

# GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES

## Du Signal Radiometrique a la Variable Biophysique

### Chaine de Pretraitement Optique Sentinel-2 avec ESA SNAP Desktop v13

<b>Module</b>	M232 - Physique du Plasma et de la Teledetection
<b>Composante</b>	Physique de la Teledetection Optique
<b>Seance</b>	TP Pratique - Traitement de Donnees Sentinel-2
<b>Logiciel</b>	ESA SNAP Desktop v13 + Sen2Cor 2.9.0
<b>Donnees</b>	S2A_MSIL1C (Top-of-Atmosphere) / S2A_MSIL2A (corrected)
<b>Duree</b>	3 heures (6 parties structurees)
<b>Videos</b>	4 tutoriels video d'accompagnement (0-Rappel a 3-Subset)
<b>Auteurs</b>	Dr. Imad Hamdi & Dr. Zada Sara
<b>Evaluation</b>	Rapport de TP avec captures annotees (30% du CC)

**Objectif General :** Maitriser la chaine complete de pretraitement optique Sentinel-2 : correction atmospherique (Sen2Cor), harmonisation geometrique (Resampling), decoupe spatiale (Subset) et extraction d'indices spectraux (NDVI) via l'algebre de bandes. L'etudiant transformera un produit brut L1C (TOA) en mesure physique validee.

#### Equation du Transfert Radiatif :

$$L_{\text{capteur}}(\lambda) = L_{\text{atm}}(\lambda) + \tau(\lambda) \cdot L_{\text{surface}}(\lambda)$$

# Sommaire

Partie	Contenu	Video	Duree
0	Rappel : Interaction Signal-Atmosphere	0-Rappel.mov	15 min
1	Correction Atmospherique (Sen2Cor 2.9.0)	1-Correction-Atm...	30 min
2	Reechantillonnage (Resampling)	2-Resampling-sen2...	30 min
3	Decoupe Spatiale (Subset) et Visualisation RGB	3-Subset-Creation...	30 min
4	Algre de Bandes : Calcul du NDVI	-	30 min
5	Automatisation : Graph Builder	-	20 min
6	Synthese, Export et Rapport	-	15 min
	Annexes A/B/C		

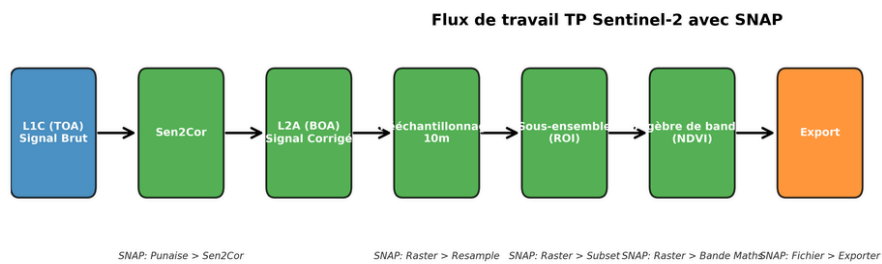


Figure 1 - Workflow synoptique du TP : L1C (brut) > Sen2Cor > L2A > Resampling > Subset > NDVI > Export.

# Partie 0 : Rappel - Interaction Signal-Atmosphere

Duree estimee : 15 minutes

■ *Video de reference : 0-Rappel.mov (30 secondes) - Rappel des concepts physiques fondamentaux*

## 0.1 Le premier obstacle : l'atmosphere

Avant d'atteindre le capteur MSI de Sentinel-2, le rayonnement solaire reflechi par la surface terrestre traverse l'atmosphere. Deux phenomenes physiques perturbent le signal :

**a) La diffusion de Rayleigh** : les molecules d'air ( $N_2, O_2$ ) diffusent le rayonnement proportionnellement a  $1/\lambda^4$ . Les courtes longueurs d'onde (bleu, 490 nm) sont 16 fois plus diffusees que le rouge (665 nm). C'est la cause principale de la **radiance de chemin** ( $L_{atm}$ ).

**b) La diffusion de Mie** : les aerosols (poussieres, gouttelettes) diffusent le rayonnement de maniere quasi-independante de la longueur d'onde. Cette composante est variable et depend des conditions atmospheriques locales.

## 0.2 Le modele de mesure : du Soleil au capteur

Le signal mesure par le capteur se decompose en deux contributions :

$$L_{\text{capteur}} = L_{\text{atm}} \text{ (radiance de chemin)} + \tau \cdot L_{\text{surface}} \text{ (signal utile)}$$

L'objectif de la correction atmospherique est d'estimer et soustraire  $L_{atm}$  pour isoler  $L_{surface}$ , la grandeur physique d'interet. Le processeur **Sen2Cor** realise cette operation en modelisant les proprietes optiques de l'atmosphere (epaisseur optique, type d'aerosol, vapeur d'eau).

## 0.3 Verification de l'environnement SNAP

1	<b>Lancer SNAP v13</b>	Double-cliquez sur l'icone SNAP Desktop. Verifiez la version dans <b>Help &gt; About SNAP</b> . Ce TP utilise SNAP 13 (comme dans les videos de formation).
2	<b>Verifier Sen2Cor</b>	Menu : <b>Optical &gt; Thematic Land Processing &gt; Sen2Cor Processor</b> . Version requise : <b>Sen2Cor 2.9.0</b> . Si absent : <b>Tools &gt; Manage External Tools</b> .
3	<b>Memoire</b>	<b>Tools &gt; Options &gt; Performance</b> : allouez 4 Go minimum (8 Go recommande).

# Partie 1 : Correction Atmospherique avec Sen2Cor

Duree estimee : 30 minutes

■ *Video de reference : 1-Correction-Athmospherique-Sen2cor.mov (4 min 14 s) - Demonstration complete de la procedure*

## 1.1 Importation du produit L1C

Le produit L1C contient la radiance au sommet de l'atmosphere (TOA - Top of Atmosphere), calibree radiometriquement et georeferencee, mais **non corrigee atmospheriquement**.

*Chemin SNAP : File > Open Product > selectionner MTD\_MSIL1C.xml*

1	<b>Ouvrir le L1C</b>	Menu : <b>File &gt; Open Product</b> . Naviguez vers le dossier de donnees. Selectionnez <b>MTD_MSIL1C.xml</b> (fichier de metadonnees principal).
2	<b>Explorer la structure</b>	Dans le <b>Product Explorer</b> , deployez l'arborescence : Metadata, Index Codings, Vector Data, Tie-Point Grids, <b>Bands</b> , Masks. Les bandes B1-B12 + B8A apparaissent, groupees par resolution.
3	<b>Premiere visualisation</b>	Double-cliquez sur <b>B4 (Rouge, 665 nm, 10 m)</b> . Utilisez l'onglet <b>Colour Manipulation</b> pour ajuster le contraste. L'onglet <b>Pixel Info</b> affiche les valeurs spectrales au survol.

✓ *Conseil : Comme montre dans la video, l'onglet World View permet de situer votre tuile geographiquement.*

## 1.2 Configuration et execution de Sen2Cor 2.9.0

*Chemin SNAP : Optical > Thematic Land Processing > Sen2Cor Processor*

Sen2Cor est un processeur autonome (standalone) qui convertit les produits L1C en L2A. Comme montre dans la video de formation, les parametres suivants sont essentiels :

Parametre	Valeur	Justification
Resolution	ALL (10m + 20m + 60m)	Traite toutes les bandes spectrales
Aerosol Type	RURAL	Adapte aux zones continentales et rurales
Mid Latitude	SUMMER	Correspond a la saison d'acquisition
Nb Threads	1	Stabilite (augmenter si machine puissante)
Scene Option	Scene only	Traitement de la scene complete
L2A_GIPP	Par default	Fichier de configuration standard ESA

1	<b>Onglet I/O Parameters</b>	Selectionnez le produit L1C comme <b>Source Product</b> . Le repertoire de sortie est configure automatiquement.
2	<b>Onglet Processing</b>	Configurez les parametres selon le tableau ci-dessus : Resolution = ALL, Aerosol = RURAL, Mid Latitude = SUMMER.

<b>3</b>	<b>Executer</b>	Cliquez <b>Run</b> . Duree : 10-20 min selon la machine. Un message confirme : 'The target product has been created and opened in SNAP 13'.
<b>4</b>	<b>Ouvrir le L2A</b>	Le produit L2A (S2A_MSI2A) apparait automatiquement dans le Product Explorer. Sa structure est identique au L1C mais les valeurs sont des <b>reflectances de surface (BOA)</b> .

■ Le produit L2A genere contient un fichier .dim et un dossier .data. Ne deplacez jamais l'un sans l'autre !

### 1.3 Validation par Scatter Plot

C'est l'etape cruciale de validation scientifique. Le Scatter Plot compare pixel a pixel la meme bande entre L1C et L2A, demontrant visuellement l'effet de la correction atmospherique.

*Chemin SNAP : Analysis > Scatter Plot*

<b>1</b>	<b>Ouvrir Scatter Plot</b>	Menu : <b>Analysis &gt; Scatter Plot</b> .
<b>2</b>	<b>Axe X</b>	Bande <b>B2 (Bleu, 490 nm)</b> du produit <b>L1C (TOA)</b> .
<b>3</b>	<b>Axe Y</b>	Bande <b>B2 (Bleu, 490 nm)</b> du produit <b>L2A (BOA)</b> .
<b>4</b>	<b>Interpreter</b>	Tous les points doivent etre <b>sous la diagonale 1:1</b> . Le decalage = $L_{atm}$ soustraite par Sen2Cor. Bande B2 choisie car maximale affectee (Rayleigh $\sim 1/4$ ■).
<b>5</b>	<b>Annoter</b>	Capturer et annoter : diagonale 1:1, zone de decalage, equation physique.

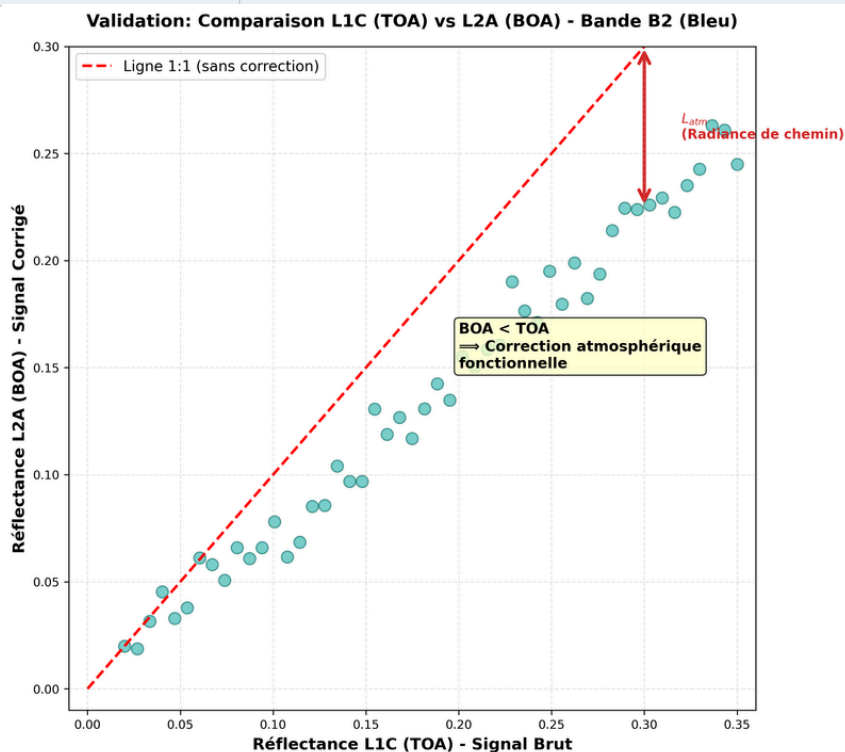


Figure 2 - Scatter Plot L1C vs L2A (bande B2). L'offset sous la diagonale prouve la soustraction de  $L_{atm}$  par Sen2Cor.

 Livrable : Capture d'ecran annotee du Scatter Plot L1C vs L2A (bande B2) avec identification de  $L_{atm}$ .

Dr. Imad Hamdi & Dr. Zada Sara  
Module M232 - Faculte des Sciences El Jadida

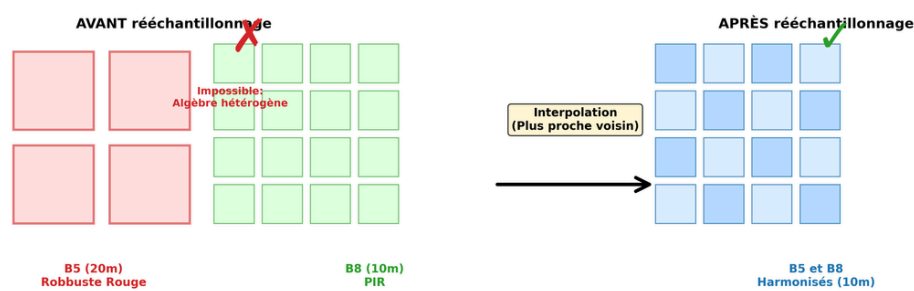
# Partie 2 : Reechantillonnage Geometrique (Resampling)

Duree estimee : 30 minutes

■ *Video de reference : 2-Resampling-sen2-Images.mov (3 min 37 s) - Procedure complete de resampling*

## 2.1 Probleme de l'incompatibilite matricielle

Sentinel-2 MSI acquiert 13 bandes a trois resolutions : 10 m (B2, B3, B4, B8), 20 m (B5-B7, B8A, B11, B12) et 60 m (B1, B9, B10). Ces matrices ont des dimensions differentes : 10980x10980 (10 m), 5490x5490 (20 m) et 1830x1830 (60 m). Il est **mathematiquement impossible** d'effectuer une algebre de bandes entre des matrices de tailles differentes.



Condition préalable pour l'algèbre de bandes: Toutes les bandes doivent avoir la même résolution spatiale

Figure 3 - Harmonisation des grilles multi-resolution vers une grille unique.

## 2.2 Configuration du Resampling

*Chemin SNAP : Raster > Geometric > Resampling*

Comme montre dans la video, l'outil Resampling comporte deux onglets : I/O Parameters et Resampling Parameters.

Parametre	Valeur (video)	Explication
Source Product	S2A_MSI2A	Le produit L2A corrige atmospheriquement
Define size by	Reference band from source	Alignement sur une bande existante
Reference Band	B2 (10 m)	Resolution la plus fine pour ne pas perdre d'information
Upsampling Method	Nearest (Neighbour)	Conserve les valeurs radiometriques originales
Downsampling Method	First	Premier pixel de la maille
Resample on pyramid	Oui (coche)	Accelere l'affichage par niveaux de zoom
Target dimensions	10980 x 10980 px	Resolution 10 m sur toute la tuile (100 km)

1	Ouvrir Resampling	Menu : <b>Raster &gt; Geometric &gt; Resampling</b> . Sélectionnez le produit L2A.
2	I/O Parameters	Source : S2A_MSI2A. Le nom cible est genere automatiquement avec le suffixe <b>_resampled</b> . Format : BEAM-DIMAP.
3	Resampling Parameters	Cochez <b>By reference band from source product</b> . Sélectionnez <b>B2</b> (10 m). Upsampling : <b>Nearest</b> . Downsampling : <b>First</b> .
4	Executer	Cliquez <b>Run</b> . Message de confirmation : 'The target product has successfully been created and opened in SNAP 13'.
5	Sauvegarder	<b>CRUCIAL</b> : le produit est virtuel ! Sauvegardez immédiatement via <b>File&gt;Save Product</b> .

■ **Le produit reechantillonne est virtuel (en memoire). Si vous fermez SNAP sans sauvegarder, tout le traitement est perdu ! Sauvegardez en BEAM-DIMAP (.dim + .data).**

📎 **Livrable** : Capture d'ecran du Product Explorer montrant que toutes les bandes ont la meme dimension matricielle (10980 x 10980 pixels).

# Partie 3 : Decoupe Spatiale (Subset) et Visualisation RGB

Duree estimee : 30 minutes

■ *Video de reference : 3-Subset-Creation.mp4 / .mov (4 min 37 s) - Creation du sous-ensemble et composites RGB*

## 3.1 Justification de la decoupe

Une tuile Sentinel-2 complete couvre 100x100 km et peut dépasser 1 Go en memoire. Le Subset (sous-ensemble) permet de se concentrer sur la zone d'interet (ROI) et d'optimiser les ressources de calcul.

## 3.2 Visualisation RGB prealable

Comme montre dans la video, avant de decouper, il est recommande de visualiser le produit en composition coloree pour identifier la zone d'interet.

*Chemin : Clic droit sur le produit > Open RGB Image Window*

1	<b>Ouvrir RGB</b>	Clic droit sur le produit reechantillonne > <b>Open RGB Image Window</b> .
2	<b>Choisir le profil</b>	Dans la boite de dialogue <b>Select RGB-Image Channels</b> , selectionnez le profil <b>Sentinel 2 MSI Natural Colors</b> . Ce profil assigne automatiquement : R = B4, G = B3, B = B2.
3	<b>Cocher l'option</b>	Cochez ' <b>Store RGB channels as virtual bands</b> ' pour eviter de dupliquer les donnees.
4	<b>Naviguer</b>	Utilisez la molette pour zoomer. Le panneau de navigation (coin superieur droit) montre la position dans la tuile complete.

Recettes de Composites Multispectraux Sentinel-2

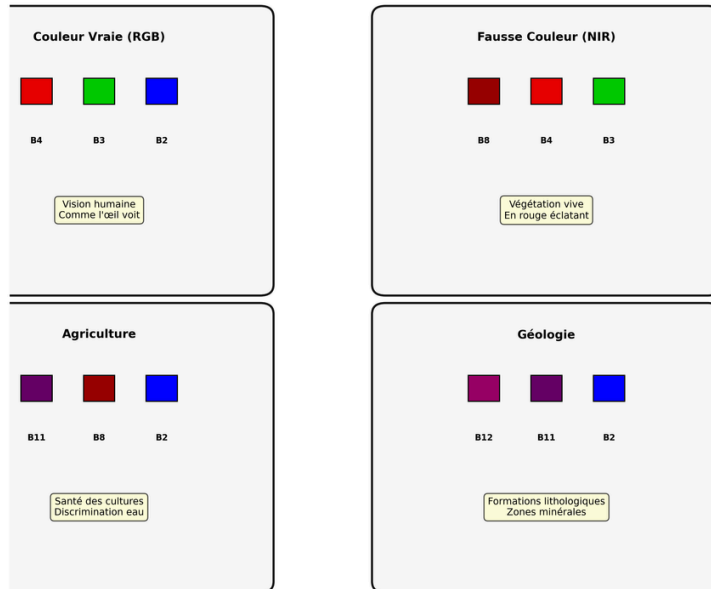


Figure 4 - Recettes de compositions colorees RGB pour differentes applications thematiques.

### 3.3 Creation du Subset

Chemin SNAP : Raster > Subset

1	Ouvrir Subset	Menu : <b>Raster &gt; Subset</b> .
2	Spatial Subset	Onglet <b>Spatial Subset</b> : definissez la zone par coordonnees pixel ou coordonnees geographiques (lat/lon).
3	Band Subset	Onglet <b>Band Subset</b> : ne conservez que les bandes utiles (B2, B3, B4, B5, B8, B11, B12) pour reduire la taille.
4	Valider	Cliquez <b>OK</b> . Le sous-ensemble est cree.
5	Verifier les statistiques	Utilisez <b>Analysis &gt; Statistics</b> pour verifier les valeurs de chaque bande (min, max, moyenne, ecart-type).
6	Sauvegarder	Sauvegardez via <b>File &gt; Save Product</b> en BEAM-DIMAP.

✓ **Conseil** : Comme visible dans la video, les statistiques montrent les plages de valeurs de reflectance pour chaque bande. Verifiez que les valeurs sont dans [0, 1].

📎 **Livrable** : Capture d'ecran du subset en couleurs naturelles + statistiques d'une bande.

# Partie 4 : Algebre de Bandes - Calcul du NDVI

Duree estimee : 30 minutes

## 4.1 Principe physique

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) exploite le contraste entre le rouge (B4, 665 nm), fortement absorbe par la chlorophylle, et le proche infrarouge (B8, 842 nm), fortement reflechi par la structure cellulaire des feuilles.

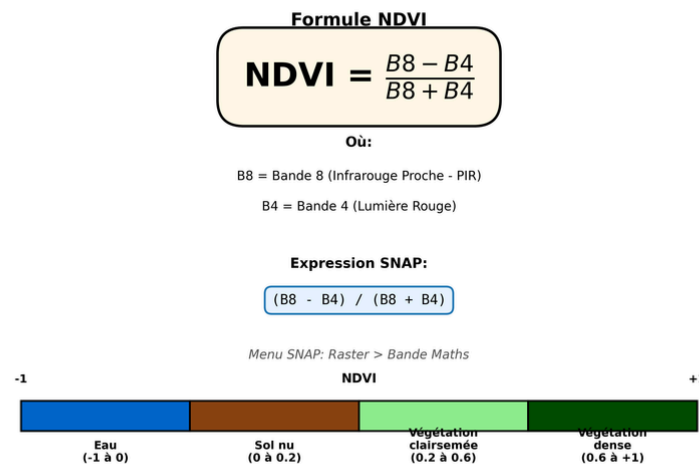


Figure 5 - Formule NDVI et echelle d'interpretation.

## 4.2 Implementation dans SNAP

Chemin SNAP : Raster > Band Maths

<b>1</b>	<b>Ouvrir Band Maths</b>	Menu : <b>Raster &gt; Band Maths</b> sur le produit subset reechantillonne.
<b>2</b>	<b>Nommer la bande</b>	Target Product : <b>NDVI</b> .
<b>3</b>	<b>Expression</b>	Saisir : <b>(B8 - B4) / (B8 + B4)</b> . B8 = PIR (842 nm, 10 m) et B4 = Rouge (665 nm, 10 m). Les deux bandes sont a 10 m grace au resampling prealable.
<b>4</b>	<b>Executer</b>	Cliquez <b>OK</b> . La bande NDVI est ajotee au produit.
<b>5</b>	<b>Palette de couleurs</b>	Clic droit sur NDVI > <b>Colour Manipulation</b> . Appliquez un degrade : bleu (eau) > brun (sol nu) > vert (vegetation).
<b>6</b>	<b>Statistiques</b>	Utilisez <b>Analysis &gt; Statistics</b> pour verifier : valeurs dans [-1, +1], moyenne attendue entre 0.1 et 0.5 selon le paysage.
<b>NDVI</b>	<b>Surface</b>	<b>Interpretation physique</b>

< 0	Eau, neige	Reflectance PIR < reflectance Rouge
0 - 0.1	Sol nu, roche	Pas d'activite chlorophyllienne
0.1 - 0.3	Vegetation clairsemee	Faible densite foliaire (LAI < 1)
0.3 - 0.6	Vegetation moderee	Cultures, prairies (LAI 1-3)
> 0.6	Vegetation dense	Forets, cultures irriguees (LAI > 3)

**Livrable : 1) Carte NDVI avec palette adaptee. 2) Statistiques (min, max, moyenne, ecart-type). 3) Interpretation thematique de 3 zones identifiees.**

Dr. Imad Hamdi & Dr. Zada Sara  
Module M232 - Faculte des Sciences El Jadida

## Partie 5 : Automatisation - Graph Builder

Duree estimee : 20 minutes

### 5.1 Principe de l'automatisation

Le Graph Builder permet d'enchaîner automatiquement plusieurs opérateurs dans un pipeline graphique, exportable en XML et exécutable en ligne de commande (**gpt**).

*Chemin SNAP : Tools > Graph Builder*

1	Ouvrir Graph Builder	Menu : <b>Tools &gt; Graph Builder</b> .
2	Ajouter les noeuds	Clic droit > <b>Add Operator</b> : Read > Resample > Subset > BandMaths > Write
3	Connecter	Glissez les fleches entre les sorties et les entrees de chaque operateur.
4	Configurer	Double-cliquez sur chaque noeud pour definir ses parametres.
5	Executer	Cliquez <b>Run</b> . Le pipeline complet s'execute.
6	Sauvegarder le graphe	<b>File &gt; Save Graph</b> en XML. Reutilisable en ligne de commande : <b>gpt mon_graphe.xml</b> .

📎 **Livrable** : Capture d'ecran du graphe : **Read > Resample > Subset > BandMaths > Write**.

## Partie 6 : Synthèse, Export et Rapport

Duree estimee : 15 minutes

### 6.1 Export

*File > Export > GeoTIFF / PNG*

1	GeoTIFF	File > Export > GeoTIFF. Conserve les metadonnees geographiques.
2	Image PNG	File > Export View as Image. Resolution 300 DPI pour le rapport.

### 6.2 Bareme du rapport de TP

Section	Contenu attendu	Pts
Introduction	Objectif, donnees (satellite, date, tuile), logiciel	2
Partie 1	Correction atmospherique : Scatter Plot annote + equation physique	5
Partie 2	Resampling : justification + preuve (dimensions matricielles)	3
Partie 3	Subset + 2 compositions RGB comparees	3
Partie 4	NDVI : carte + stats + interpretation de 3 zones	5
Conclusion	Synthese, limites de l'approche, perspectives	2
	<b>TOTAL</b>	<b>20</b>

### 6.3 Questions de reflexion

#	Question
Q1	Pourquoi la bande B2 (Bleu) montre-t-elle le decalage le plus important dans le Scatter Plot ?
Q2	Que se passerait-il si l'on calculait le NDVI directement sur le produit L1C (sans correction) ?
Q3	Pourquoi choisit-on Nearest Neighbour pour le resampling en teledetection quantitative ?
Q4	Quel indice spectral utiliseriez-vous pour cartographier les surfaces en eau ? Proposez la formule.
Q5	Quels sont les avantages du Graph Builder pour le traitement de series temporelles Sentinel-2 ?

# Annexes

## Annexe A : Les 13 bandes Sentinel-2 MSI

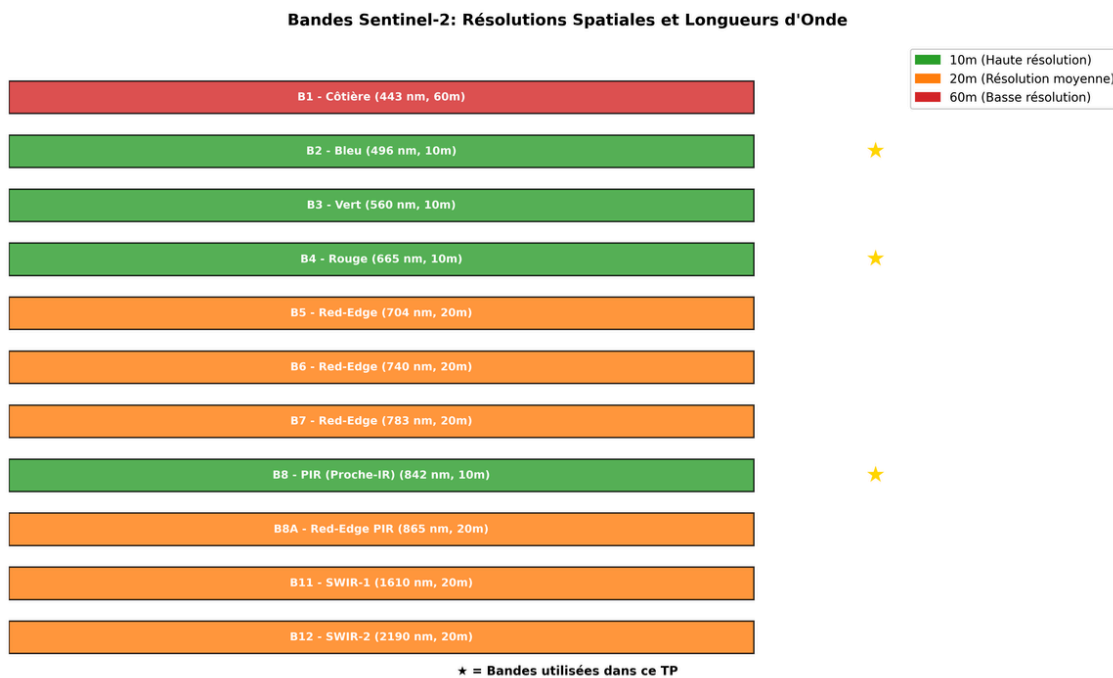


Figure 6 - Bandes spectrales Sentinel-2 MSI par resolution spatiale.

Bande	Longueur d'onde (nm)	Res.	Usage
B1	443 (Coastal)	60 m	Aerosols
B2 *	490 (Bleu)	10 m	Scatter Plot, composites
B3	560 (Vert)	10 m	Composites RGB
B4 *	665 (Rouge)	10 m	Chlorophylle, NDVI
B5	705 (Red-edge)	20 m	Phenologie
B6	740 (Red-edge)	20 m	Phenologie
B7	783 (Red-edge)	20 m	Phenologie
B8 *	842 (PIR)	10 m	Structure foliaire, NDVI
B8A	865 (PIR étroit)	20 m	Vegetation
B9	940 (Vapeur eau)	60 m	Atmosphérique
B10	1375 (Cirrus)	60 m	Nuages
B11	1610 (SWIR 1)	20 m	Humidité, géologie
B12	2190 (SWIR 2)	20 m	Minéraux

\* = bandes utilisées dans ce TP. Vert = 10 m | Blanc = 20 m/60 m

## Annexe B : Glossaire terminologique

Terme correct	A éviter	Explication
Matrice de radiance	Image / photo	Donnee quantitative calbree
Correction atmospherique	Nettoyage	Soustraction physique de L_atm
Reflectance de surface	Signal propre	Grandeur sans dimension [0,1]
Reeechantillonnage	Redimensionnement	Interpolation geometrique
Algre de bandes	Combinaison	Operations matricielles pixel a pixel
Acquisition / donnee	Image satellite	Resultat de mesure calbree

## Annexe C : Raccourcis SNAP

Raccourci	Action
Ctrl+O	Ouvrir un produit
Ctrl+S	Sauvegarder
Ctrl+Shift+E	Export GeoTIFF
F5	Rafraichir
Molette	Zoom
Clic molette + glisser	Panoramique