

# DOCUMENT TECHNIQUE

## - EO4DROUGHTMONITORING -

### Projet Fonds Pacifique

- Suivi de la sécheresse dans les territoires insulaires du Pacifique -

Date	Version	Auteurs	Commentaires
03/08/2022	1.0	OEIL - INSIGHT - IRD	Doc technique co-construit
22/08/2022	1.1	OEIL - INSIGHT	Phasage du projet, livrables
22/09/2022	1.2	OEIL - INSIGHT	Final



---

## Table des matières

---

1. CONTEXTE .....	5
2. L'ETUDE.....	5
2.1. Objectif.....	5
2.2. Un indicateur pour le suivi de la sécheresse végétale par télédétection .....	6
2.3. Partenaires techniques, scientifiques et thématiques.....	8
2.4. Déroulement de l'étude .....	9
2.4.1. Phase 0 : Septembre – Octobre 2023 .....	9
2.4.2. Phase 1 : Novembre 2022 – Avril 2023 .....	9
2.4.3. Phase 2 : Avril – Septembre 2023.....	9
2.4.4. Phases 3 et 4 : Septembre – Décembre 2023.....	9
3. Mise en production opérationnelle sur la Nouvelle-Calédonie .....	11
3.1. Zone d'étude et données sources.....	11
3.2. Production de l'indicateur actuel .....	14
3.3. Production de l'indicateur prévisionnel .....	16
3.4. Actualisation et livraison des produits .....	16
3.5. Description technique des chaînes : code, librairies, format des données, etc..	18
3.5.1. Fonctionnement à date : V1_SCO .....	18
3.5.2. Modifications pour industrialisation : V2_FP .....	20
4. Construction et validation de l'indicateur sur les territoires du Pacifique .....	21
4.1. Zones d'étude et données sources.....	21
4.2. Méthodologie .....	24
5. Valorisation de l'indicateur sécheresse, des alertes et des prévisions .....	26
5.1. Outils de visualisation de l'OEIL .....	26
5.2. Indexation des données pour le système d'information décisionnel de l'OEIL ..	26
6. Annexes.....	27
Annexe 1 : Infrastructure IT.....	27
Annexe 2 : Planification détaillée .....	28
7. Références bibliographiques.....	32

---

## Liste des figures

---

Figure 1 : Le système pour le suivi et la prévision de la sécheresse dans les territoires du Pacifique .....	7
Figure 2 : Planning prévisionnel.....	10
Figure 3 : Zone d'étude en Nouvelle-Calédonie et Occupation/Usage des sols 2020 ( <i>ESRI Land Cover, 2020</i> ).....	11
Figure 4 : Chaîne de production de l'indicateur sécheresse sur la Nouvelle-Calédonie...	14
Figure 5 : Chronogramme pour l'actualisation et la livraison des produits sur la Nouvelle-Calédonie.....	17
Figure 6 : Territoires français du Pacifique sélectionnés pour la construction de l'indicateur de sécheresse ( <i>Météo-France</i> ).....	21
Figure 7 : Îles d'Efaté et Espiritu Santo au Vanuatu pour le test et l'adaptation de l'indicateur sur un territoire étranger ( <i>CNES/Airbus/Planet Observer - Copernicus</i> ) .....	22

---

## Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Produits pour la production d'indicateurs actuels de sécheresse en Nouvelle-Calédonie.....	12
Tableau 2 : Volume de données nécessaire à la production de l'indicateur sur la Nouvelle-Calédonie.....	13
Tableau 3 : Format des produits d'entrée et de sortie de chaque chaîne pour la production de l'indicateur sur la Nouvelle-Calédonie .....	19
Tableau 4 : Modifications pour industrialisation des chaînes.....	20
Tableau 5 : Volume de données nécessaire à la construction de l'indicateur sur les territoires du Pacifique. Ici sont précisées uniquement les données qui présentent un volume important (images haute résolution).....	24

Le présent document, réalisé par l'OEIL, INSIGHT et l'IRD Nouvelle-Calédonie, consiste en **un document technique présentant les aspects thématiques et techniques pour la mise en œuvre d'un indicateur de sécheresse végétale** dans le cadre du projet Fonds Pacifique EO4DroughtMonitoring (EO4DM).

## 1. CONTEXTE

Les événements extrêmes de plus en plus présents dans le Pacifique (phénomènes El Nino/La Nina) ont des conséquences non négligeables sur les territoires insulaires. L'effet du changement climatique et des épisodes de sécheresse est donc au centre des préoccupations dans de nombreuses îles du Pacifique ([Vanuatu](#), [Wallis-et-Futuna](#), [Polynésie Française](#), etc.). Les événements de sécheresse intenses ont des impacts indéniables sur la biodiversité, sur les cultures agricoles et la ressource en eau comme cela a pu être le cas en 2019 pour la [Nouvelle-Calédonie](#).

Les projections en Nouvelle-Calédonie tablent sur une possible augmentation des températures de 3°C et un déficit hydrique de 20 % en 2100 avec des épisodes de sécheresse plus longs et plus intenses et une disparité côte ouest/côte est encore plus importante (*Dutheil, 2018*). Actuellement, le suivi et l'anticipation de ces épisodes de sécheresse se fait via des mesures météorologiques informant sur le déficit pluvieux et non pas sur le stress hydrique des plantes. Par ailleurs, les données sont uniquement disponibles sur quelques points de mesure et ne sont pas continues sur les territoires.

Un outil de suivi de la sécheresse environnementale et agricole à partir d'images satellites et de données météorologiques a été développé et évalué en Nouvelle-Calédonie : projet Earth Observations for Drought Monitoring ([EO4DM](#)). Ce projet labellisé SCO (*Space Climate Observatory*) et financé par le CNES a été réalisé en collaboration avec Météo-France NC en tant que partenaire technique et l'Agence Rurale en tant qu'utilisateur final, et fournit un outil d'aide à la décision aux institutions et d'aide à la gestion pour les agriculteurs. Les indicateurs développés constituent une source d'informations singulièrement importante dont les valorisations et apports peuvent être multiples : agriculture, gestion des ressources (eau), sécurité (surveillance des risques liés aux inondations, incendies), environnement, etc.

## 2. L'ETUDE

### 2.1. Objectif

Le projet proposé ici s'inscrit dans la continuité du travail mené sur la Nouvelle-Calédonie avec comme objectif principal de démontrer l'applicabilité et l'utilité d'un tel outil dans d'autres territoires insulaires du Pacifique. La démarche globale est ainsi de disposer d'un procédé adapté pour l'ensemble des territoires insulaires du Pacifique et qui pourra être délivré en libre accès de façon opérationnelle en lien avec les acteurs centraux de la région (notamment [AUS/DataCube](#) et [CPS/Digital Earth Pacific](#)). L'ensemble des livrables sera mis à disposition de la communauté sous licence [CREATIVE COMMONS de type Attribution-NonCommercial-ShareAlike \(CC BY-NC-SA 4.0\)](#). En Nouvelle-Calédonie,

l'indicateur sécheresse sera intégré à un système d'information décisionnelle environnementale de l'OEIL, permettant d'effectuer des croisements d'informations selon différents territoires analysés (Province, commune, bassin versant...).

Le projet présenté ici vise :

- à mettre en production l'indicateur sur la Nouvelle-Calédonie et à le valoriser via des interfaces numériques et services de consultation et de mise à disposition des données pour l'ensemble de la communauté.
- à construire un indicateur de sécheresse végétale sur certains territoires identifiés du Pacifique.
- à mettre en production un tableau de bord pour l'analyse des tendances de sécheresse (Nouvelle-Calédonie uniquement).
- à mettre en production une interface de consultation des données sécheresses (région pacifique). **FACULTATIF**

## **2.2. Un indicateur pour le suivi de la sécheresse végétale par télédétection**

La présente étude repose à la fois sur la mise en application de méthodologies pré-évaluées et validées en Nouvelle-Calédonie (projet SCO) et sur l'adaptation de celles-ci sur d'autres territoires du Pacifique. Elle se focalise dans ce cadre présent sur une approche par télédétection à partir de données *open data* pour le suivi de la sécheresse végétale.

Il convient donc de commencer par définir ce que nous entendons par sécheresse :

*La sécheresse est définie comme un phénomène de manque d'eau sur une période significativement longue entraînant un stress et des pertes de productivités liés au déficit hydrique. Nous distinguerons par la suite la sécheresse météorologique correspondant à un déficit pluviométrique, de la sécheresse végétale (ou biophysique) correspondant à l'état de stress hydrique de la végétation, conséquence d'un déficit de pluie.*

Du fait de l'impact indéniables des événements de sécheresse intenses sur la biodiversité, les cultures agricoles et la ressources en eau, l'enjeu principal ici est de **fournir un indicateur spatialisé de la sécheresse végétale pour permettre une meilleure anticipation, servant d'outil d'aide à la décision aux institutions.**

Les indicateurs permettant de quantifier l'aléa sécheresse sont multiples. Les premiers développés reposent sur des **mesures météorologiques** se basant par exemple sur des données pluviométriques tel que le SPI – Standardized Precipitation Index (*McKee et al.*,

1993) ou plus récemment combinant précipitations et températures de l'air comme le SPEI - Standardized Precipitation Evaporation Index (Vicente-Serrano, 2010).

Avec l'arrivée en masse de **données satellitaires** et la capacité des capteurs spatiaux à observer dans plusieurs bandes spectrales, il est devenu possible d'accéder à divers paramètres de la surface en lien direct avec la sécheresse de la végétation. Les principales études menées en télédétection reposent sur la comparaison de l'état actuel d'indices de surface par rapport à un comportement de référence historique. Les indices utilisés pour cela rendent compte de l'état de la végétation telle que l'activité photosynthétique (NDVI, EVI) ou le contenu en eau des plantes (NDWI), mais également de certaines propriétés du sol telles que l'humidité (SWI) et la température (LST).

**Le système proposé** (Fig.1) permet un suivi des épisodes de sécheresse en s'appuyant sur des indicateurs éprouvés et objectifs issus des données complémentaires d'observation de la terre (EO). Grâce au traitement de produits satellites acquis dans différentes longueurs d'onde (optiques, thermiques, micro-ondes), l'outil estime des anomalies de végétation, température et humidité du sol qui sont ensuite combinées aux produits météorologiques (précipitations, évapotranspiration de référence). Le système est capable (1) d'évaluer l'intensité des épisodes de sécheresse et d'en estimer leur sévérité par analogie à un état de référence historique (*indicateur actuel*), (2) couplé à ces données actuelles et à des modèles statistiques de prévision, de fournir une indication de la trajectoire future plausible d'une saison hydrologique (*indicateur prévisionnel*).

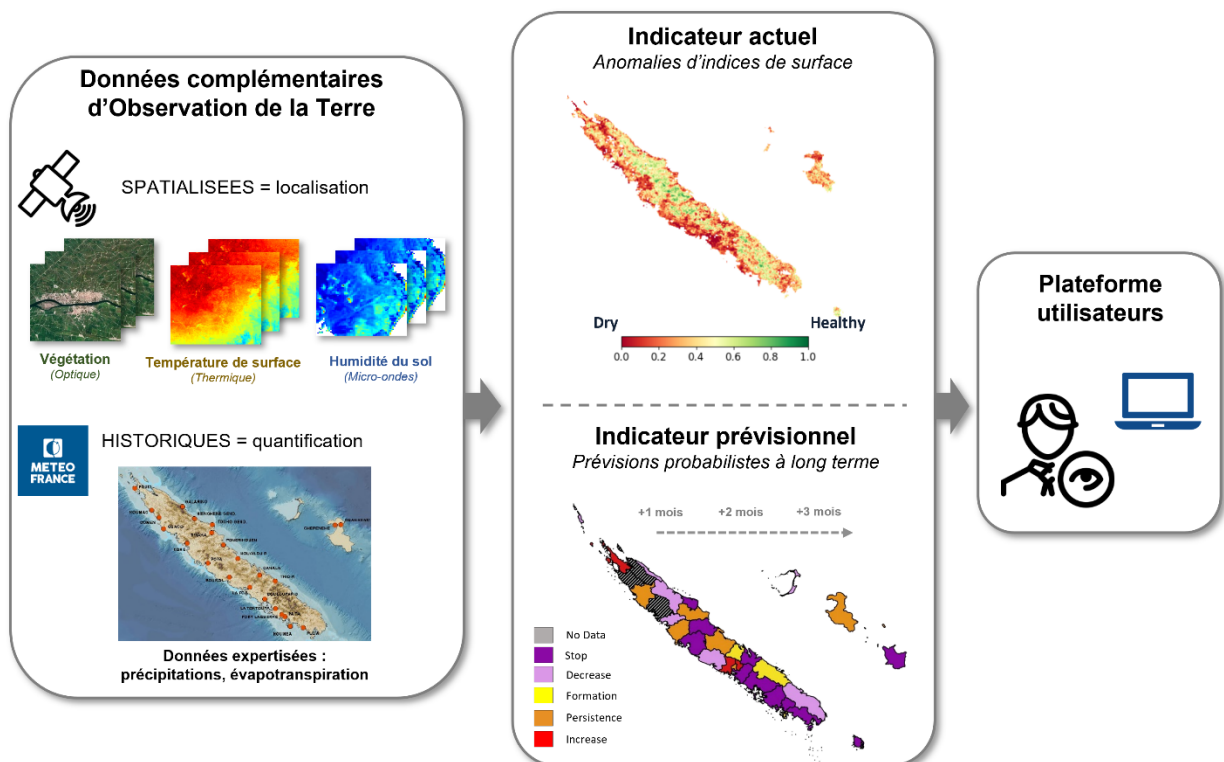


Figure 1 : Le système pour le suivi et la prévision de la sécheresse dans les territoires du Pacifique

### 2.3. Partenaires techniques, scientifiques et thématiques

Ce travail sera mené par trois partenaires de Nouvelle-Calédonie dédiés au cadrage du projet et aux développements techniques :

- **L'Observatoire de l'Environnement pour la Nouvelle-Calédonie (OEIL)** réalise le suivi de l'environnement sur le territoire en fournissant, via leurs plateformes opérationnelles, plusieurs indicateurs et outils de surveillance environnementale. Porteur du projet, l'OEIL aura ici le rôle de cadrage global du projet, de valorisation et de portage final de l'indicateur sécheresse développé pour la NC. Grâce à son expertise dans le domaine, il s'assurera également du bon déroulement technique et thématique du travail mené par les différents partenaires.
- **INSIGHT** est une startup néo-calédonienne du Groupe CIPAC (*Compagnie Industrielle du Pacifique*) dédiée à l'observation de la Terre par imagerie spatiale. En particulier, INSIGHT a été en charge des développements de l'indicateur de sécheresse biophysique sur la Nouvelle-Calédonie, en collaboration avec Météo-France NC. Dans l'étude proposée ici, INSIGHT sera en charge de la mise à disposition de l'indicateur produit sur la Nouvelle-Calédonie et des développements dédiés aux traitements d'images satellites pour la production de l'indicateur sur les autres territoires.
- **L'IRD Nouvelle-Calédonie (UMR EspaceDEV)** apporte un soutien scientifique et technique à ce projet. De par son expertise en Observation de la Terre dédiée à l'étude de l'environnement Néo-Calédonien, cet organisme de recherche suivra de près les développements réalisés pour aider au bon déroulement du projet.

D'autres acteurs ont été identifiés pour être sollicités au cours de l'étude afin de disposer d'un soutien technique et thématique :

- METEO-FRANCE : propriétaire actuel d'une partie de la chaîne de traitement. Une convention devra être formalisée avec Météo-France sur l'utilisation de la chaîne en production et sur d'autres territoires
- CSIRO : expertise attendue dans l'exploitation des données Radar et du DataCube Australien
- CPS : Expertise attendu sur l'exploitation du DataCube *Digital Earth Pacifique*
- Direction de l'agriculture de la Polynésie Française : mise à disposition de données in situ
- Gouvernement du Vanuatu : mise à disposition de données in situ
- AGENCE RURALE Nouvelle Calédonie : possible testeur de l'application et des données produites.
- ...A compléter

Les parties prenantes du projet pourront suivre et intervenir dans le projet à travers 3 points d'étapes (démarrage, restitution mi-parcours, restitution).



La liste des parties prenantes présentée ici n'est pas exhaustive et peut évoluer en cours de projet.

## 2.4. Déroulement de l'étude

La planification des actions et des livrables est détaillée en annexe 2. Le Gantt prévisionnel est présenté en figure 2 ci-après.

### 2.4.1. *Phase 0 : Septembre – Octobre 2023*

**Réunion de démarrage du projet auprès des parties prenantes identifiées**

**Phase 0 : Etudes préalables**

*30 jours*

### 2.4.2. *Phase 1 : Novembre 2022 – Avril 2023*

**Phase 1A : Adaptation de la chaîne SCO pour NC (Version 1)**

*30 jours*

**Phase 1B : Mise en place dashboard sécheresse NC**

*30 jours*

**Validation Phase 1** : Validation scientifique, Validation au Bon Fonctionnement et Validation de Service Régulier de la chaîne V1 (NC)

*19 jours*

### 2.4.3. *Phase 2 : Avril – Septembre 2023*

**Réunion de restitution de la phase 1 + présentation de la phase 2 avec l'ensemble des parties prenantes**

**Phase 2 : Adaptation de la chaîne pour la régionalisation Pacifique (Version 1.1)**

*55 jours*

**Validation Phase 2** : Validation scientifique, Validation au Bon Fonctionnement et Validation de Service Régulier de la chaîne V1.1 (Pacifique)

*19 jours*

### 2.4.4. *Phases 3 et 4 : Septembre – Décembre 2023*

**Phase 3 : Orchestration de la chaîne (Version 1.2)**

*20 jours*

**Validation Phase 3** : Validation au Bon Fonctionnement et Validation de Service Régulier de la chaîne V1.2 (Orchestration)

*10 jours*

**Phase 4 : Finalisation, restitution**

*10 jours*

**Restitution finale avec l'ensemble des parties prenantes**

			2022				2023											
			Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	octobre	Novembre	Décembre
V1	Phase 0	30																
	Phase 1 A	30																
	Phase 1 B	30																
	Validation CS + VABF + VSR	19																
V1.1	Phase 2	55																
	Validation CS + VABF + VSR	19																
V1.2	Phase 3	20																
	Test VABF + VSR	10																
	Phase 4	10																
TOTAL		223																

Figure 2 : Planning prévisionnel

### 3. MISE EN PRODUCTION OPERATIONNELLE SUR LA NOUVELLE-CALEDONIE

#### 3.1. Zone d'étude et données sources

La mise en production opérationnelle de l'indicateur se fera sur la Nouvelle-Calédonie incluant la Grande-Terre, les îles Belep au Nord, les îles Loyauté à l'Est, et l'île des Pins au Sud. La carte ci-dessous (Fig.3) présente la zone étudiée ainsi que l'occupation et usage des sols. En Nouvelle-Calédonie, les terres présentant le plus de sensibilité au phénomène sécheresse se situent sur la côte Ouest de la Grande-Terre, où sont observées les moyennes annuelles de précipitations les plus faibles. Il s'agit de vastes plaines de fourrés et savanes, incluant la majorité des parcelles agricoles du territoire.

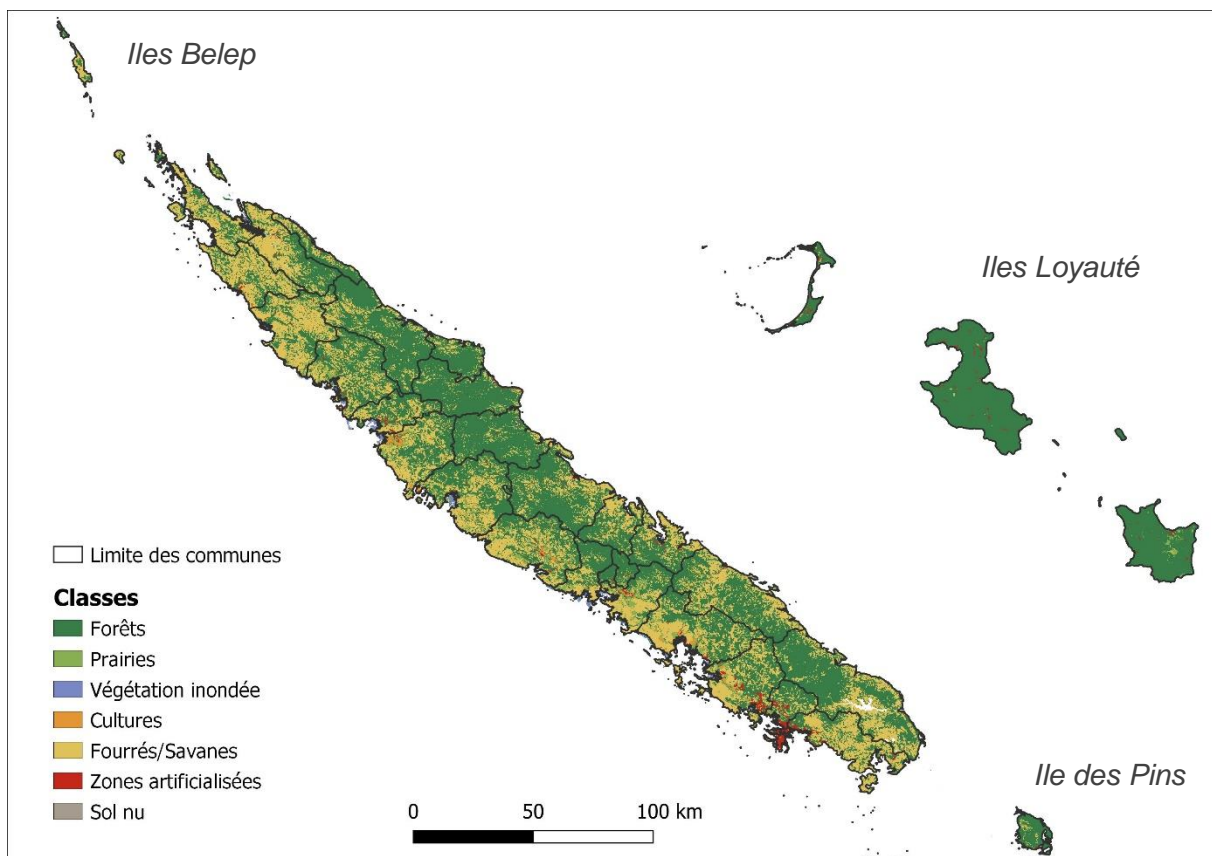


Figure 3 : Zone d'étude en Nouvelle-Calédonie et Occupation/Usage des sols 2020 (ESRI Land Cover, 2020)

Les produits satellites et météorologiques intervenant dans la production de l'indicateur sont présentés dans le tableau 1. Ces produits sont regroupés en deux échelles spatiales : une échelle globale qui inclut les produits informant sur la sécheresse à un niveau communal et intra-communal (*information par commune ou au pixel d'1 km*) et une échelle locale regroupant les produits dédiés au suivi plus fin de la sécheresse et adaptés aux zones agricoles notamment (*information au pixel de 10 m*).

Tableau 1 : Produits pour la production d'indicateurs actuels de sécheresse en Nouvelle-Calédonie

Echelle	Produit	Bandes	Variable observée	Résolution	Répétitivité	Période
1) Echelle Globale	SPI, SPEI	-	Précipitations, Evapotranspiration	Stations	1 mois	1960 - ce jour
	MODIS (MOD09A1)	Réfectances PIR (B2) Réfectances MIR (B6)	Contenu en eau végétation (NDWI)	500 m	8 jours	2000 - ce jour
	MODIS (MOD11A2/ MYD11A2)	-	Températures de surface (LST)	1 km	8 jours	2000 - ce jour
	ASCAT	Indice d'humidité à T=20 (SWI-020)	Humidité du sol en zone racinaire (SWI)	12.5 km	1 jour	2007 - ce jour
2) Echelle Locale	S2-THEIA	Réfectances PIR (B8) Réfectances MIR (B11)	Contenu en eau végétation (NDWI)	10 m	5 jours	2016 - ce jour
	L7	Réfectances PIR (B4) Réfectances MIR (B5)	Contenu en eau végétation (NDWI)	30 m	15 jours	1999 - 2013
	L8	Réfectances PIR (B5) Réfectances MIR (B6)	Contenu en eau végétation (NDWI)	30 m	15 jours	2013 - ce jour

**A l'échelle globale**, les produits MODIS permettent d'accéder tous les 8 jours au contenu en eau de la végétation ainsi qu'à la température de surface, et les données ASCAT fournissent le taux journalier d'humidité du sol en zone racinaire. Sont également ajoutés ici les produits SPI et SPEI informant respectivement sur le déficit pluvieux et en évapotranspiration, à un pas de temps mensuel. Ils sont produits tous les mois par Météo-France à partir des relevés météorologiques issus de leurs stations.

**A l'échelle locale**, les produits utilisés sont issus des satellites Landsat-7 (L7), Landsat-8 (L8) et Sentinel-2 (S2) THEIA. Il s'agit ici de produits de réflectances de surface corrigés des effets géométriques et atmosphériques (L2A), permettant l'estimation du NDWI à une résolution décimétrique et à un pas de temps allant de 5 jours (S2) à 15 jours (L7/L8).

Chaque type de produit satellite a permis d'accéder à une série d'indices sur une période relativement longue (pouvant aller jusqu'à une vingtaine d'années selon les produits) et servant ainsi de **référentiel historique** pour la qualification de la sécheresse. Le traitement de l'historique a été réalisé dans le cadre du projet SCO. En raison de la quantité importante de données nécessaires, un serveur de calcul a été spécifiquement mis en place afin de permettre le stockage et le traitement en local des différents produits. L'infrastructure IT qui a été développée est présentée et décrite en annexe 1.

Les données historiques (de 2000 à ce jour) sont déjà stockées et servent de base pour le calcul des futurs indicateurs.

Dans le cadre du présent projet, les mêmes produits sources seront utilisés pour réaliser le calcul des nouveaux indicateurs (mise à jour opérationnelle) sous forme de routine (présentée en section suivante). A noter que les produits L7 ne seront pas

intégrés dans la routine développée, ayant servi uniquement pour la construction du référentiel, mais que nous présentons ici pour une meilleure compréhension du fonctionnement global de la chaîne.

Le tableau ci-dessous synthétise le **volume de données** nécessaire à la production de l'indicateur sur la Nouvelle-Calédonie. Nous précisons d'une part la taille des données nouvellement acquises (*sources*) et produites chaque mois (*indices, indicateurs*), et d'autre part la taille du référentiel historique à date (2000 – 2021). Celui-ci sera mis à jour à chaque fin de mois impliquant donc une augmentation de sa taille (+ 20 Go chaque mois). Les produits sources pourront être supprimés si besoin.

**Tableau 2 : Volume de données nécessaire à la production de l'indicateur sur la Nouvelle-Calédonie**

Produits	Volume MOIS (Go)			Volume HISTORIQUE (Go)	
	Sources	Indices	Indicateurs	Indices	Indicateurs
MODIS	0,05	0,01	0,01	0,16	0,24
ASCAT	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
LANDSAT-S2	145	15	5	150	250
TOTAL	145 Go	AJOUT HISTO = + 20 Go		HISTO = 400 Go	

### 3.2. Production de l'indicateur actuel

La chaîne de production sur la Nouvelle-Calédonie est présentée en figure 4. La production de l'indicateur actuel sera réalisée via **trois sous chaînes** permettant d'accéder aux trois niveaux d'information sécheresse (communal, intra-communal, parcellaire).

La méthodologie pour les développements et validations scientifiques des indicateurs et des chaînes de traitement est détaillée dans les *rapports de production du projet SCO*. Nous invitons le lecteur à se référer à ces rapports pour tout complément d'information à ce sujet.

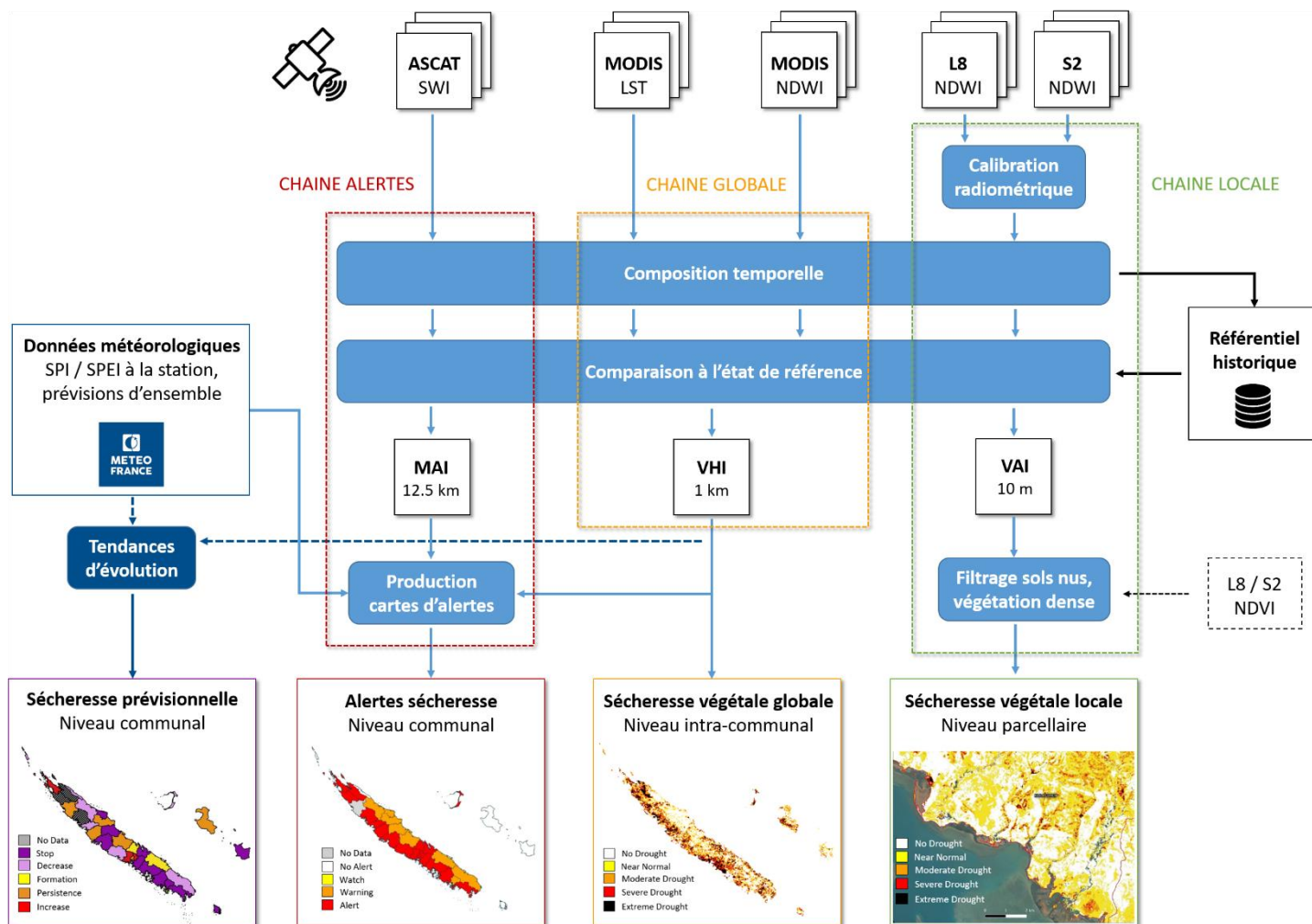


Figure 4: Chaîne de production de l'indicateur sécheresse sur la Nouvelle-Calédonie.

- **La Chaîne Locale** fournira l'indicateur au niveau parcellaire (10 m), calculé à partir des indices NDWI issus de L8 et S2 préalablement prétraités et calibrés. L'indicateur VAI (*Vegetation Anomaly Index ; Amri et al., 2011 ; Peters et al., 2002*) sera estimé par comparaison au référentiel selon l'équation ci-dessous :

$$VAI = \frac{NDWI - \overline{NDWI}}{\sigma_{NDWI}}$$

1

avec  $\overline{NDWI}$  la moyenne et  $\sigma_{NDWI}$  l'écart-type calculés pour une période temporelle (ici une décade, soit 10 jours) sur tout l'historique. Cet indicateur est centré en 0, avec des valeurs négatives indiquant un état de stress anormal, et des valeurs positives indiquant un état favorable.

*A noter que pour cette échelle spécifique, une phase de post-traitement peut être intégrée afin de filtrer les régions de sols nus ou à végétation dense pouvant être d'un intérêt moindre pour un suivi parcellaire. Cette étape pourra être réalisée à partir d'indices de NDVI calculés à partir des mêmes images L8/S2, mais impliquant également une calibration radiométrique au préalable.*

- **La Chaîne Globale** fournira l'indicateur au niveau intra-communal (1 km) à partir des indices MODIS (NDWI, LST). Ici, l'indicateur VHI (*Vegetation Health Index ; Kogan, 1997, 2000*) sera estimé selon l'équation :

$$VHI = \alpha * VCI + (1 - \alpha) * TCI$$

2

avec  $\alpha = 0.5$ , et où le VCI et le TCI sont définis selon *Kogan (1995, 1997)* et obtenus respectivement à partir du NDWI et de la LST. Un VHI de 0 correspondra à l'état le plus défavorable (végétation sèche), alors qu'une valeur de 1 correspondra à l'état le plus favorable (végétation en bonne santé).

- **La Chaîne Alertes** fournira un indicateur communal issu de la combinaison d'indicateurs satellites et météorologiques. L'objectif ici est de déterminer à quel stade se situe le déficit dans la relation de cause à effet de la sécheresse agricole (*Sepulcre-Canto, 2012*) : un déficit pluviométrique entraînant un déficit d'humidité du sol, ayant lui-même pour effet le stress hydrique de la végétation (Fig.9). Pour cela, nous intégrerons les indicateurs fournis par Météo-France sur leurs stations (SPI, SPEI), l'indicateur VHI ainsi que l'indicateur d'anomalies d'humidités du sol MAI (*Moisture Anomaly Index ; Amri et al., 2012 ; Le Page et Zribi, 2019*).

Trois niveaux d'alerte sécheresse seront alors fournis par commune :

- 1) Watch : Niveau d'alerte minimale correspondant à une détection de déficit pluviométrique, mais sans impact observé sur la surface
- 2) Warning : Niveau intermédiaire avec détection de déficit observé au niveau de la surface (humidité du sol, évapotranspiration), mais sans stress hydrique directement observé sur la végétation



- 3) Alert : Niveau d'alerte maximale avec détection d'un état de stress hydrique de la végétation

### 3.3. Production de l'indicateur prévisionnel

L'indicateur prévisionnel est issu de développements réalisés par Météo-France NC. Le produit se présente sous la forme de cartes à l'échelle communale informant sur les tendances d'évolution de la sécheresse végétale à +1 mois, +2 mois et +3 mois (à partir du mois en cours).

Cet indicateur est obtenu à partir de la connaissance de deux types d'informations :

- La forte corrélation observée entre les produits de sécheresse météorologique (en particulier le SPI-3 mois issus des stations) et l'indicateur global de sécheresse végétale (produit satellite VHI). *Le SPI-3 mois est alors qualifié de « proxy » météorologique de la sécheresse végétale.*
- Les prévisions de précipitation informant sur les probabilités d'évolution de SPI (*Lavaysse, 2020*). Ces produits correspondent aux prévisions d'ensemble accessibles via le Global Drought Observatory, et qui ont été évaluées et calibrées localement via les données SPI issues des stations (réadaptation des scores et classes d'évolution au territoire).

### 3.4. Actualisation et livraison des produits

Afin de limiter l'impact des nuages sur les produits satellites tout en gardant une répétitivité adaptée à l'évolution de la sécheresse, le pas de temps sélectionné pour l'actualisation de l'indicateur de sécheresse locale (VAI) est de **10 jours**, et de **8 jours** pour l'indicateur de sécheresse globale (VHI).

Du fait de la mise à disposition des données météorologiques à un pas de temps mensuel, les cartes d'alertes et cartes de prévisions seront fournies **au mois** (milieu du mois suivant).

Les données météorologiques, incluant les produits observés (SPI, SPEI) et les produits prévisionnels (tendances d'évolution), sont déposées par Météo-France NC sur un serveur dédié. INSIGHT a l'accès à ce serveur, et se chargera de récupérer les fichiers autour du 15 du mois suivant, date à laquelle les données seront complètes et validées par Météo-France.



Le chronogramme ci-dessous (Fig.5) présente l'actualisation des indicateurs sur les deux premiers mois de l'étude. Ce schéma sera répété de manière à couvrir la totalité de la période de test en mode opérationnel des chaînes de traitement (cf. section 2.4). Il s'agit notamment de mettre en évidence la procédure de mise à disposition des produits pour leur **production et leur diffusion opérationnelle**.

Nous proposons de procéder de la manière suivante :

- 1) Livraison 1, *au début du mois 2* incluant les produits infra-mensuels :
  - indicateurs de sécheresse locale VAI obtenus durant le mois 1
  - indicateurs de sécheresse globale VHI obtenus durant le mois 1
- 2) Livraison 1bis, *en milieu du mois 2* incluant :
  - les produits mensuels d'alertes du mois 1
  - les produits mensuels de prévisions du mois 1
  - une synthèse mensuelle des indicateurs VAI et VHI agrégés sur le mois 1

→ Il pourra être envisageable de fournir également à cette étape les produits infra-mensuels nouvellement acquis durant la 1<sup>ère</sup> moitié du mois 2.
- 3) La livraison 2, *en début du mois 3* incluant les produits infra-mensuels VAI et VHI du mois 2
- 4) Etc.

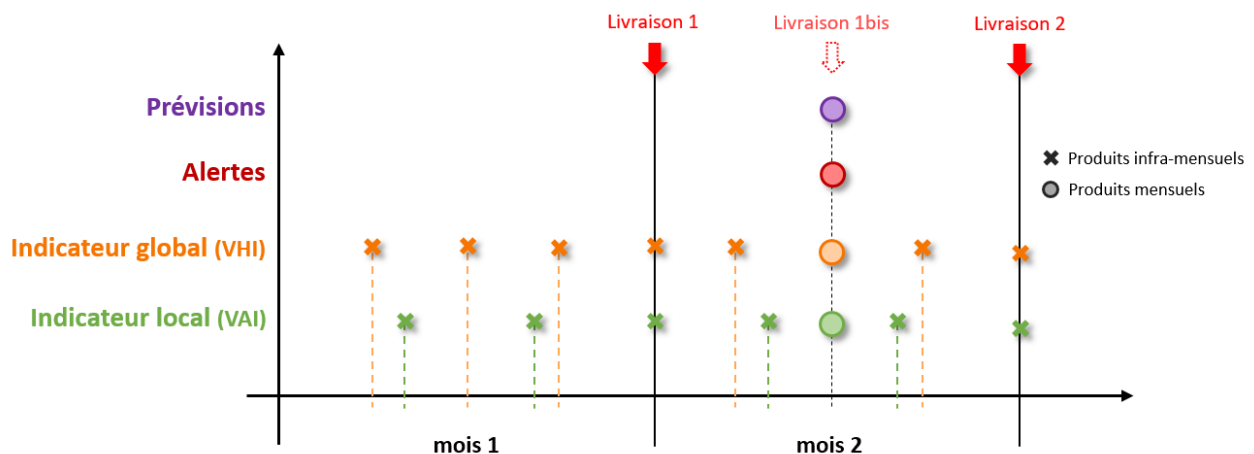


Figure 5 : Chronogramme pour l'actualisation et la livraison des produits sur la Nouvelle-

### 3.5. Description technique des chaines : code, librairies, format des données, etc.

Cette section précise certains aspects techniques des chaines de traitement. Une première sous-section présente leur fonctionnement à date (version 1 à l'issue du projet SCO). La deuxième sous-section présente les modifications à apporter pour permettre l'industrialisation des chaines (version 2 développée dans le cadre de ce projet Fonds Pacifique).

#### 3.5.1. *Fonctionnement à date : V1\_SCO*

Les chaines se présentent chacune sous la forme de **trois fonctions principales** développées en langage de programmation *Python* :

- *LocalDroughtIndex\_decade.py* :  
Production de l'indicateur de sécheresse local tous les 10 jours
- *GlobalDroughtIndex\_month.py* :  
Production de l'indicateur de sécheresse global à un pas de temps mensuel
- *AlertDrought\_month.py* :  
Production des alertes communales à un pas de temps mensuel

**Deux librairies python** sont nécessaires au bon fonctionnement de ces chaines :

- *rasterio* pour le traitement des rasters (images satellites)
- *geopandas* pour le traitement des vecteurs (données météorologiques, produits annexes, etc.)

Pour lancer ces chaines, l'utilisateur doit :

- 1) Installer l'environnement python nécessaire (librairies, dépendances, etc.)
- 2) Télécharger les nouveaux produits (images satellites et données météorologiques nouvellement acquises et à traiter)
- 3) Placer les produits satellites et les produits annexes dans les dossiers correspondants.

Le code de ces fonctions est disponible en accès privé sur le gitlab d'INSIGHT : <https://gitlab.com/insightnc/eo4dm/dmpipeline>. Cet environnement collaboratif a été mis en place pour permettre le développement et l'adaptation des chaines au sein d'un processus de traitement général.

Le tableau ci-dessous précise le **format des produits d'entrée et de sortie** des différentes chaînes :

**Tableau 3 : Format des produits d'entrée et de sortie de chaque chaîne pour la production de l'indicateur sur la Nouvelle-Calédonie**

	INPUT DATA			OUTPUT DATA		
Chaînes	Produits	Détails	Format	Produits	Détails	Format
Chaîne Globale	MODIS	LST, Réflectances	Raster ( <i>GeoTiff</i> )	Indicateur végét	VHI	Raster ( <i>GeoTiff</i> )
	Référentiel histo	LST, NDWI historiques	Raster ( <i>GeoTiff</i> )	Indices	LST, NDWI	Raster ( <i>GeoTiff</i> )
	Annexes	LUT Masques	Table ( <i>csv</i> ) Raster ( <i>GeoTiff</i> )	Intermediaires	Statistiques	Table ( <i>csv</i> )
Chaîne Locale	LANDSAT-S2	Réflectances	Raster ( <i>GeoTiff</i> )	Indicateur végét	VAI	Raster ( <i>GeoTiff</i> )
	Référentiel histo	NDWI, NDVI historiques	Raster ( <i>GeoTiff</i> )	Indices	NDVI, NDWI	Raster ( <i>GeoTiff</i> )
	Annexes	LUT Masques Emprise tuiles	Table ( <i>csv</i> ) Raster ( <i>GeoTiff</i> ) Vecteur ( <i>shp</i> )	Intermediaires	Statistiques	Table ( <i>csv</i> )
Chaîne Alertes	ASCAT	SWI	Raster ( <i>GeoTiff</i> )	Carte alertes	Alertes sécheresse par commune	Vect/Table ( <i>shp, csv</i> )
	Référentiel histo	SWI historiques	Raster ( <i>GeoTiff</i> )	Indicateur humid	MAI	Raster ( <i>GeoTiff</i> )
	Indicateur végét	VHI	Raster ( <i>GeoTiff</i> )	Indice	SWI	Raster ( <i>GeoTiff</i> )
	METEO	SPI, SPEI	Table ( <i>csv</i> )	Intermediaires	Statistiques	Table ( <i>csv</i> )
	Annexes	LUT, Masques	Table ( <i>csv</i> ) Rast/Vect ( <i>GeoTiff, shp</i> )	-	-	-

### 3.5.2. Modifications pour industrialisation : V2\_FP

Le tableau ci-dessous présente les modifications à réaliser sur les trois chaînes pour permettre une mise en production opérationnelle de l'indicateur. De manière générale, il s'agit de permettre une **automatisation** maximale de la chaîne, consistant en l'orchestration de différentes tâches telles que le téléchargement des produits d'entrée ou le lancement automatique de chacune des chaînes.

Des modifications du code seront réalisées pour répondre au cahier des charges en termes **d'actualisation** des produits de sortie. De plus, il pourra être envisagé de modifier la chaîne de manière à la rendre la plus **générique** possible en vue de la régionalisation de l'indicateur (voir section 4). *En particulier, les produits S2-THEIA pourront être remplacés par les produits S2-ESA, impliquant certaines adaptations du code dans les phases de prétraitements (filtre qualité, calcul d'indices).*

Enfin, du fait du lancement récent du **satellite Landsat-9 (L9)**, les produits de réflectances L9 pourront être intégrés à la chaîne, améliorant la répétitivité temporelle des produits de végétation (S2 et L8), et réduisant ainsi l'effet des nuages. *Les produits L9 sont fournis suivant les mêmes caractéristiques que celles des produits L8 (mêmes bandes spectrales et même résolution spatiale), rendant leur intégration relativement simple dans la chaîne locale.*

Tableau 4 : Modifications pour industrialisation des chaînes

Chaînes	Téléchargements produits d'entrée	Orchestration traitements	Généricité	Actualisation
<b>Chaîne Globale</b>	A automatiser	A automatiser	OK	Synthèse mensuelle = OK Actualisation 8 j = A FAIRE
<b>Chaîne Locale</b>	S2_L2A = OK L8 = A automatiser L9 = A ajouter	A automatiser	S2 = Sen2Cor ESA	Synthèse mensuelle = A FAIRE Actualisation 10 j = OK
<b>Chaîne Alertes</b>	A automatiser	A automatiser	Produits météorologiques	OK

## 4. CONSTRUCTION ET VALIDATION DE L'INDICATEUR SUR LES TERRITOIRES DU PACIFIQUE

### 4.1. Zones d'étude et données sources

L'indicateur de sécheresse végétale sera calculé, testé puis validé sur deux ou trois territoires présélectionnés :

- 1) Le premier cas d'étude comprendra des territoires français du Pacifique comme **la Polynésie Française**, incluant l'île de Tahiti (végétation hétérogène comprenant des terres agricoles et ainsi que de la forêt dense) ou Hiva Oa dans les Marquises (forêt dense essentiellement). L'objectif sera de tester l'indicateur sur des territoires à la végétation relativement différente, afin de pousser les limites de la chaîne. Un autre territoire français pourra être **Wallis-et-Futuna**, où nous pouvons également trouver une végétation hétérogène. Ces territoires français présentent un intérêt de par la mise à disposition par Météo-France de données météorologiques fiables et expertisées (Fig.6) servant à la validation des indicateurs biophysiques développés. Ainsi, ces candidats permettront de fournir un premier démonstrateur de l'indicateur sur des territoires situés dans des secteurs du Pacifique relativement éloignés.

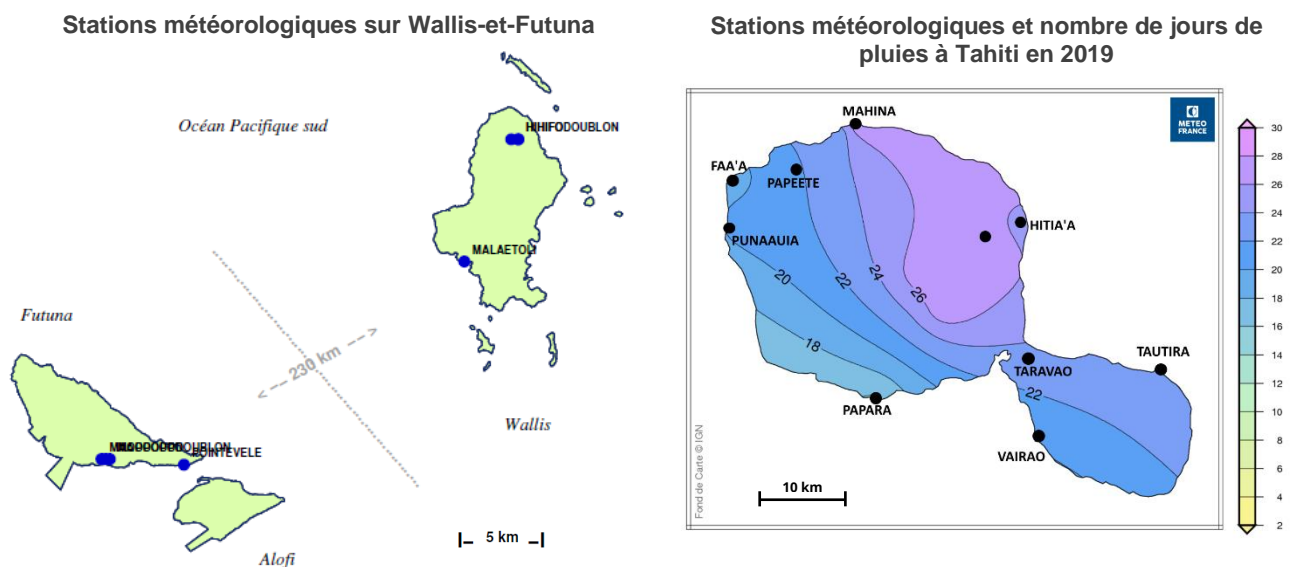


Figure 6 : Territoires français du Pacifique sélectionnés pour la construction de l'indicateur de sécheresse (Météo-

- 2) Ensuite, un territoire étranger sera également considéré : le **Vanuatu** (Fig.7). Ici, une première estimation des indicateurs biophysiques sera réalisée, puis une validation pourra être faite selon la disponibilité de données météorologiques sur ce territoire. Dans ce cas, plusieurs îles de l'archipel pourront être étudiées telles que Efaté ou Espiritu Santo où se concentrent la majorité de la population et une partie importante des terres agricoles.

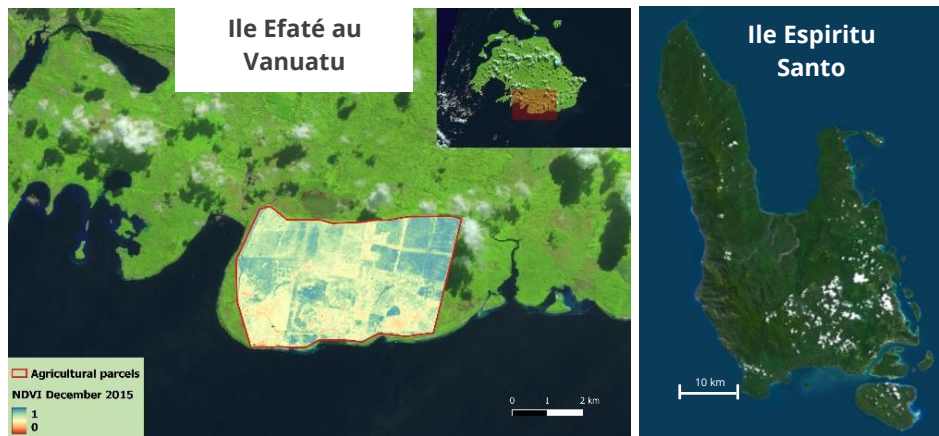


Figure 7 : Îles d'Efaté et Espiritu Santo au Vanuatu pour le test et l'adaptation de l'indicateur sur un territoire étranger (CNES/Airbus/Planet Observer - Copernicus)

**Pour ce qui est des données satellites**, les produits sources utilisés seront prioritairement ceux qui ont été testés et validés sur la Nouvelle-Calédonie, également regroupés en deux échelles spatiales d'application :

- Produits échelle globale : Températures et Réflectances de surface MODIS
- Produits échelle locale : Réflectances Landsat-7/8/9, Copernicus Sentinel-2 ESA

Les images S2 L2A THEIA étant produites à ce jour que sur la Nouvelle-Calédonie, elles seront alors remplacées pour ces territoires par les produits S2 L2A fournis par l'ESA, issus de la chaîne de correction atmosphérique Sen2Cor.

Les produits Landsat-9 seront ajoutés à la liste de la série Landsat (7 et 8). Ils permettront d'améliorer la répétitivité temporelle des produits de végétation, réduisant ainsi l'effet des nuages.

**D'autres produits satellitaires** seront intégrés pour accéder à l'humidité du sol aux deux échelles spatiales :

- Produits micro-ondes SMAP-S1 : issus de la combinaison de micro-ondes passives en bande L et micro-ondes actives en bande C pour accéder à l'humidité du sol à 3 km de résolution (*remplaceront les produits ASCAT utilisés sur la Nouvelle-Calédonie*)
- Produits radar en bande-C Sentinel-1 : du fait de la superficie relativement faible de certains territoires sélectionnés comme Wallis-et-Futuna, nous intégrerons également les produits Sentinel-1 permettant d'accéder à l'humidité de surface à une échelle décamétrique tout en s'affranchissant de l'effet des nuages. A l'heure actuelle, la plateforme Sentinel-1A est dysfonctionnelle. Nous envisageons tout de même d'exploiter les données disponibles à partir de la plateforme Sentinel-1B.

**Les mesures in-situ** seront issues de stations météorologiques déjà en place sur les territoires concernés :

- Données météorologiques observées : précipitation, température
- Données météorologiques modélisées : vents, température de surface et rayonnement solaire

Météo-France est en charge de produire les données de SPI au niveau de leurs stations sur Wallis-et-Futuna et Tahiti. Ces données de référence seront indispensables pour calibrer et valider les indicateurs sur ces territoires

*Pour le Vanuatu, cela dépendra des données mises à disposition par les partenaires régionaux du projet (Gouvernement du Vanuatu, CPS, CSIRO).*

Le tableau ci-après synthétise le **volume de données** nécessaire pour la construction de l'indicateur sur les territoires du Pacifique. Seules les images hautes résolutions sont présentées ici (le volume des autres produits étant négligeable). Nous précisons le volume par mois, ainsi que le volume pour tout l'historique, à savoir depuis 2000 pour Landsat et 2015/2016 pour S1/S2. Les volumes présentés ici incluent les 3 territoires. *Le volume historique des indices Landsat n'est pas précisé car il est inclut dans celui des indices S2 (produits composites).*

Tableau 5 : Volume de données nécessaire à la construction de l'indicateur sur les territoires du Pacifique. Ici sont précisées uniquement les données qui présentent un volume important (images haute résolution)

	Volume MOIS (Go)			Volume HISTORIQUE (Go)		
Produits	Sources	Indices	Indicateurs	Sources	Indices	Indicateurs
LANDSAT-7-8-9	20	2	2	2000	-	-
SENTINEL-2	110	11	11	9000	200	200
SENTINEL-1	20	2	2	2000	200	200
TOTAL	150 Go	15 Go	15 Go	13 000 Go	400 Go	400 Go

## 4.2. Méthodologie

La méthodologie que nous suivrons afin de produire et évaluer l'indicateur de sécheresse végétale sur les territoires concernés est la suivante :

### 1) Bancarisation de la donnée :

Cette première étape consistera à mettre en place la collecte et l'organisation des divers produits sources. Etant donnée la quantité importante de produits satellites, une possibilité ici sera de mettre à profit l'infrastructure mise en place à INSIGHT dans le projet SCO pour le stockage de ces données (annexe 1).

### 2) Prétraitements :

Un ensemble de prétraitements seront réalisés sur les produits sources et comprendrons le filtrage des nuages (produits optiques), filtrage du speckle (produits radars), reprojection, calibration radiométrique et calcul d'indices de surface (si non déjà fournis). Cette étape comprendra également une phase de composition temporelle permettant d'obtenir des produits agrégés sur une période qui sera évaluée comme la plus adaptée.

Certains partenaires du projet comme le **CSIRO** pourront apporter leurs expertise et compétences techniques sur l'étape de bancarisation (meilleur accès aux images satellites, aux capacités de stockage et de traitement autour de l'OpenDataCube), ainsi que sur la phase de prétraitements des données telles que les produits radar Sentinel-1.



3) Calcul des indicateurs satellites :

Différents indicateurs de sécheresse seront calculés sur un pas de temps pouvant aller du mois à quelques jours : des produits d'anomalies (VAI, TAI, MAI), des produits basés sur la distance aux extrêmes (VCI, TCI) et des produits combinés (VHI).

4) Evaluation des indicateurs (selon disponibilité des données météorologiques) :

La méthodologie suivie ici consiste à évaluer les performances de plusieurs indicateurs de sécheresse basés sur différents indices de surface et diverses méthodes de calcul, et ce afin de **sélectionner un ou plusieurs indicateurs adaptés aux territoires concernés**.

L'évaluation des différents indicateurs se fera en analysant les dynamiques spatio-temporelles des produits développés, en comparaison à certains facteurs environnementaux (climat, types de végétation, etc.) qui influent particulièrement sur le niveau de sécheresse végétale. Pour cela, des analyses statistiques (tests de Pearson par exemple) seront réalisées entre les indicateurs satellites et des indicateurs météorologiques comme le SPI.

Cette évaluation permettra de mettre en évidence les régions et périodes de l'année où les indicateurs satellites fonctionnent le mieux et à l'inverse montrer les limites de ce type de solutions.

5) Prévisions (selon disponibilité des données météorologiques) :

Cette dernière phase sera dédiée à la prévision de la sécheresse et **dépendra de la disponibilité de données de prévisions évaluées et calibrées pour les territoires concernés**. Une possibilité, le cas échéant, sera d'utiliser les produits de prévisions d'ensemble fournis par le Global Drought Observatory. *Nous faisons remarquer que ces produits ne sont pas évalués localement mais peuvent servir de première base pour obtenir des tendances d'évolution de la sécheresse à grande échelle.*

## **5. VALORISATION DE L'INDICATEUR SECHERESSE, DES ALERTES ET DES PREVISIONS**

### **5.1. Outils de visualisation de l'OEIL**

En Nouvelle-Calédonie, l'indicateur sécheresse sera présenté à travers un tableau de bord de l'OEIL dédié à la consultation des tendances de sécheresse sur plusieurs années et sur différents échelons territoriaux.

Des analyses croisées avec l'occupation du sol, les incendies et d'autres indicateurs environnementaux seront disponibles.

Pour les autres territoires de la région Pacifique, un outil de visualisation simplifié des tendances de sécheresse sur plusieurs années est envisagé d'être mis en place. L'outil développé par INSIGHT lors du projet SCO pourrait être revalorisé, bien que des ajustements soient nécessaires, non prévus dans le cadre du présent projet en l'état. Il sera également question de mener des discussions avec les acteurs régionaux clés qui pourraient appuyer ce besoin de diffusion de données au profit des utilisateurs du Pacifique.

### **5.2. Indexation des données pour le système d'information décisionnel de l'OEIL**

Les indicateurs seront indexés sur une grille hexagonale hiérarchique (H3) afin d'assurer une correspondance spatiale avec les autres indicateurs environnementaux du système d'information décisionnel de l'OEIL.

Le traitement d'indexation nécessite un accès aux données disponibles en sortie de chaîne de production sécheresse. Deux stratégies sont envisageables pour réaliser ces traitements (interne à l'infrastructure de production ou traitement déporté).

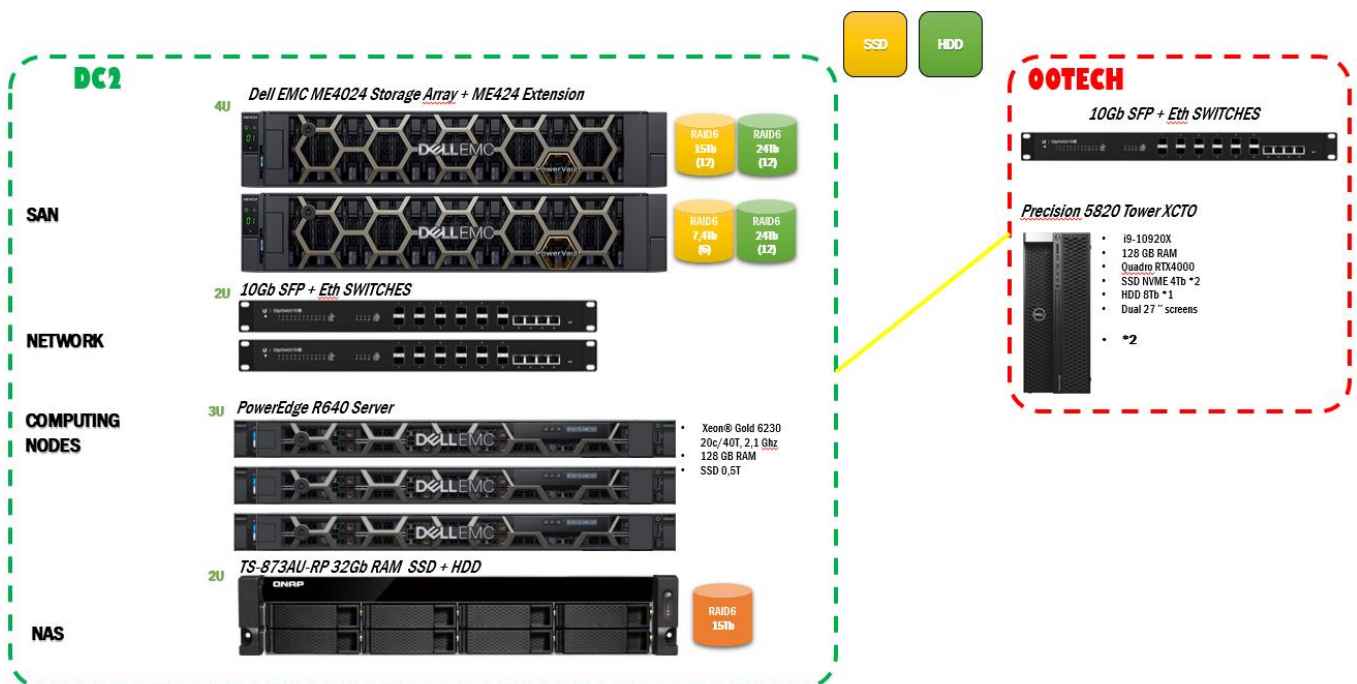
Les données indexées seront stockées et gérées dans le SID de l'OEIL.

## 6. ANNEXES

### Annexe 1 : Infrastructure IT

Dans le cadre du projet SCO, une infrastructure informatique dédiée a été mise en place par INSIGHT pour la bonne mise en œuvre des différents traitements et stockage de données. En effet, l'infrastructure repose sur une solution de virtualisation qui s'appuie sur un cluster de calcul, une baie de stockage haute performance et une interconnexion 10 GB. Les équipes bénéficient ainsi d'un bac à sable solide, flexible et performant, permettant de déployer des machines virtuelles de calcul en quelques clics et sans besoin d'intervention du département IT de la maison mère (CIPAC). Les équipiers bénéficient également de stations de travail hautes performances dédiées permettant la manipulation direct de données lourdes.

Cette infrastructure a permis l'élaboration de chaînes de traitements et du référentiel historique qui seront réutilisés pour la mise en production opérationnelle de l'indicateur sur la Nouvelle-Calédonie ainsi que la construction et l'adaptation sur les autres territoires du Pacifique.



#### Arrangement Physique (Projet SCO)

## Annexe 2 : Planification détaillée

### **Phase 0 :**

- Mise en place de la méthodologie de gestion de projet : méthodologie Agile (SCRUM), outils de gestion de projet informatique (azure DevOps)
- Faisabilité de l'utilisation d'une plateforme d'accès aux produits satellites prétraités de type DataCube (AUS/CPS) ou service équivalent (Google Earth Engine, Data-Terra, Euro Data Cube...)
- Correction des données Landsat-7 (2003 – 2013) : test et implémentation des méthodes de gap-filling, implémentation dans la chaîne et retraitement des indices historiques
- Mise en place des environnements pour la chaîne de traitement (Dev, Qualif, Prod)

#### 30 Jours Homme :

- 14 JH faisabilité, dev (INSIGHT)
- 8 JH mise en place, suivi projet, faisabilité (OEIL)
- 8 JH faisabilité (IRD)

#### Livrables :

- *Projet DevOps, Atelier/formation*
- *Benchmark, POC, CR faisabilité DataCube, accord de principe d'utilisation de ces outils par les fournisseurs*
- *Indices historiques Landsat-7 corrigés*
- *Environnements, Repo Git, Atelier/formation*

### **Phase 1A :**

- Adaptation des pas de temps pour la production des indicateurs de la chaîne SCO (globale et locale)
- Calcul de l'indicateur sur l'historique des données en NC
- Constitution d'un indice de corrélation SPI affiné selon la méthodologie qui sera préconisée par les experts thématiques et scientifiques (Conseil Scientifique OEIL, IRD)

#### 30 Jours Homme : dev (INSIGHT)

#### Livrables :

- *Release V1 de la chaîne de traitement*
- *Documentation pour la mise en production*

- *Historique de l'indicateur sécheresse NC global et local (2000-2022)*
- *Production continue des cartes d'indicateur de sécheresse NC*
- *Production des cartes de confiance des données NC (indice de corrélation SPI + disponibilité des images)*

### **Phase 1B :**

- Faisabilité d'accès aux données d'indicateur sécheresse pour la valorisation dans les outils de l'OEIL
- Indexation des données et géotraitement, produit de façon continue
- Réalisation du dashboard NC

30 Jours Homme : faisabilité, dev (OEIL)

Livrables :

- *Outil de visualisation de l'indicateur sécheresse NC*
- *Outil de visualisation des alertes et des prévisions NC*

### **Validation phase 1 :**

- Validation scientifique : protocole de validation des données par IRD/CS OEIL
- Validation au Bon Fonctionnement (VABF) : correction des bugs majeurs et bloquants, test fonctionnel chaîne et interface de visualisation
- Validation de Service Régulier (VSR) : correction de bugs bloquants, mise en production

19 Jours Homme :

- *4 JH tests, validation (INSIGHT)*
- *5 JH validation (OEIL)*
- *10 JH validation (IRD)*

Livrable : Rapport de contrôle

### **Phase 2 :**

- Mise à disposition du SPI par Météo-France sur les territoires français (Wallis-et-Futuna, Polynésie Française)
- Calcul du SPI ou recherche de données de validation sur le territoire étranger (Vanuatu)

- Développement d'une branche « région Pacifique » pour adapter le code de la chaîne de traitement aux autres territoires du Pacifique
- Intégration de nouvelles sources de données (S2 ESA, Radar S1, Landsat 9, SMAP-S1)
- Collecte des indices et calcul de l'historique de l'indicateur sécheresse dans la région Pacifique

55 Jours Homme :

- 30 JH dev (INSIGHT)
- 5 JH suivi projet, contact partenaires (OEIL)
- + 20 JH dev plateforme visualisation (INSIGHT/OEIL ?)

Livrables :

- Release V1.1 de la chaîne de traitement
- Historique de l'indicateur sécheresse, Wallis-et-Futuna, Polynésie Française, Vanuatu global et local (2000-2022)
- Outil de visualisation de l'indicateur sécheresse Wallis-et-Futuna, Polynésie Française et Vanuatu
- Outil de visualisation des alertes et des prévisions Wallis-et-Futuna, Polynésie Française et Vanuatu

**Validation phase 2 :**

- Validation scientifique : protocole de validation des données par IRD/CS OEIL
- VABF : correction des bugs majeurs et bloquants, test fonctionnel chaîne et interface de visualisation
- VSR : correction de bugs bloquants, mise en production

19 Jours Homme :

- 4 JH tests, validation (INSIGHT)
- 5 JH validation (OEIL)
- 10 JH validation (IRD)

Livrable : Rapport de contrôle

**Phase 3 :**

- Développement d'une branche « orchestration »
- Mise en place d'un système d'orchestration et de suivi des erreurs de la chaîne de traitement

20 Jours Homme :

- 17 JH dev (INSIGHT)
- 3 JH suivi projet (OEIL)

Livrables :

- Release V1.2 de la chaîne de traitement
- Mise en production

**Validation phase 3 :**

- VABF : correction des bugs majeurs et bloquants, test fonctionnel chaîne et interface de visualisation
- VSR : correction de bugs bloquants, mise en production

10 Jours Homme :

- 3 JH tests, validation (INSIGHT)
- 5 JH validation (OEIL)
- 2 JH validation (IRD)

**Phase 4 :**

- Finalisation du projet
- Communication/restitution

10 Jours Homme :

- 3 JH restitution technique (INSIGHT)
- 7 JH communication (OEIL)

Livrables :

- Plaque communication
- Restitution technique (dont 3 avec les parties prenantes au cours du projet)
- Restitution publique 2h

## 7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amri, R., Zribi, M., Lili-Chabaane, Z., Duchemin, B., Gruhier, C., & Chehbouni, A. (2011). Analysis of Vegetation Behavior in a North African Semi-Arid Region, Using SPOT-VEGETATION NDVI Data. *Remote Sensing*, 3(12), 2568-2590. <https://doi.org/10.3390/rs3122568>
- Amri, R., Zribi, M., Lili-Chabaane, Z., Wagner, W., & Hasenauer, S. (2012). Analysis of C-Band Scatterometer Moisture Estimations Derived Over a Semiarid Region. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(7), 2630-2638. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2186458>
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621-636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Kogan, F. N. (2000). Contribution of remote sensing to drought early warning. In *Early warning systems for drought preparedness and drought management* (p. 75-87).
- Lavaysse, C., Stockdale, T., McCormick, N., & Vogt, J. (2020). Evaluation of a New Precipitation-Based Index for Global Seasonal Forecasting of Unusually Wet and Dry Periods. *Weather and Forecasting*, 35(4), 1189-1202. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0196.1>
- Le Page, M., & Zribi, M. (2019). Analysis and Predictability of Drought In Northwest Africa Using Optical and Microwave Satellite Remote Sensing Products. *Scientific Reports*, 9(1), 1466. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37911-x>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.
- Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Vina, A., Hayes, M., & Svoboda, M. D. (2002). Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68(1), 71-75.
- Sepulcre-Canto, G., Horion, S., Singleton, A., Carrao, H., & Vogt, J. (2012). Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(11), 3519-3531. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3519-2012>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>