diffusion non-sélective

La diffusion non sélective se produit lorsque la taille des particules atmosphériques est beaucoup plus grande que la longueur d'onde du rayonnement. Elle est due aux gouttelettes d'eau trouvées dans les nuages et le brouillard. La diffusion non-sélective affecte toutes les longueurs d'onde qui sont diffusées (Figure 1.9). Puisque les gouttes d'eau de l'atmosphère dispersent presque également le bleu, vert et rouge, cela produit un rayonnement blanc. Ceci explique que nuages et brouillard sont blancs.



*Figure 1.9 Diffusion non-sélective: toutes les longueurs d'onde sont affectées d'où la couleur blanche des nuages
(tiré de : [source](#))*

Le rayonnement subit de multiples diffusions à l'intérieur du nuage. Dans ce cas, le satellite ne peut donc pas observer la surface de la Terre.

Rayonnement et matière

Lorsque le soleil éclaire la surface terrestre, des interactions se produisent entre le rayonnement et la cible illuminée. En fonction des propriétés et des caractéristiques de la cible, une partie du rayonnement est réfléchi vers le capteur satellitaire. Chaque objet ou chaque surface possède ainsi une réponse spectrale bien précise à une longueur d'onde donnée. L'ensemble des réponses spectrales à différentes longueurs d'onde constitue ce que l'on appelle la signature spectrale (voir paragraphe suivant) d'une surface. Chaque type de surface peut ainsi être caractérisé et identifié sur une image ([source](#)).

Les interactions rayonnement / matière

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique atteint un objet, certaines longueurs d'onde (Figure 1.10) sont absorbées (α), tandis que d'autres sont réfléchies (ρ) par l'objet. Une partie du rayonnement peut éventuellement être transmise (τ) à travers l'objet si celui-ci est plus ou moins transparent, avec un changement de direction de la propagation dû à la réfraction. La partie du rayonnement qui est absorbée modifie l'énergie interne de l'objet et produit de la chaleur qui sera réémise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde.

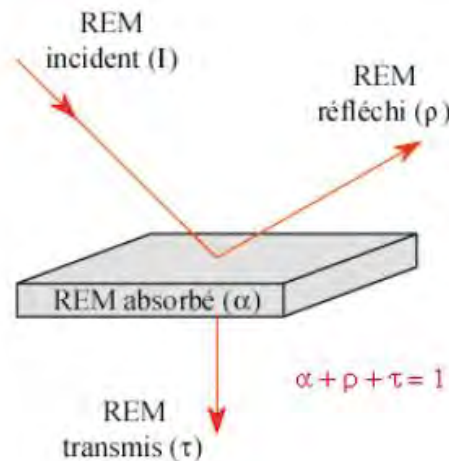


Figure 1.10 Interactions du rayonnement électromagnétique avec la matière – absorption (α), réflexion (ρ), transmission (τ) (tiré de [source](#) selon Bonn, Caloz, Collet, & Rochon, 1992)

Tous les objets sont ainsi caractérisés par un coefficient d'absorption (noté α), un coefficient de réflexion (noté ρ), et un coefficient de transmission (noté τ), qui expriment respectivement la part d'énergie absorbée, réfléchie et transmise. Ces trois coefficients ont des valeurs qui varient entre 0 et 1 et leur somme est toujours égale à 1, selon le principe de la conservation de l'énergie ([source](#)).

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Quelques cas particuliers:

- Un corps totalement opaque ne transmet pas le rayonnement, qui est en partie absorbé et en partie réfléchi.

$$\tau = 0 \Rightarrow \alpha + \rho = 1$$

- Un corps parfaitement transparent ne réfléchit pas le rayonnement, mais en absorbe et en transmet une partie.

$$\rho = 0 \Rightarrow \alpha + \tau = 1$$

L'énergie incidente totale interagira avec la surface de la cible selon l'un ou l'autre de ces trois modes d'interaction ou selon leur combinaison.

La proportion de chaque interaction dépend de la longueur d'onde de l'énergie, ainsi que de la nature et des conditions de la surface.

L'absorption (α): tout corps qui reçoit un rayonnement incident peut en absorber une partie, cette partie absorbée modifie son énergie interne, il s'échauffe.

- La transmission (τ): lorsque l'énergie du rayonnement passe à travers la cible. Le changement de milieu lié à la transmission entraîne une réfraction.
- La réflexion (ρ) : lorsque la cible renvoie l'énergie du rayonnement.

La réflexion

En télédétection, nous mesurons le rayonnement réfléchi par une cible et ce phénomène est donc primordial. La réflexion spéculaire et la réflexion diffuse représentent deux modes limites de réflexion de l'énergie ([source](#)).

La réflexion spéculaire (Figure 1.11 a) a lieu lorsque la cible de surface lisse réfléchit l'énergie dans une même direction. On parle de réflexion diffuse (Figure 1.11 b) lorsque la cible de surface rugueuse redirige l'énergie dans toutes les directions. (Centre canadien de télédétection, s. d.).

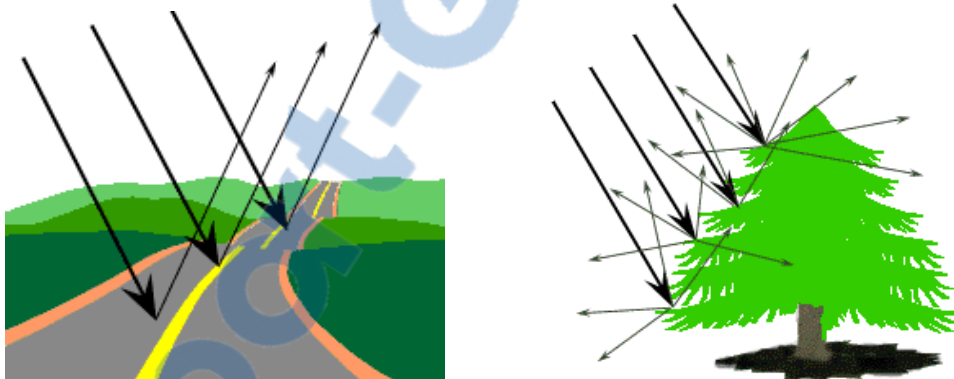


Figure 1.11 Réflexion spéculaire (a) sur une surface lisse et réflexion diffuse sur une surface rugueuse (b)

Le cas de l'émission

Tout corps dont la température est $> 0^{\circ}\text{K}$ émet un rayonnement électromagnétique. Ce corps est appelé source et est un émetteur de rayonnement électromagnétique.

Une source d'énergie électromagnétique est caractérisée par la répartition spectrale du rayonnement qu'elle émet :

- spectre continu : l'énergie varie de façon continue avec λ
- spectre de raies : l'énergie est concentrée sur un certain nombre de raies spectrales

La plupart des émetteurs que l'on connaît sur Terre sont à spectre continu.

Ils s'approchent d'un modèle théorique appelé corps noir.

On a vu dans la loi de la transformation de l'énergie que

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Si un corps absorbe tous les rayonnements incidents, alors l'absorption (α) est égale à 1:

$$\alpha = 1 \text{ et } \tau + \rho = 0$$

Ce corps est appelé corps noir.

Les corps noirs et gris

A son tour, ce corps réémet un rayon électromagnétique dont l'intensité et la fréquence dépendent de son énergie interne : sa température.

Il en découle différentes lois physiques dont celle de Wien qui dit que :

"plus la température d'un corps noir est élevée plus il émet dans de courtes longueurs d'onde"

Le Soleil peut être considéré comme un corps noir à 6 000°K son maximum d'émission est aux alentours de 500 nm (vert-jaune) au voisinage de la sensibilité maximale de l'œil humain (550 nm)

La Terre a une température moyenne proche de 300°K son maximum d'émission est aux alentours de 9 500 nm (IRTh)

La plupart des surfaces naturelles ne se comportent pas comme des corps noirs, où

$$\rho + \tau > 0$$

mais plutôt comme des corps gris

Les corps gris n'absorbent qu'une partie du rayonnement et leur émissivité est plus faible.

L'eau, le basalte et le bitume ont des comportements proches des corps noirs surtout pour les grandes longueurs d'onde.

L'absorption

Tous les corps naturels absorbent une partie du rayonnement qui leur parvient. La partie du rayonnement absorbé modifie l'énergie interne du corps. Il y a production de chaleur et réémission de l'énergie à une plus grande longueur d'onde.

En télédétection spatiale, la notion d'absorption est fondamentale car le signal parvenant au capteur satellitaire est modifié au cours de la traversée atmosphérique où

le rayonnement est fortement absorbé par les constituants gazeux et les particules en suspension.

Il est intéressant de noter que contrairement à ce qui se passe dans l'atmosphère transparente aux rayonnements visibles et proche infrarouges, les surfaces naturelles elles, absorbent une partie de ces rayonnements ([source](#)).

La transmission

Lorsqu'une partie du rayonnement incident passe à travers un milieu, on dit que le rayonnement est transmis. Le phénomène de transmission concerne les milieux plus ou moins transparents comme l'eau, les nuages ou l'atmosphère, mais pas uniquement. Le feuillage des arbres par exemple se comporte comme un milieu transparent vis-à-vis du rayonnement proche infrarouge.

Cette notion de transmission est très importante en télédétection, puisque les capteurs dédiés à l'observation des surfaces terrestres et océaniques utilisent les bandes spectrales pour lesquelles l'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère est négligeable. Ces bandes spectrales correspondent aux fenêtres atmosphériques discutées dans la section précédente ([source](#)).

La réfraction

Le phénomène de réfraction correspond à une déviation de la trajectoire du rayonnement lorsqu'il passe d'un milieu à un autre n'ayant pas le même indice de réfraction (rapport entre vitesse de la lumière dans le vide et vitesse de la lumière dans le milieu considéré). La réfraction se produit à l'interface entre les deux milieux ([source](#)).

Signatures spectrales

La télédétection ne serait pas possible si tous les objets étudiés émettaient ou réfléchissaient tous à la même longueur d'onde. En réalité, tout objet, que cela soit des plantes, des surfaces agricoles, des masses d'eau, des habitations, etc. émet ou réfléchit le rayonnement à différentes longueurs d'onde et intensités (Centre canadien de télédétection, s. d.). Chaque surface possède ainsi une signature spectrale (Figure 1.12) - quantité d'énergie émise ou réfléchie en fonction de la longueur d'onde - qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires ([source](#)).

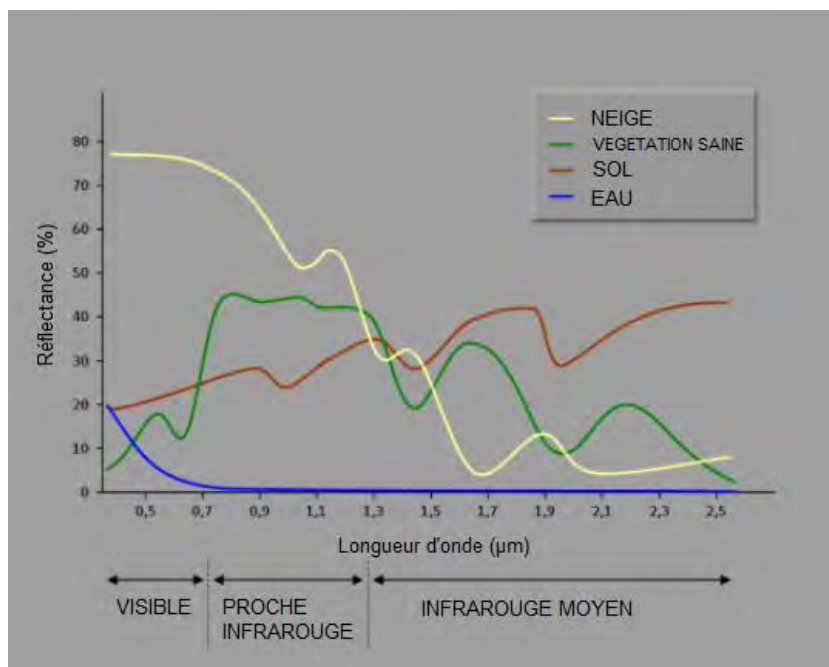


Figure 1.12 Signature spectrale des principales surfaces naturelles (adapté et tiré de : [source](#)).

Les signatures spectrales de l'eau et du sol peuvent paraître similaires dans le visible mais seront toujours différenciables dans le proche infrarouge.

Si nous nous concentrons sur l'eau, nous constatons qu'elle a une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde (Figure 1.12), mais qu'elle absorbe cependant un peu moins les ondes les plus courtes, d'où sa couleur bleue (Figure 1.13) ([source](#)).

Elle paraîtra très foncée si elle est observée avec les longueurs d'onde rouge et proche infrarouge. Lorsque les couches supérieures de l'eau contiennent des sédiments en suspension, la transmission diminue, la réflexion augmente et l'eau paraît plus brillante (Figure 1.13). La couleur de l'eau se déplacera légèrement vers les plus grandes longueurs d'onde (rouge et proche infrarouge). (Centre canadien de télédétection, s. d.).

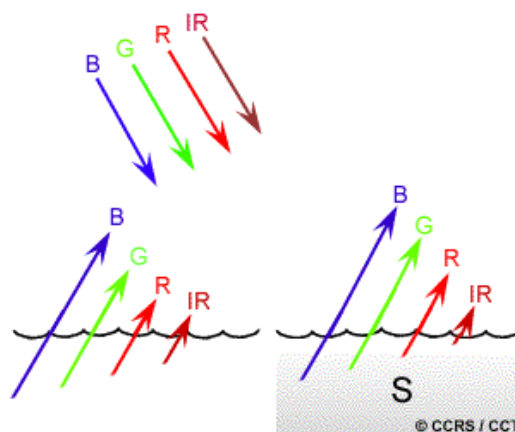


Figure 1.13 Absorption par l'eau des grandes longueurs d'onde du rayonnement visible et du proche infrarouge sans sédiment et avec sédiment (S) (source : (Centre canadien de télédétection, s. d.)

La signature spectrale de l'eau dépend à la fois des molécules qui la constituent, mais aussi des éléments dissous ou en suspension dans la colonne d'eau, comme les organismes phytoplanctoniques, les sédiments ou les substances jaunes. Lorsque la couche de surface contient de fortes concentrations en phytoplancton, on observe une

augmentation de la réflectance dans les longueurs d'onde du vert et l'eau nous paraît par conséquent plus verte (Figure 1.14) ([source](#)).

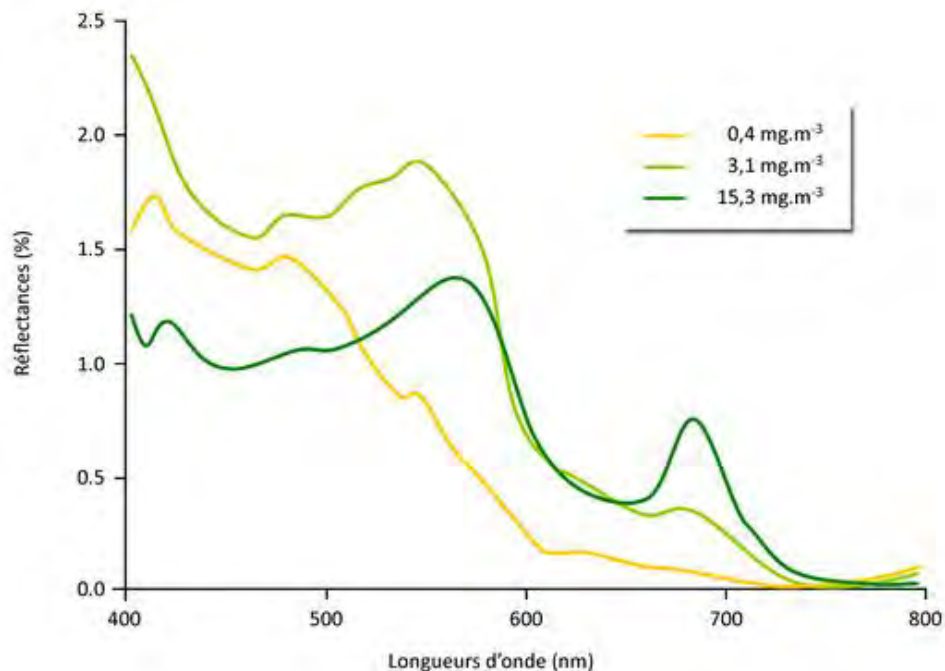


Figure 1.14 Réflectance de l'eau de mer en fonction de sa teneur en chlorophylle (en mg.m^{-3}).
(Tiré de : [source](#) selon Gower et al., 1988)

Plate-formes, capteurs, orbites

L'enregistrement de l'énergie réfléchi se fait par un capteur installé sur une plate-forme.

Cette plate-forme peut être : un avion, un ballon, un satellite.

Les satellites sont mis en orbite autour de la Terre et permettent une couverture répétitive et continue de la surface de la Terre. Ils fournissent la majeure partie des données recueillies par télédétection.

L'orbite des satellites peut être différente selon les usages désirés:

- *Orbite géostationnaire* à 36'000 km de la Terre, ces satellites tournent à la même vitesse que la Terre et observent toujours la même région en continue (satellites météo et de communication).
- *Orbite quasi polaire* (allant du Nord au Sud et vice versa ou orbite ascendante et descendante)
- *Orbite héliosynchrone* (observe le globe à la même heure locale solaire)

La partie de la surface de la Terre observée se nomme la fauchée et peut varier d'une dizaine de kilomètre à une centaine de kilomètre.

La mesure du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface terrestre, les océans ou l'atmosphère, est mesuré par le capteur satellitaire.

Luminance

Le flux énergétique enregistré au niveau du capteur satellitaire se nomme une luminance ([source](#)).

La luminance qui s'exprime en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$ dépend de plusieurs paramètres :

- la superficie de la source qui émet ou réfléchit le rayonnement (en m^2)
- Le champ de vision du capteur qui observe la source dans un angle solide (en stéradian - sr)
- La bande spectrale (fenêtre étroite de longueurs d'onde) du capteur (en μm)

Les luminances permettent donc de différencier les surfaces sur une image. En revanche, si l'on veut étudier l'évolution d'une surface (couverture végétale par exemple) au cours du temps, on ne pourra pas comparer les luminances d'une image à une autre, car elles dépendent de l'éclairement reçu par la surface. Il faut donc convertir les luminances en une grandeur indépendante de l'éclairement incident, la réflectance.

Réflectance

La réflectance est le rapport entre l'énergie réfléchie par une surface et l'énergie incidente reçue par cette même surface pour une longueur d'onde donnée. C'est une grandeur sans unité comprise entre 0 et 1 ou souvent exprimée en pourcentage.

Définition de quelques grandeurs radiométriques et leurs unités

Grandeur radiométrique	Définition	Unité
Flux énergétique (ou puissance)	Energie reçue ou réfléchie par unité de temps	W (watt)
Exitance énergétique	Flux énergétique réfléchi par une source par unité de surface et intégrée sur un hémisphère	W.m^{-2}
Eclairement	Flux énergétique reçu par unité de surface	W.m^{-2}
Luminance	Flux énergétique émis par unité d'angle solide et par unité de surface d'une source dans une direction donnée	$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$
Réflectance	Rapport de l'exitance énergétique à l'éclairement souvent représenté en %	Sans unité

Différentes résolutions

Résolution spatiale

Les images satellites sont composées de pixels. Si un capteur a une résolution de 30 m au sol, alors le pixel affiché à l'écran représentera 30 m x 30 m.

Résolution spectrale

Les capteurs ont des longueurs d'ondes différentes afin de pouvoir distinguer des cibles aux signatures spectrales proches. Ces fenêtres de longueurs d'onde sont appelées la résolution spectrale.

Résolution radiométrique

Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit donc sa capacité à discriminer des différences d'intensité d'énergie.

Les données images sont représentées par une valeur numérique variant entre 0 et 2 à une certaine puissance moins un. Cet intervalle correspond à un nombre de bits utilisés pour encoder des valeurs en format binaire. Le nombre maximum de niveaux d'intensité disponibles dépend du nombre de bits utilisés pour représenter l'intensité enregistrée. Par exemple, un capteur utilisant 8 bits pour enregistrer les données aura $2^8 = 256$ niveaux d'intensité disponibles car il aura 256 valeurs numériques disponibles allant de 0 à 255 ([source](#)).

Résolution temporelle

La notion de repassage d'un satellite sur la même scène détermine aussi l'utilisation de ses images. Elle varie entre quelques minutes, quelques jours à plusieurs semaines. L'énorme avantage de la télédétection est qu'il récolte des données de façon continue et à des périodes différentes ce qui permet une comparaison multi temporelle d'une scène.

Réception, transmission et traitement des données

On utilise trois méthodes de transmission des données :

A. Les données peuvent être transmises directement à une station de réception sur Terre, si le satellite se situe dans le cercle de réception de la station.

B. Si le satellite n'est pas dans le cercle de réception d'une station, les données peuvent être stockées par un enregistreur à bord du satellite.

C. Les données peuvent être aussi retransmises à la station de réception par des satellites de communication qui sont en orbite géostationnaire autour de la Terre. Les données sont transmises de satellite à satellite jusqu'à ce qu'on puisse les retransmettre à la station.

Traitement

Les données brutes parviennent à la station de réception sous forme numérique. Elles sont alors traitées pour corriger les distorsions atmosphériques, géométriques, et systématiques lorsque nécessaire. Elles sont ensuite converties dans un format standard et sont sauvegardées.

Accès aux données

De nombreuses agences (USGS, ESA) mettent aujourd'hui gratuitement à disposition du public les images satellites. Notamment USGS qui a décidé en 2008 d'ouvrir ses archives Landsat. Il existe sur le marché, des satellites commerciaux aux résolutions de 10 voire 5 m. Ces produits sont généralement payants et onéreux.

Bibliographie pour l'annexe 1 :

Aronoff, S. (2005). *Remote sensing for GIS managers* (ESRI Press).

Bonn, F., Caloz, R., Collet, C., & Rochon, G. (1992). *Précis de télédétection* (Vol. 1-4). Sillery (Que.) : Presses de l'Université du Québec, 1992-2001.

Centre canadien de télédétection. « Notions fondamentales de télédétection ». Ressources naturelles Canada, s. d. <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imageriesatellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressourceseducatives/9310>.

Sites internet:

Université Paris 1

<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/index.html>

Université Paris 8

<http://margaux.ipt.univ-paris8.fr/vgodard/enseigne/teled2/memotele/mem11tel.htm>

Figure 1.5

<http://antennes.skyrock.com/544921038-Le-spectre-electromagnetique.html>

Annexe 2

2 Qu'est-ce qu'un Système d'information géographique ?

Remarque : Texte entièrement tiré et adapté de : <http://www.bmreunion.com/sig/spip.php?rubrique1>

Définition

L'information géographique peut être définie comme l'ensemble de la description d'un objet et de sa position géographique à la surface de la Terre.

Ainsi, le système d'information géographique (SIG) permet de gérer une multitude d'informations de tous types (images satellitaires, photos aériennes, cartes, données chiffrées, base de données, etc.), de les mettre à jour rapidement, de faire des requêtes (classique et spatiales), d'appliquer des règles de topologie, de générer de nouvelles couches d'informations par le biais de ces croisements.

Son rôle est de proposer une représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial (Figure 2.1) d'un territoire en se basant sur des vecteurs (points, polygones, polygones) ou des rasters (maillage) qui sont associées à des informations qualitatives (route, voie ferrée, forêt, lac etc.) ou contextuelles et dont le but ultime est l'aide à la décision.

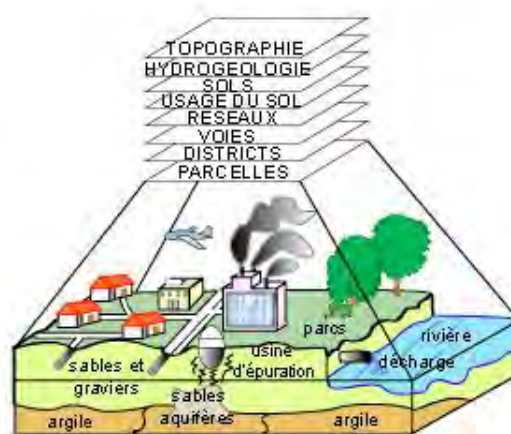


Figure 2.1 Données et réalité: ensemble des couches d'informations représentant les différents objets et phénomènes du monde réel. Tiré de "Les systèmes d'information géographique", Que sais-je, PUF, éd. 1996

Les composantes du SIG

Un SIG est constitué de 5 composants majeurs :

1. Les données

Les données sont certainement les composantes les plus importantes des SIG.

Les données géographiques peuvent être, soit importées à partir de fichiers, soit saisies par un opérateur. Elles possèdent deux composantes :

- ▶ les données géométriques renvoient à la forme et à la localisation des objets ou phénomènes ;
- ▶ les données graphiques renvoient aux paramètres d'affichage des objets (type de trait, couleur...);

Les données attributaires sont les données associées à un objet ou une localisation géographique, soit pour décrire un objet géographique, soit pour localiser des informations : nom d'une route, type d'un bâtiment localisé par son adresse, nombre d'habitants d'un immeuble localisé par ses coordonnées géométriques, débit d'un cours d'eau, tension d'une ligne

de transport d'énergie, type d'arbres dans un verger localisé par sa parcelle, etc. Les données attributaires sont reliées à la géométrie de l'objet.

Les métadonnées associées, sont les données sur les données (date d'acquisition, nom du propriétaire, méthodes d'acquisition, limites d'utilisation ...).

2. Les logiciels

Ils assurent les 6 fonctions suivantes (les 6A) :

- ▶ saisie des informations géographiques sous forme numérique (Acquisition)
- ▶ gestion de base de données (Archivage)
- ▶ manipulation et interrogation des données géographiques (Analyse)
- ▶ mise en forme et visualisation (Affichage)
- ▶ représentation du monde réel (Abstraction)
- ▶ prospective (Anticipation)

Un logiciel SIG est donc un système de gestion de bases de données (SGBD) localisées (géoréférencées) qui comprend une ou plusieurs couches géographiques qui peuvent entretenir des relations entre elles, être croisées, interrogées.

3. Les matériels

Actuellement, le traitement des données à l'aide des logiciels ne peut se faire sans un ordinateur. En outre, pour faciliter la diffusion des résultats produits par un SIG, on utilise de plus en plus des systèmes client-serveur en intranet, extranet voire Internet. Ces solutions de diffusion appelées web-mapping ou web-sig utilisent un serveur cartographique.

4. Les savoir-faire

Tous les éléments décrits précédemment ne peuvent prendre vie sans une connaissance technique de ces derniers. Un SIG fait appel à divers savoir-faire et donc divers métiers qui peuvent être effectués par une ou plusieurs personnes. On retiendra notamment la nécessité d'avoir des compétences en géodésie (connaissance des concepts de système de référence et de système de projection), en analyse des données, des processus et de modélisation, en traitement statistique, en sémiologie graphique et cartographique, en traitement graphique.

5. Les utilisateurs

Comme tous les utilisateurs de SIG ne sont pas forcément des spécialistes, un SIG propose des boîtes à outils que l'utilisateur assemble pour réaliser son projet. N'importe qui peut, un jour ou l'autre, être amené à utiliser un SIG. Cela dit, on ne s'improvise pas géomaticien¹⁰ : une bonne connaissance des données manipulées et de la nature des traitements effectués par les logiciels permet seule d'interpréter convenablement la qualité des résultats obtenus. Cela nécessite dans la plupart des cas le recours à de la formation.

¹⁰ Géomaticien, spécialiste en géomatique. Géomatique: qui regroupe l'ensemble des disciplines et moyens informatiques permettant de représenter, d'analyser et d'intégrer des données géographiques. La géomatique consiste donc en au moins trois activités distinctes : collecte, traitement et diffusion des données.

Annexe 3

3 Analyse dans Web of Knowledge

Regain d'intérêt

Sur le site [Web of knowledge](#), dans l'option « Search » en limitant la recherche de 2000 à 2015 et en insérant le mot « Remote sensing¹¹ », on obtient un nombre de 74'238 articles à ce sujet sur 58'629'998 (0.126% du total). Alors que si l'on fait la même recherche de 1955-1999, on obtient 16'470 résultats sur 44'922'295 (0.036% du total) sachant que le plus ancien article à ce sujet trouvé dans cette base date de 1963. En 36 ans (1963 à 1999), il y a eu que 22% des articles publiés ces 15 dernières années.

Pour la même période 2000 à 2015, on obtient en rajoutant « limnology » 15 articles et 247 avec « oceanography ». Ainsi, en faisant ces recherches très rapides, on peut facilement montrer l'intérêt croissant de la télédétection toutes utilisations confondues au cours de ces quinze dernières années (Figure 3.1), conclusion à laquelle Matthew (Matthews, 2011) était par ailleurs aussi arrivé.

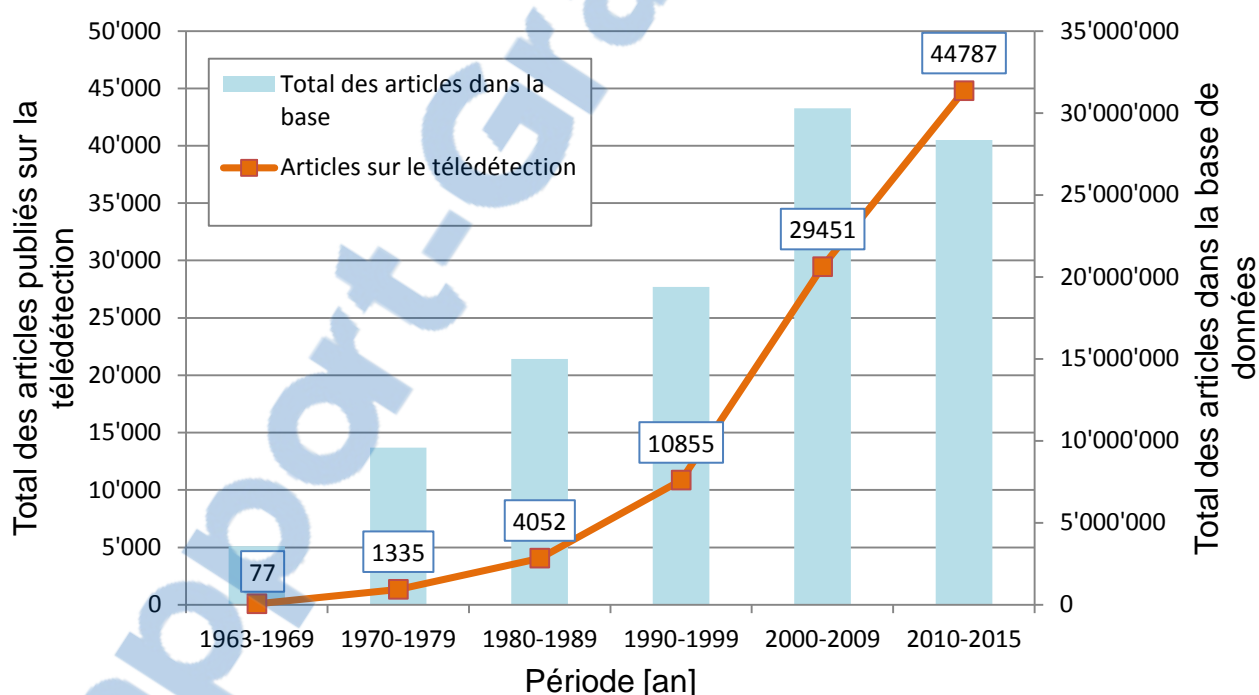


Figure 3.1 Résultat de la recherche des articles publiés et répertoriés sur le site [apps.webofknowledge.com](#) dont le sujet est la télédétection. A noter qu'en 5 ans (2010-2015) la quantité d'articles publiés dépasse déjà de loin le total publié à la période précédente (consultation 18 décembre 2015)

L'intérêt croissant de la télédétection est vraisemblablement dû à plusieurs facteurs: l'accès gratuit aux données (Landsat, Sentinel, MODIS-Terra, etc) dont les résolutions spatiales permettent une analyse fines a fait exploser l'usage de la télédétection dans divers domaines. Enfin, les progrès technique et les résolutions spectrales (bandes plus étroites et multiples) offrent la possibilité d'étudier des phénomènes jusqu'ici difficilement observables. Notamment, en télédétection aquatique, le satellite [Sentinel-2](#)

¹¹ Signifie en anglais « télédétection »

du programme [Copernicus](#) de l'ESA est destiné entre autres à l'étude de l'eau, les bandes spectrales sont adaptées pour correspondre aux propriétés optiques des eaux dites complexes.

Bibliographie pour l'annexe 3:

Matthews, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6855–6899. (<http://doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>)

Site internet:

Web of Knowledge

<http://apps.webofknowledge.com>

Annexe 4

4 Procédure de traitement des données AVHRR de l'Université de Berne

4.1 Problématique et informations

Tous les traitements d'images ont été réalisés avec le logiciel de SIG ArcGIS ver. 10.3, ESRI ©, cette procédure concerne donc ce logiciel spécifiquement.

Deux problèmes de base:

- i) Les images reçues de l'Université sont au format (*.ers) et l'on ne peut pas les transformer dans ArcGIS.
- ii) La projection LCC 2SP (Lambert Conic Conformal 2 Standard Parallel) est une projection personnalisée de l'Université de Berne non reconnue dans ArcGIS.

Les données ont été transmises via leur serveur ftp. Dans chaque fichier, une image *.jpeg (Figure 4.1) permet de visualiser la scène et de sélectionner celles qui sont sans nuages sur le Léman.

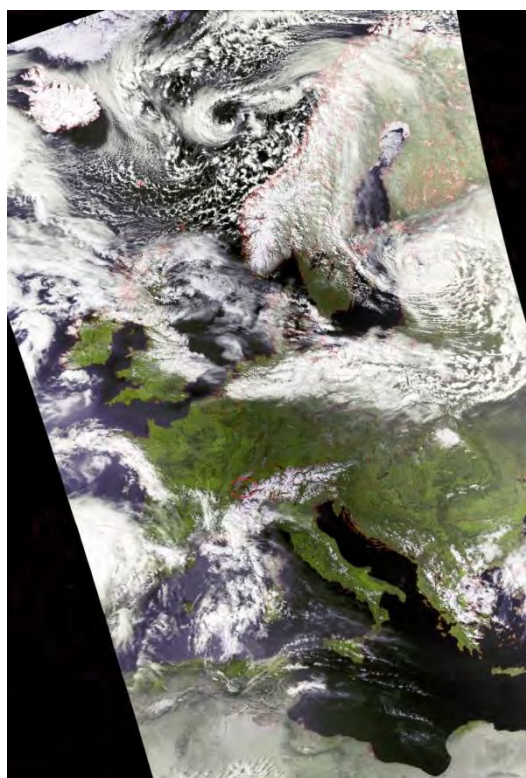
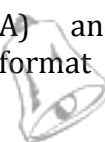


Figure 4.1 Image du 11 avril 1988 à 14h17 (réf: 19880411_1417_noaa09_avhrr2_rtoabtmp_v03) un cercle rouge a été dessiné sur la zone du Léman

Les images sont classées selon : année, mois, jour_heure_satellite_capteur et reçues en trois différents produits selon la description reçue de l'Université de Berne:

'rectified': geo-coded, orthorectified reflectances (TOA) and brightness temperatures, viewing geometry, logfiles; gzipped, ER Mapper format.



'corrected': AVHRR channels 1 and 2 where the atmospheric correction (SMAC 6S) was applied to, logfiles; gzipped ER Mapper format; note: the scale is different from the 'rectified' data

'cloud': cloud masks, cloud probabilities, skin temperatures, logfiles; GeoTIFF

'img': false colour preview images; JPEG.

Sur la trentaine d'images proposées, seules 15 sont sélectionnées (sans couverture nuageuse apparente sur l'image de prévisualisation). En réalité, seules 4 images seront réellement sans cirrus de type "rectified".

Tableau 19 Sélection d'images AVHRR (identification raccourcie)

19880411_1417
19880414_1344
19880414_1525
19880503_1339
19880709_1455
19880710_1444
19880726_1511
19880728_1449
19880904_1438
19880907_1404
19880908_1354
19881004_1552
19881009_1458
19881021_1426
19881028_1450

4.2 Traitement des images dans ArcGIS

1. Créer une **géodatabase personnelle** (*.gdb) depuis ArcCatalog. Ici, appelée **Lem1.gdb**.

2. **Transformation du format *.ers en *.tif**

Avant d'insérer les images satellites qui sont au format ER Mapper (*.ers) il faut les transformer au format TIF (*.tif). On utilise le script Raster To Other Format (multiple) trouvé dans ArcToolbox > Conversion Tools > To Raster > Raster To Other Format (multiple).

Pour faciliter la tâche répétitive, un Model Builder a été créé¹² (Figure 4.2). Input Workspace et Output Workspace sont définis en tant que paramètres ainsi on peut choisir l'entrée et la sortie du modèle :

¹² Grâce à l'aide précieuse de Martin Lacayo

Convert Folder

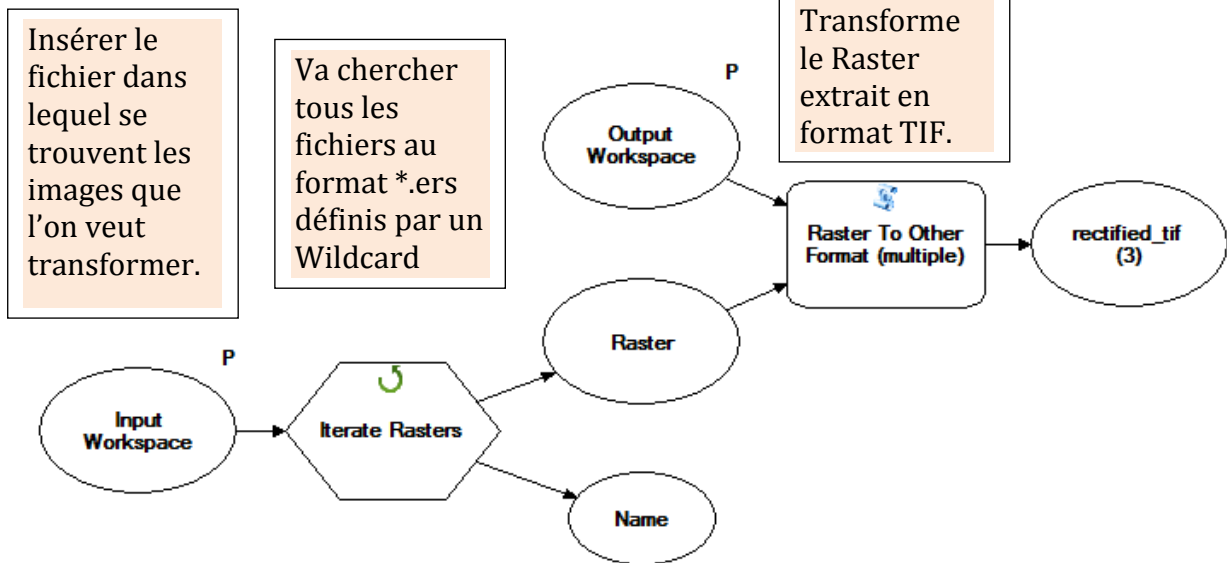


Figure 4.2 Model Builder Convert Folder

3. Projection

Il faut recréer une projection selon le fichier PROJ4 demandé à l'Université de Berne (Lambert Conformal Conic 2 Standard parallels – LCC 2SP):

PROJ.4 : '+proj=lcc +lat_1=40 +lat_2=55 +lat_0=0 +lon_0=10 +x_0=0 +y_0=0
+datum=WGS84 +units=m +no_defs'

Pour ce faire, il faut la créer et le fichier PROJ4 reçu par l'Université de Berne a été transformé en format WKT lisible par ArcGIS <projected cs> PROJCS et sauvé en fichier *.prj

PROJCS :

```
PROJCS["Lambert_Conformal_Conic_2SP",GEOGCS["GCS_WGS_1984",DATUM["D_WGS_1984",SPHEROID["WGS_1984",6378137.0,298.257223563]],PRIMEM["Greenwich",0.0],UNIT["Degree",0.0174532925199433]],PROJECTION["Lambert_Conformal_Conic"],PARAMETER["false_easting",0.0],PARAMETER["false_northing",0.0],PARAMETER["central_meridian",10.0],PARAMETER["standard_parallel_1",40.0],PARAMETER["standard_parallel_2",55.0],PARAMETER["latitude_of_origin",0.0],UNIT["Meter",1.0]]
```

Ce fichier va être importé dans ArcGIS.

Aller dans ArcCatalog, sur le Raster transformé en TIF. Clic droit, Properties (Figure 4.3).

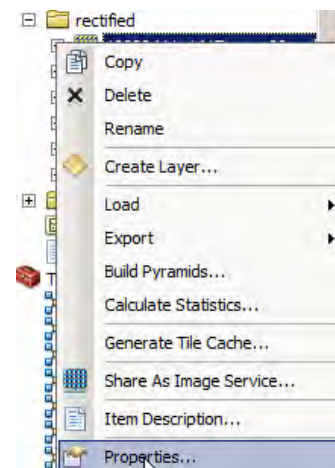


Figure 4.3 Properties du Raster

La fenêtre suivante s'ouvre. Aller sous Spatial Reference et cliquer sur Edit (Figure 4.4).

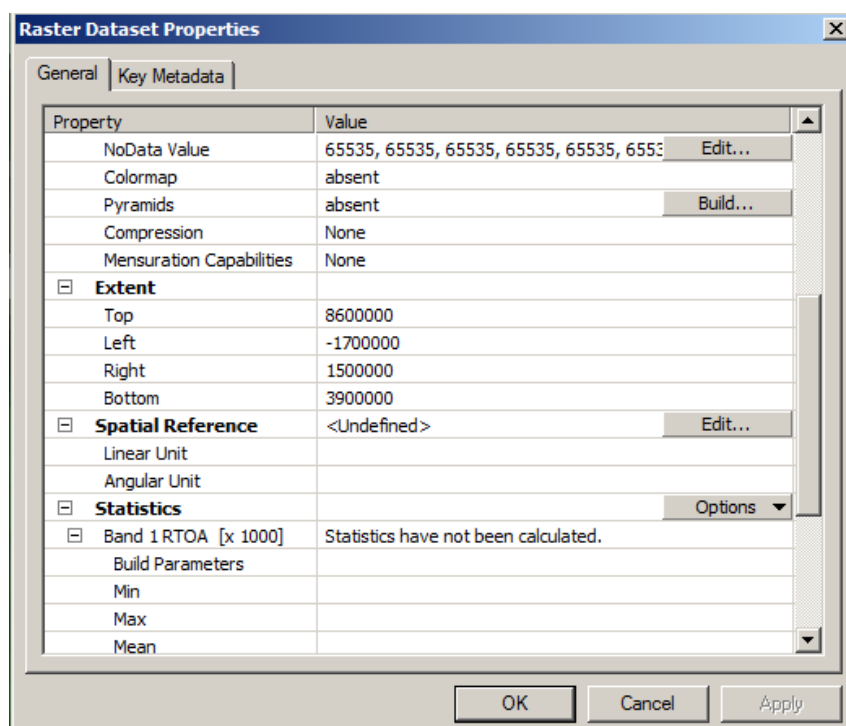


Figure 4.4 Raster Dataset Properties du Raster, aller avec la barre déroulante jusqu'à Spatial Reference

En cliquant sur Edit, cette fenêtre s'ouvre. Aller vers le Globe et cliquer sur Import (Figure 4.5).

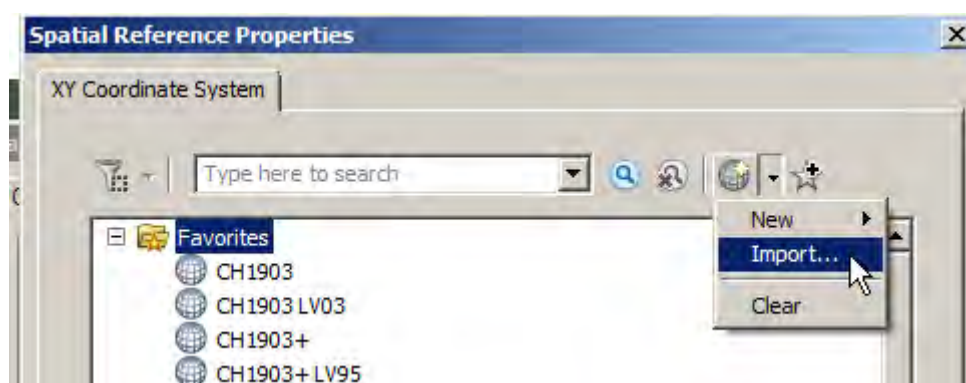
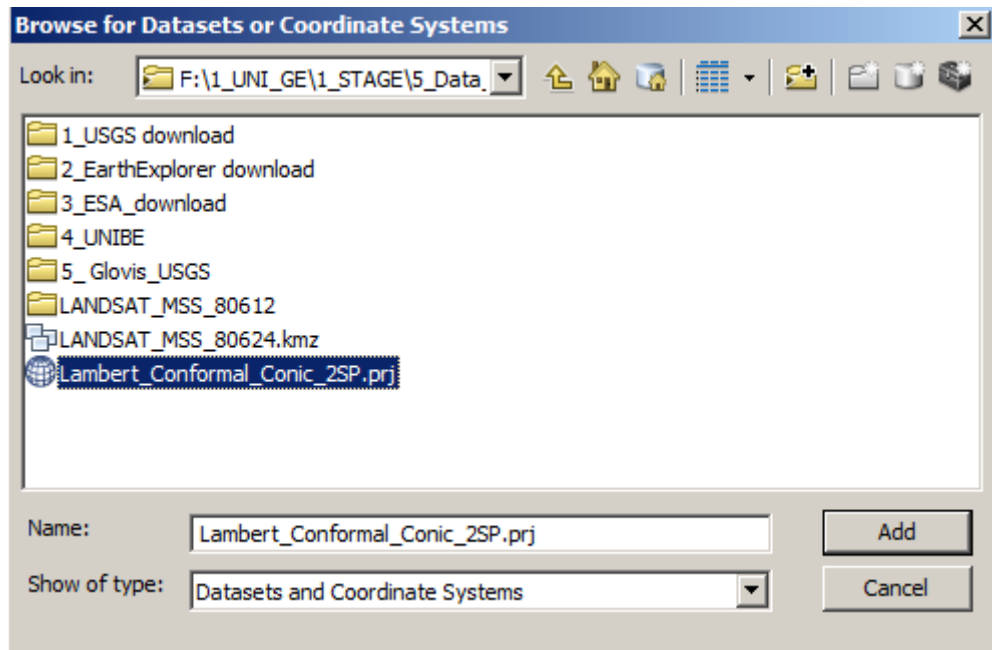


Figure 4.5 Spatial Reference Properties, cliquez sur Import pour importer le fichier contenant la projection.

Importer le fichier *.prj (Figure 4.6)



*Figure 4.6 Importation du fichier *.prj créé au préalable*

Se référer au point "Création du point SHL2" pour les détails de la création de la projection personnalisée sur le site internet <http://spatialreference.org> pour de futurs usagers, divers WKT sont présentés.

Afin de rendre la tâche plus rapide et simple, un autre Model Builder nommé «Define Folder Projection» a été réalisé (Figure 4.7) :

Define Folder Projection

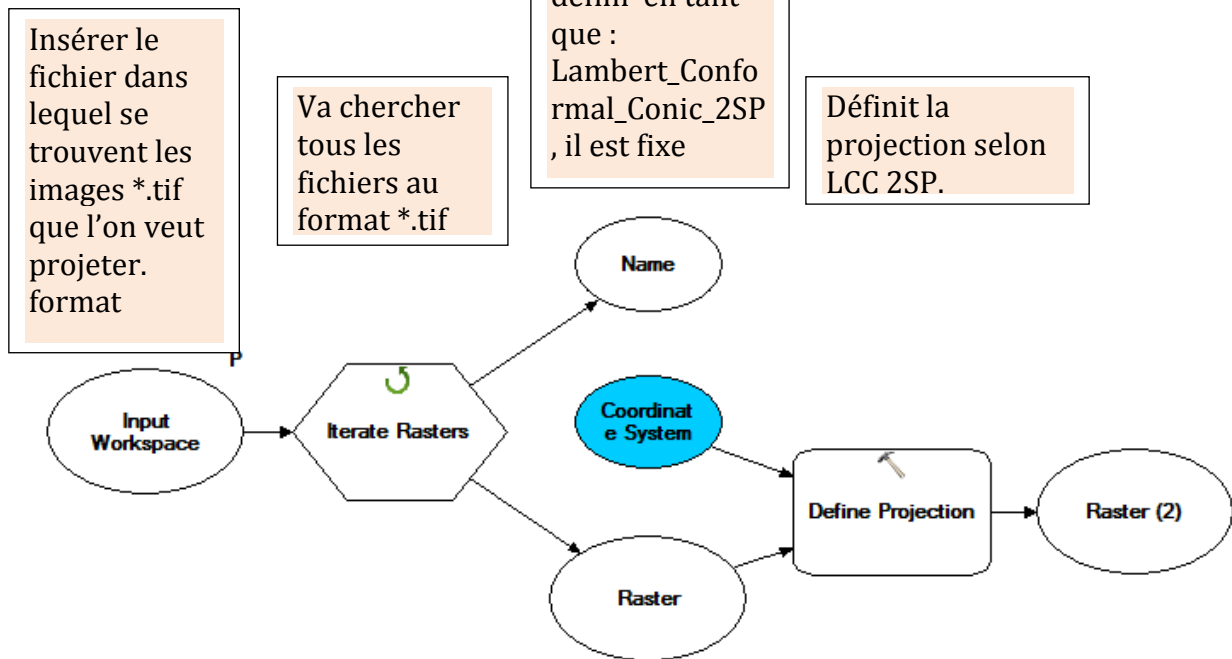


Figure 4.7 Model builder "Define projection"

Puis que le processus est le même pour toutes les images, un Model Builder général (Figure 4.8) nommé « Combo » rassemble les deux Model Builder (conversion des fichiers du format *.ers en *.tif puis projection selon la projection personnalisée).

Combo

Il n'y a qu'à insérer le fichier d'entrée (Input Workspace) et le fichier de sortie à définir (Output Workspace).

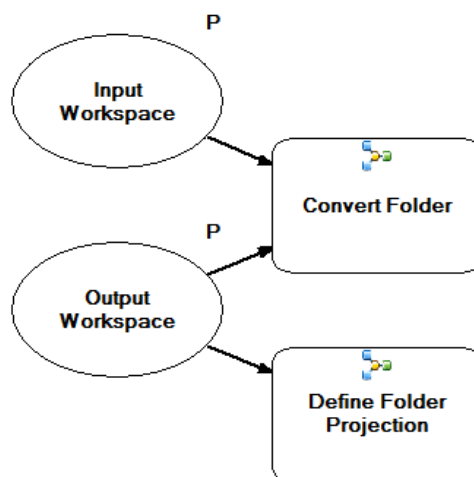


Figure 4.8 Model builder faisant les deux opérations en une: convertit le format et définit la projection.

Remarque : s'il y a un problème et que l'on n'arrive pas à changer la projection des images, alors, il faut vérifier si les fichiers sont en Read-only. Aller sur le dossier où elles se trouvent, clic droit > Propriétés > Général > Attributes > cliquer la case Read-only.

Tous les Model Builder sont sauvés sous :

F:\1_UNI_GE\1_STAGE\5_Data_download\4_UNIBE\ToolboxAVHRR.tbx

4. **Carte de base suisse** (optionnel) à insérer dans notre géodatabase depuis ArcCatalog,
Prise celle au 1 :25'000 (Figure 4.9)

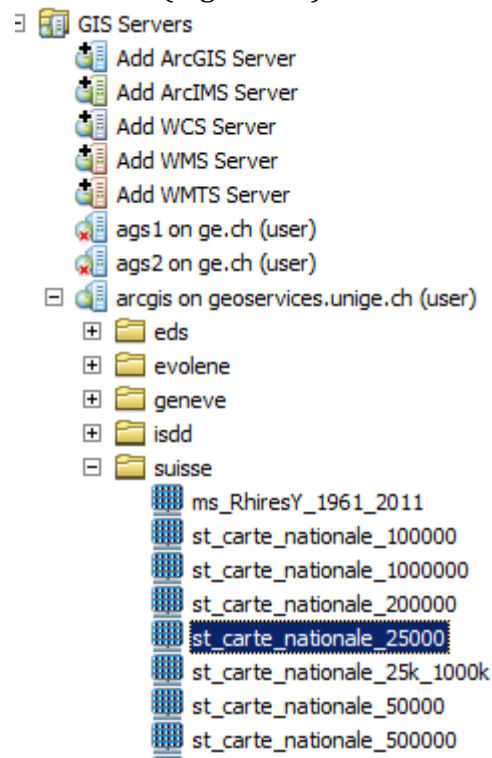


Figure 4.9 Chemin où trouver la carte nationale suisse sur le réseau interne à l'Université

La carte nationale a comme référence spatiale CH1903 LV03, elle sera projetée à la volée puisque notre Data Frame est défini comme tel ainsi que les autres rasters. Elle se cale sur les images satellites (optionnel).

A partir de ce point, tous les traitements sont aussi valables pour les images Landsat et repris dans la procédure de traitement d'images Landsat.

5. **Couche contour du lac des SITG**

On peut plutôt prendre le shapefile du **SITG: SHP_GEO_LAC_LEMAN_SITG** (emprise du lac Léman) et le sauver en local dans notre géodatabase en le transformant en Shape. Prendre soin de le projeter selon la bonne projection. Cette étape est valable aussi pour le traitement des images Landsat.

6. **Créer un masque** pour réduire l'image satellite à notre zone de travail. Depuis ArcCatalog, Folder Connection, clic droit sur le dossier > New > Shapefile. Le mettre dans la projection des rasters (Figure 4.10).

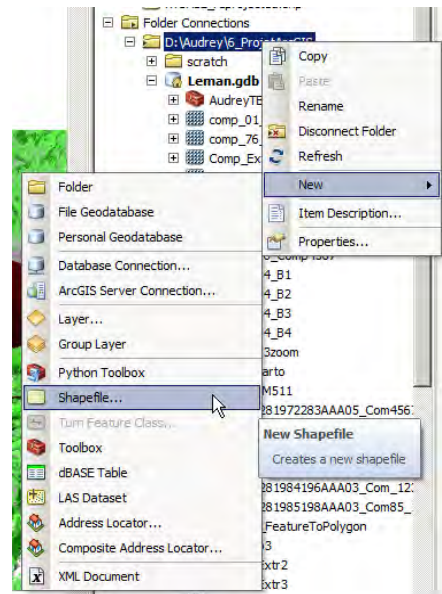


Figure 4.10 Première étape, créer un shape pour le futur masque

7. Ouvrir une session d'édition (Figure 4.11), aller dans Editing Windows > Create Features. Sélectionner l'objet à éditer, ici Cut_image, choisir de quel type, ici Polygone. Mettre à la même projection que les rasters. Dessiner un rectangle qui entoure le Léman en allant sur Editor > Editing Window > Create Features

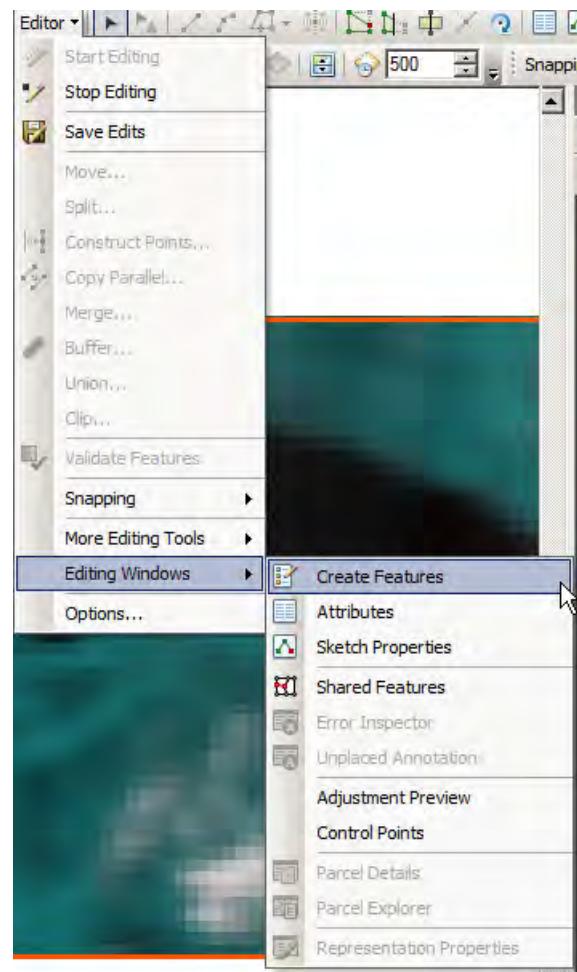


Figure 4.11 Créer le shape dans la session d'édition

Dans Create Features (Figure 4.12), cliquer sur Cut_image et sélectionner un outil de construction (Construction Tools), ici Polygone.

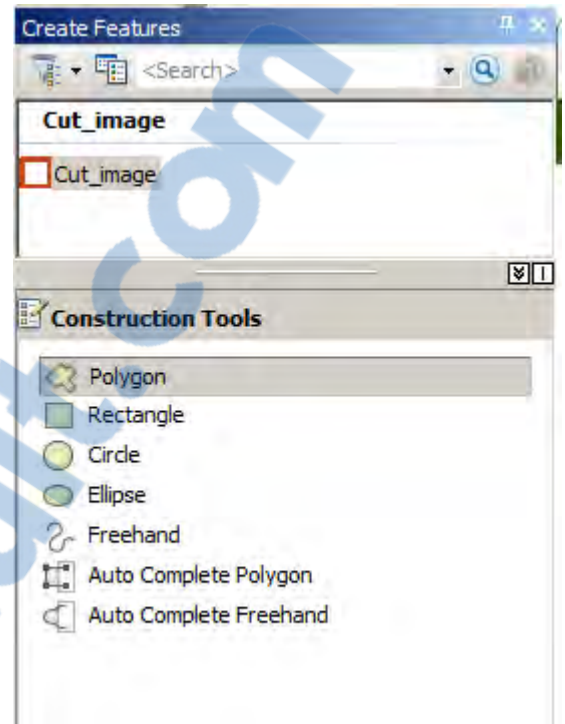


Figure 4.12 Dessiner le polygone

Sauver et fermer la session d'édition. S'il n'apparaît pas directement dans la table des matières, aller le chercher depuis ArcCatalog. Clic dans table des matières, sur le symbole de Cut_image, le changer, en gardant que le contour.

8. Extract by mask (ArcToolbox)

Afin d'extraire une portion de l'image satellite, on utilise le masque créé avec l'outil "Extract by mask" (Figure 4.13).

Insérer l'image à extraire et ensuite le masque. Nommer le fichier.

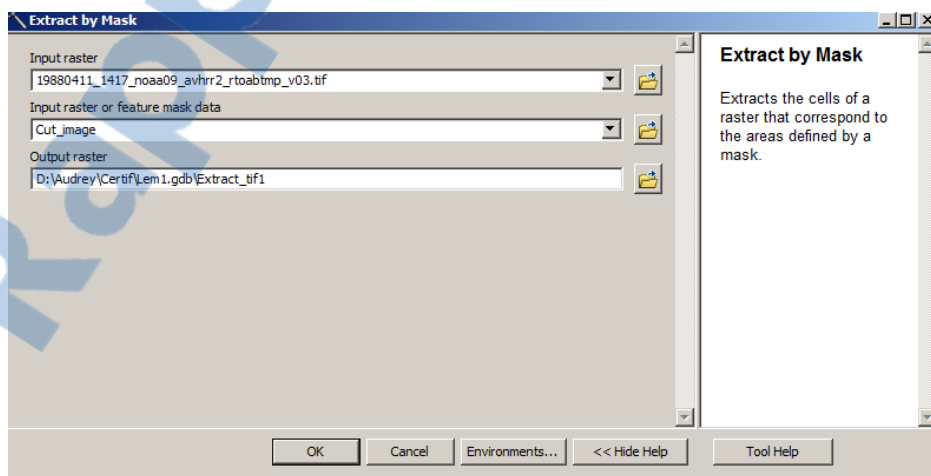


Figure 4.13 Extract by mask

Ou créer un Model Builder pour couper l'image (Figure 4.14) puisque cette tâche va être répétitive aussi.

Extract

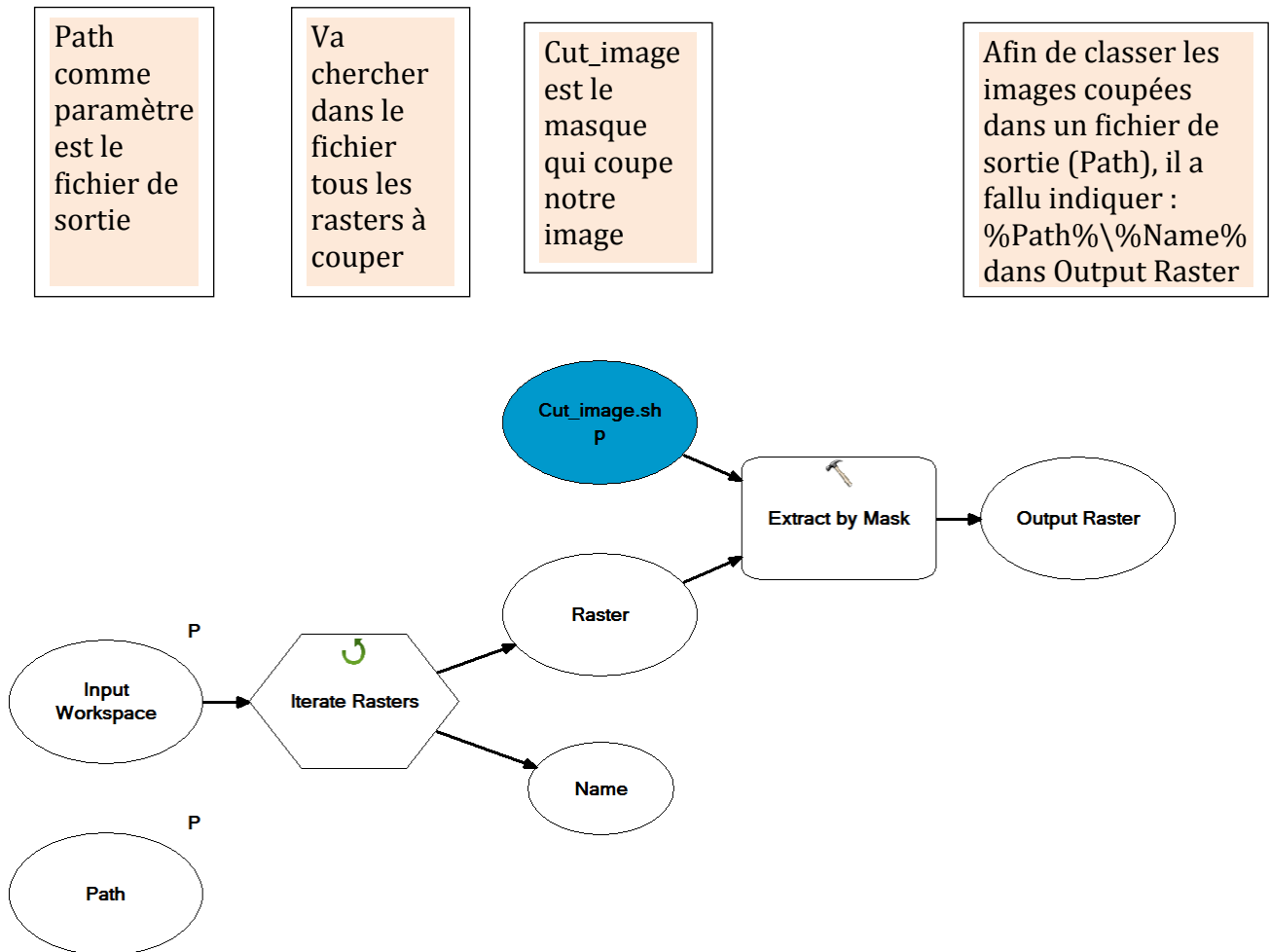


Figure 4.14 Model builder Extract

9. Créer le point SHL2 selon la bonne projection utilisée.

Les coordonnées GPS de SHL2 sont WGS84 6.58872 °E, 46.4527 °N en degrés. Nous désirons les projeter selon la projection obtenue par l'Université de Berne en mètres.

Afin de placer le point SHL2 sur la carte, des transformations ont dû être réalisées.

Comme la projection LCC 2SP de l'Université de Berne est personnalisée:

PROJ.4 : '+proj=lcc +lat_1=40 +lat_2=55 +lat_0=0 +lon_0=10 +x_0=0 +y_0=0 +datum=WGS84 +units=m +no_defs'

Elle ne correspond pas à la projection proposée par le site www.spatialreference.org (Europe LCC) remarquez les indications sous Standard parrallel 1 et 2 (Figure 4.15):

Europe LCC

Projection:	lcc
Standard parallel 1:	43
Standard parallel 2:	62
Central latitude:	30
Central longitude:	10
False easting:	0
False northing:	0
Ellipsoid:	<ul style="list-style-type: none"> • Semi-major radius: 6378388 • Inverse flattening: 297 • Name: International 1909 (Hayford)
Units:	m

<http://spatialreference.org/ref/esri/102014/>

ESRI:102014 : +title=Europe LCC +proj=lcc +lat_1=43 +lat_2=62 +lat_0=30 +lon_0=10 +x_0=0 +y_0=0 +ellps=intl +units=m +no_defs

Figure 4.15 Projection Europe LCC du site <http://spatialreference.org>

Il aura fallu créer une projection personnalisée sur le site internet www.spatialreference.org en tant que "LCC 2SP customized" pour obtenir la conversion la plus juste et référencée sur le site comme SR-ORG: 8395, voir <http://spatialreference.org/ref/sr-org/8395/>

Voilà quelques exemples de WKT pour différentes utilisations:

Human-readable OGC WKT :

```
PROJCS["LCC 2SP customized",
  GEOGCS["WGS 84",
    DATUM["WGS_1984",
      SPHEROID["WGS 84",6378137,298.257223563,
        AUTHORITY["EPSG","7030"]],
      AUTHORITY["EPSG","6326"]],
    PRIMEM["Greenwich",0],
    UNIT["degree",0.0174532925199433],
    AUTHORITY["EPSG","4326"]],
  PROJECTION["Lambert_Conformal_Conic_2SP"],
  PARAMETER["standard_parallel_1",40],
  PARAMETER["standard_parallel_2",55],
  PARAMETER["latitude_of_origin",0],
  PARAMETER["central_meridian",10],
  PARAMETER["false_easting",0],
  PARAMETER["false_northing",0],
  UNIT["metre",1,
    AUTHORITY["EPSG","9001"]]]]
```


PROJ4 :

```
+proj=lcc +lat_1=40 +lat_2=55 +lat_0=0 +lon_0=10 +x_0=0 +y_0=0 +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m +no_defs
```

ESRI WKT:

PROJCS["LCC 2SP

customized",GEOGCS["GCS_WGS_1984",DATUM["D_WGS_1984",SPHEROID["WGS_1984",6378137,298.257223563]],PRIMEM["Greenwich",0],UNIT["Degree",0.017453292519943295]],PROJECTION["Lambert_Conformal_Conic"],PARAMETER["standard_parallel_1",40],PARAMETER["standard_parallel_2",55],PARAMETER["latitude_of_origin",0],PARAMETER["central_meridian",10],PARAMETER["false_easting",0],PARAMETER["false_northing",0],UNIT["Meter",1]]

Sur ce site <http://twcc.fr/en/#>, les coordonnées en degrés du point SHL2 (WGS84 6.58872 °E, 46.4527 °N) ont été transformées en mètre selon la projection nouvellement créée sur le site www.spatialreference.org et référencé comme "LCC 2SO customized" SR-ORG: 8395, voir <http://spatialreference.org/ref/sr-org/8395/>.

Pour transformer les coordonnées WGS84 du point SHL2 dans la nouvelle projection créée, il faut appuyer sur le + dans la partie inférieure de la fenêtre (Figure 4.16) et aller chercher la nouvelle référence créée sur le site Spatial Reference (Figure 4.17).

Custom reference system

1. Search the Proj4js format on [Spatial Reference](#):
Ex: European Datum 1950

Search!

2. Come-back and add the new reference system definition in TWCC:

Examples...

- +title=ED 1950 (Deg) +proj=longlat +ellps=intl +no_defs
- EPSG:4326
- ESRI:37231
- IAU2000:29901
- SR-ORG:38
- IGNF:RRAF91

Add!

3. You use this system frequently?
Contact us and we will add it to TWCC permanently!

Contact us

*GPS (WGS84) (deg)

Lat = 46.4527 °N
Lng = 6.58872 °E

Convert

UD1

X = -259820.58 m
Y = 5696835.61 m

Convert

Figure 4.16 Transformation dans la bonne projection

Figure 4.17 Fenêtre à remplir avec le code SR-ORG 8395 nouvellement créé

Dans la liste du menu déroulant, LCC 2 SP customized est référencé sous UD1 (Figure 4.16).

Résultat:

Insérer (Figure 4.16) WGS84 6.58872 °E, 46.4527 °N → résultat de la transformation en LCC 2SP Customized = X : -259820.58m, Y : 5696835.61m

Lorsque l'on clique sur le point d'interrogation [?] à côté de UD1, cette fenêtre apparaît avec les détails de la projection (Figure 4.18), il s'agit bien de la bonne projection.

System definition x

UD1

Projection:	lcc
Standard parallel 1:	40
Standard parallel 2:	55
Central latitude:	0
Central longitude:	10
False easting:	0
False northing:	0
Ellipsoid:	<ul style="list-style-type: none"> Semi-major radius: 6378137 Inverse flattening: 298.257223563 Name: WGS 84
Datum:	<ul style="list-style-type: none"> Toward WGS84 scaling: 0,0,0 Name: WGS84
Units:	m

UD1 : +proj=lcc +lat_1=40 +lat_2=55 +lat_0=0 +lon_0=10 +x_0=0 +y_0=0 +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m +no_defs

Figure 4.18 Détails de la projection

Finalement, insérer dans un fichier Excel les coordonnées X et Y nouvellement transformées.

10. Utiliser ArcToolbox>Excel to Table pour **transformer le fichier Excel en table** ArcGIS. Clic droit sur la nouvelle table> Display XY data (Figure 4.19), s'affiche la fenêtre suivante, il faut insérer les bonnes coordonnées sur les bons champs (X sur X field, Y sur Y field) et cliquer sur Edit afin d'insérer la bonne projection LCC 2SP.

Cela crée un point dans la table des matières.

Clic droit sur le point, Export data as Shapefile. Le point SHL2 s'aligne parfaitement.

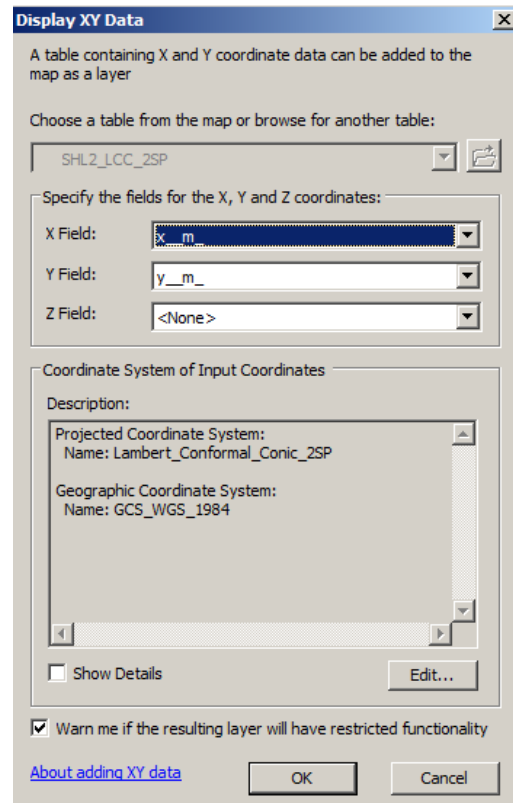


Figure 4.19 Display X Data pour position le point sur la carte

11. Création d'un buffer autour du point SHL2

Faire un zoom sur le point SHL2 (possibilité de faire des Bookmarks, voir barre de menu) afin de dessiner un buffer qui sera utilisé pour Zonal Statistics as Table (ArcToolBox). A nouveau, même procédure que dans la création du masque (point 6), aller dans ArcCatalog sous le dossier où se trouve notre géodatabase dans le dossier racine, clic droit>New>Shape. On doit le géoréférencer selon la layer de base. Ouvrir une session d'édition>Editing window>Create Features. Sélectionner le buffer et polygone.

12. Bandes ratio

Raster Calculator (Figure 4.20) nous permet de faire des calculs sur les rasters. Il se trouve dans ArcToolbox>Spatial analyst. Le résultat sera la création d'un nouveau raster en sortie.

Comme nous divisons les nombres digitaux (ND) des bandes, nous allons avoir des chiffres à virgule, il faut alors insérer « Float » dans la formule pour que cela fonctionne.

Float("1989_b1")/ Float("1989_b3")

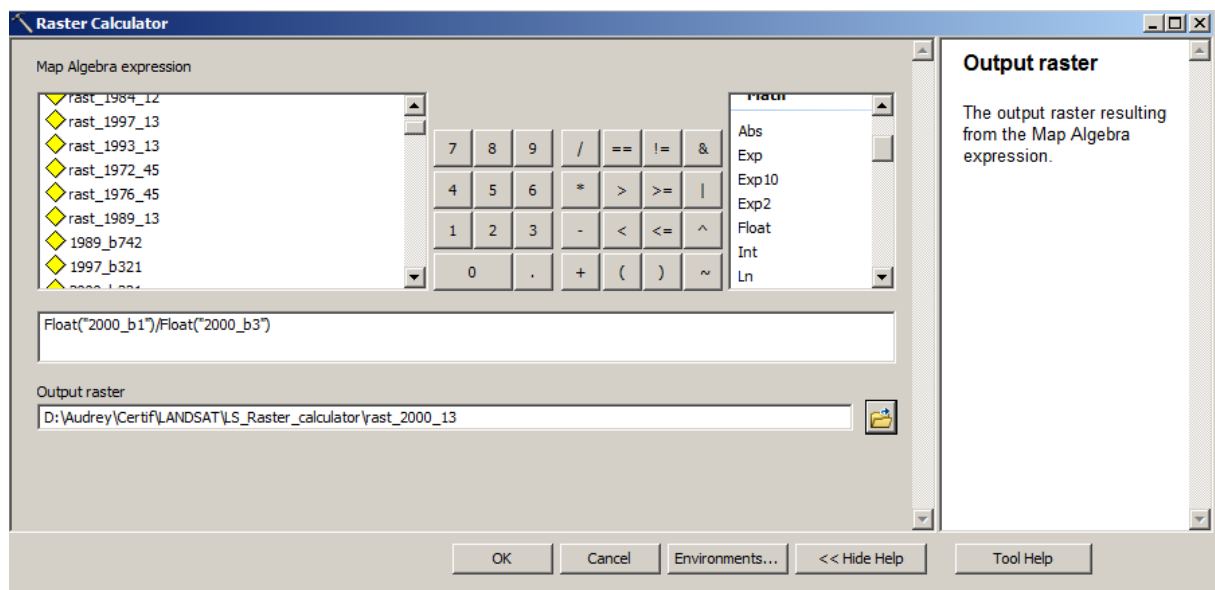


Figure 4.20 Raster Calculator

13. Zonal Statistics as a Table (ArcToolBox)

Afin de calculer les statistiques des pixels autour du point SHL2 où les mesures *in situ* sont réalisées, nous utilisons l'outil « Zonal Statistics as a table » (Figure 4.21).

D'abord insérer le buffer, ensuite, le nom du champ, puis le raster sur lequel les statistiques vont être effectuées. La table est rajoutée directement dans la table des matières.

un champ SHL2 comme
texte avec SHL2 dans la
table a été rajouté

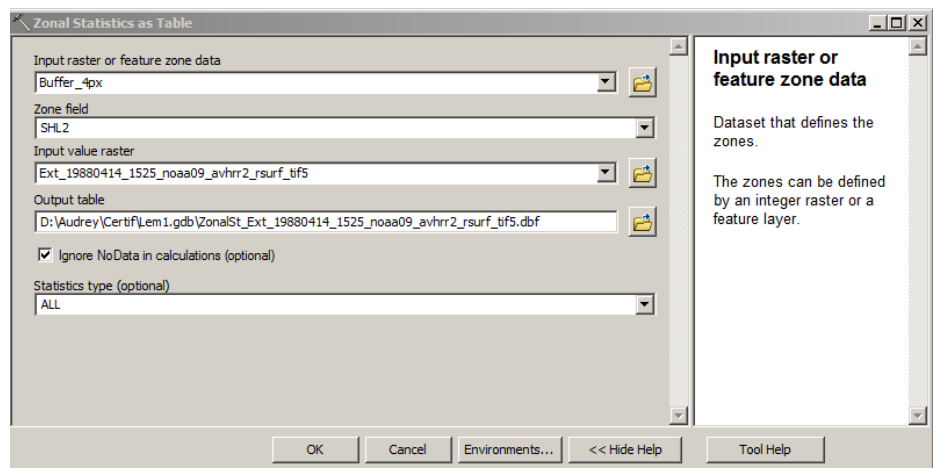


Figure 4.21 Zonal statistics as table

14. Extraire la table en fichier excel.

Utiliser l'outil, Table to Excel de ArcToolbox. (Figure 4.22). Insérer en premier la table. Le fichier Excel sera automatiquement mis dans un dossier nommé Scratch (le renommer si nécessaire).

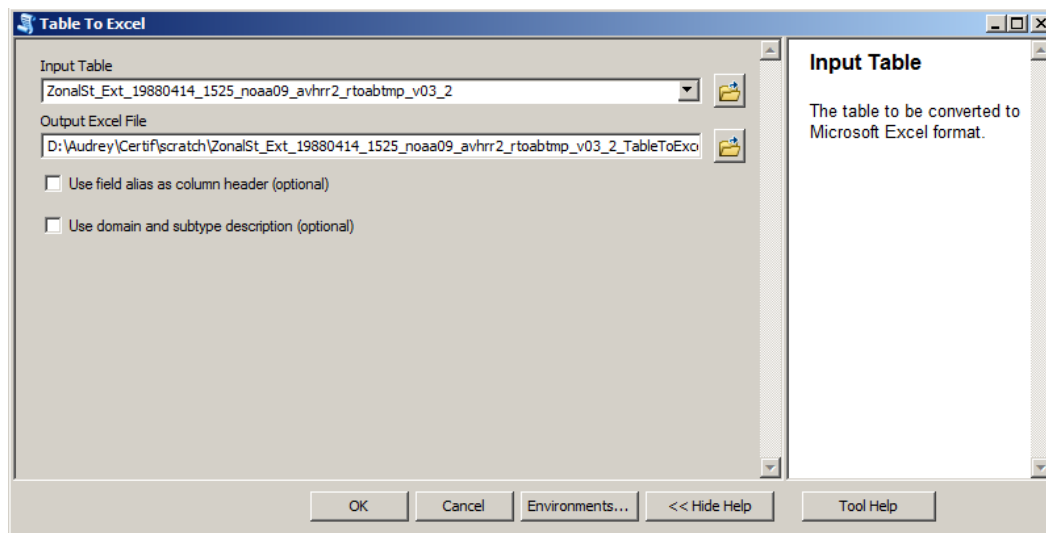


Figure 4.22 Table to Excel

Utiliser la moyenne (MEAN) et l'écart-type (STD) pour les graphiques.

4.3 Traitement dans Excel

4.3.1 Traitement statistique dans Excel

1. **Compiler un seul fichier** des résultats de "zonal statistics as a table" pour toutes les années.

Chaque tableau Excel n'a qu'une ligne de résultat en relation avec le nouveau raster créé du ratio des bandes. Pour s'y retrouver, rajouter une colonne dans chaque fichier avec le nom du raster avant de rassembler le tout dans un fichier global.

YEAR_BANDS	NAME
Im1_1972_b4b6	SHL_60m
Im2_1976_b4b6	SHL_60m
Im5_1984_b1b3	SHL_60m
It5_1989_b1b4	SHL_30m
It5_1993_b1b4	SHL_30m

2. **Importer les données *in situ*** dans le fichier de compilation de Zonal Statistics.

Les données *in situ*, auront été au préalable sélectionnée et choisies selon la date la plus proche de la scène.

3. **Calculer les corrélations.**

Il faut mettre les deux moyennes ensemble puis:

Menu>Données-->Utilitaire d'analyses-->Sélectionner Analyse de corrélation. La corrélation s'affichera sur une nouvelle feuille Excel. Assez rapidement, on peut voir s'il y a corrélation ou non. Si oui, créer un graphique nuage de points avec l'affichage du coefficient de détermination (R^2).

Sélectionner les variables X et Y (ici, nos moyennes), Menu>Insertion>Nuage de points.

Clic droit sur un point du nuage, sélectionner, Ajouter une courbe de tendance et tout en bas, cocher "Afficher le coefficient de détermination sur le graphique".

4. **Analyse des résultats**

Se référer à la section 6.7 du mémoire.

Annexe 5

5 Satellites Landsat

Les satellites Landsat fournissent un suivi discontinu multispectrale de l'observation de la Terre depuis le 23 juillet 1972 (Figure 5.1) date du lancement du premier satellite de la série et fournissent ainsi une source inestimable d'informations sur l'évolution de notre environnement depuis plus de 40 ans. Actuellement, deux satellites (Landsat 7 et Landsat 8) sont en fonction, le dernier ayant été lancé en 2013.

Il s'agit de la première série de satellites civils d'observation de la Terre lancé par la NASA.



Figure 5.1 Date de lancement des différents satellites Landsat (tiré de: [source](#))

La base de données du Committee on Earth Observation Satellites ([CEOS](#)), permet d'avoir une vue globale des caractéristiques de tous les satellites et de leurs capteurs, (s'y référer pour plus de détails techniques).

Tous les satellites Landsat sont sur orbite héliosynchrone (Landsat 1, 2, 3 à 917 km d'altitude et Landsat 4 et suivants à 705 km) et d'une résolution temporelle de 16 jours (repasse sur la même scène). Les caractéristiques principales des satellites Landsat et de leurs capteurs sont rassemblées dans le tableau 5.1.

Les satellites utilisés pour ce travail sont indiqués en surbrillance jaune.

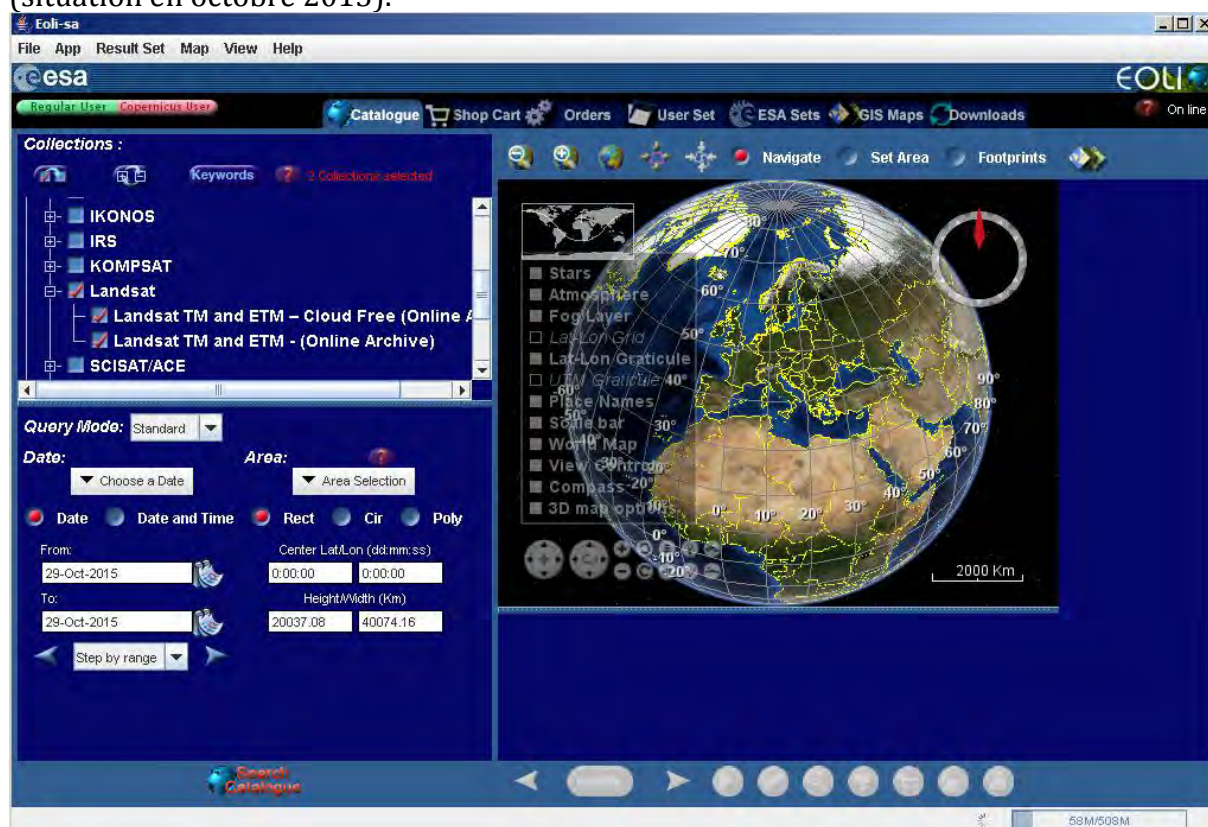
Tableau 5.1 Caractéristiques de Landsat (PIR = proche infra-rouge [NIR en anglais], IRC = infra-rouge court [SWIR en anglais], IRth= infra-rouge thermal, PAN= panchromatique) (sources: USGS, CEOS data)

Mission	Satellite	Capteur	Résolution spatiale (m)	Résolution spectrale		
				Canal	Bande	Longueur d'onde (µm)
1972-1978	Landsat 1	MSS	60*	4	vert	0.5-0.6
1975-1982	Landsat 2		60*	5	rouge	0.6-0.7
1978-1983	Landsat 3		60*	6	PIR	0.7-0.8
			60*	7	PIR	0.8-1.1
1982-1993	Landsat 4	MSS	60*	1	vert	0.5-0.6
1984-2013	Landsat 5		60*	2	rouge	0.6-0.7
			60*	3	PIR	0.7-0.8
			60*	4	PIR	0.8-1.1
* Le taille originale du pixel de MSS était de 79 x 57 m, les systèmes de production le ré-échantillonne à 60 m						
1982-1993	Landsat 4	TM	30	1	bleu	0.45-0.52
1984-2013	Landsat 5		30	2	vert	0.52-0.60
			30	3	rouge	0.63-0.69
			30	4	PIR	0.76-0.90
			30	5	IRC	1.55-1.75
			120 * (30)	6	IRth	10.40-12.50
			30	7	IRC	2.08-2.35
* La bande TM6 est acquise à une résolution de 120 m mais les produits transformés avant le 25.02.2010 sont ré-échantillonnés à 60 m et ceux après cette date, à 30 m.						
1999-actuel	Landsat 7	ETM+	30	1	bleu	0.45-0.52
			30	2	vert	0.52-0.60
			30	3	rouge	0.63-0.69
			30	4	PIR	0.77-0.90
			30	5	IRC	1.55-1.75
			60 * (30)	6	IRth	10.40-12.50
			30	7	IRC	2.09-2.35
			15	8	PAN	.52-.90
* La bande 6 ETM + est acquise à la résolution de 60 mètres. Les produits transformés après le 25.02.2010 sont ré-échantillonnées à 30 m.						
2013-actuel	Landsat 8	OLI	30	1	Aérosols côtiers	0.43 - 0.45
		TIRS	30	2	bleu	0.45 - 0.51
			30	3	vert	0.53 - 0.59
			30	4	rouge	0.64 - 0.67
			30	5	PIR	0.85 - 0.88
			30	6	IRC 1	1.57 - 1.65
			30	7	IRC 2	2.11 - 2.29
			15	8	PAN	0.50 - 0.68
			30	9	Cirrus	1.36 - 1.38
			100 * (30)	10	IRth 1	10.60 - 11.19
			100 * (30)	11	IRth 2	11.50 - 12.51
* Les bandes IRth bands sont acquises à une résolution de 100 m mais sont ré-échantillonnées à 30 m PIR = proche infra-rouge (NIR), IRC = infra-rouge court (SWIR), IRth= infra-rouge thermal, PAN= panchromatique						

Annexe 6 Utilisation du programme Eoli-SA

Toutes les images issues d'ESA ont été obtenues par l'application Eoli-sa 9.6.1 (application téléchargée en octobre 2015 sur le site ESA : <https://earth.esa.int/web/guest/eoli>)

Seules les données Landsat TM et ETM sont téléchargeables sur le site pour le moment (situation en octobre 2015).



Il faut s'enregistrer sur le site ESA afin d'accéder à My Earthnet

Critères de recherche utilisés dans Eoli-sa :

Online collection:

Landsat → Landsat TM and ETM – Cloud Free (Online Archive)

→ Landsat TM and ETM – (Online Archive)

Query mode:

→ Date: Nodate

→ Set Area /dessinée autour du Léman

La liste des résultats a une colonne "Download URL". Il faut cliquer droit → Copy Value. Le mettre dans une barre de recherche d'un explorateur (Firefox) et télécharger le dossier sur son poste de travail.

Annexe 7

Fiche signalétique du Léman et de son bassin versant

Le Léman

Position géographique moyenne :	46°27' lat. N 6°32' long. E de Greenwich
Altitude moyenne du plan d'eau (1943-2008) * :	372.05 m
Superficie du plan d'eau * * :	580.1 km ² dont France : 234.8 km ² Suisse : 345.3 km ² <ul style="list-style-type: none">• Vaud : 298.0 km²• Valais : 10.6 km²• Genève : 36.7 km²
Volume moyen :	89 milliards de m ³ soit 89 km ³
Longueur des rives * * :	200.2 km dont France: 58.0 km Suisse : 142.2 km <ul style="list-style-type: none">• Vaud : 102.0 km• Valais : 7.6 km• Genève : 32.6 km
Débit moyen du Rhône amont (à la Porte du Scex) (1935-2008) * :	182 m ³ /s
Débit moyen du Rhône à l'exutoire (à Genève) (1935-2008) * :	250 m ³ /s

Caractéristiques morphométriques du Grand Lac et du Petit Lac

	Léman	Grand Lac	Petit Lac
Superficie de plan d'eau (km ² / %)	580.1	498.9/86	81.2/14
Volume (km ³ / %)	89	86/96	3/4
Profondeur maximale (m)	309.7	309.7	76
Profondeur moyenne (m)	152.7	172	41
Longueur dans l'axe (km)	72.3	49	23.3

Le Grand Lac forme un bassin unique, d'orientation approximative est-ouest, caractérisé par une plaine centrale étendue, limitée par la courbe isobathe 300 m. Orienté nord-est - sud-ouest, le Petit Lac est bien plus étroit et moins profond. Son plancher est découpé par une série de cuvettes peu marquées.

* Annuaire hydrologique de la Suisse 2008. OFEV, Berne, 2009
* * Calculs informatiques effectués sur des cartes OFT (Office fédéral de topographie) au 1:25'000

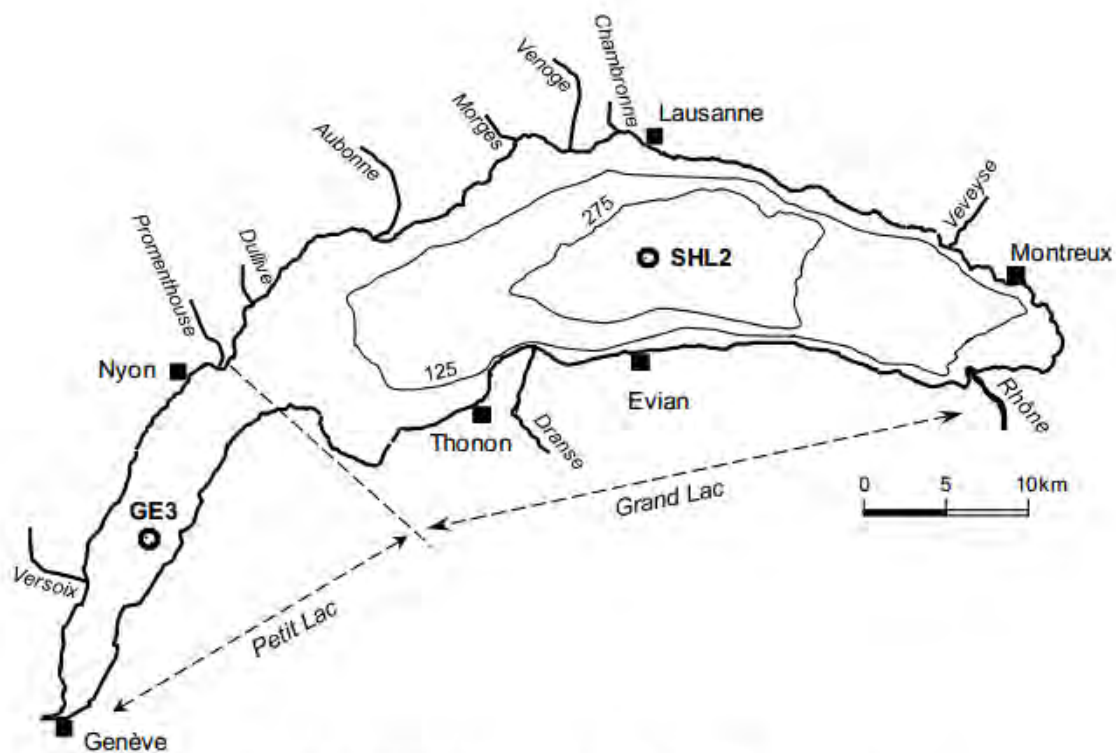


Figure 1 : Le Léman et la situation des stations de prélèvements
 SHL2 : (coord. CH : 534.700 / 144.950)
 GE3 : (ccord. CH : 506.100/ 128.040)

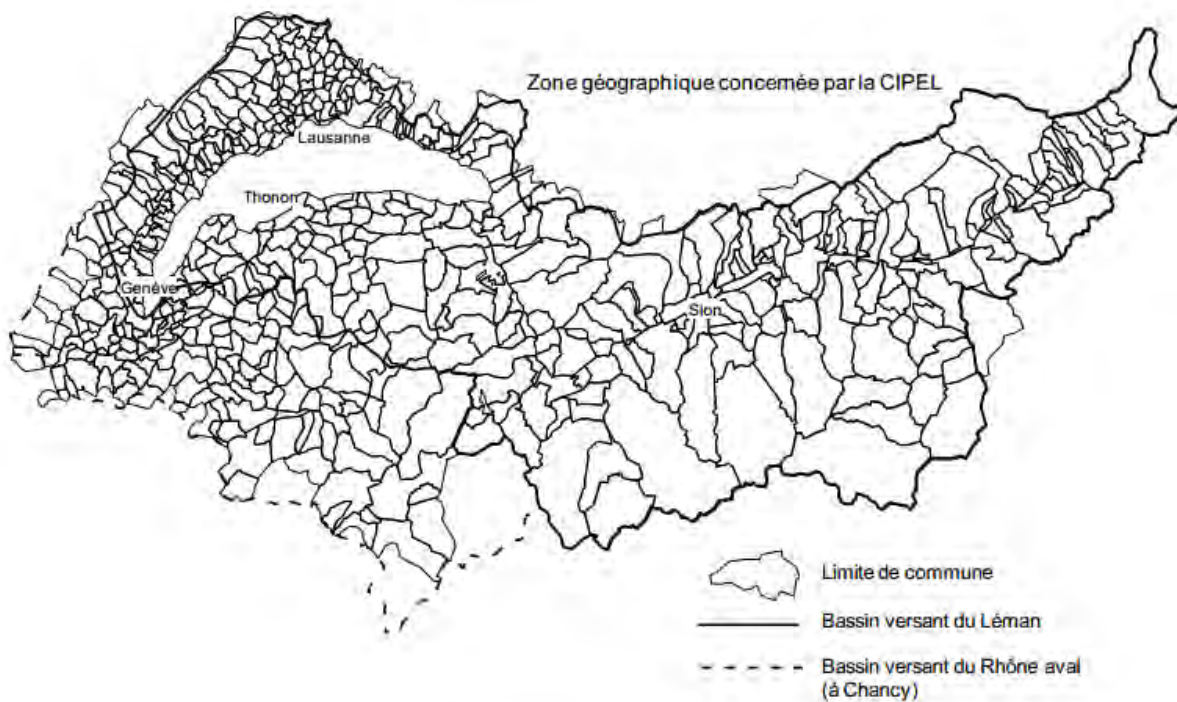
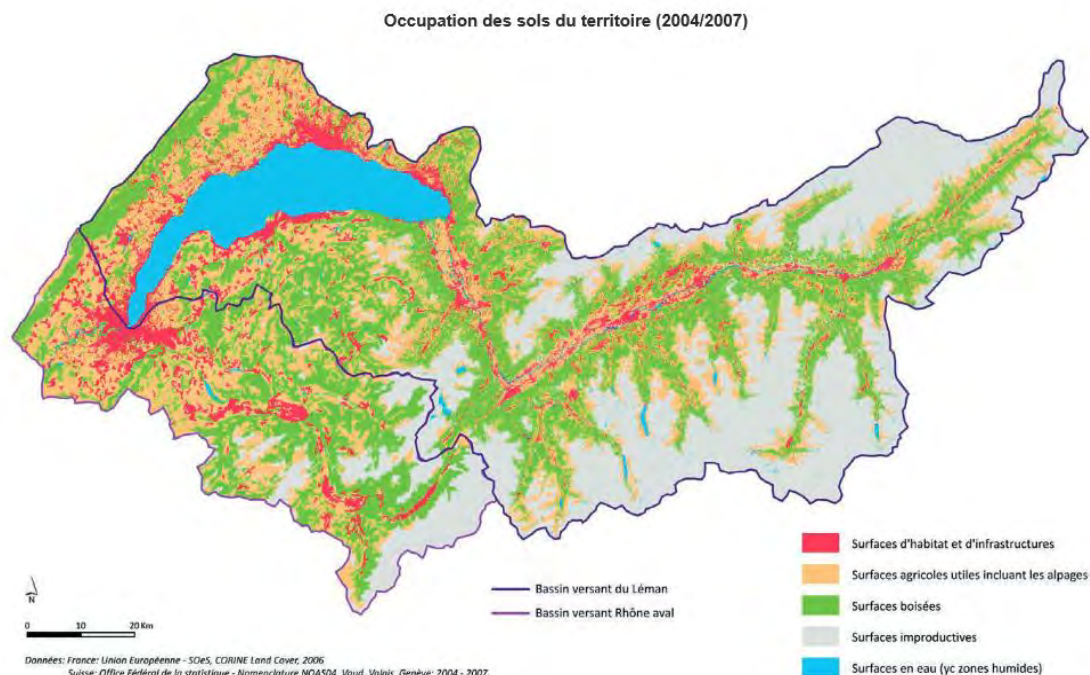


Figure 2 : Le bassin versant du Léman et du Rhône aval jusqu'à la frontière franco-suisse de Chancy

LE BASSIN VERSANT DU LÉMAN

Surface du bassin versant (lac compris) :	7'999 km ²	
Surface du bassin versant (sans le lac) :	7'419 km ²	
	dont :	France : 893 km ² Suisse : 6'526 km ²
Altitude moyenne * :	1'670 m	
Altitude maximale (Pointe Dufour) :	4'634 m	
Population permanente (2011) :	1'083'431	
	dont :	France : 142'229 Suisse : 941'202
Population touristique (capacité d'accueil-2006/2012) :	556'227	
	dont :	France : 162'360 Suisse : 393'867
Répartition des modes d'utilisation des sols les plus importants (CIPEL, 1999)	Terres incultes:	34.5%
	Forêts:	22.0%
	Pâturages:	23.0%
	Terres cultivables:	20.5%
Répartition des terres cultivables:	63.1 % d'herbages	
	26.7 % de terres ouvertes	
	6.6 % de vignobles	
	2.6 % de vergers intensifs	
	1.0 % de cultures maraîchères	



Tiré et adapté de CIPEL (CIPEL, 2015)

Source: Plan d'action 2011-2020, tableau de bord technique, CIPEL, 2015

Annexe 8 Données *in situ* de référence

Toutes ces données *in situ* proviennent du SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains, CIPEL. Un travail de tri des données et de calculs de moyennes pour certains paramètres a dû être effectué au préalable. La sélection des dates de prélèvement s'est faite, dans la mesure du possible, au plus près des dates des scènes des satellites (voir mémoire § 6.5.1, Tableau 11).

Phosphore total

Concentration moyenne en phosphore total calculée selon différentes profondeurs dans l'idée de distinguer une différence entre ces profondeurs¹³.

date de prélèvement	Ptot 0-2.5 m ($\mu\text{gp/l}$)*	Ptot 0-5 m ($\mu\text{gp/l}$)	Ptot 0-10 m ($\mu\text{gp/l}$)	Ptot 0-20 m ($\mu\text{gp/l}$)	Ptot Annuel ($\mu\text{gp/l}$)
18.10.1972	No data	34.00	35.33	41.25	71.1
17.05.1976	No data	54.00	56.67	60.50	89.6
06.08.1984	25.50	25.00	24.60	30.57	76.4
24.07.1989	7.50	8.33	9.80	10.43	58.3
26.07.1993	12.00	12.67	13.40	12.57	47.3
04.08.1997	12.00	12.67	14.80	12.86	37.7
08.08.2000	14.00	14.67	13.80	12.57	36.5
22.07.2003	16.00	16.67	17.40	17.71	32.8
09.08.2005	12.00	12.67	15.60	15.14	29.4

* pas de mesure à 2.5 m en 1972 et 1976

© SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains, CIPEL, [20.11.2015], développé par le dispositif Eco-Informatique ORE de l'INRA

La dernière colonne (P_{tot} annuel) a été utilisée pour mettre en évidence une corrélation entre les concentrations aux différentes profondeurs.

Résultat de la corrélation :

Corrélation r	P_{tot} Annuel ($\mu\text{gp/l}$)
Ptot 0-2.5 m ($\mu\text{gp/l}$)*	0.514
Ptot 0-5 m ($\mu\text{gp/l}$)	0.805
Ptot 0-10 m ($\mu\text{gp/l}$)	0.790
Ptot 0-20 m ($\mu\text{gp/l}$)	0.838

On constate que la moyenne de P_{tot} à 0-20 m est la plus fortement corrélée.

¹³ J-M. Jaquet, comm. personnel, novembre 2015

Chlorophylle

La chlorophylle-*a* a été calculée en moyenne de 0-5 m de profondeur en relation avec la capacité de pénétration des capteurs dans l'eau selon la longueur d'onde.

date de prélèvement	Chlorophylle <i>a</i> Strickland-Parsons (µg/l) moyenne
	de 0 à 5 m de profondeur
18.10.1972	no data
17.05.1976	6.87
06.08.1984	5.68
24.07.1989	5.46
26.07.1993	7.88
04.08.1997	3.37
08.08.2000	3.78
22.07.2003	5.60
09.08.2005	8.89

© SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains, CIPEL, [10.12.2015], développé par le dispositif Eco-Informatique ORE de l'INRA

Transparence

Le disque de l'INRA est blanc et mesure 30 cm de diamètre.

date de prélèvement	transparence par disque inra (m)
18.10.1972	6.90
17.05.1976	3.60
06.08.1984	5.60
24.07.1989	7.40
26.07.1993	6.00
04.08.1997	4.30
08.08.2000	5.30
22.07.2003	4.50
09.08.2005	2.20

© SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains, CIPEL, [06.01.2016], développé par le dispositif Eco-Informatique ORE de l'INRA

Annexe 9 Données météorologiques des scènes Landsat

Ces données proviennent de la station météorologique de Pully. Date de l'extraction: 17.12. 2015 sur l'application Climap-Net du Groupe Climat de l'ISE.

L'extraction s'est faite selon les critères suivants (il manque la direction du vent) :

- Température de l'air à 2 m au-dessus du sol
- Vitesse du vent (transformée en km/h)
- Précipitation (mm)

Remarque: les données météo des stations automatiques ne sont disponibles qu'à partir de 1978 (S. Goyette, comm.pers., décembre. 2015), ainsi les scènes de 1972 et 1976 n'ont pas pu être renseignées.

Scène 1984

Nom du fichier: LM51960281984212AAA03		Heure de la scène: 09:52:19
Landsat 5 MSS	date:	30.07.1984
Jour de la scène	Vitesse du vent [km/h]: 5.04	Température [°C]: 22.8
7 jours avant	Précipitation somme par jour (mm)	
24.07.1984	1.6	
25.07.1984	0	
26.07.1984	4	
27.07.1984	0	
28.07.1984	0	
29.07.1984	0	
30.07.1984	0	

Scène 1989

Nom du fichier: LS05_RFUI_TM__GTC_1P_19890728T094958_19890728T095026_028760_0196_0028_8A43		Heure de la scène: 09:50:12
Landsat 5 TM	date:	28.07.1989
Jour de la scène	Vitesse du vent [km/h]: 12.96	Température [°C]: 24.4
7 jours avant	Précipitation somme par jour (mm)	
22.07.1989	0	
23.07.1989	0	
24.07.1989	0	
25.07.1989	0	
26.07.1989	0	
27.07.1989	0	
28.07.1989	0	

Scène 1993

Nom du fichier: LS05_RFUI_TM__GTC_1P_19930723T094513_ 19930723T094541_049963_0196_0028_4DA3		Heure de la scène: 09:45:27
Landsat 5 TM	date:	23.07.1993
Jour de la scène	Vitesse du vent [km/h]: 5.4	Température [°C]: 17.6
7 jours avant	Précipitation somme par jour (mm)	
17.07.1993	0.5	
18.07.1993	0	
19.07.1993	1.8	
20.07.1993	0.2	
21.07.1993	5.9	
22.07.1993	2.3	
23.07.1993	0	

Scène 1997

Nom du fichier: LS05_RFUI_TM__GTC_1P_19970803T095357_ 19970803T095425_071399_0196_0028_EA1E		Heure de la scène: 09:54:11
Landsat 5 TM	date:	03.08.1997
Jour de la scène	Vitesse du vent [km/h]: 6.12	Température [°C]: 22.5
7 jours avant	Précipitation somme par jour (mm)	
28.07.1997	0	
29.07.1997	0	
30.07.1997	0	
31.07.1997	0.3	
01.08.1997	1	
02.08.1997	0	
03.08.1997	0	

Scène 2000

Nom du fichier: LS07_RNSG_ETM_GTC_1P_20000819T101353_20000819T101422_007162_0196_0028_8E92		Heure de la scène: 10:14:07
Landsat 7 ETM	Date: 19.08.2000	
Jour de la scène	Vitesse du vent [km/h]: 4.68	Température [°C]: 25.9
7 jours avant	Précipitation somme par jour (mm)	
13.08.2000	0	
14.08.2000	0	
15.08.2000	0	
16.08.2000	0	
17.08.2000	3.4	
18.08.2000	0.2	
19.08.2000	0	

Scène 2003

Nom du fichier: LT51960282003200MTI01		Heure de la scène: 09:59:33	
Landsat 5 TM	Date:		19.07.2003
Jour de la scène	Vitesse du vent [km/h]:	Température [°C]:	
	4.68	24.3	
7 jours avant	Précipitation somme par jour (mm)		
13.07.2003	0		
14.07.2003	0		
15.07.2003	0		
16.07.2003	0		
17.07.2003	0		
18.07.2003	0		
19.07.2003	0		

Scène 2005

Nom du fichier: LT51960282005221KIS00		Heure de la scène: 10:11:05
Landsat5 TM	date: 09.08.2005	
Jour de la scène	Vitesse du vent [km/h]: 4.68	Température [°C]: 18.4
7 jours avant	Précipitation somme par jour (mm)	
03.08.2005	0.1	
04.08.2005	0.0	
05.08.2005	0.0	
06.08.2005	1.7	
07.08.2005	0.0	
08.08.2005	0.0	
09.08.2005	0.0	

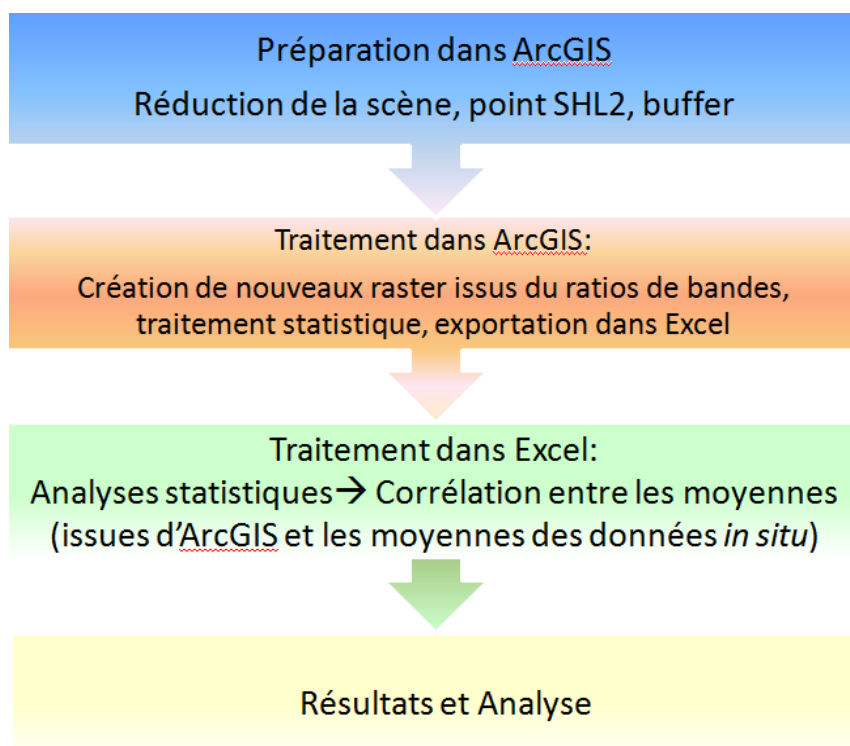
Annexe 10

10 Procédure de traitement d'images Landsat 1972 à 2005

Les recherches sur les divers portails ont permis de rassembler plus de 300 images du lac Léman. Le fichier des images satellites est lourd et est souvent zippé. Quelques conseils sont exposés aux paragraphes 10.1 et 10.2 pour gagner du temps lors du téléchargement.


Dans un deuxième temps, une sélection de 9 images de 1972 à 2005 est utilisée pour établir la corrélation entre l'évolution temporelle de la courbe du phosphore, de la transparence et de la chlorophylle (données *in situ*) et ce qui peut ressortir d'une analyse en télédétection. Deux projets sont créés, un sans correction atmosphérique et un autre avec correction atmosphérique.

Cette procédure explique le processus de préparation (§ 10.3) et de traitement (§ 10.4) de cette sélection d'images dans ArcGIS mais aussi dans Excel (§ 10.5) pour les analyses statistiques. Ce schéma résume les étapes du travail effectué.

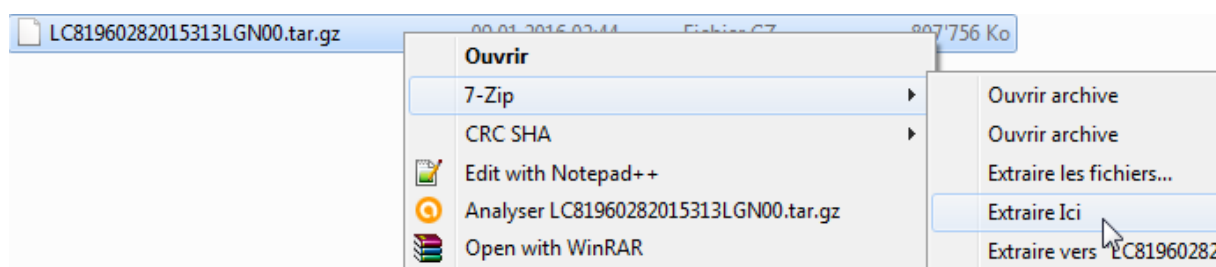


10.1 Procédure d'extraction des fichiers au format *.tar.gz

Les fichiers reçus de USGS (EarthExplorer ou Glovis) sont au format :*.tar.gz

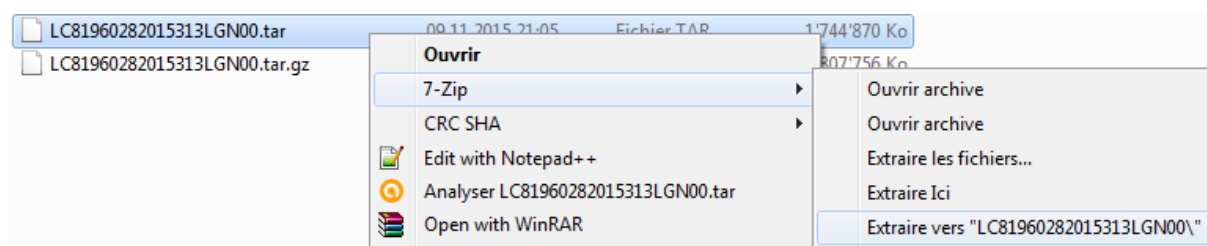
 LC81960282015313LGN00.tar.gz

Il faut dans un premier temps dézipper le fichier « Extraire ici » :



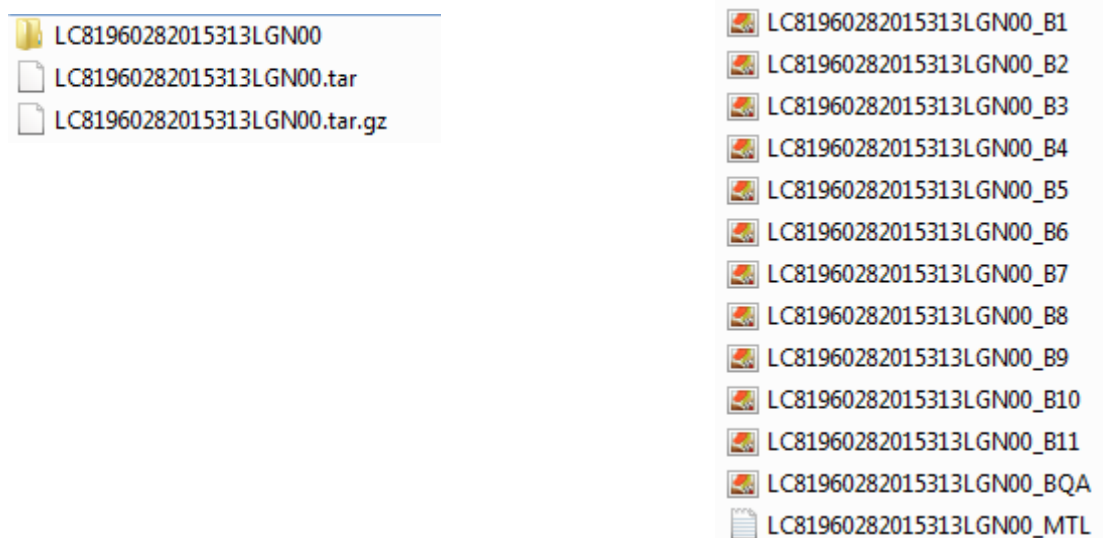
Cela va le dézipper au format *.gz.

Il faut ensuite recommencer l'opération mais cette fois en utilisant « Extraire vers » afin d'avoir toutes les bandes dans un fichier portant le nom d'identification de l'image satellite (LANDSAT_SCENE_ID selon les métadonnées).



Tenir compte que cela prend du temps car les fichiers sont lourds.

Résultat : un répertoire rassemblant toutes les bandes et les métadonnées de l'image satellite :



10.2 Extraction d'une grande quantité de fichiers compressés au format *.zip.

Les fichiers reçu d'ESA quant à eux sont aussi compressés mais au format *.zip. S'aider d'un outil pour tous les décompresser automatiquement comme par exemple: Bitser (<http://www.bitser.org/>).

10.3 Préparation des images

Remarques préliminaires:

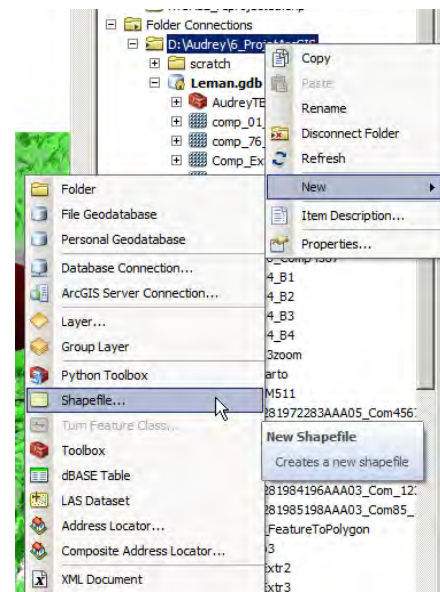
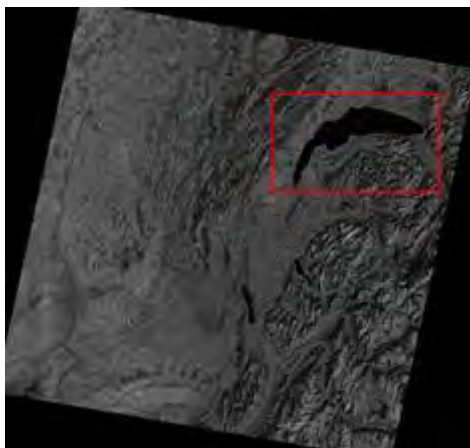
Tous les traitements d'images ont été réalisés avec le logiciel de SIG ArcGIS ver. 10.3, ESRI ©, cette procédure concerne donc ce logiciel spécifiquement. Par défaut et pour simplifier nous utilisons TM pour désigner les bandes.

Deux géodatabases ont été créées pour des projets différents. La géodatabase "LS_utm.gdb" correspond au projet avec correction atmosphérique, ces dernières ayant été réalisées dans le logiciel opensource GRASS¹⁴. L'autre géodatabase rassemblant les projets les plus importants pour nos analyses se nomme: LANDSAT_SANSCORR.gdb.

Etape:

Préparation dans ArcGIS Réduction de la scène, point SHL2, buffer

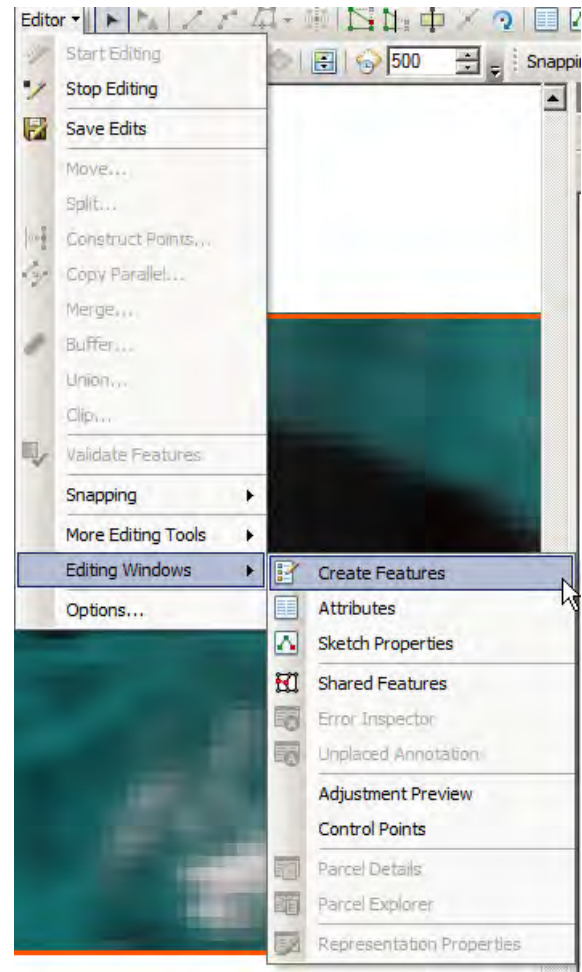
1. Créer une géodatabase dans ArcGIS (LANDSAT_SANSCORR.gdb et LS_utm.gdb)
2. Garder la projection d'origine des images satellites afin d'éviter au maximum les distorsions¹⁵ (projection UTM 31N, ellipsoïde WGS84).
3. **Créer un masque** pour réduire l'image satellite à notre zone de travail. Depuis ArcCatalog, Folder Connection, clic droit sur le dossier > New > Shapefile. Le mettre dans la projection des rasters.



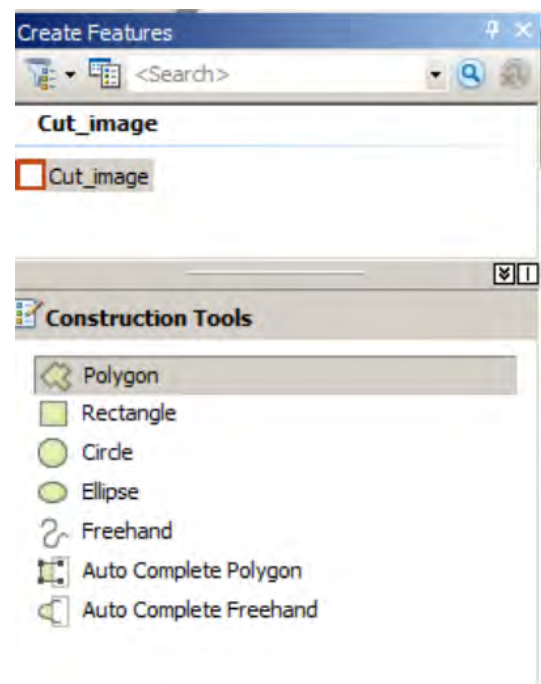
¹⁴ Avec l'aide précieuse de Nikos Alexandris

¹⁵ K- Allenbach, comm.pers. novembre 2015

4. Ouvrir une session d'édition, aller dans Editing Windows > Create Features. Sélectionner l'objet à éditer, ici nommé "Cut_image", choisir de quel type, ici Polygone. Mettre à la même projection que les rasters. Dessiner un rectangle qui entoure le Léman en allant sur Editor > Editing Window > Create Features



5. Dans Create Features, cliquer sur "Cut_image" et sélectionner un outil de construction (Construction Tools), ici Polygone.

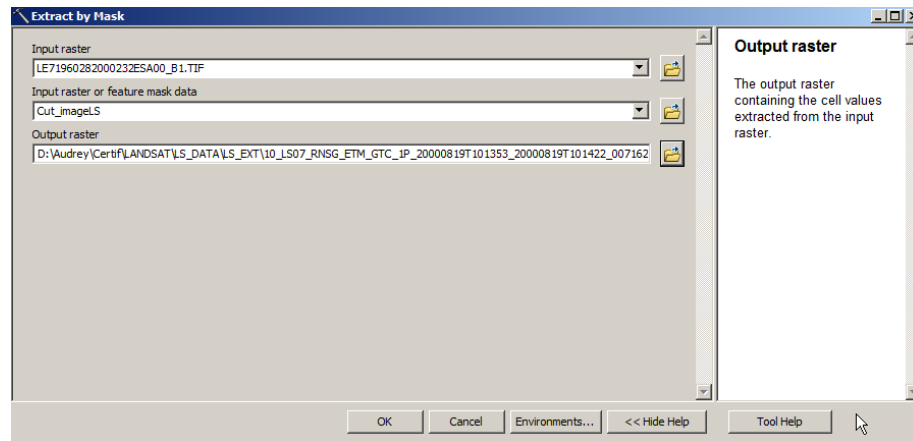


6. Sauver et fermer la session d'édition. S'il n'apparaît pas directement dans la table des matières, aller le chercher depuis ArcCatalog. Clic dans table des matières, sur le symbole de Cut_image, changer la symbologie, en gardant que le contour.

7. **Extract by mask (ArcToolbox)**

Afin d'extraire une portion de l'image satellite, on utilise le masque créé avec l'outil "Extract by mask".

Insérer l'image à extraire et ensuite le masque. Nommer le fichier et les classer dans un fichier créé au préalable depuis ArcCatalog: "Extract" (maximum 13 caractères autorisés).



8. **Couche contour du lac des SITG**

Afin d'avoir un point de référence cartographique, télécharger sur le site SITG le shapefile: **SHP_GEO_LAC_LEMAN_SITG** (emprise du lac Léman) et le sauver en local dans notre géodatabase en le transformant en Shape. Prendre soin de le projeter selon la bonne projection (UTM 31N)

9. **Créer le point SHL2** des prélèvements *in situ* et le mettre à la projection des images. Les coordonnées GPS de SHL2 sont WGS84 6.58872 °E, 46.4527 °N en degrés. Les insérer dans un fichier Excel que l'on transforme en table lisible par ArcGIS (Excel to Table dans ArcToolBox), elle apparaît dans le projet. Clic droit sur la nouvelle table> Display XY data s'affiche. Il faut insérer les bonnes coordonnées sur les bons champs (X sur X field, Y sur Y field) et cliquer sur Edit afin d'insérer la bonne projection. Cela crée un point dans la table des matières. Clic droit sur le point, Export data as Shapefile. Le point SHL2 s'aligne parfaitement. Possibilité de créer un champ supplémentaire dans la table (Name pour distinguer les buffers pour les résolutions à 60 m et à 30 m).

10. **Création d'un buffer autour du point SHL2**

Faire un zoom sur le point SHL2 (possibilité de faire des Bookmarks, voir barre de menu) afin de dessiner un buffer qui sera utilisé pour Zonal Statistics as Table (ArcToolBox). Selon la taille des pixels (60m et 30m) 2 buffers ont été créés. Le premier à 60 m de résolution, il s'agit d'un buffer de 2x2 pixels (240 m²). Le deuxième de 2x2 pixels (120 m²). A nouveau, même procédure que dans la création du masque (point 3), aller dans ArcCatalog sous le dossier où se trouve notre géodatabase dans le dossier racine, clic droit>New>Shape. On doit le géoréférencer selon la layer de base. Ouvrir une session d'édition>Editing window>Create Features. Sélectionner le buffer et polygone.

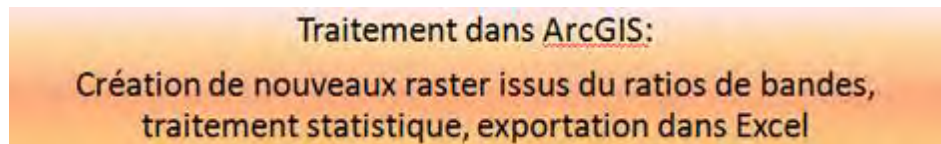
11. Création d'un buffer lac

Utiliser le shapefile du lac créé au point 8 et faire un buffer du lac (voir point 10 pour la procédure) en insérant -150 m dans le champ "Distance value".

10.4 Traitement des images

Tout est prêt pour commencer le traitement des images. Penser à créer des dossiers explicites depuis ArcCatalog pour le classement des résultats:

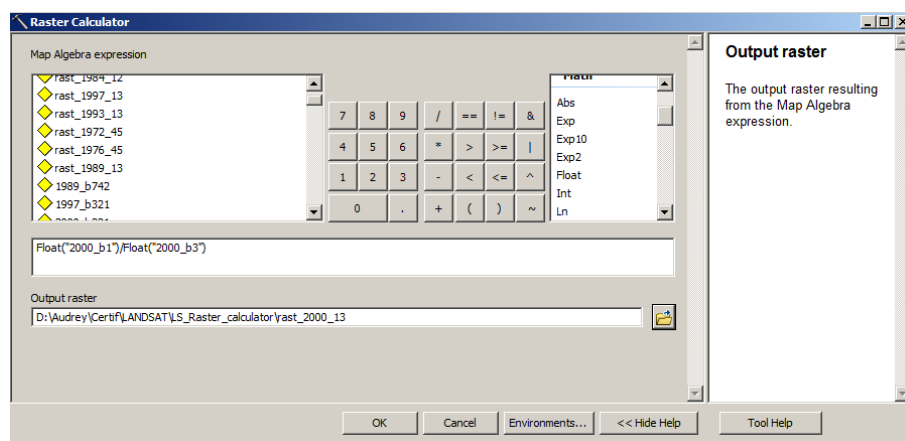
Etape:

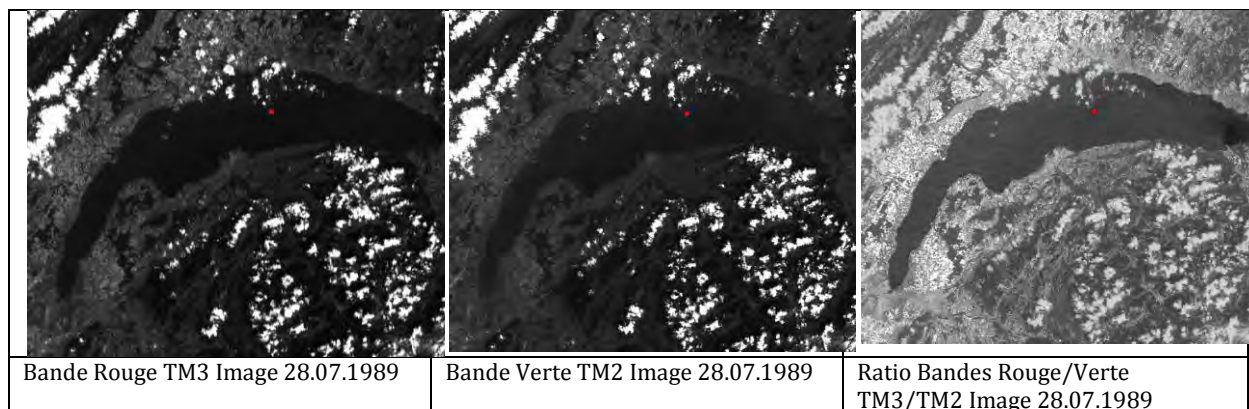


12. Bandes ratio

Raster Calculator permet de faire des calculs sur les rasters. Le résultat sera la création d'un nouveau raster en sortie. Cet outil se trouve dans ArcToolbox>Spatial Analyst. Comme nous divisons les nombres digitaux (ND) des bandes brutes (0-255 pour une image à 8 bits), nous allons avoir des chiffres à virgule, il faut alors insérer « Float » dans la formule pour que cela fonctionne.

$\text{Float}("2000_b1") / \text{Float}("2000_b3")$





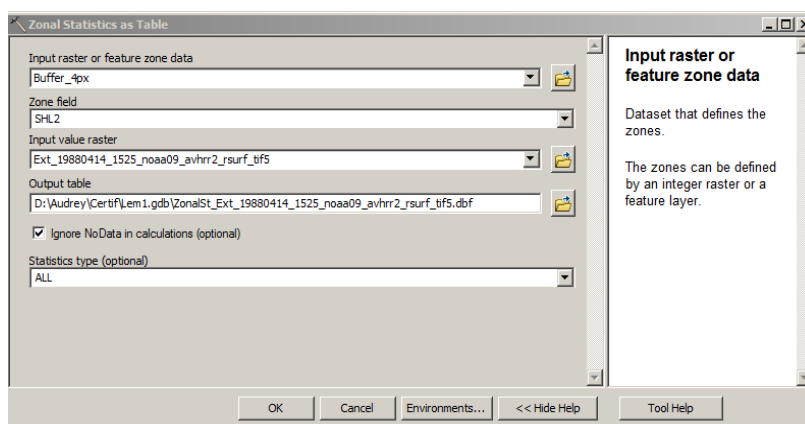
Exemple de l'effet du ratio de bandes : création d'un nouveau raster

13. Zonal Statistics as a Table

Afin de calculer les statistiques des pixels autour du point SHL2 où les mesures *in situ* sont réalisées, nous utilisons l'outil « Zonal Statistics as a table » (ArcToolBox>Spatial Analyst).

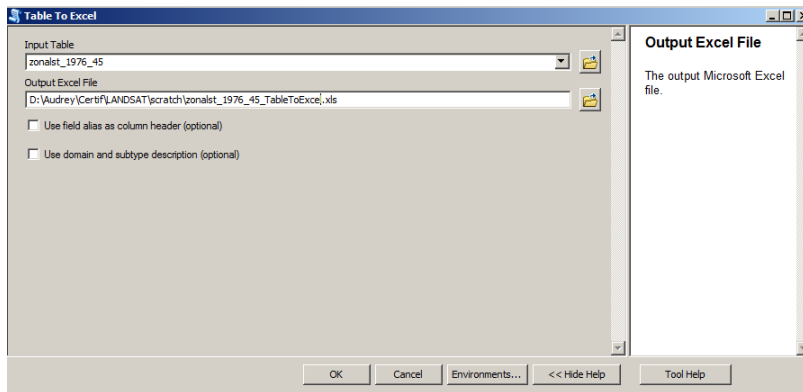
D'abord insérer le buffer approprié selon les résolutions, ensuite, le nom du champ, puis le raster nouvellement créé au point 12 sur lequel les statistiques vont être effectuées. La table des résultats est rajoutée directement dans la table des matières.

Pour le projet sans correction atmosphérique, les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes, alors que les valeurs du projet avec correction atmosphérique, correspondent à la réflectance ou la température (pour la Bande 6).



14. Extraire la table en fichier Excel.

Utiliser l'outil, Table to Excel de ArcToolbox. Insérer en premier la table. Le fichier Excel sera automatiquement mis dans un dossier nommé Scratch (le renommer si nécessaire pour son propre classement).



La moyenne du résultat des statistiques zonales (MEAN) est utilisée pour tous les calculs dans Excel.

10.5 Traitement statistique dans Excel

Troisième étape:

Traitement dans Excel:
Analyses statistiques → Corrélation entre les moyennes
(issues d'ArcGIS et les moyennes des données *in situ*)

5. **Compiler un seul fichier** des résultats de "zonal statistics as a table" pour toutes les années.

Chaque tableau Excel n'a qu'une ligne de résultat en relation avec le nouveau raster créé du ratio des bandes. Pour s'y retrouver, rajouter une colonne "YEAR_BANDS" dans chaque fichier avec le nom du raster avant de rassembler le tout dans un fichier global.

YEAR_BANDS	NAME
Im1_1972_b4b6	SHL_60m
Im2_1976_b4b6	SHL_60m
Im5_1984_b1b3	SHL_60m
It5_1989_b1b4	SHL_30m
It5_1993_b1b4	SHL_30m

6. **Importer les données *in situ*** dans le fichier de compilation de Zonal Statistics.

Les données *in situ*, auront été préalablement sélectionnées et choisies selon la date la plus proche de la scène.

7. **Calculer les corrélations.**

Il faut mettre les deux moyennes l'une à côté de l'autre puis:

Menu>Données-->Utilitaire d'analyses-->Sélectionner Analyse de corrélation. La corrélation s'affichera sur une nouvelle feuille Excel. Assez rapidement, on peut voir s'il y a corrélation ou non. Si oui, créer un graphique nuage de points avec l'affichage du coefficient de détermination (R^2) et un autre avec des courbes pour avoir une autre représentation visuelle.

Sélectionner les variables X et Y (ici, nos moyennes), Menu>Insertion>Nuage de points.

Clic droit sur un point du nuage, sélectionner, Ajouter une courbe de tendance et tout en bas, cocher "Afficher le coefficient de détermination sur le graphique".

10.6 Analyse des résultats

Dernière étape du processus que l'on retrouve détaillée à la section 6.7 du mémoire.

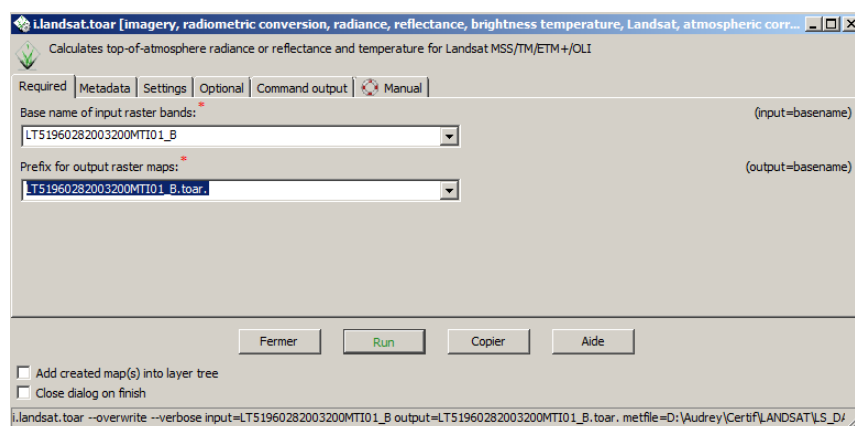
Résultats et Analyse

10.7 Dans GRASS 7.0.1 transformation des images rasters

Pour le projet avec correction atmosphérique, cette partie a été faite dans le logiciel open source GRASS. La commande "i.landsat.toar" a été utilisée. Cette commande transforme les nombres digitaux (ND) en TOA¹⁶ radiance, réflectance ou en température des satellites Landsat MSS/TM/ETM+/OLI. La correction atmosphérique "dos3"¹⁷ a été appliquée (<https://grass.osgeo.org/grass64/manuals/i.landsat.toar.html>)

➔ Importation des images, georéférencement.

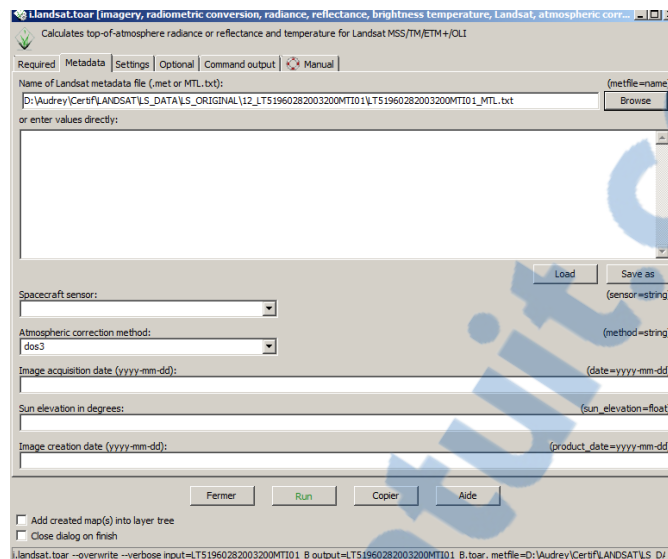
Par défaut, GRASS transforme les ND en réflectance (non corrigée). En appliquant la correction atmosphérique "dos3", on obtient la réflectance corrigée (sans unité, souvent exprimée en pourcentage). Pour plus d'informations se référer à: https://grasswiki.osgeo.org/wiki/Atmospheric_correction.



¹⁶ TOA= top of the atmosphere

¹⁷ Dos3 = Dark object subtraction, diffusion de Rayleigh

Dans l'onglet Metadata, insérer le fichier *.MTL.txt contenant les métadonnées de l'image et choisir "dos3" dans Atmospheric correction method.



Les images corrigées ont d'abord été coupées avec le buffer autour du point SHL2 (création d'un buffer unique) puis dans un second temps avec le buffer du lac. Les images corrigées ont ensuite été importées dans ArcGIS et la suite de la procédure a été réalisée (à partir du point 12, § 10.4).

Annexe 11

11 Présentation complète des résultats (I)

11.1 Projet SANS correction atmosphérique, buffer SHL2

Ces analyses sont basées sur un projet SIG sans correction atmosphérique. Le simple fait de réaliser des ratios de bandes, implique, une atténuation des perturbations atmosphériques¹⁸. Sept ratios de bandes ont été testés, toutes par rapport aux trois paramètres, à savoir: P_{tot} , transparence et Chl-*a*. Il en ressort, que le ratio de bandes TM4/TM1 (§ 11.1.5) a une forte corrélation ($r=0.946$) et un fort coefficient de détermination ($R^2=0.8948$) avec le P_{tot} .

Le tableau ci-dessous récapitule les calculs statistiques pour chaque paramètre en relation avec les ratios des bandes satellites. On peut remarquer qu'aucune corrélation n'a été trouvée pour la Chl-*a* et juste une à $r=0.677$ pour la transparence. Remarque: lorsque $r < 0.5$, R^2 n'a pas été calculé.

projet sans correction atmosphérique						
<i>In situ</i>	P_{tot}		Chl- <i>a</i>		Transparence	
Bandes	r	R^2	r	R^2	r	R^2
TM1/TM4 (Bleu/PIR)	0.859	0.738	0.357	-	0.226	-
TM1/TM3 (Bleu/Rouge)	-0.77	0.593	0.578	0.334	-	-
TM2/TM4 (Vert/PIR)	0.485	-	0.324	-	0.094	-
TM2/TM3 (Vert/Rouge)	0.871	0.759	0.077	-	0.208	-
TM4/TM1 (PIR/Bleu)	0.946	0.895	0.139	-	0.115	-
TM3/TM1 (Rouge/Bleu)	0.875	0.765	0.499	-	0.132	-
TM3/TM2 (Rouge/Vert)	0.822	0.676	0.058	-	0.208	-
Bande TM 4 (PIR)	0.642	0.416	0.525	0.275	0.677	0.458
Bande TM1 (Bleu)	0.845	0.711	0.172	-	0.406	-

¹⁸ J-M. Jaquet, comm. pers., novembre 2015

Une autre analyse (§ 11.3.2) pour essayer de nous conforter dans le résultat (TM4/TM1 voir § 11.1.5) a été réalisée avec les bandes TM4, TM1 et le ratio TM4/TM1:

Une statistique zonale sur l'entier du lac a été calculée. Au préalable, une zone tampon (buffer) a été déterminée en retirant 150 m depuis les berges afin d'avoir un minimum d'influence des pixels des rives mais aussi des eaux peu profondes qui peuvent fausser le signal. Par la suite, une comparaison des deux moyennes des statistiques zonales, l'une du résultat avec le buffer du lac entier et l'autre avec le résultat du buffer autour du point de prélèvement a été faite (§ 11.3.2). Les corrélations des rapports entre buffers sont très fortes (elles sont toutes entre $r=0.91$ et 0.99 et $R^2=0.84-0.99$). On peut ainsi déduire que le buffer autour du point SHL2 est représentatif.

Remarque: tous les calculs statistiques dans Excel se sont basés sur les résultats de la Moyenne (MEAN) calculée dans ArcGIS (Zonal statistics as table).

11.1.1 Ratio de bandes TM1/TM4 (Bleu/PIR)

Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs correspondent au rapport des bandes brutes.

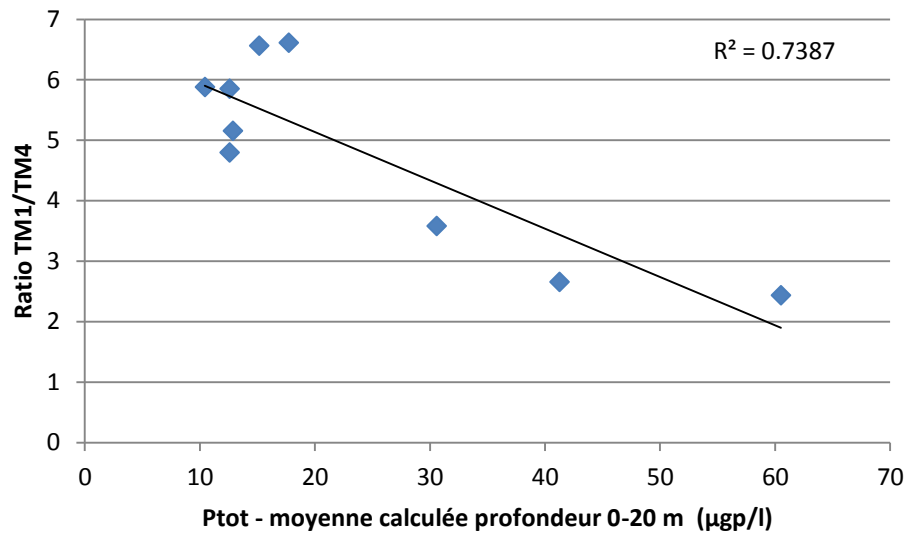
YEAR_BANDS	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b4b6	2.333	2.933	2.658	0.250
lm2_1976_b4b6	2.063	2.615	2.437	0.220
lm5_1984_b1b3	3.333	3.889	3.583	0.198
lt5_1989_b1b4	5.765	6.000	5.882	0.083
lt5_1993_b1b4	4.500	5.083	4.800	0.222
lt5_1997_b1b4	5.000	5.545	5.157	0.227
le7_2000_b1b4	5.750	6.000	5.854	0.091
lt5_2003_b1b4	6.333	7.125	6.615	0.305
lt5_2005_b1b4	5.889	6.875	6.566	0.404

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Le P_{tot} a été calculé à différentes profondeurs, comme vu dans l'annexe des données *in situ* (annexe 8). C'est la moyenne (MEAN) qui a été pris en compte dans les analyses de comparaison.

Avant de faire le graphique, une corrélation entre la moyenne (MEAN) résultats des statistiques zonales et des différentes concentrations selon la profondeur est calculée. Il en ressort qu'il y a une forte corrélation négative pour le P_{tot} entre 0-2.5 m ($r=-0.859$). On se souviendra qu'il n'y a pas de mesures pour les années 1972 et 1976 à 2.5 m de profondeur (signalé par *). Le coefficient de détermination $r^2=0.738$, ainsi seuls 73.8 % de la variance de Y (ratio TM1/TM4) est expliquée par la variance de X (P_{tot}).

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
P _{tot} 0-2.5 m (µgp/l)*	-0.615
P _{tot} 0-5 m (µgp/l)	-0.840
P _{tot} 0-10 m (µgp/l)	-0.825
P _{tot} 0-20 m (µgp/l)	-0.859



Comparaison avec les données in situ Chl-a

La corrélation est faible.

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
moyenne pondérée par la profondeur (chlorophylle a strickland-parsons) µg/l	0.357

Comparaison avec les donnée in situ de la transparence

La corrélation est aussi faible pour la transparence.

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
transparence par disque inra (m)	-0.226

11.1.2 Ratio de bandes TM1/TM3 (Bleu/Rouge)

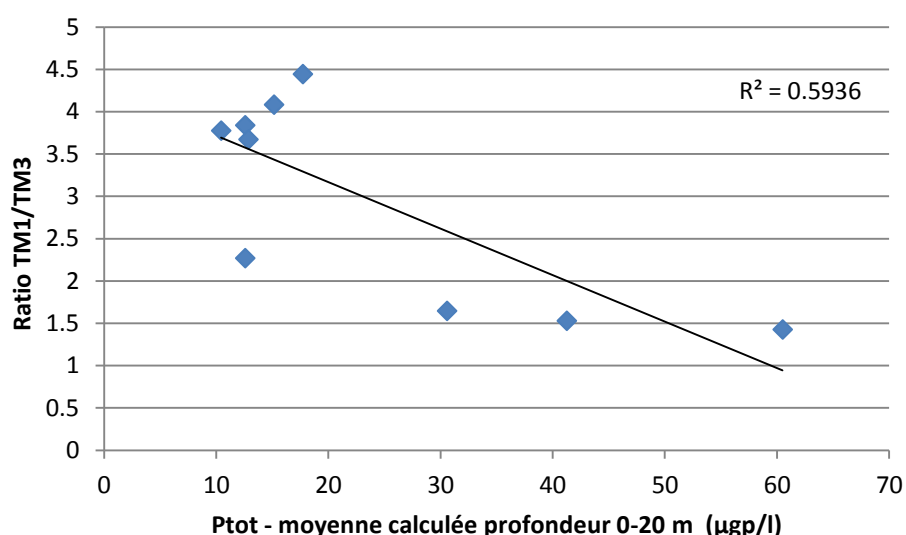
Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes.

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b4b5	1.467	1.607	1.527	0.052
lm2_1976_b4b5	1.320	1.522	1.425	0.072
lm5_1984_b1b2	1.429	1.882	1.644	0.163
lt5_1989_b1b3	3.704	3.846	3.774	0.050
lt5_1993_b1b3	3.706	4.067	3.837	0.138
lt5_1997_b1b3	3.529	3.813	3.670	0.115
le7_2000_b1b3	2.156	2.333	2.268	0.070
lt5_2003_b1b3	4.385	4.538	4.442	0.064
lt5_2005_b1b3	3.786	4.231	4.081	0.182

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Avec ce ratio de bandes, il ressort qu'il y a une corrélation négative pour le P_{tot} entre 0-20 m ($r=-0.770$). Le coefficient de détermination $r^2=0.5936$, ainsi seuls 59.4% de la variance de Y (ratio TM1/TM3) est expliquée par la variance de X (P_{tot}).

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{gP/l}$)*	-0.672
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.766
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.728
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.770



Comparaison avec données in situ Chl-a

Corrélation r	MEAN
moyenne pondérée par la profondeur(chlorophylle a strickland-parsons) µg/l	0.578

Le coefficient de détermination est de $r^2=0.3339$.
Ce ratio ne donne pas de bons résultats pour la Chl-a.

Comparaison avec données in situ de la transparence

La corrélation n'est pas bonne pour ce ratio et la transparence:

Corrélation r	MEAN
transparence par disque inra (m)	-0.195

11.1.3 Ratio de bandes TM2/TM4 (Vert/PIR)

Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes.

YEAR BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b4b6	2.333	2.933	2.658	0.250
lm2_1976_b4b6	2.063	2.615	2.437	0.220
lm5_1984_b1b3	3.333	3.889	3.583	0.198
lt5_1989_b2b4	2.176	2.176	2.176	0.000
lt5_1993_b2b4	1.571	1.833	1.717	0.098
lt5_1997_b2b4	3.750	3.833	3.771	0.036
le7_2000_b2b4	1.750	2.000	1.833	0.102
lt5_2003_b2b4	2.111	2.500	2.236	0.159
lt5_2005_b2b4	2.111	2.375	2.278	0.109

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Aucune forte corrélation n'est trouvée:

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m (µgp/l)*	0.485
P_{tot} 0-5 m (µgp/l)	0.138
P_{tot} 0-10 m (µgp/l)	0.144
P_{tot} 0-20 m (µgp/l)	0.184
P_{tot} Annuel (µgp/l)	0.248

Comparaison avec données in situ Chl-a

De même pour la Chl-a

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
moyenne pondérée par la profondeur(chlorophylle a strickland-parsons) µg/l	-0.324

Comparaison avec données in situ de la transparence

De même pour la transparence

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
transparence par disque inra (m)	-0.094

11.1.4 Ratio de bandes TM2/TM3 (Vert/Rouge)

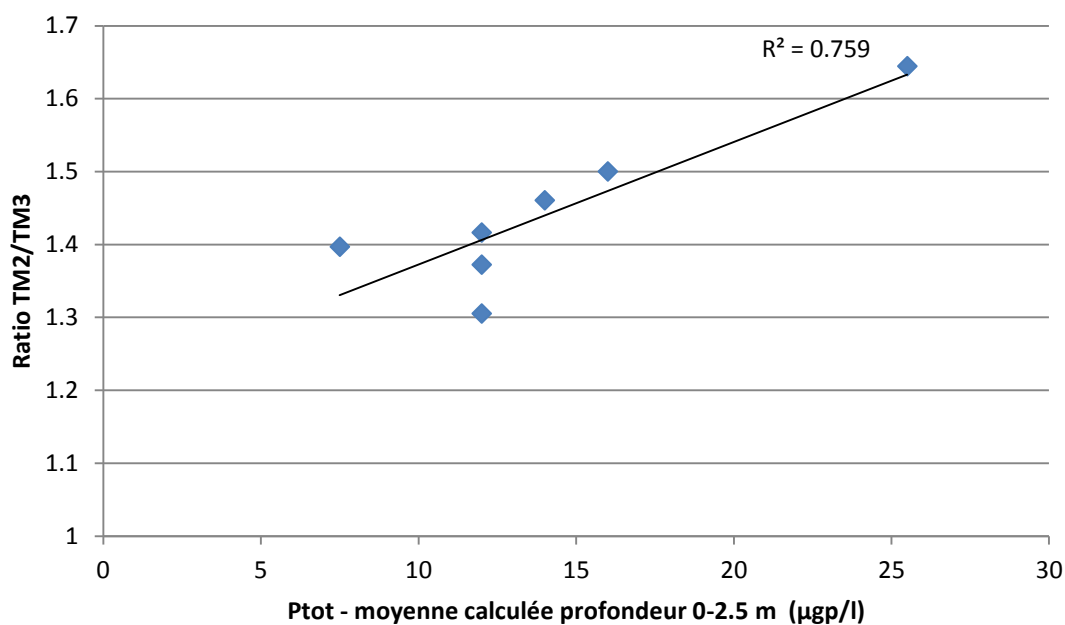
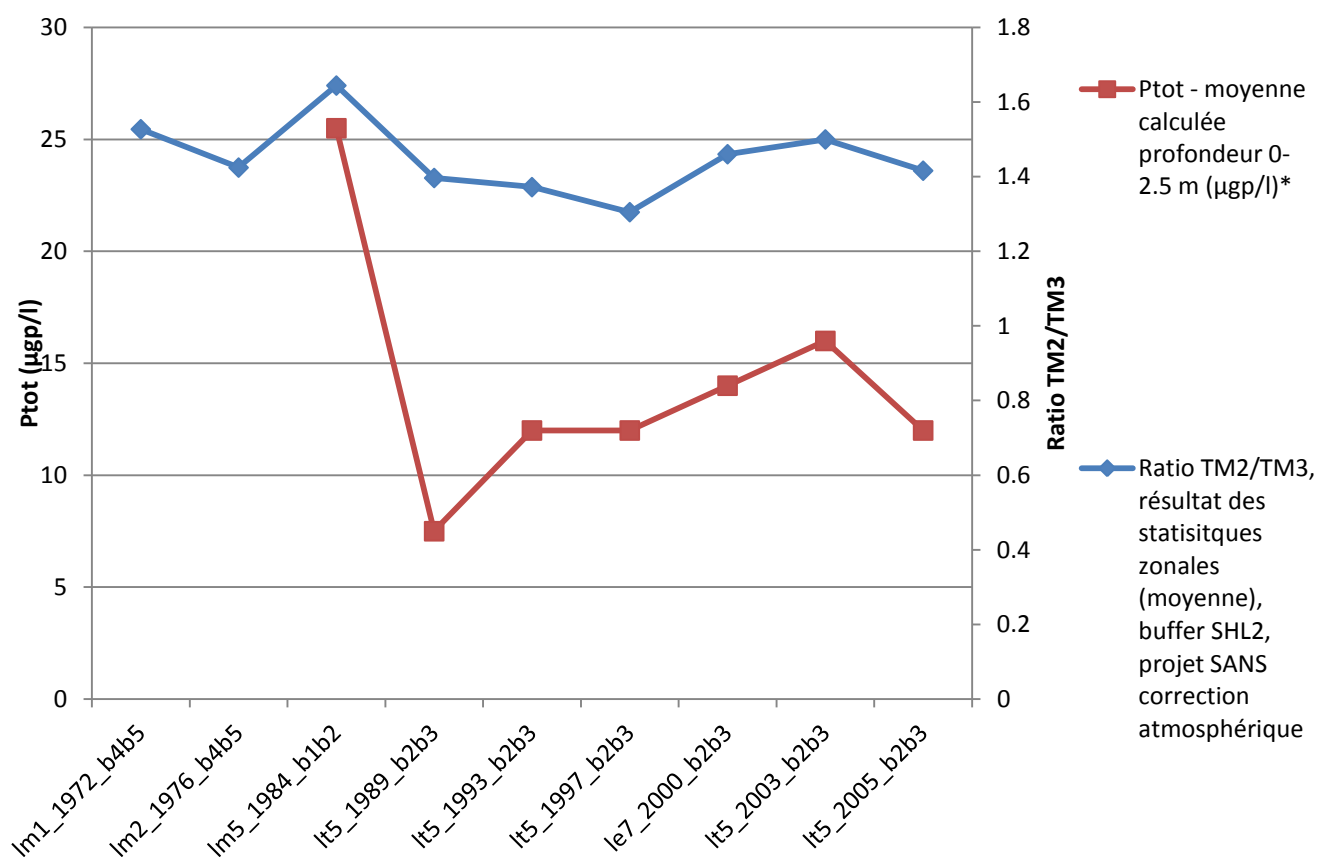
Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes. On notera les petits écarts-types (STD).

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b4b5	1.467	1.607	1.527	0.052
lm2_1976_b4b5	1.320	1.522	1.425	0.072
lm5_1984_b1b2	1.429	1.882	1.644	0.163
lt5_1989_b2b3	1.370	1.423	1.397	0.026
lt5_1993_b2b3	1.294	1.467	1.372	0.062
lt5_1997_b2b3	1.235	1.375	1.305	0.070
le7_2000_b2b3	1.406	1.500	1.460	0.036
lt5_2003_b2b3	1.462	1.538	1.500	0.038
lt5_2005_b2b3	1.357	1.462	1.416	0.046

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Il existe une forte corrélation avec la concentration de P_{tot}, moyenne calculée pour une profondeur de 0-2.5 m.

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
P _{tot} 0-2.5 m (µgp/l)*	0.871
P _{tot} 0-5 m (µgp/l)	0.302
P _{tot} 0-10 m (µgp/l)	0.247
P _{tot} 0-20 m (µgp/l)	0.352
P _{tot} Annuel (µgp/l)	0.410



Le coefficient de détermination $R^2=0.759$, ainsi 75.9% de la variance de Y (Ratio TM2/TM3) est expliquée par la variance de X (P_{tot}).

Comparaison avec données in situ Chl-a

Il n'y a pas de corrélation.

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
moyenne pondérée par la profondeur(chlorophylle a strickland-parsons) $\mu\text{g/l}$	-0.077

Comparaison avec données in situ de la transparence

Egalement pas de corrélation

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
transparence par disque inra (m)	0.208

11.1.5 Ratio de bandes TM4/TM1 (PIR/Bleu)

Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes. Notons les très petits écarts-types (STD).

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b6b4	0.341	0.429	0.380	0.036
lm2_1976_b6b4	0.382	0.485	0.414	0.041
lm5_1984_b3b1	0.257	0.300	0.280	0.015
lt5_1989_b4b1	0.167	0.173	0.170	0.002
lt5_1993_b4b1	0.197	0.222	0.209	0.010
lt5_1997_b4b1	0.180	0.200	0.194	0.008
le7_2000_b4b1	0.167	0.174	0.171	0.003
lt5_2003_b4b1	0.140	0.158	0.151	0.007
lt5_2005_b4b1	0.145	0.170	0.153	0.010

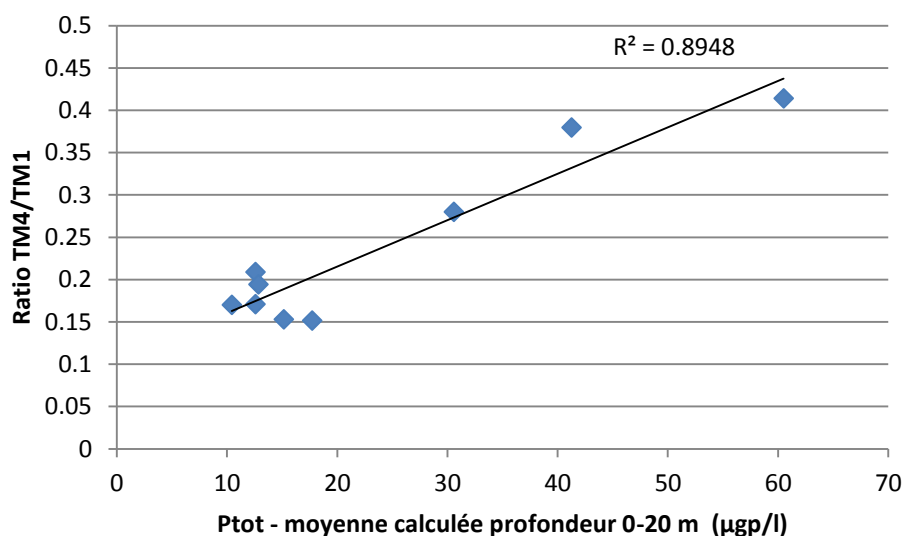
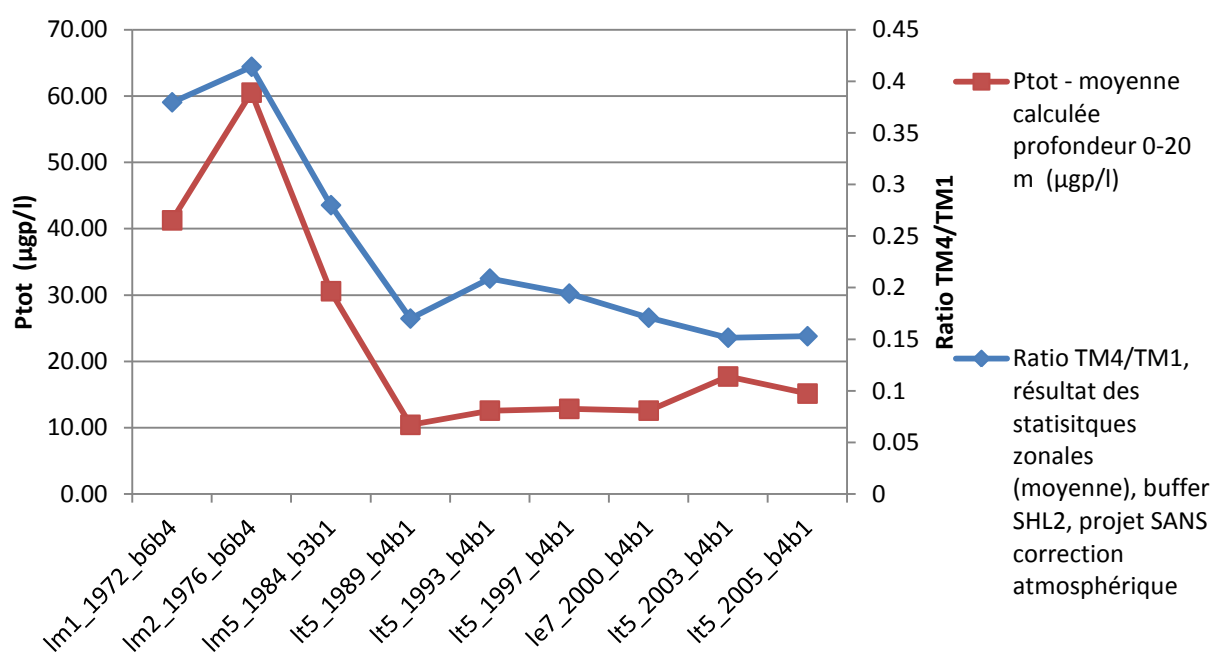
C'est le meilleur résultat de notre recherche de corrélation. Avec une corrélation à $r=0.946$ et un coefficient de détermination de $R^2=0.8948$ lorsqu'il est comparé à la concentration de P_{tot} (moyenne calculée à une profondeur de 0-20 m).

A noter cependant que les satellites de 1972 à 1984 n'avaient pas de bande bleue, le ratio a donc été fait pour les 3 premières années sur du vert/PIR.

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Ce ratio a une très bonne corrélation avec la moyenne de concentration de P_{tot} calculé pour une profondeur de 0-20 m bien qu'avec un effectif de 9 images (N=9), les résultats des corrélations entre les moyennes calculées aux profondeurs 0-5 m, 0-10 m et la corrélation de P_{tot} (prof. 0-20 m) ne soient pas significativement différents.

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{gP/l}$)*	0.735
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{gP/l}$)	0.929
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{gP/l}$)	0.923
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{gP/l}$)	0.946
P_{tot} Annuel ($\mu\text{gP/l}$)	0.889



Comparaison avec données in situ Chl-a

La corrélation avec la Chl-a n'existe pas.

Corrélation r	Mean buffer lake
Chlorophylle a Strickland-Parsons (µg/l) moyenne de 0 à 5 m de profondeur	0.139

Comparaison avec données in situ de la transparence

Même chose avec la transparence.

Correlation r	MEAN
transparence par disque inra (m)	0.115

11.1.6 Ratio de bandes TM3/TM1 (Rouge/Bleu)

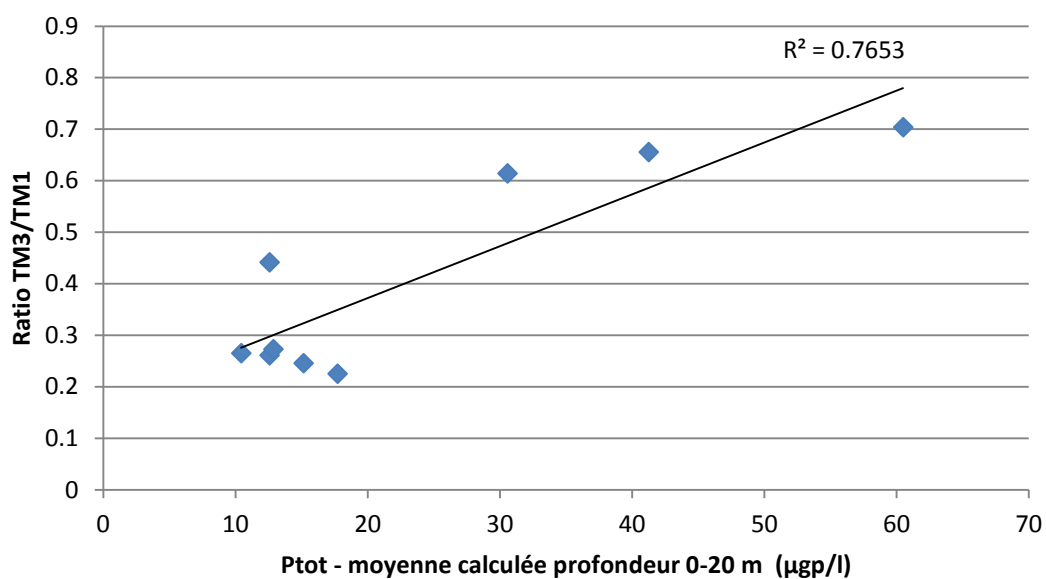
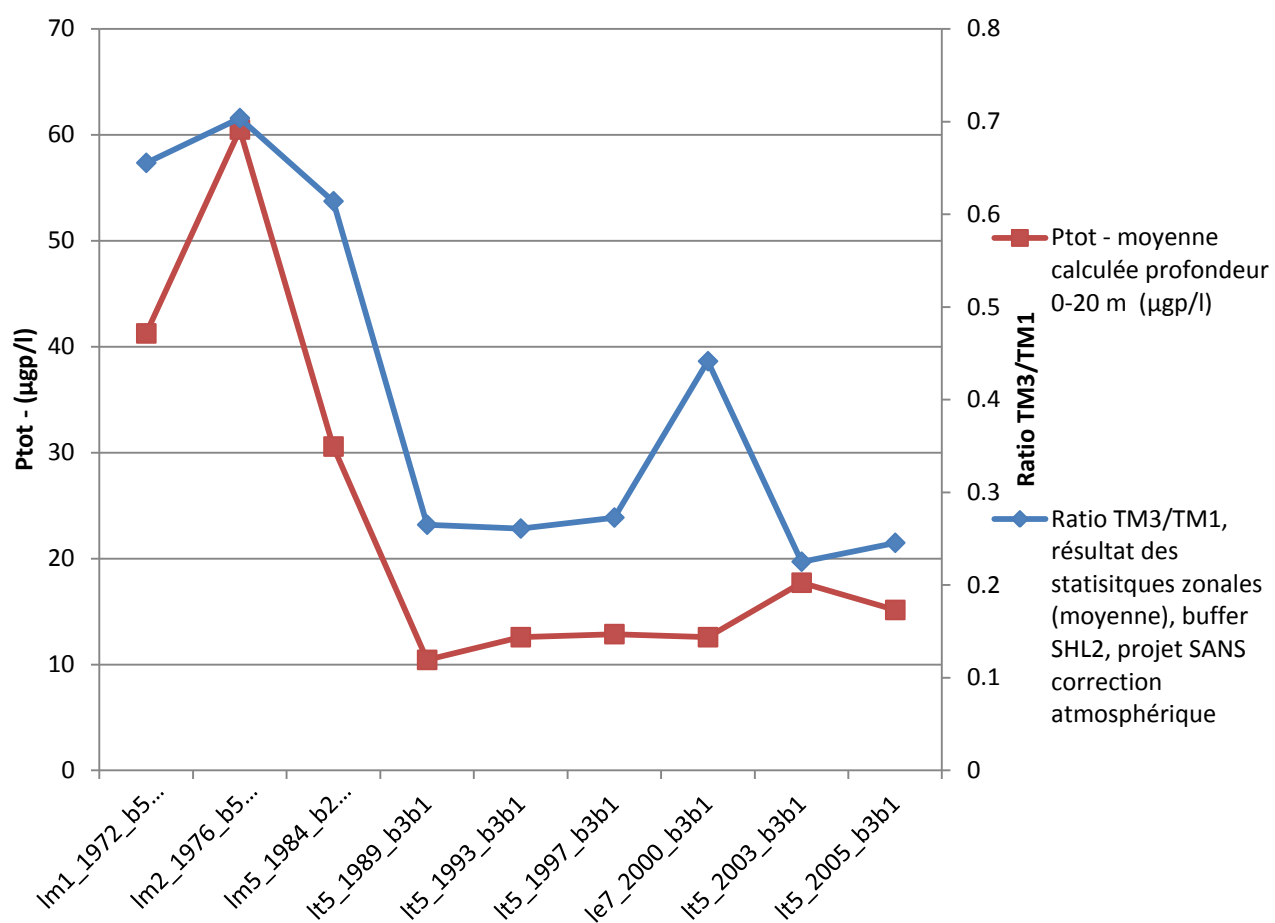
Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes. On notera à nouveau de petits écarts-types (STD).

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b5b4	0.622	0.682	0.655	0.022
lm2_1976_b5b4	0.657	0.758	0.704	0.036
lm5_1984_b2b1	0.531	0.700	0.614	0.060
lt5_1989_b3b1	0.260	0.270	0.265	0.004
lt5_1993_b3b1	0.246	0.270	0.261	0.009
lt5_1997_b3b1	0.262	0.283	0.273	0.009
le7_2000_b3b1	0.429	0.464	0.441	0.014
lt5_2003_b3b1	0.220	0.228	0.225	0.003
lt5_2005_b3b1	0.236	0.264	0.246	0.011

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Une plus forte corrélation ($r=0.875$) existe pour la concentration de P_{tot} calculée sur une profondeur de 0-20 m et le coefficient de détermination est de $R^2= 0.7653$ bien qu'avec un effectif de 9 images ($N=9$) les résultats entre corrélations ne soient pas significativement différents.

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m (µgp/l)*	0.804
P_{tot} 0-5 m (µgp/l)	0.863
P_{tot} 0-10 m (µgp/l)	0.832
P_{tot} 0-20 m (µgp/l)	0.875
P_{tot} Annuel (µgp/l)	0.855



Comparaison avec données in situ Chl-a

Faible corrélation négative.

Corrélation r	MEAN
moyenne pondérée par la profondeur (chlorophylle a strickland-parsons) $\mu\text{g/l}$	-0.499

Comparaison avec données in situ de la transparence

Pas de corrélation.

Corrélation r	MEAN
transparence par disque inra (m)	0.132

11.1.7 Ratio de bandes TM3/TM2 (Rouge/Vert)

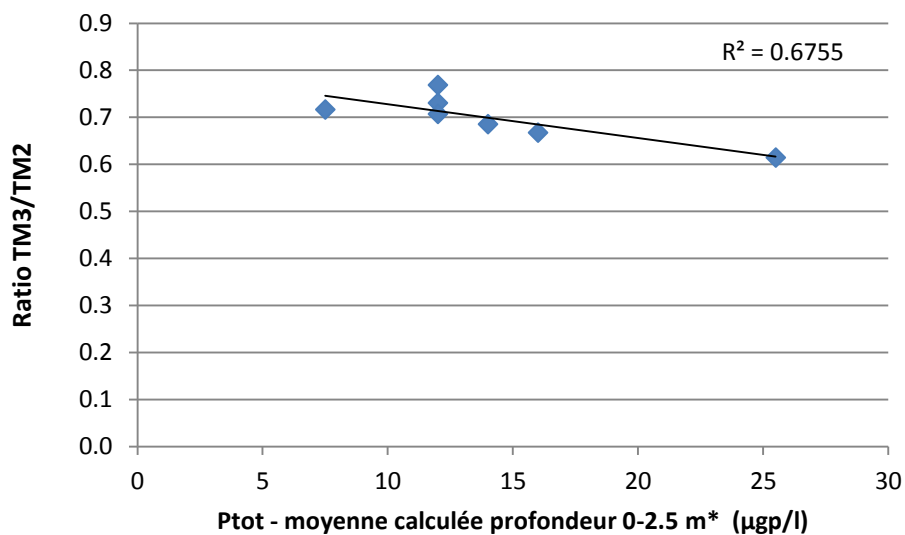
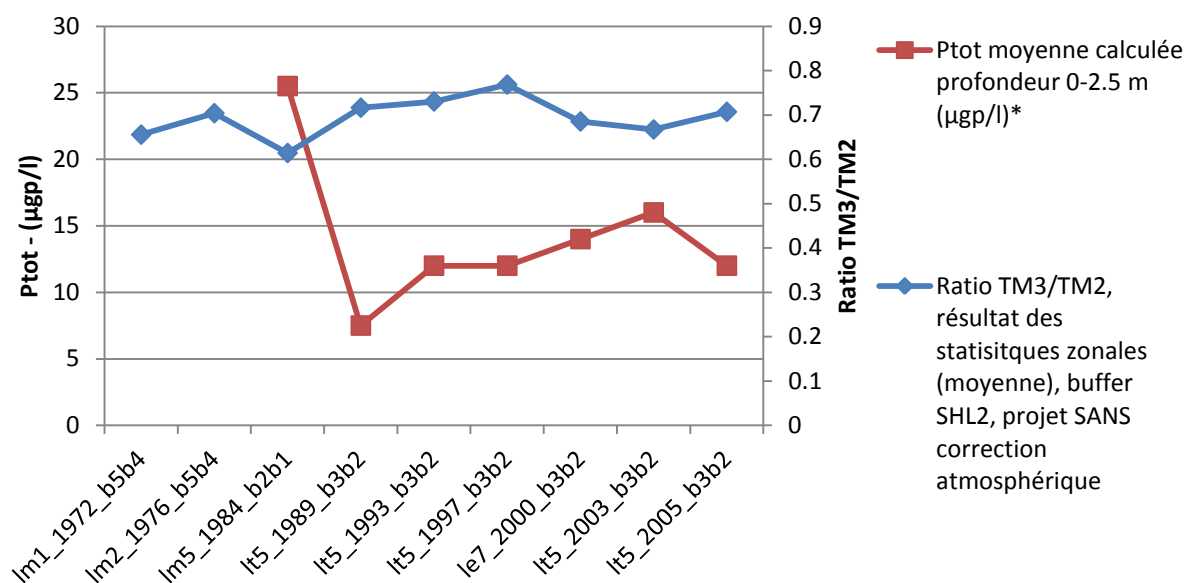
Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes. On notera les petits écarts-types (STD).

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b5b4	0.622	0.682	0.655	0.022
lm2_1976_b5b4	0.657	0.758	0.704	0.036
lm5_1984_b2b1	0.531	0.700	0.614	0.060
lt5_1989_b3b2	0.703	0.730	0.716	0.014
lt5_1993_b3b2	0.682	0.773	0.730	0.033
lt5_1997_b3b2	0.727	0.810	0.768	0.041
le7_2000_b3b2	0.667	0.711	0.685	0.017
lt5_2003_b3b2	0.650	0.684	0.667	0.017
lt5_2005_b3b2	0.684	0.737	0.707	0.023

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Forte corrélation négative avec la concentration moyenne calculée sur la profondeur entre 0-2.5 m ($r=-0.822$ et $R^2= 0.6755$)

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{g/l}$)*	-0.822
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{g/l}$)	-0.311
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{g/l}$)	-0.257
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{g/l}$)	-0.358
P_{tot} Annuel ($\mu\text{g/l}$)	-0.391



Comparaison avec données in situ Chl-a

Pas de corrélation.

Corrélation r	MEAN
moyenne pondérée par la profondeur(chlorophylle a strickland-parsons) µg/l	0.058

Comparaison avec données in situ de la transparence

Faible corrélation.

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
transparence par disque inra (m)	-0.208

11.2 Bandes uniques TM4 et TM1

Ici, nous avons voulu comparer les bandes individuellement afin de voir quelle corrélation il y avait entre les statistiques zonales sur le buffer SHL2 et celles sur l'entier du lac (buffer lac, voir résultats § 11.3.2). Nous avons toutefois aussi profité de faire les comparaisons avec les 3 paramètres.

11.2.1 Bande TM 4 (PIR)

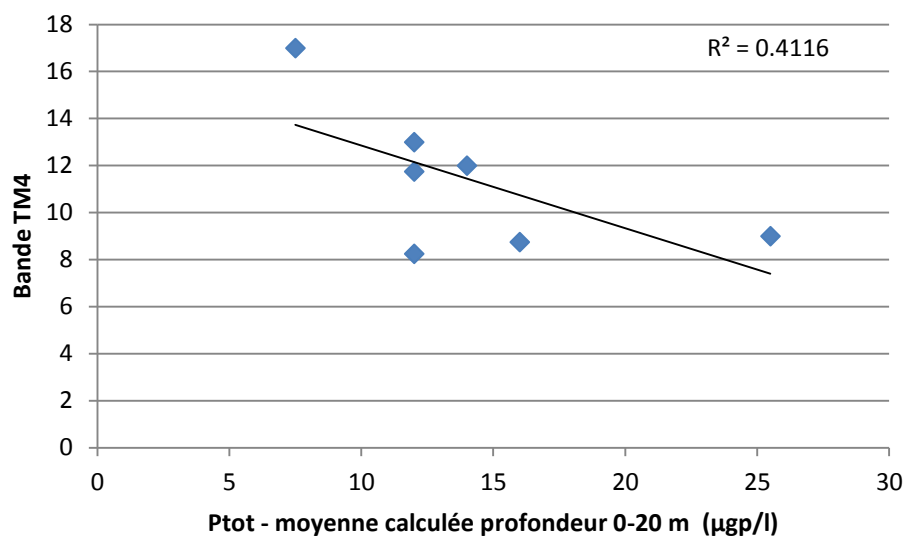
Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs correspondent à des nombres digitaux (ND).

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
lm_1972_b6	15	18	16.5	1.500
lm2_1976_b6	13	16	14.25	1.090
lm5_1984_b3	9	9	9	0.000
lt5_1989_b4	17	17	17	0.000
lt5_1993_b4	12	14	13	0.707
lt5_1997_b4	11	12	11.75	0.433
le7_2000_b4	12	12	12	0.000
lt5_2003_b4	8	9	8.75	0.433
lt5_2005_b4	8	9	8.25	0.433

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Il y a une faible corrélation négative avec le P_{tot} pour la concentration calculée à 0-20m ($r=-0.642$, $R^2=0.416$).

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{gp/l}$)*	-0.642
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{gp/l}$)	0.254
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{gp/l}$)	0.259
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{gp/l}$)	0.264
P_{tot} Annuel ($\mu\text{gp/l}$)	0.484



Comparaison avec données in situ Chl-a

Une faible corrélation négative est établie entre la bande 4 et la Chl-a avec un mauvais coefficient de détermination ($r=-0.525$, $R^2=0.275$).

Corrélation r	MEAN
moyenne pondérée par la profondeur(chlorophylle a strickland-parsons) µg/l	-0.525

Comparaison avec données in situ de la transparence

Il existe une corrélation positive de $r=0.677$ lorsque l'on compare la bande 4 à la transparence. Le coefficient de détermination est de $R^2=0.4582$.

Corrélation r	MEAN
transparence par disque inra (m)	0.677

11.2.2 Bande TM1 (Bleu)

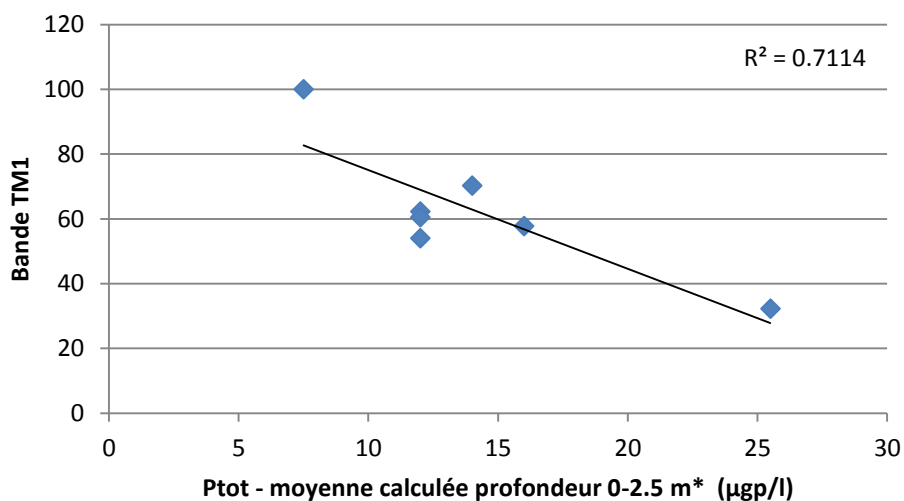
Tableau des résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer différent pour les deux résolutions (60m et 30m) autour du point SHL2. Les valeurs correspondent à des nombres digitaux (ND).

YEAR_Band	MIN	MAX	MEAN	STD
lm1_1972_b4	42	45	43.5	1.12
lm2_1976_b4	33	36	34.5	1.12
lm5_1984_b1	30	35	32.25	1.79
lt5_1989_B1	98	102	100	1.41
lt5_1993_b1	61	64	62.25	1.30
lt5_1997_b1	60	61	60.5	0.50
le7_2000_b1	69	72	70.25	1.09
lt5_2003_b1	57	59	57.75	0.83
lt5_2005_b1	53	55	54	1.00

Comparaison avec les données in situ P_{tot}

Une forte corrélation négative est établie en comparant la bande 1 avec le P_{tot} . ($r = -0.843$, $R^2 = 0.7114$).

Correlation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{gP/l}$)*	-0.843
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.708
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.697
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.719



Comparaison avec données in situ Chl-a

Pas de corrélation pour la Chl-a.

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
moyenne pondérée par la profondeur(chlorophylle a strickland-parsons) $\mu\text{g/l}$	-0.172

Comparaison avec données in situ de la transparence

Il existe une faible corrélation avec la transparence.

<i>Corrélation r</i>	<i>MEAN</i>
transparence par disque inra (m)	0.406

11.3 Projet SANS correction atmosphériques, buffer lac -150m

Puisque nous n'avons pas trouvé de corrélation avec les paramètres de transparence et de Chl-a avec le buffer SHL2 (§ 11.1), nous nous limiterons à la comparaison avec le P_{tot} pour le projet avec le buffer lac-150m.

Ce projet a été réalisé dans le but de comparer les bandes de la meilleure corrélation trouvée dans la section précédente, à savoir le ratio TM4/TM1 (§ 11.1.5), cette comparaison sera présentée à la section 11.3.2. Dans cette section, sont présentés les résultats de comparaison du ratio TM4/TM1, des bandes TM4, TM1 avec les données *in situ* du P_{tot} .

Tableau résumé des statistiques pour cette section.

<i>In situ</i>	P_{tot}	
Bandes	r	R^2
TM4/TM1 (PIR/Bleu)	0.963	0.9271
TM1	-0.813	0.6609
TM4	0.38	-

11.3.1 Ratio TM4/TM1 et P_{tot}

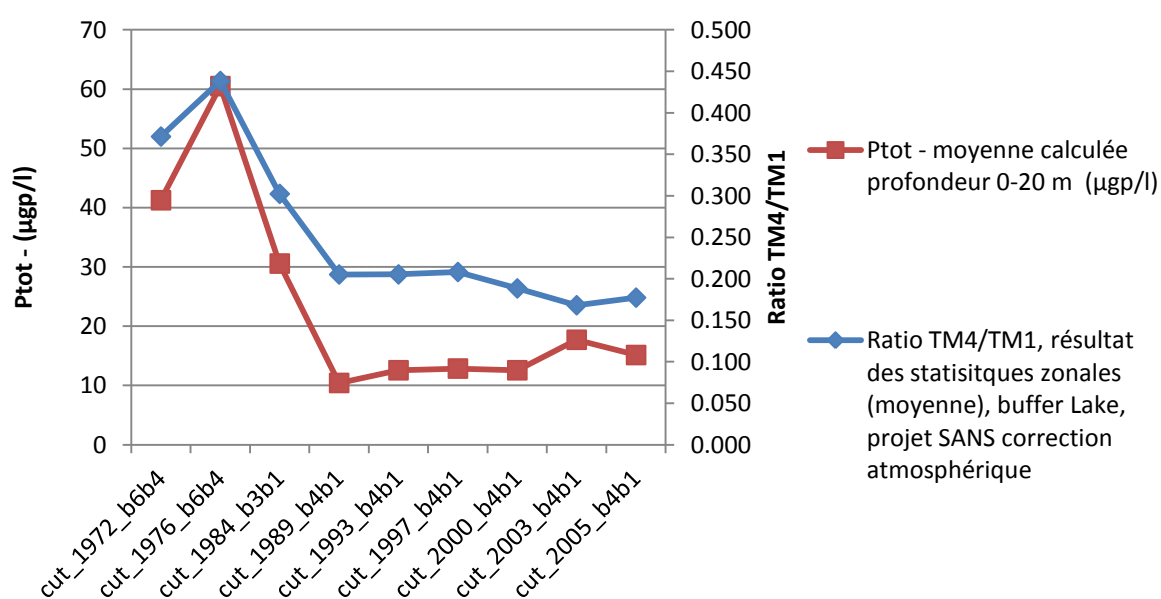
Résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer lac -150 m. Les valeurs des résultats correspondent au rapport des bandes brutes.

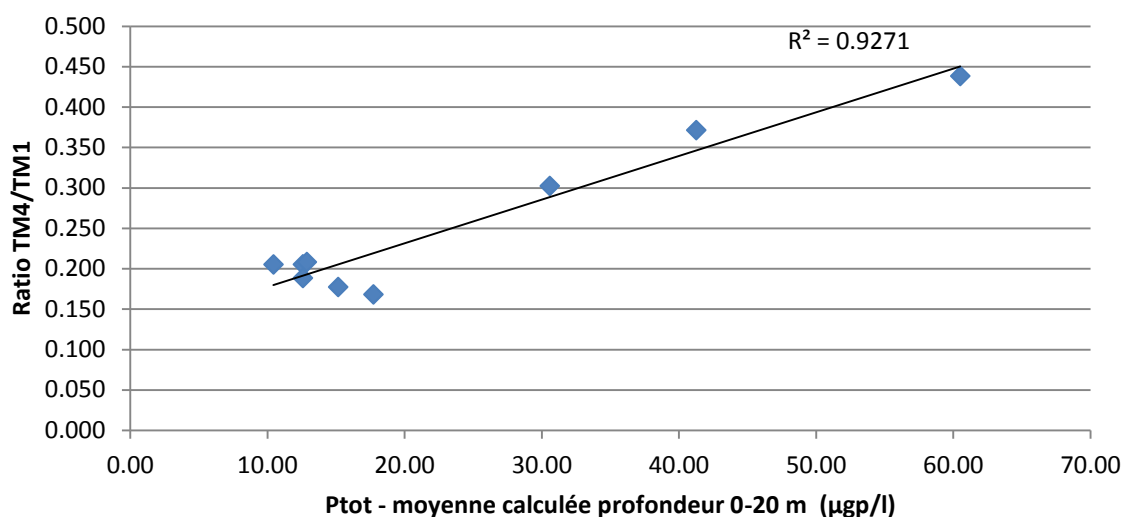
Year_band	MIN	MAX	Moyenne	Ecart-type
cut_1972_b6b4	0.177	1.178	0.371	0.039
cut_1976_b6b4	0.194	2.262	0.438	0.052
cut_1984_b3b1	0.129	2.595	0.302	0.040
cut_1989_b4b1	0.150	1.052	0.205	0.059
cut_1993_b4b1	0.000	1.902	0.205	0.046
cut_1997_b4b1	0.131	1.677	0.208	0.042
cut_2000_b4b1	0.143	1.441	0.188	0.025
cut_2003_b4b1	0.016	4.322	0.168	0.031
cut_2005_b4b1	0.109	2.019	0.177	0.023

Comparaison TM4/TM1 et P_{tot}

Il y a une forte corrélation ($r=0.963$) et un fort coefficient de détermination ($R^2 = 0.9271$) avec la concentration moyenne de P_{tot} calculée pour les profondeurs 0-20 m bien qu'avec un effectif de 9 images ($N=9$) les résultats des corrélations entre les moyennes calculées aux profondeurs 0-5 m, 0-10 m ne soient pas significativement différents.

Corrélation r	Moyenne
Ptot 0-2.5 m ($\mu\text{gP/l}$)*	0.726
Ptot 0-5 m ($\mu\text{gP/l}$)	0.945
Ptot 0-10 m ($\mu\text{gP/l}$)	0.941
Ptot 0-20 m ($\mu\text{gP/l}$)	0.963
Ptot Annuel ($\mu\text{gP/l}$)	0.919





Bande TM4 et P_{tot}

Résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer lac -150 m. Les valeurs correspondent à des nombres digitaux (ND).

Year_band	MIN	MAX	Moyenne	Ecart-type
cut_1972_b6	8	53	16.010	2.023
cut_1976_b6	7	95	15.143	2.033
cut_1984_b3	4	109	9.992	1.600
cut_1989_b4	15	255	21.879	17.493
cut_1993_b4	0	116	12.131	3.370
cut_1997_b4	8	104	12.893	3.848
cut_2000_b4	10	98	13.302	1.992
cut_2003_b4	1	255	9.900	1.946
cut_2005_b4	6	111	9.346	1.420

Il y a une faible corrélation négative avec le P_{tot} pour la concentration calculée à 0-2.5m ($r=-0.611$).

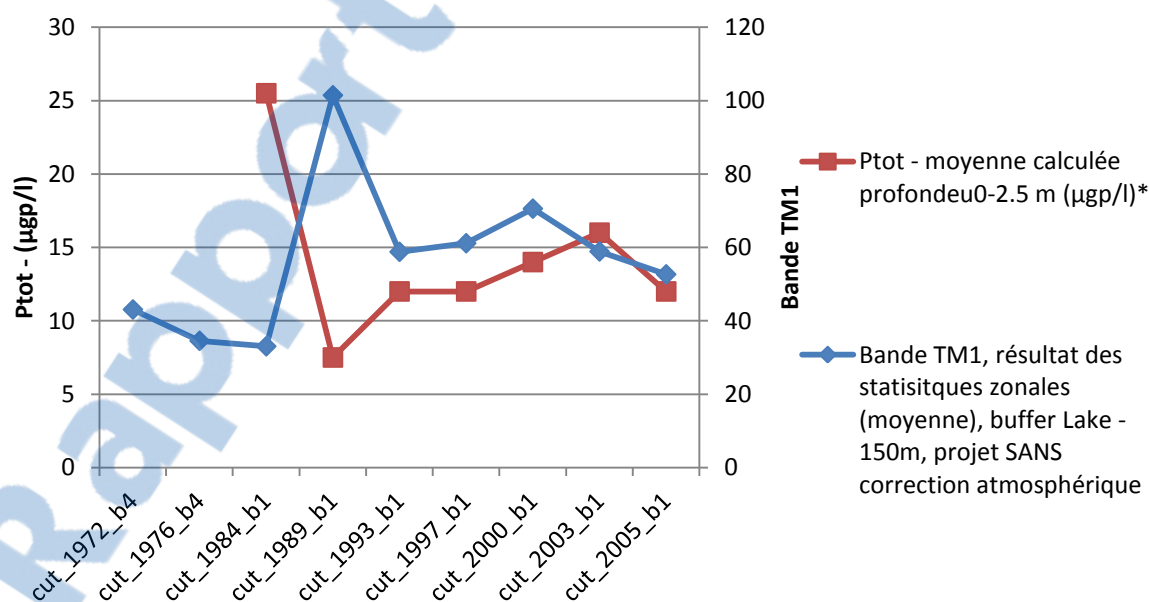
Corrélation r	Moyenne
Ptot 0-2.5 m (µgP/l)*	-0.611
Ptot 0-5 m (µgP/l)	0.076
Ptot 0-10 m (µgP/l)	0.086
Ptot 0-20 m (µgP/l)	0.093
Ptot Annuel (µgP/l)	0.380

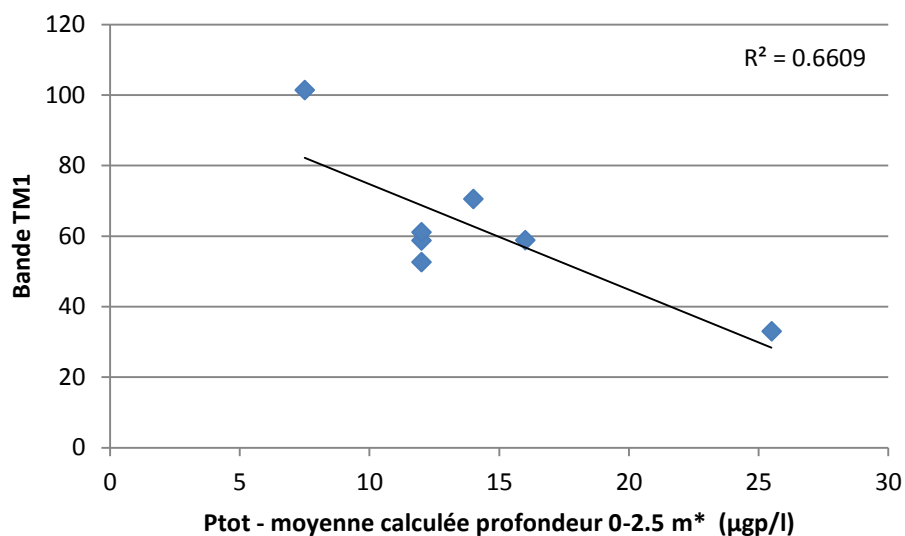
Bande TM1 et P_{tot}

Résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer lac -150 m. Les valeurs correspondent à des nombres digitaux (ND).

Year_band	MIN	MAX	MEAN	STD
cut_1972_b4	33	79	43.079	2.214
cut_1976_b4	25	67	34.542	1.582
cut_1984_b1	28	60	33.044	1.971
cut_1989_b1	81	255	101.444	20.555
cut_1993_b1	48	145	58.794	4.146
cut_1997_b1	49	115	61.133	5.071
cut_2000_b1	64	127	70.559	1.505
cut_2003_b1	52	109	58.885	2.757
cut_2005_b1	46	103	52.654	1.954

Corrélation r	Moyenne
Ptot 0-2.5 m ($\mu\text{gP/l}$)*	-0.813
Ptot 0-5 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.694
Ptot 0-10 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.684
Ptot 0-20 m ($\mu\text{gP/l}$)	-0.704
Ptot Annuel ($\mu\text{gP/l}$)	-0.452





11.3.2 Corrélation entre les bandes ratios selon le buffer SHL2 et buffer lac -150m

Toutes les corrélations sont très fortes ainsi que le coefficient de détermination.

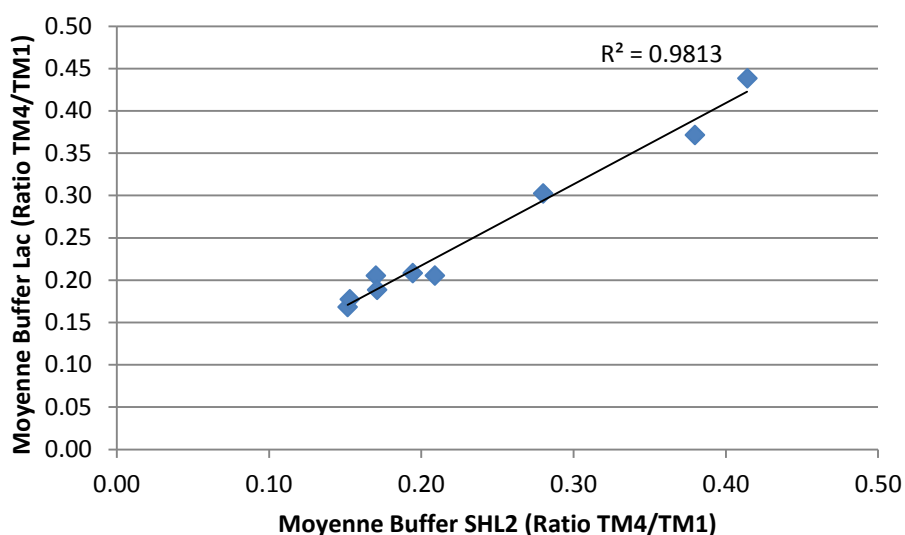
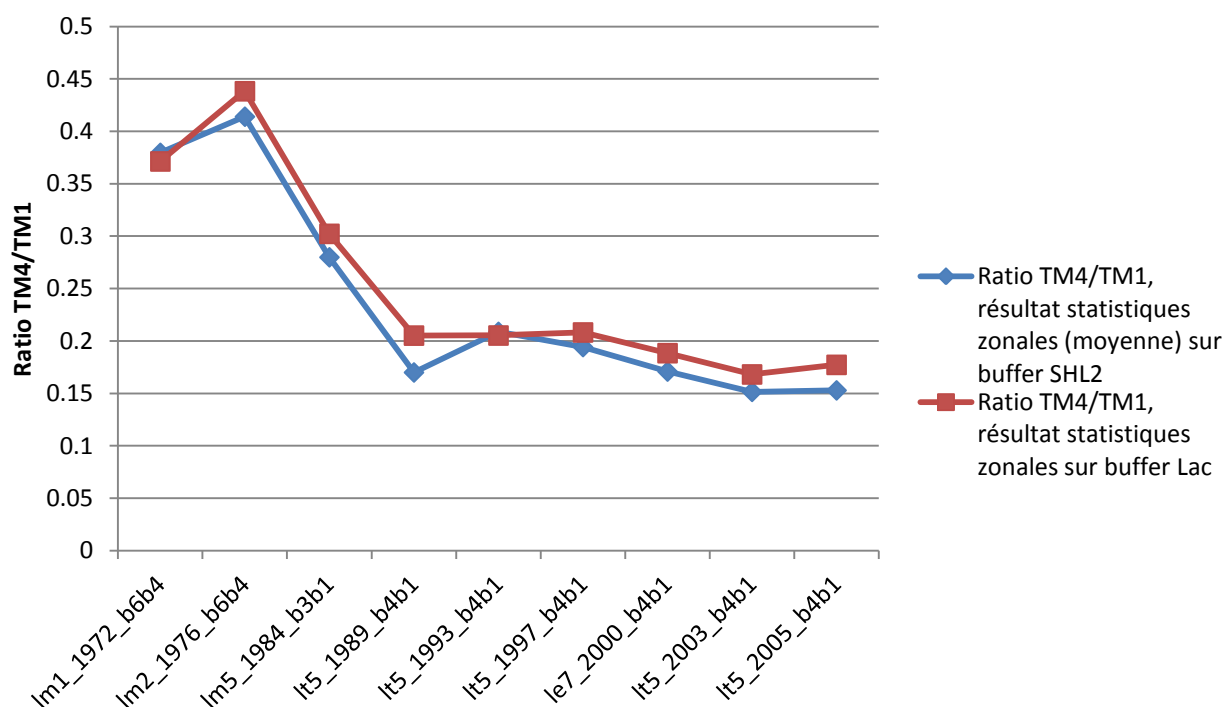
Bandes Buffer SHL2	Buffer Lac -150 m	r	R ²
TM4/TM1(PIR /Bleu)	TM4/TM1 (PIR /Bleu)	0.991	0.9815
Bande TM 4 (PIR)	Bande TM 4 (PIR)	0.917	0.8408
Bande TM1 (Bleu)	Bande TM1 (Bleu)	0.997	0.994

Comparaison entre les bandes ratios TM4/TM1 selon le buffer utilisé

Il existe une très forte corrélation entre la moyenne (résultat des statistiques zonales) selon les buffer utilisés, soit SHL2, soit lake-150m. De plus le coefficient de détermination est de $R^2 = 0.9813$.

Corrélation r	Moyenne buffer SHL2
Moyenne buffer Lac	0.991

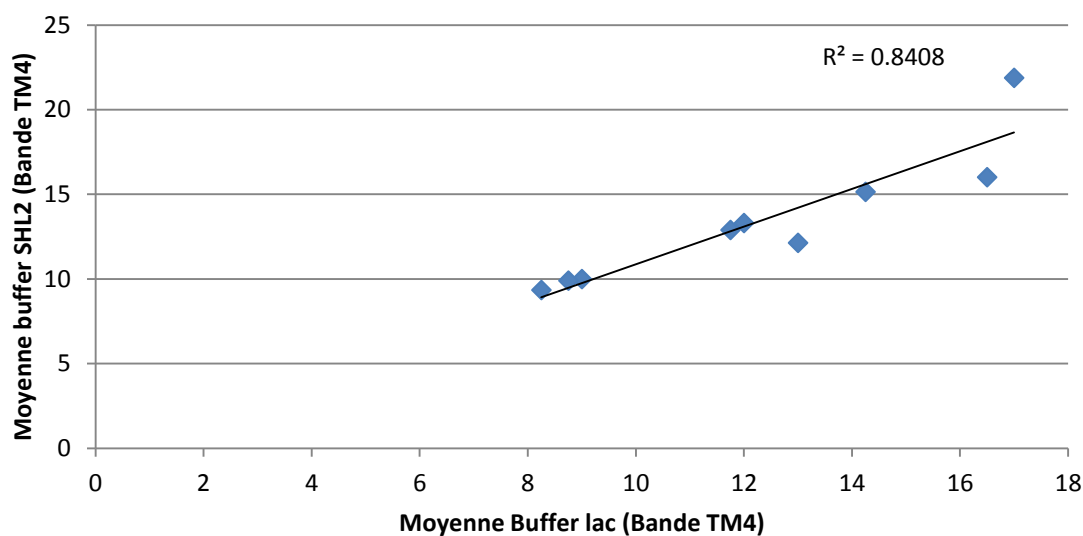
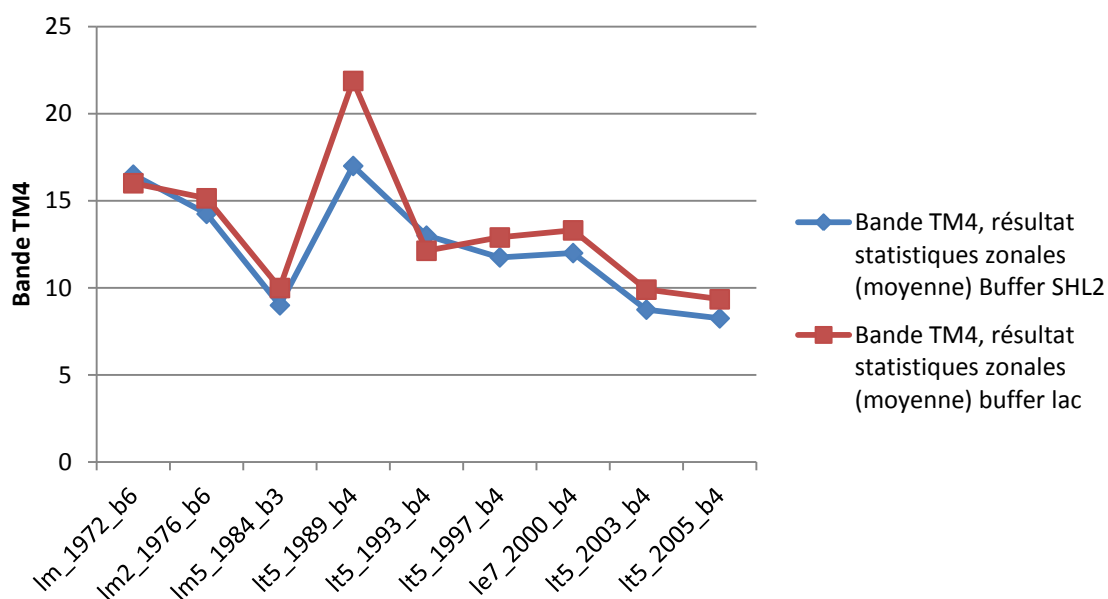
Sur le graphique suivant, on voit les deux courbes s'aligner quasi parfaitement.



Comparaison entre des bandes TM4 selon le buffer utilisé

Même chose que précédemment, la corrélation est très forte ($r=0.917$) pour les bandes TM4 selon le buffer utilisé ainsi que le coefficient de détermination ($R^2=0.8408$).

Corrélation r	Moyenne Buffer SHL2
Moyenne buffer lac	0.917

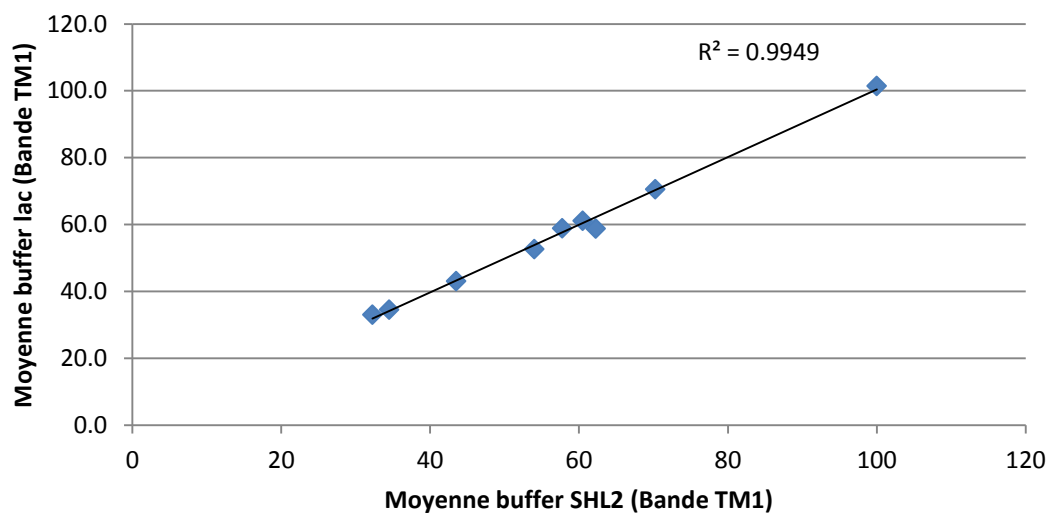
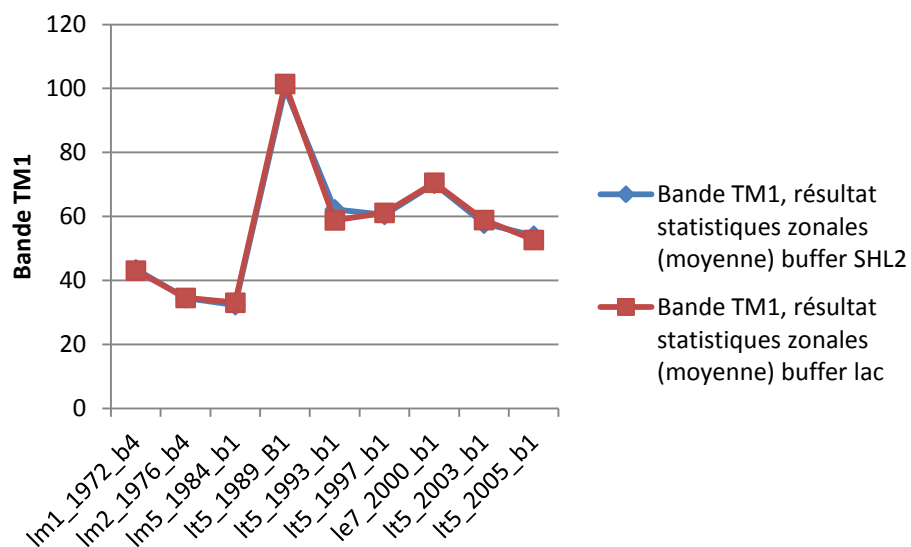


Comparaison entre les bandes TM1 selon le buffer utilisé

Pour la bande TM1, la corrélation et le coefficient de détermination sont de quasi 1.

<i>Corrélation</i>	<i>Moyenne buffer SHL2</i>
Moyenne buffer lac	0.997

On voit sur le graphique suivant les courbes qui s'alignent parfaitement. Quant au nuage de point, on observe très bien la distribution des données sur la courbe de tendance. On peut conclure que les analyses faites sur le point SHL2 correspondent à la tendance du lac selon les bandes TM1, TM4 et le ratio TM4/TM1.



Annexe 12

12 Présentation complète des résultats (II)

12.1 Projet avec correction atmosphérique

Projet avec correction atmosphérique (open source GRASS 7.0.1), commande `i.landsat.toar (dos3)`, pour transformer les ND en réflectance (voir le lien : <https://grass.osgeo.org/grass64/manuals/i.landsat.toar.html>)

Seul le paramètre *in situ* P_{tot} a été comparé dans ce projet.
Par défaut, TM est utilisé pour désigner les bandes même si nous avons des capteurs MSS et ETM. Sur 9 images, 5 proviennent de Landsat 5 TM.

Cinq ratios de bandes ont été testés sur le projet avec correction atmosphérique. Il s'agit de: TM2/TM4, TM2/TM3, TM1/TM3, TM4/TM1, TM3/TM1.

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats statistiques (coefficient de corrélation = r et coefficient de détermination = R^2). Lorsque $r < 0.5$, R^2 n'a pas été calculé.

<i>In situ</i>	P_{tot}	
Bandes	r	R^2
TM1/TM3 (Bleu/Rouge)	0.273	-
TM2/TM4 (Vert/PIR)	0.626	0.392
TM2/TM3 (Vert/Rouge)	0.930	0.864
TM4/TM1 (PIR/Bleu)	-0.857	0.734
TM3/TM1 (Rouge/Bleu)	-0.820	0.672

Il ressort de cette analyse que seul le ratio de bandes TM2/TM3 (voir § 12.1.3) a une forte corrélation positive ($r=0.930$ et $R^2 = 0.864$) entre la concentration en P_{tot} et la réflectance (moyenne, issue des statistiques zonales sur le buffer autour du point SHL2). Deux autres fortes corrélations négatives sont ressorties des ratios de bandes TM4/TM1 ($r = -0.857$, $R^2 = 0.734$) et TM3/TM1 ($r = -0.820$, $R^2 = 0.672$).

12.1.1 Ratio de bandes TM1/TM3 (Bleu/Rouge)

Résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer identique pour les deux résolutions autour du point SHL2.

YEAR_BANDS	MIN	MAX	MEAN	STD
1972_b45	1.566576	2.12363935	1.86501577	0.13134721
1976_b45	1.61180389	1.82643938	1.73623395	0.07134976
1984_b12	3.50793123	4.45582247	4.04704499	0.34115552
1989_b13	1.93686509	2.33607244	2.08605549	0.08590475
1993_b13	1.85393274	2.608284	2.27096426	0.18288152
1997_b13	1.566576	2.12363935	1.86501577	0.13134721
2000_b13	2.16731954	2.9586153	2.61548602	0.19190142
2003_b13	2.72016931	3.19964767	2.96961109	0.10507587
2005_b13	5.12055397	8.90260124	6.39326426	0.88760494

Remarque: pour tous les calculs statistiques dans Excel, la moyenne (MEAN) issue des statistiques zonales dans ArcGIS a été utilisée.

Le P_{tot} a été calculé à différentes profondeurs, comme vu dans l'annexe 8 "Données *in situ*". Après calculs des corrélations, on constate qu'il n'y a pas de relations. On peut en déduire que le ratio de bandes TM1/TM3 n'est pas un bon indicateur du P_{tot} .

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)*	0.273
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	-0.288
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	-0.270
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	-0.247
P_{tot} Annuel ($\mu\text{g}/\text{l}$)	-0.377

12.1.2 Ratio de bandes TM2/TM4 (Vert/PIR)

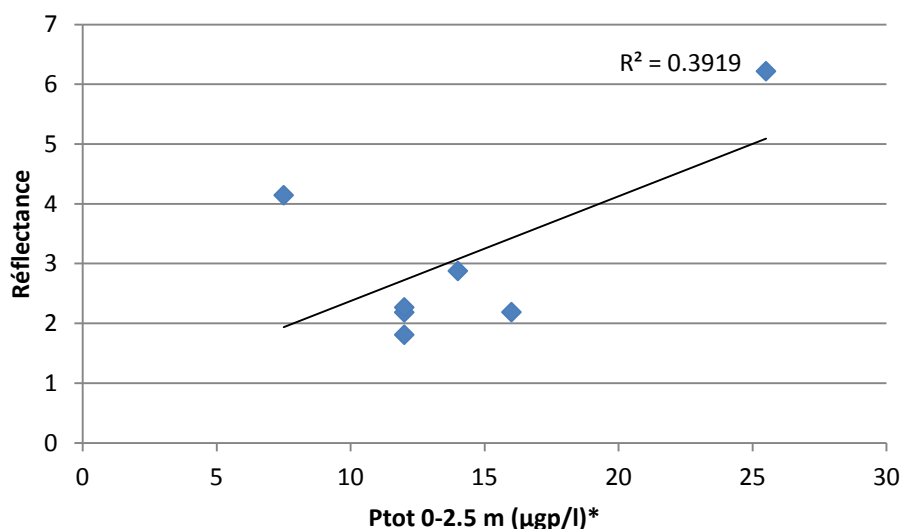
Résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer identique pour les deux résolutions autour du point SHL2.

YEAR_BANDS	MIN	MAX	MEAN	STD
1972_b46	1.12471771	1.41260254	1.20060007	0.08505828
1976_b46	2.27572799	2.89924598	2.64214674	0.18452426
1984_b13	4.95448923	8.01735306	6.22045201	1.21784155
1989_b24	3.28721452	4.40396929	4.14606105	0.27890207
1993_b24	1.48562598	2.18151355	1.81162852	0.19091901
1997_b24	1.99938738	2.64218259	2.18732756	0.20455978
2000_b24	2.12783575	3.19661236	2.87944455	0.33306424
2003_b24	2.07628989	2.39562869	2.19021145	0.10564326
2005_b24	2.09090734	2.41501665	2.27034272	0.10246324

Une corrélation entre la moyenne (MEAN), résultat des statistiques zonales et des différentes concentrations selon la profondeur est calculée.

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)*	0.626
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	-0.054
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	-0.089
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	-0.016
P_{tot} Annuel ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.349

Il en ressort qu'il y a une bonne corrélation pour le P_{tot} entre 0-2.5 m ($r=0.626$). On se souviendra qu'il n'y a pas de mesures pour les années 1972 et 1976 à 2.5 m de profondeur ce qui explique pourquoi la courbe du P_{tot} commence à partir de 1984 (signalé par *). Le coefficient de détermination est $r^2=0.3919$, ainsi seuls 39.19 % de la variance de Y (Réflectance) est expliquée par la variance de X (P_{tot}).



Pour ces raisons, ce ratio des bandes TM2/TM4 est à écarter.

12.1.3 Ratio de bandes TM2/TM3 (Vert/Rouge)

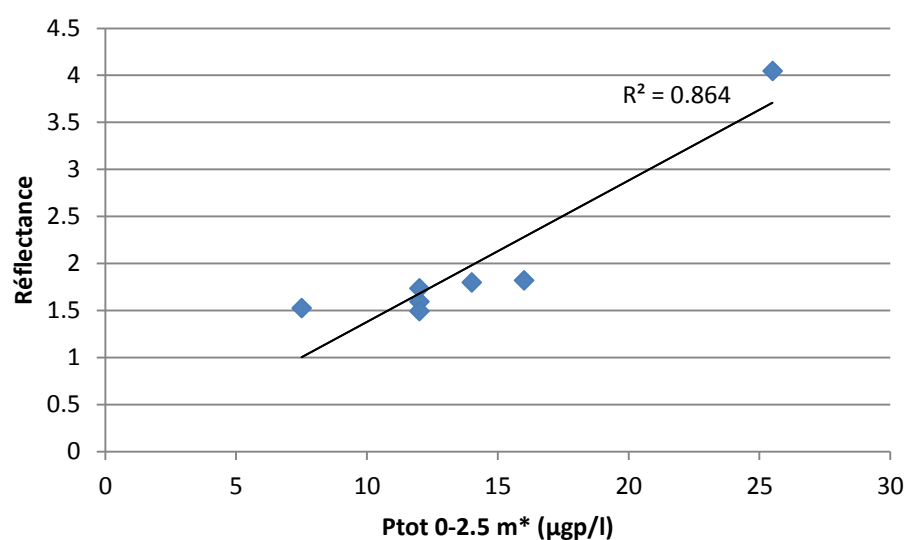
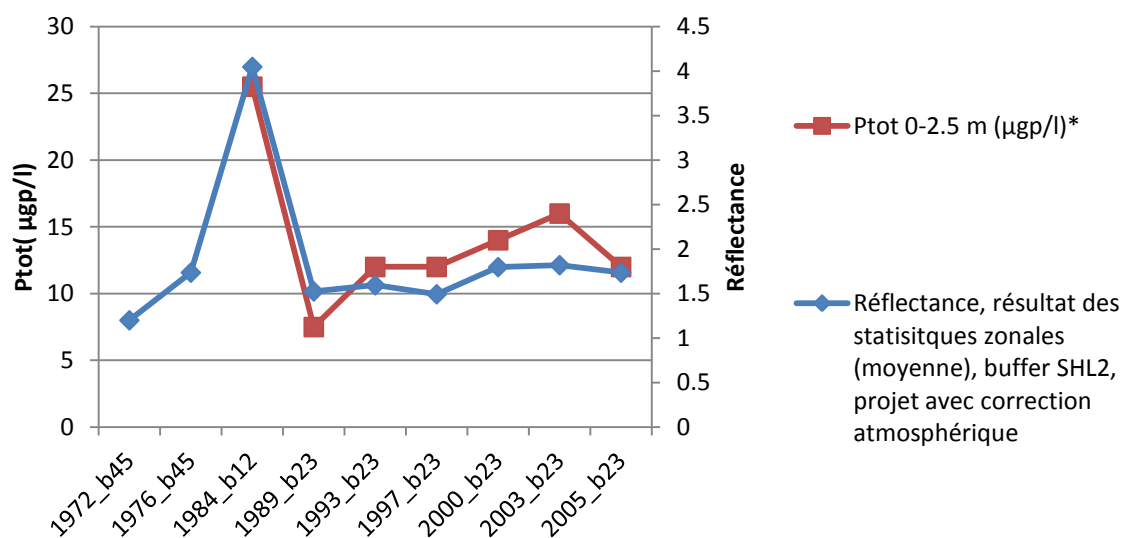
Résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer identique pour les deux résolutions autour du point SHL2.

YEAR_BANDS	MIN	MAX	MEAN	STD
1972_b45	1.12471771	1.41260254	1.20060007	0.08505828
1976_b45	1.61180389	1.82643938	1.73623395	0.07134976
1984_b12	3.50793123	4.45582247	4.04704499	0.34115552
1989_b23	1.40882778	1.61900043	1.52548922	0.06165946
1993_b23	1.32972825	1.87078476	1.59464188	0.13931679
1997_b23	1.32893252	1.8069663	1.4934621	0.12135095
2000_b23	1.42865944	2.13278675	1.79840964	0.17156413
2003_b23	1.73677254	1.94648457	1.82041187	0.05732108
2005_b23	1.55880892	1.95706058	1.73568407	0.08705541

Même procédure qu'au point 12.1.1, on prend la meilleure corrélation pour représenter les résultats. Il existe une forte corrélation ($r=0.930$) entre le résultat des statistiques zonales (moyenne) et la concentration de P_{tot} pour la profondeur 0-2.5 m.

Corrélation r	MEAN
Ptot 0-2.5 m (µg/l)*	0.930
Ptot 0-5 m (µg/l)	0.073
Ptot 0-10 m (µg/l)	0.030
Ptot 0-20 m (µg/l)	0.107
Ptot Annuel (µg/l)	0.310

Le coefficient de détermination est de $R^2 = 0.864$, ainsi 86.4% de la variance de Y (Réflectance) est expliquée par la variance de X (P_{tot}).



Ce ratio de bandes est celui qui a la plus forte corrélation.

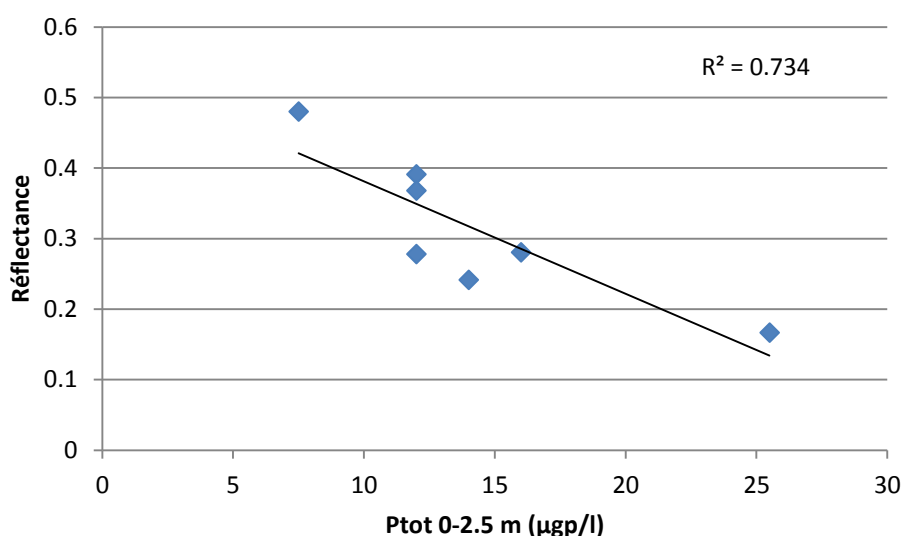
12.1.4 Ratio de bandes TM4/TM1 (PIR/Bleu)

Résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer identique pour les deux résolutions autour du point SHL2.

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
1972_b64	0.46670654	0.6213063	0.51901217	0.05054829
1976_b64	0.34491727	0.43941984	0.38051676	0.02920658
1984_b31	0.12472944	0.20183715	0.16671782	0.03062457
1989_b41	0.42806891	0.51629823	0.48017698	0.01954273
1993_b41	0.33363095	0.47756997	0.3911238	0.03515552
1997_b41	0.30884776	0.40610892	0.36807939	0.02331643
2000_b41	0.21723241	0.30096471	0.24153299	0.02708473
2003_b41	0.25812715	0.31005105	0.28056172	0.01339614
2005_b41	0.26363814	0.31755847	0.27813402	0.0173767

Les calculs des corrélations font apparaître une forte corrélation négative de $r=-0.857$ et le coefficient de détermination $r^2=0.734$, ainsi 73.4% de la variance de Y (Réflectance) est expliquée par la variance de X (P_{tot}).

Corrélation r	MEAN
P_{tot} 0-2.5 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)*	-0.857
P_{tot} 0-5 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.145
P_{tot} 0-10 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.180
P_{tot} 0-20 m ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.172
P_{tot} Annuel ($\mu\text{g}/\text{l}$)	0.252



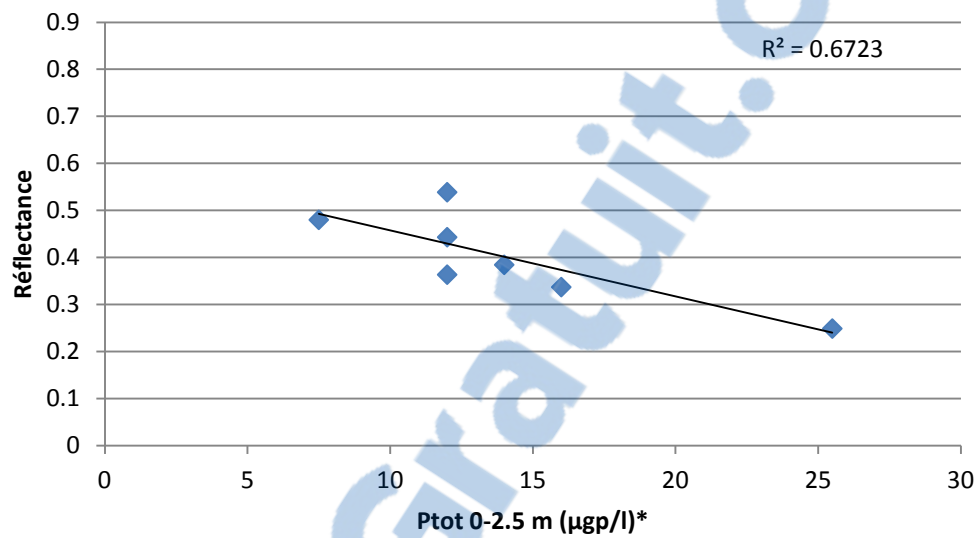
12.1.5 Ratio de bandes TM3/TM1 (Rouge/Bleu)

Résultats des statistiques zonales (ArcGIS>ArcToolBox>Zonal Statistics as Table) avec buffer identique pour les deux résolutions autour du point SHL2.

YEAR_BAND	MIN	MAX	MEAN	STD
1972_b54	0.70791322	0.88911206	0.83685115	0.05564392
1976_b54	0.54751337	0.6204229	0.57695558	0.02426802
1984_b21	0.22442545	0.2850683	0.24894179	0.02195304
1989_b31	0.42806891	0.51629823	0.48017698	0.01954273
1993_b31	0.38339382	0.5393939	0.44327135	0.03659951
1997_b31	0.47088972	0.63833481	0.53889269	0.03853056
2000_b31	0.33799598	0.46139944	0.38454063	0.03019186
2003_b31	0.31253439	0.36762416	0.33717325	0.01214156
2005_b31	0.33099172	0.39782539	0.36362268	0.01742833

Une forte corrélation négative ($r=-0.820$) apparaît à nouveau entre la moyenne, résultat des statistiques zonales sur le ratio de bandes TM3/TM1 et le buffer autour du point SHL2. Le coefficient de détermination quant à lui est de $R^2=0.6723$ ainsi 67.23% de la variance de Y (Réflectance) est expliquée par la variance de X (P_{tot}).

Corrélation r	MEAN
P _{tot} 0-2.5 m (µgp/l)*	-0.820
P _{tot} 0-5 m (µgp/l)	0.446
P _{tot} 0-10 m (µgp/l)	0.468
P _{tot} 0-20 m (µgp/l)	0.462
P _{tot} Annuel (µgp/l)	0.374



Annexe 13

Cartographie thermique du lac

Il est nécessaire de transformer les nombre digitaux (ND) des pixels en température. Pour ce faire, les bandes thermiques (TM6) ont été traitées avec GRASS (voir Annexe 10 traitement images Landsat) puis travaillées dans ArcGIS. Après traitement sur GRASS, les valeurs indiquées sont en degrés Kelvin. Pour transformer ces degrés en degrés Celsius, on utilise Raster calculator (ArcToolBox>Spatial Analyst) dans lequel on applique la formule suivante:

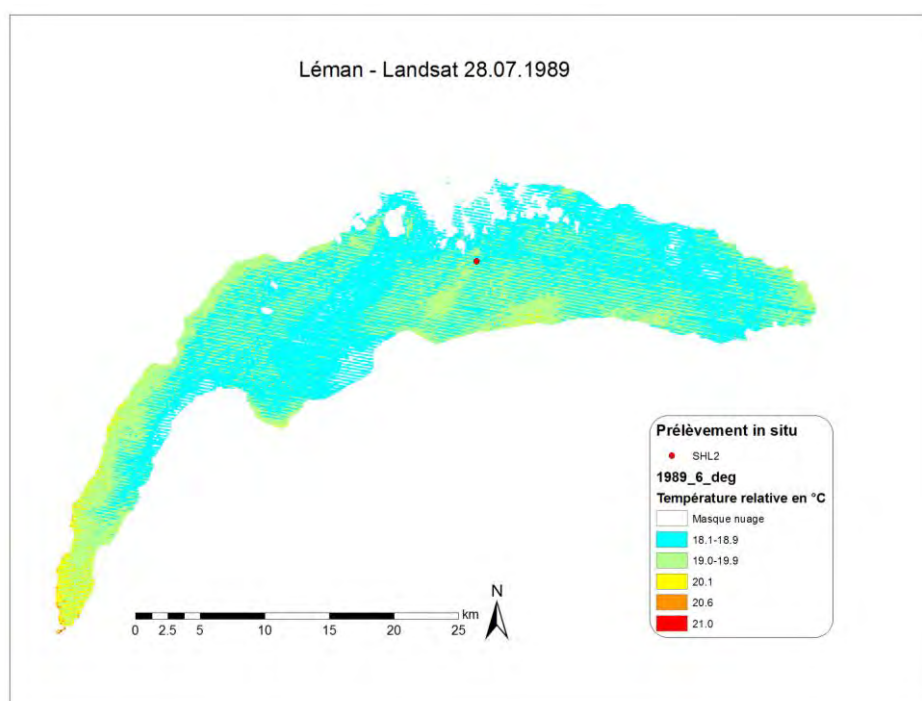
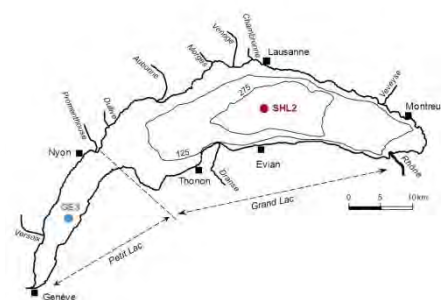
$$[^{\circ}\text{C}] = [\text{K}] - 273,15$$

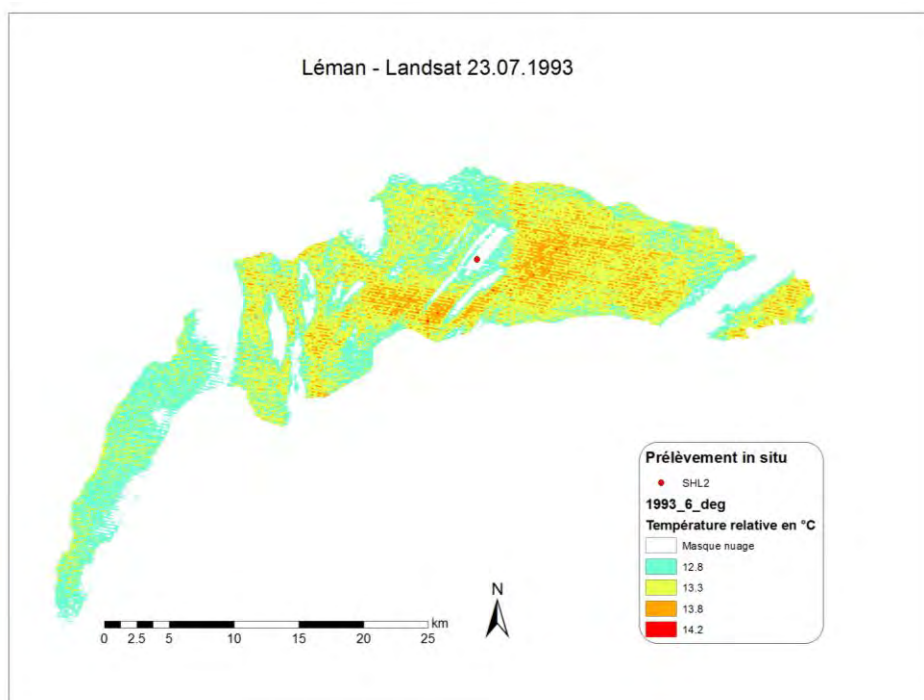
En d'autres termes, il faut insérer "Bande6" - 273.15. Un nouveau raster avec les degrés °C est généré.

La classification a été faite par regroupement de pixels afin de faire apparaître les variations de température. Les nuages ont été masqués et affichés en blanc sur les images.

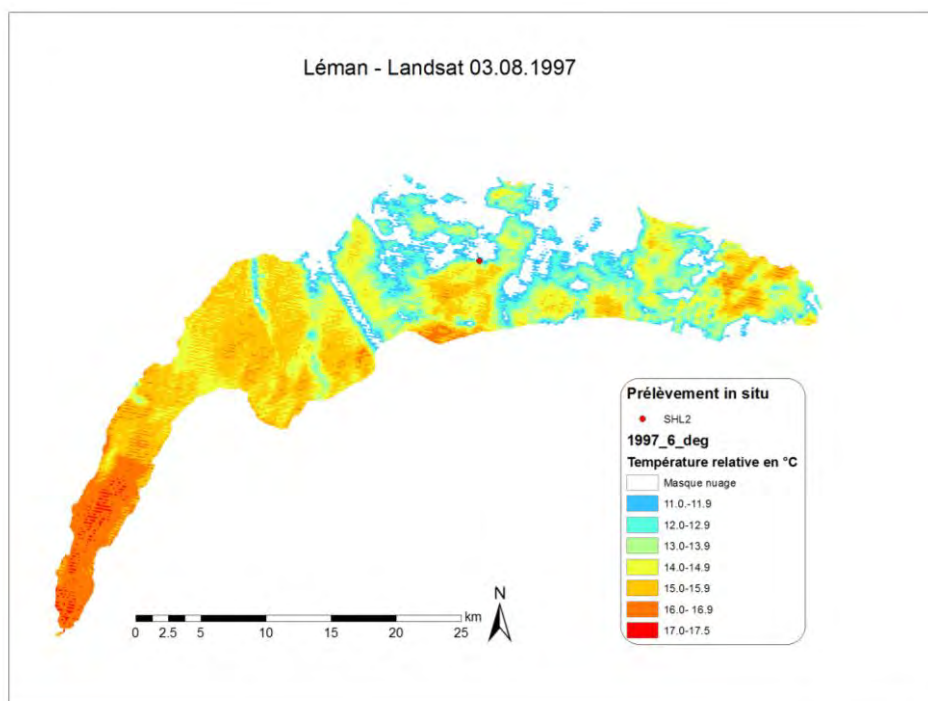
Idéalement, il aurait fallu avoir la direction des vents, le débit des rivières pour mieux comprendre les patterns. On se réfère cependant à l'annexe 9 (Données météo) qui indique la température au sol, la vitesse du vent et qui retrace les précipitations 7 jours avant la scène. Les images de 1972, 1976 et 1984 n'ont pas pu être analysées puisque le capteur MSS n'était pas équipé de bande thermique.

Les images proviennent de Landsat 5 TM sauf indication contraire. Cette carte (à droite) avec les affluents du Léman nous aide à comprendre les différences de températures observées.



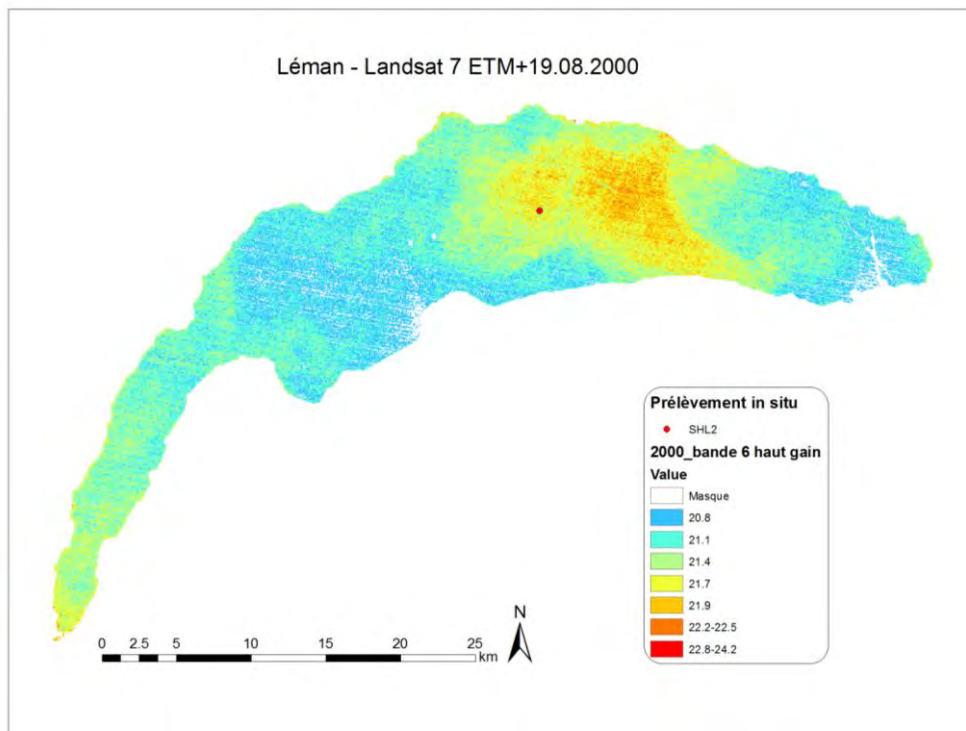


C'est en cartographiant cette image de 1993 que nous avons réalisé que le point SHL2 (indiqué en rouge) et son buffer sont exactement sous les cirrus et que le signal n'a pas pu atteindre la surface de l'eau. Il s'agit d'une très bonne préparation de prétraitement qu'il faudrait intégrer au processus.

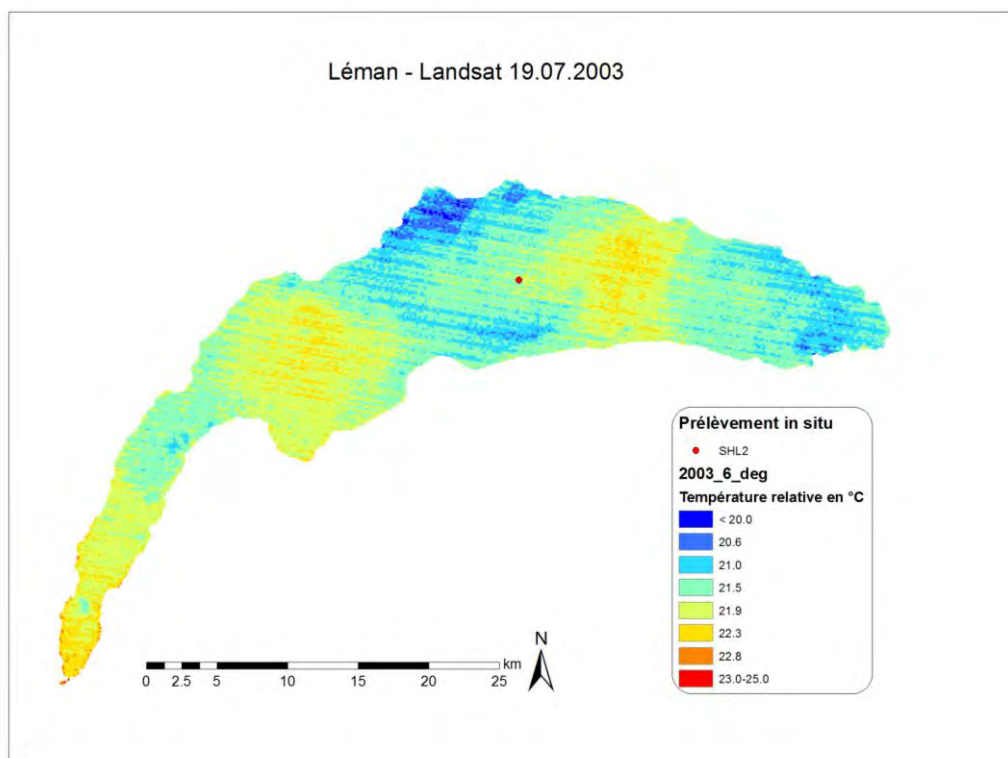


Après vérification en zoomant sur la zone du buffer de SHL2, nous constatons que les cirrus sont juste en limite et n'ont pas, à priori, impacté le signal. Le Petit-Lac se distingue fortement avec une accumulation d'eaux plus chaudes, peut-être dû à la bise. On remarque des traces de passages d'avions.

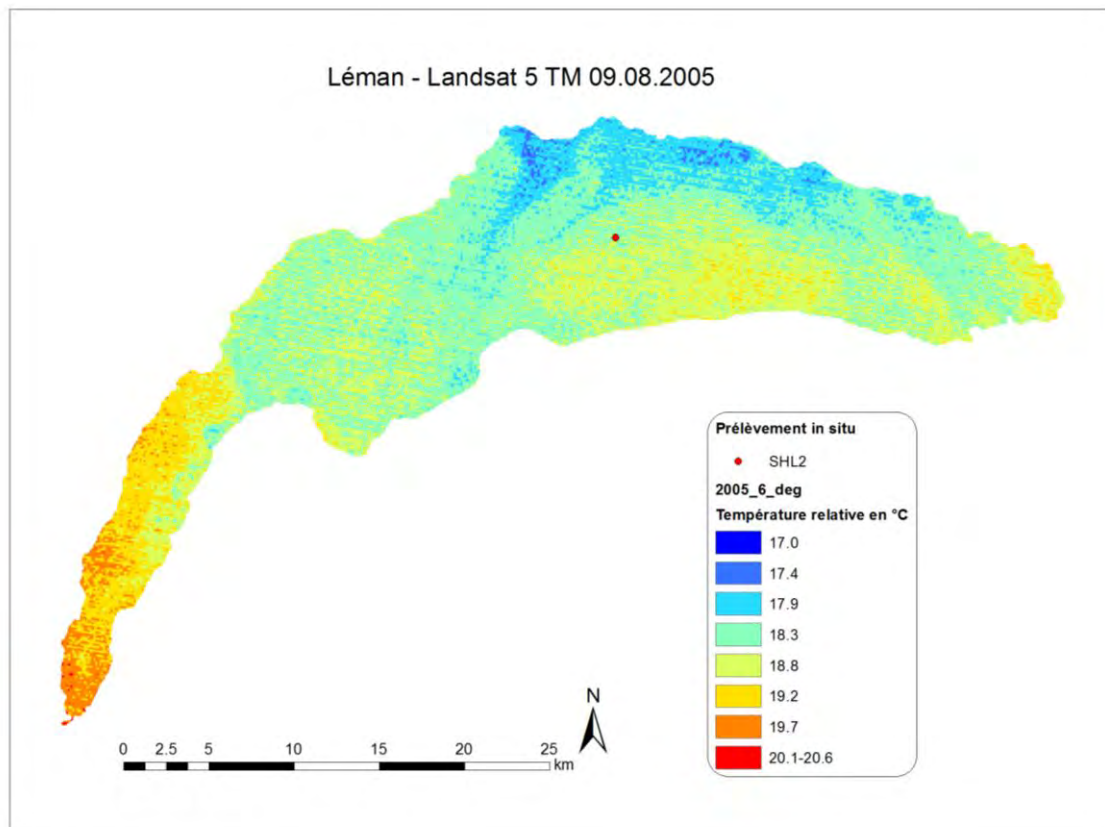




La grande zone orangée sur le Grand-Lac pourrait être due à des vents cumulant la chaleur sur le lac durant la journée.



2003 était l'année de la sécheresse. On observe deux grosses taches distinctes sur le Grand Lac séparées par une tache plus froide comme décrite par (Oesch, Jaquet, Klaus, & Schenker, 2008) On observe aussi une zone plus chaude dans le Petit Lac.



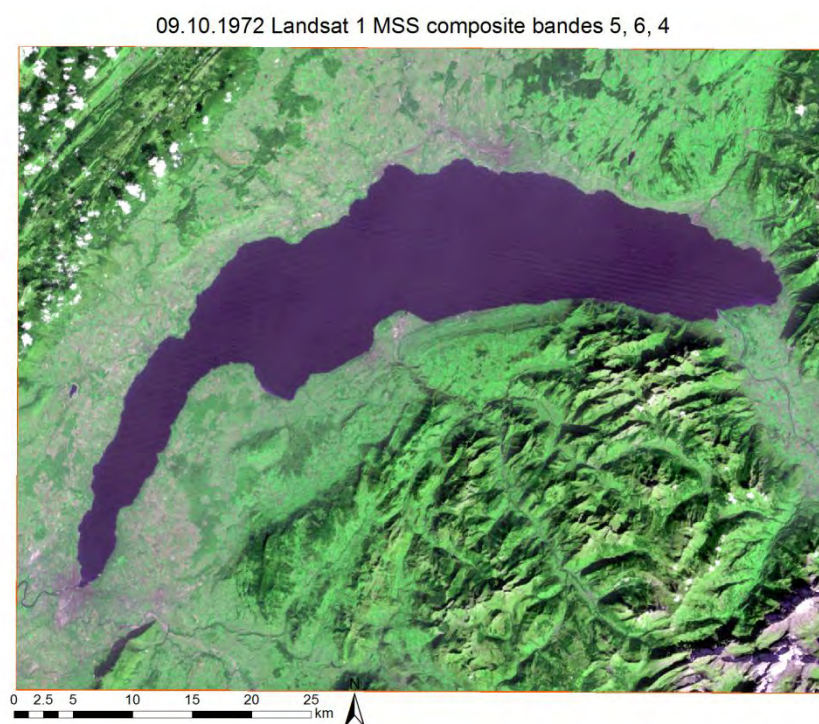
La zone bleue plus froide (à la hauteur de Morges) proviendrait de la dynamique thermique nocturne du lac avec des brises venant de la terre et refroidissant le lac (Oesch *et al.*, 2008). La journée, le lac accumule la chaleur, se réchauffe et recouvre les panaches froids nocturnes. La perte de chaleur stockée pourrait être expliquée par des épisodes de bise qui auraient interrompu le régime de brise prédominant (Oesch *et al.*, 2008) et accumulé les eaux de surfaces chaudes vers le Petit-Lac. On comprend ainsi l'utilité d'obtenir l'information de la direction du vent.

Annexe 14 Images composite Landsat 1972-2005

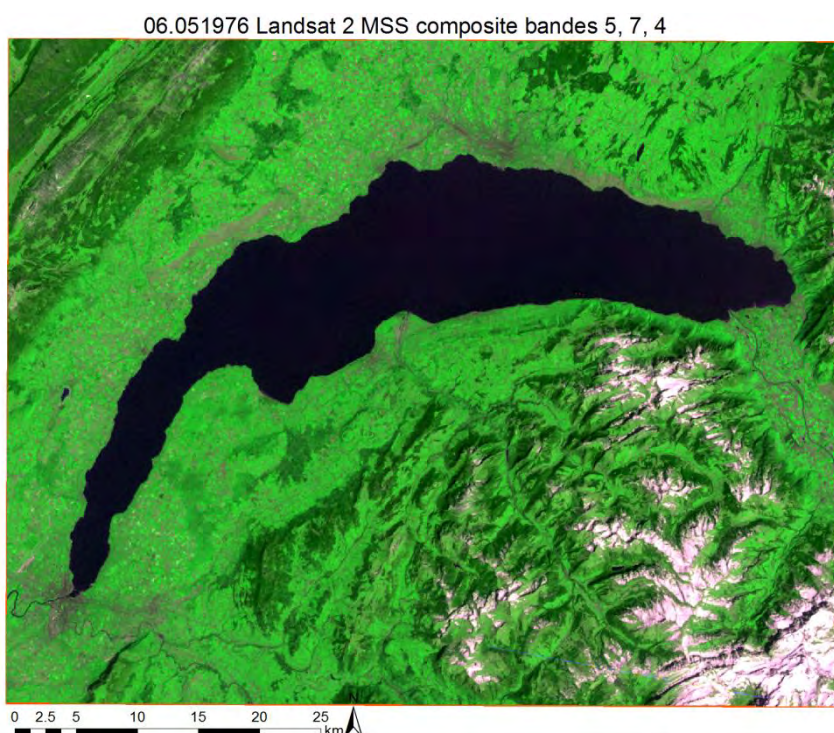
Des images composites de toutes les années ont été réalisées aux fausses couleurs ou en vraies couleurs. Contrairement aux bandes brutes parfois très foncées, elles permettent une bonne compréhension de l'image. Elles devraient être systématiquement composées et étudiées avant le début d'un processus d'analyse. Signalons que pour les années 1972, 1976 et 1984, la bande bleue n'existant, les images vraies couleurs n'ont pas pu être composées.

Dans ArcGIS: ArcToolbox > Data Management Tools > Rasters > Raster processing> Composite Bands.

1972

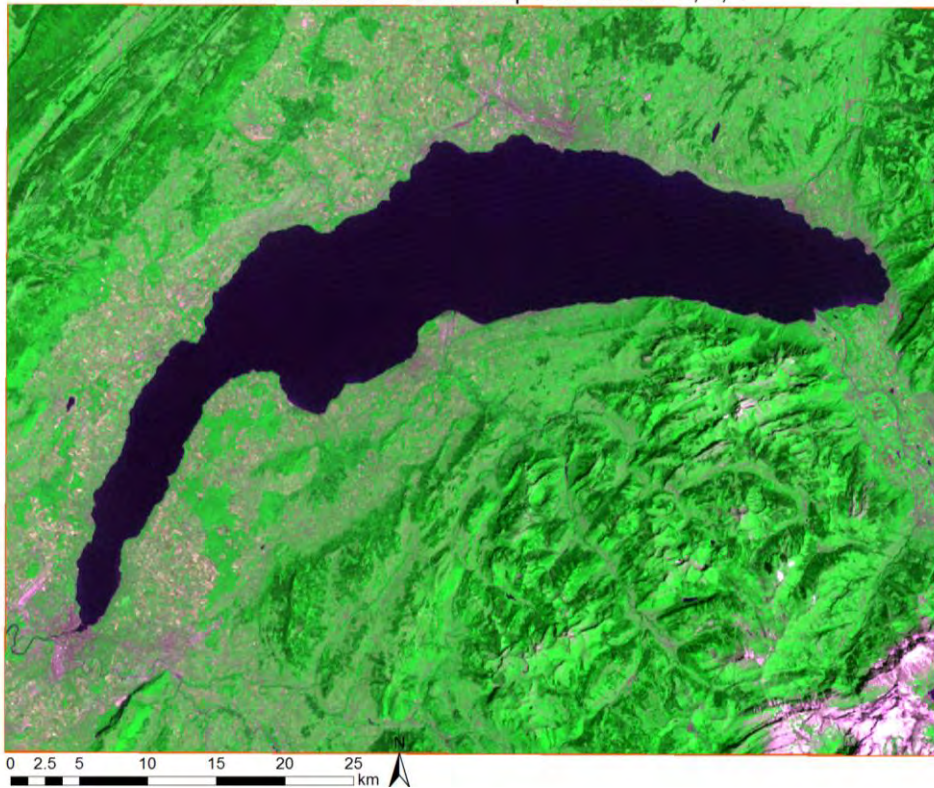


1976



1984

30.07.1984 Landsat 5 MSS composite bandes 2, 4, 1



1989

28.07.1989 Landsat 5 TM composite bandes 3, 2, 1



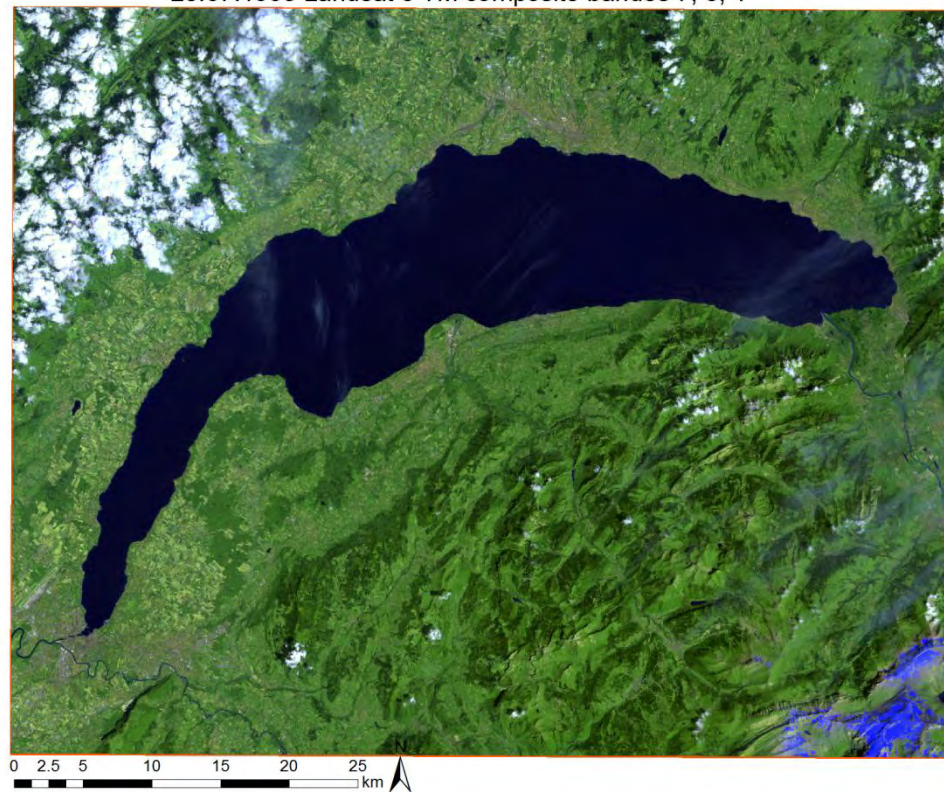
154

1993

23.07.1993 Landsat 5 TM composite vraies couleurs bandes 3, 2, 1

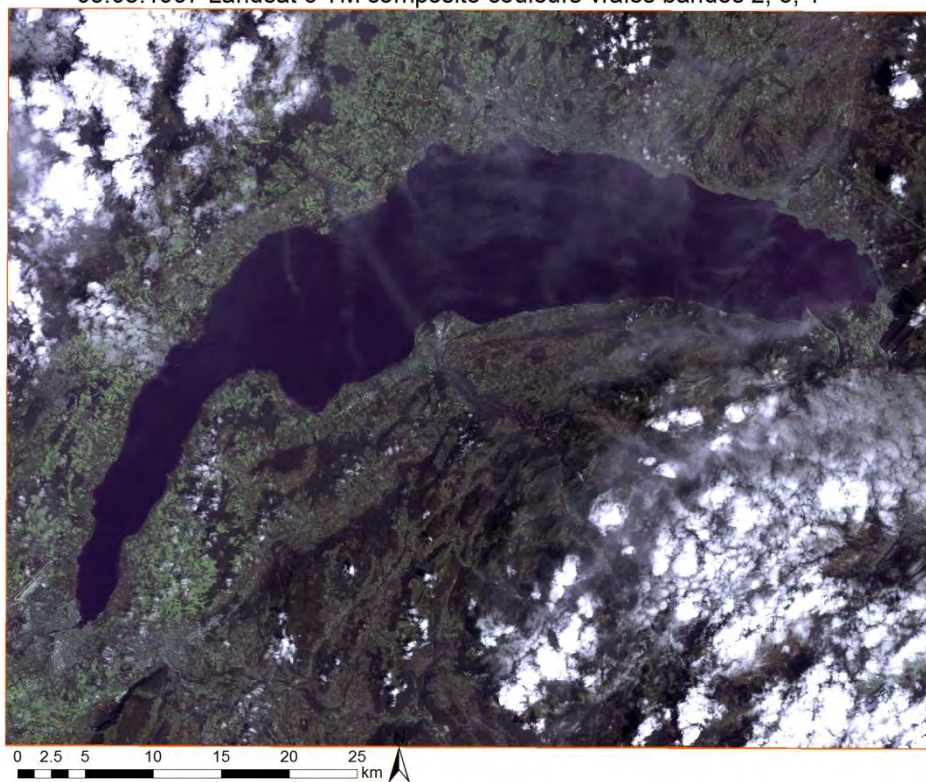


23.07.1993 Landsat 5 TM composite bandes 7, 5, 1

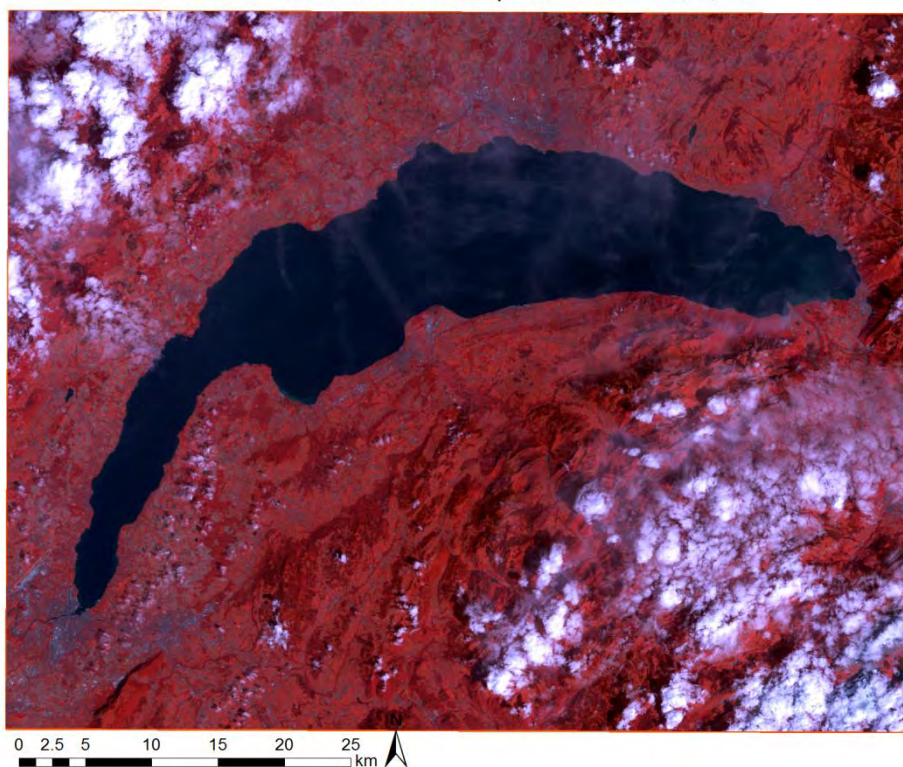


1997

03.08.1997 Landsat 5 TM composite couleurs vraies bandes 2, 3, 1

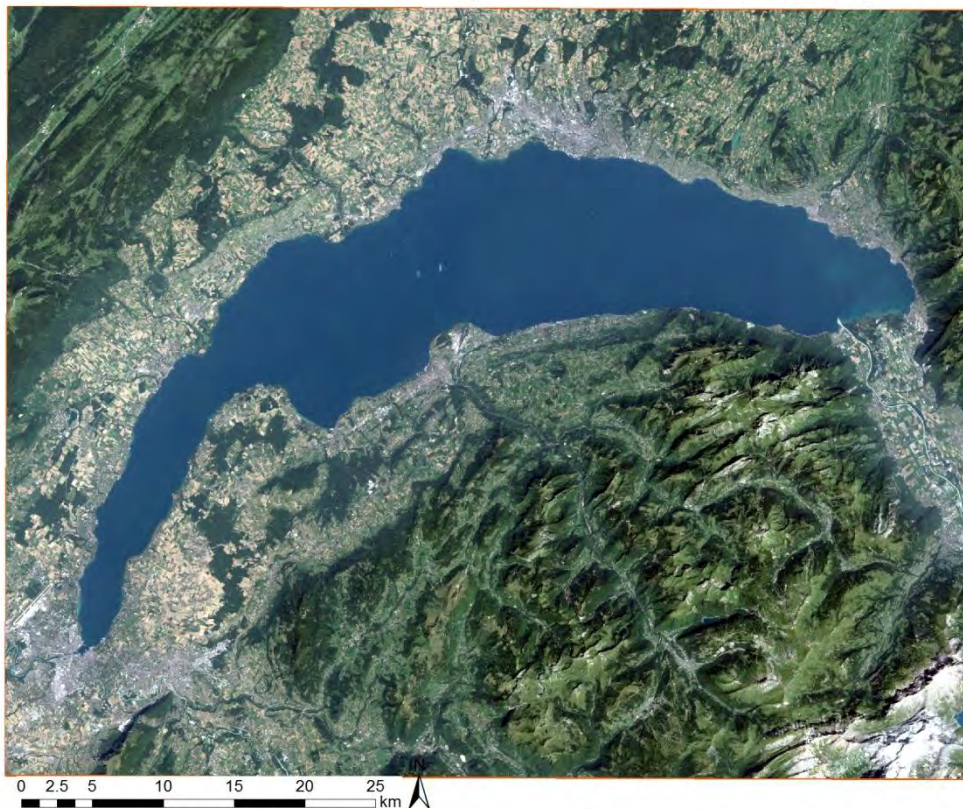


03.08.1997 Landsa 5 TMt composite bandes 4, 2, 1

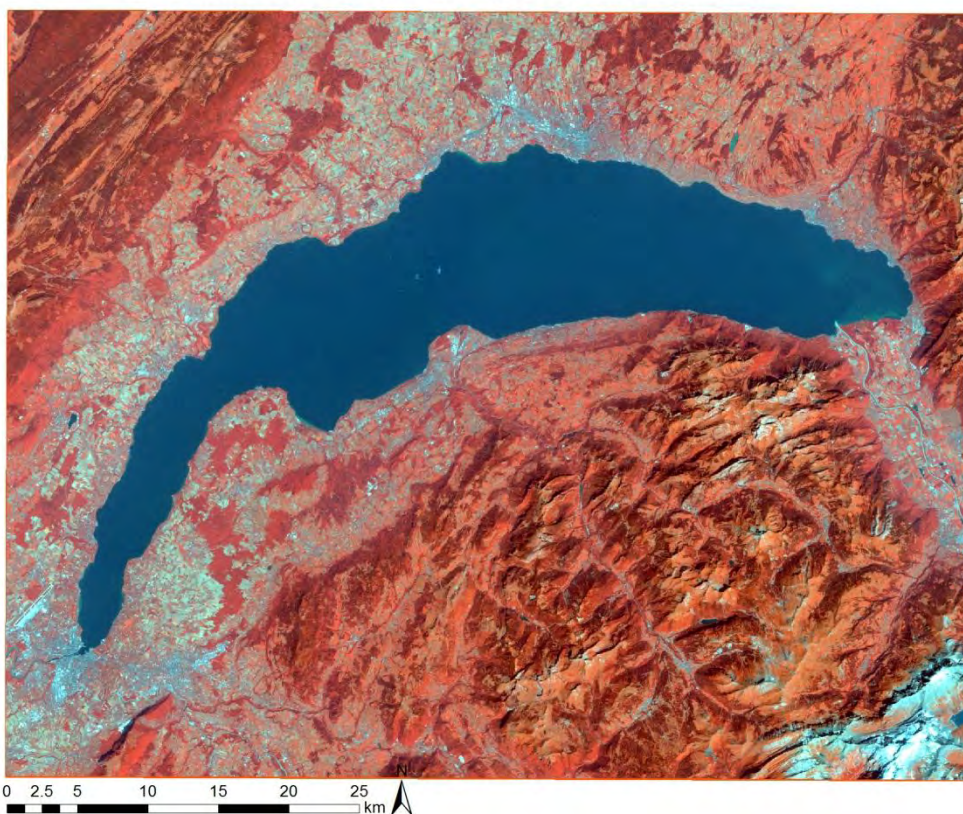


2000

19.08.2000 Landsat 7 ETM+ composite vraies couleurs bandes 2, 3, 1



19.08.2000 Landsat 5 TM composite bandes 4, 2, 1

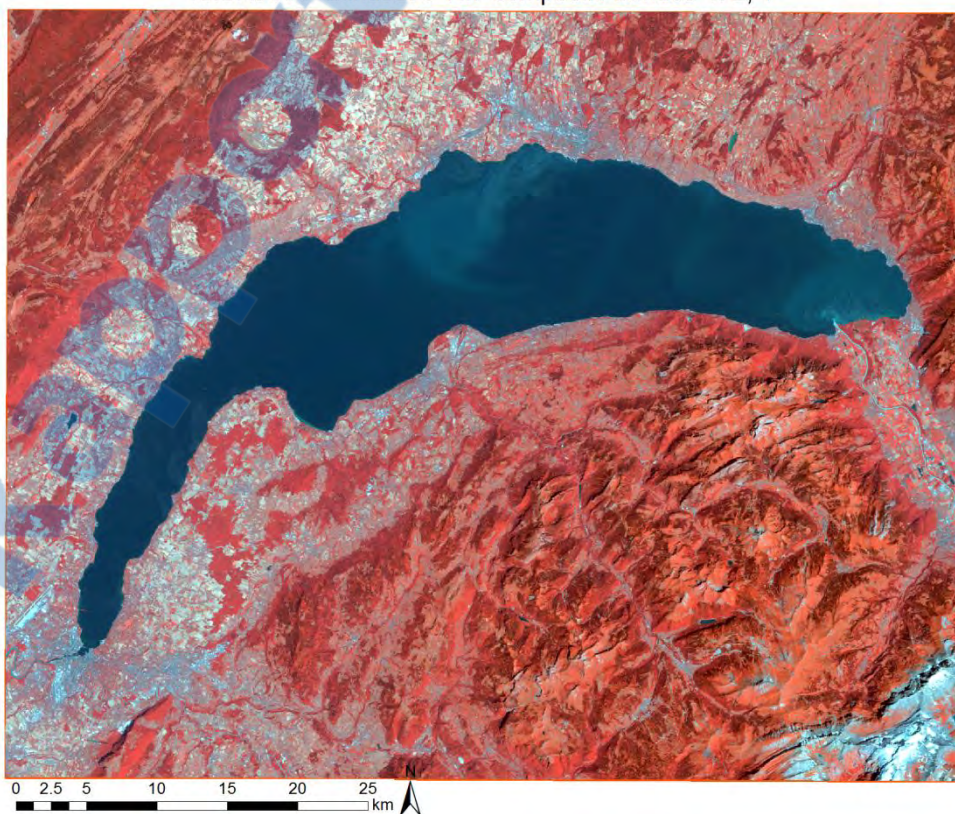


2003

19.07.2003 Landsat 5 TM composite vraies couleurs bandes 3, 2, 1



19.07.2003 Landsat 5 TM composite bandes 4. 2, 1



2005

09.08.2005 Landsat 5 TM composite vraies couleurs bandes 3, 2, 1



09.08.2005 Landsat 5 TM composite bandes 4, 2, 1



Remerciements

Ces études en géomatique n'auraient jamais pu être entreprises sans la souplesse logistique de mon mari qui a pu être là pour nos enfants lors de mes multiples absences, qu'il en soit vivement remercié. J'adresse les mêmes remerciements à ma sœur et mes amis (Valérie, Isa, Fabienne, Clovis, Martine) qui ont gardé mes enfants lors des cours les mercredis ou à d'autres moments. Un tendre merci revient à mes enfants qui m'ont encouragée lors des dernières semaines de rédaction.

Ensuite, je tenais à remercier toutes l'équipe du bureau B406 à l'ISE ainsi que les visiteurs passagers comme Karin Allenbach, qui, par leur bonne humeur et gentillesse ont rendu ce stage agréable. Je remercie plus particulièrement Martin Lacayo qui m'a assistée à plusieurs reprises lors de problèmes techniques ainsi que Nikos Alexandris pour m'avoir aidée avec le logiciel GRASS et Stéphane Goyette du groupe Climat de l'ISE pour m'avoir gentiment montré l'utilisation du logiciel Climap.

Mes plus vifs et chaleureux remerciements vont à Gregory Giuliani et à Jean-Michel Jaquet qui m'ont suivie durant le stage, m'ont donné des pistes à suivre et partagé leurs conseils d'experts.

Mes remerciements chaleureux aussi au Prof. Wunderle et à Stefan Neuhaus de l'Université de Berne pour l'obtention des quelques données AVHRR, à Ghislaine Monet et Denis Barbet pour mes diverses demandes de données *in situ* à l'INRA de Thonon-les-Bains. Et pour finir, un dernier remerciement à toute l'équipe d'enseignants du certificat en géomatique 2015 pour nous avoir enseigné toutes ces matières intéressantes ainsi qu'à notre assistant Pablo qui nous a particulièrement épaulé pendant les premières semaines des cours.