
PROJET SCO FRANCE 2021 :

EO4DROUGHTMONITORING

RAPPORT MI-PAROURS

Date	Version	Auteurs	Commentaires
22/02/2022	1.0	INSIGHT / Météo-France NC	<i>Bancarisation</i>
16/03/2022	1.1	INSIGHT / Météo-France NC	<i>Ajout Indicateur global</i>
17/06/2022	2	INSIGHT / Météo-France NC	<i>Ajout Indicateur local</i>



Table des matières

1. Contexte	4
2. L'étude	4
2.1. Objectif.....	4
2.2. Partenaires techniques, scientifiques et thématiques.....	5
2.3. Lien avec utilisateurs finaux	6
2.4. Déroulement.....	8
3. Bancarisation de la donnée	9
3.1. Les produits météorologiques	10
3.1.1. Standardized Precipitation Index	10
3.1.2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index	11
3.2. Les produits satellites pour l'échelle globale	11
3.2.1. Températures de surface et indices de végétation MODIS	11
3.2.2. Indices d'humidité du sol ASCAT Copernicus	14
3.3. Les produits satellites pour l'échelle locale.....	15
3.3.1. Réflectances Sentinel-2 THEIA	15
3.3.2. Réflectances Landsat USGS	16
4. Indicateurs actuels	18
4.1. Le suivi de la sécheresse par télédétection	18
4.1.1. Les indicateurs basés sur la végétation.....	19
4.1.2. Les indicateurs basés sur la température et l'humidité.....	20
4.1.3. Les indicateurs combinés	20
4.2. Climat et végétation en Nouvelle-Calédonie.....	22
4.3. Echelle globale.....	25
4.3.1. Méthodologie.....	25
4.3.2. Dynamique spatio-temporelle des indices de surface.....	26
4.3.3. Etude et validation des indicateurs de sécheresse.....	31
4.3.4. Mise en relation des différents indicateurs sécheresse pour la production d'alertes globales.....	35
4.4. Echelle locale	39
4.4.1. Méthodologie.....	39



4.4.2.	Calibration radiométrique des indices de végétation : exemple du NDWI sur Bourail	40
4.4.3.	Sites d'étude pour l'évaluation locale des indicateurs.....	42
4.4.4.	Evaluation des indicateurs.....	43
4.4.5.	Production de l'indicateur local sur la Nouvelle-Calédonie	48
4.5.	Conclusion et Produits finalisés.....	51
5.	Annexes.....	55
	Annexe 1 : Compte Rendu de réunion – 28/05/2021	55
	Annexe 2 : Compte Rendu de réunion – 16/07/2021	57
	Annexe 3 : Compte Rendu de réunion – 25/08/2021	62
	Annexe 4 : Compte Rendu de réunion – 30/11/2021	65
	Annexe 5 : Infrastructure IT.....	71
	Annexe 6 : Cartes des dynamiques d'humidité du sol.....	72
	Annexe 7 : Série temporelle de l'indicateurs MAI.....	73
	Annexe 8 : Corrélations mensuelles entre le SPI-3 mois et les indicateurs satellites sur la commune de Poindimié.....	74
	Annexe 9 : Corrélations maximum par commune entre le SPI-3 mois et les indicateurs satellites.....	75
	Annexe 10 : Note de synthèse SPEI (Météo-France).....	76
	Annexe 11 : Scores et lags de corrélation entre le VHI et les indicateurs SPI, MAI, SPEI	83
	Annexe 12 : Calibration radiométrique des indices NDWI Sentinel-2	84
	Annexe 13 : Proportion des classes d'occupation / usage des sols sur Bourail	85
	Annexe 14 : Variabilité spatio-temporelle de l'indicateur VAI-ndwi sur la station de Nessadiou (commune de Bourail)	86
	Annexe 15 : Corrélations maximums à l'échelle locale entre le SPEI-3 mois et les indicateurs satellites	87
	Annexe 16 : Procédure de composition temporelle par décade des indices de végétation	88
6.	Références bibliographiques.....	89

Ce document présente les développements réalisés pour les parties Bancarisation de la Donnée et Indicateurs Actuels dans le cadre du projet EO4DroughtMonitoring (EO4DM), labélisé par le Space Climate Observatory (SCO) en mars 2021.

1. CONTEXTE

Tous les ans, entre août et décembre, la Nouvelle-Calédonie est en proie à une période plus ou moins longue sans pluies substantielles. Les rivières, les sols et les végétaux sont asséchés ce qui a des conséquences multiples : lutte contre les feux de forêt, agriculture, ressources en eau... Par ailleurs, fruit des changements globaux, on observe une hausse des températures depuis 50 ans en Nouvelle-Calédonie, ce qui accentue le stress sur la ressource en eau et les conflits d'usage. 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*). Ces éléments impactent ainsi, directement comme indirectement, la biodiversité si riche sur le territoire de la Nouvelle-Calédonie ainsi que les différents écosystèmes et milieux naturels qui le composent.

Actuellement, Météo-France NC se base sur les données issues des pluviomètres pour estimer l'indice SPI (*Standardized Precipitation Index*) et ainsi faire le suivi des [épisodes de sécheresse météorologiques](#). Néanmoins, les pluviomètres ne couvrent pas toutes les communes. Il existe une hétérogénéité spatiale dans les épisodes de sécheresses, notamment dans les phases de déclenchement des dispositifs d'aide aux agriculteurs ("[Plan foïn](#)" mis en place par l'Agence Rurale), compliquant ainsi la tâche des décideurs lors des procédures de reconnaissance des calamités agricoles. Le recours à un **indice de végétation spatialisé** pourrait combler cette lacune. De plus, un indice qualifiant l'état de la végétation semble a priori plus adapté pour caractériser la sécheresse agricole que l'outil actuel qui ne tient compte que du déficit pluviométrique alors que la température, l'humidité, le vent et le rayonnement solaire global contribuent eux aussi au stress hydrique des végétaux.

2. L'ETUDE

2.1. Objectif

Afin de répondre à ces besoins, le projet EO4DroughtMonitoring (EO4DM) a pour but de **développer un outil de suivi des épisodes de sécheresse** en s'appuyant sur des indicateurs éprouvés et objectifs issus des données complémentaires d'observation de la terre (EO). Via une **plateforme de visualisation et de diffusion de l'information (IHM)**, les indicateurs mis en place apportent une réponse objective, actualisée, spatialisée et temporelle aux institutionnels pour une prise de décision éclairée.

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 (Fig. 1) permet (1) d'évaluer l'intensité des épisodes de sécheresse et d'en estimer leur sévérité par analogie à un état de référence historique (*indicateurs actuels*), (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 (*indicateurs prévisionnels*).

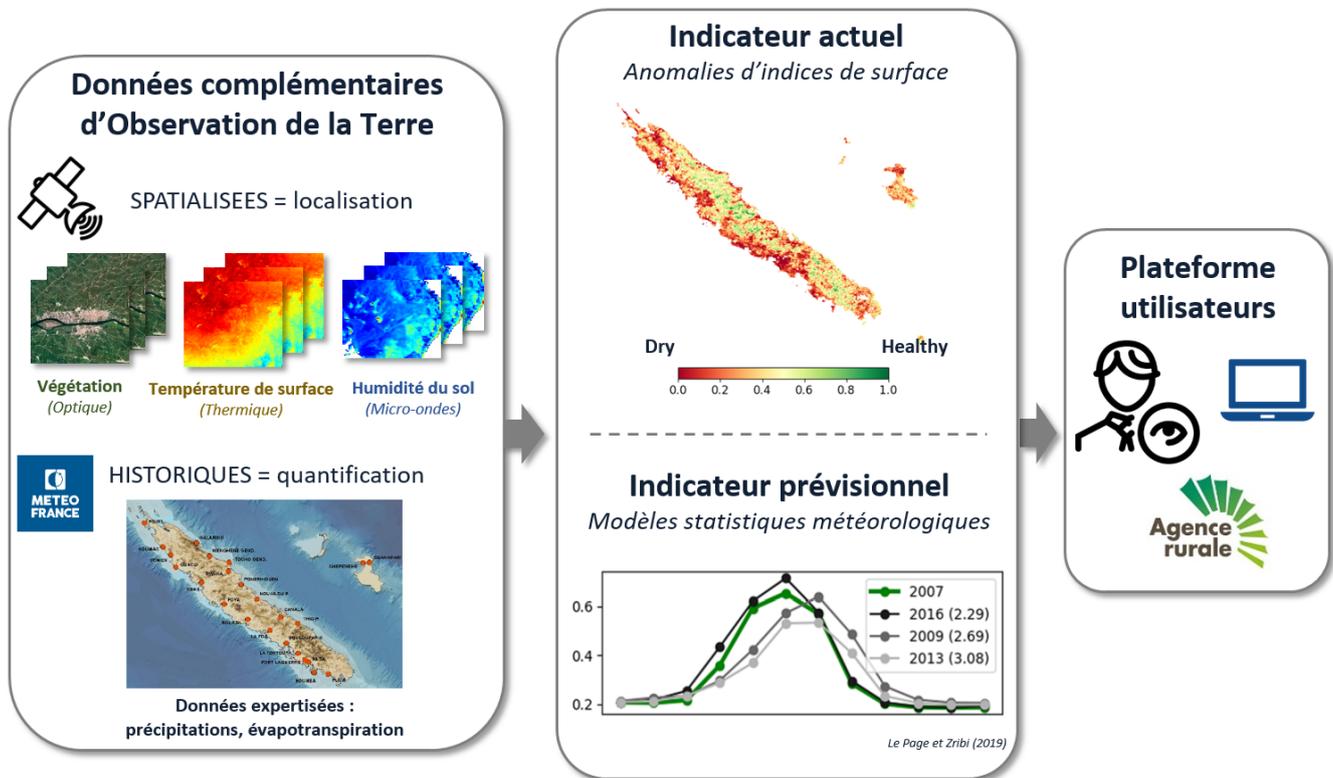


Figure 1 : Le système *EO4DroughtMonitoring* pour le suivi et la prévision de la sécheresse en Nouvelle-Calédonie.

2.2. Partenaires techniques, scientifiques et thématiques

Ce projet est principalement porté par INSIGHT pour la partie traitement de données satellitaires et cadrage global du projet, et en étroite collaboration avec Météo-France NC pour la partie référentiel historique et prévisions de la sécheresse. D'autres partenaires scientifiques sont également intégrés au projet avec un suivi plus global (IRD, CES THIEA).

- **INSIGHT** est une startup néo-calédonienne du Groupe CIPAC (Compagnie Industrielle du Pacifique) dédiée à l'observation de la Terre par imagerie spatiale. Elle est en charge dans ce présent projet des développements de l'indicateur de sécheresse biophysique sur la Nouvelle-Calédonie, en particulier pour les parties relatives aux traitements d'images satellites et à la mise en place de la plateforme utilisateur. Elle assure également le bon déroulement du projet en faisant le lien avec les différents partenaires techniques et utilisateurs.

- **Météo-France Nouvelle-Calédonie** assure aujourd'hui le suivi de divers paramètres climatiques en Nouvelle-Calédonie ainsi qu'à Wallis-et-Futuna. En particulier, la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques contribuera au projet en fournissant des données expertisées informant sur la sécheresse météorologiques, servant de validation aux produits satellitaires développés. Météo-France NC apportera également son expertise en modèles de prévision pour l'élaboration de l'indicateur prévisionnel.
- **L'UMR EspaceDEV (IRD Nouvelle-Calédonie)** 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 a été convié à certaines réunions pour aider au bon déroulement du projet.
- **Les Centre d'Expertises Scientifiques (CES) du pôle THEIA** ont également été conviés aux réunions de suivi du projet. En particulier, certains CES ont pu apporter leur soutien pour les questions et développements techniques liés à l'estimation de la sécheresse végétale par imagerie satellite (*CES Sécheresse, Humidité des sols, Evapotranspiration*).

2.3. Lien avec utilisateurs finaux

L'Agence Rurale est le principal utilisateur avéré dans ce projet. Celui-ci a un rôle central dans la gestion et le développement du secteur agricole en Nouvelle-Calédonie, mettant en œuvre des dispositifs servant notamment à la prévention et à l'indemnisation des dommages en cas de calamités naturelles ou crises sanitaires (cas du "Plan foin" mené par l'Agence Rurale, Fig.2). Le système EO4DroughtMonitoring servira ici d'outil d'aide à la décision en matière à la fois de politique publique (production agricole et fourragère, gestion de la ressource en eau, etc.) et de soutien au secteur agricole et aux **producteurs** (compréhension de l'impact des épisodes de sécheresse et adaptation des indemnités annuelles pour les calamités agricoles avec une vision objective du phénomène).

Le système vise à fournir un produit final au plus proche des attentes de l'Agence Rurale et des producteurs à la fois d'un point de vue de l'échelle d'exploitation des indicateurs, de leur prévisibilité mais aussi de la mise en forme de la donnée (visualisation sur la plateforme). L'Agence Rurale a été conviée aux différentes réunions d'avancement du projet (cf. planning ci-après) afin de s'assurer du développement d'un outil répondant au mieux aux besoins utilisateurs. En particulier, les **échelles**

Agence rurale **DATE LIMITE D'INSCRIPTION AU PLAN FOIN**

Suite à l'analyse du bilan pluviométrique, aux perspectives climatiques de météo France Nouvelle-Calédonie et à l'avis des commissions « Sécheresse » (02/07/20) et « Plan foin » (17/07/20), l'Agence rurale vous informe que vous avez **jusqu'au 31 août 2020 pour vous inscrire au dispositif « Plan foin » (achat de foin & autoconsommation)**.

Les inscriptions réalisées après cette date ne donneront plus accès à l'aide à l'aliment, si cette aide devait être mise en place en fin d'année.

Pour plus d'infos sur le dispositif, contactez l'Agence rurale au 26 06 90 ou par mail : contact@agencerurale.nc

30 route de la Boie des Dames - Forum du CENTRE - Ducos - BP 27820 - 98863 Nouméa Cedex
Tél. : 26.09.60 - Mail : contact@agencerurale.nc

Figure 2 : "Plan foin" pour une aide aux producteurs face à l'aléa sécheresse

d'exploitations ont pu être définies lors de ces réunions vis-à-vis des attentes de l'Agence Rurale. Trois niveaux de précisions ont été identifiés :

- 1) Un niveau communal permettant dans un premier temps un déclenchement des aides selon un découpage "administratif", le déclenchement étant fait jusqu'à présent de manière globale sur l'ensemble du territoire
- 2) Un niveau intra-communal permettant d'identifier sur le territoire des secteurs classés selon différents niveaux de sécheresse végétale et dont les limites géographiques sont "thématiques"
- 3) Un niveau parcellaire informant sur l'intensité de la sécheresse végétale à un niveau plus fin et ainsi plus adapté à un suivi au sein des parcelles agricoles.

La figure ci-dessous présente des exemples de produits obtenus dans ce projet et illustrant les trois niveaux d'utilisation de l'information sécheresse. Nous verrons dans la partie bancarisation (section 3) que ces niveaux de précisions sont obtenus en combinant plusieurs produits satellites (et météorologiques) définis à différentes résolutions spatiales. Les produits de l'échelle "globale" traiteront les niveaux communal et intra-communal, et les produits de l'échelle "locale" traiteront le niveau parcellaire.

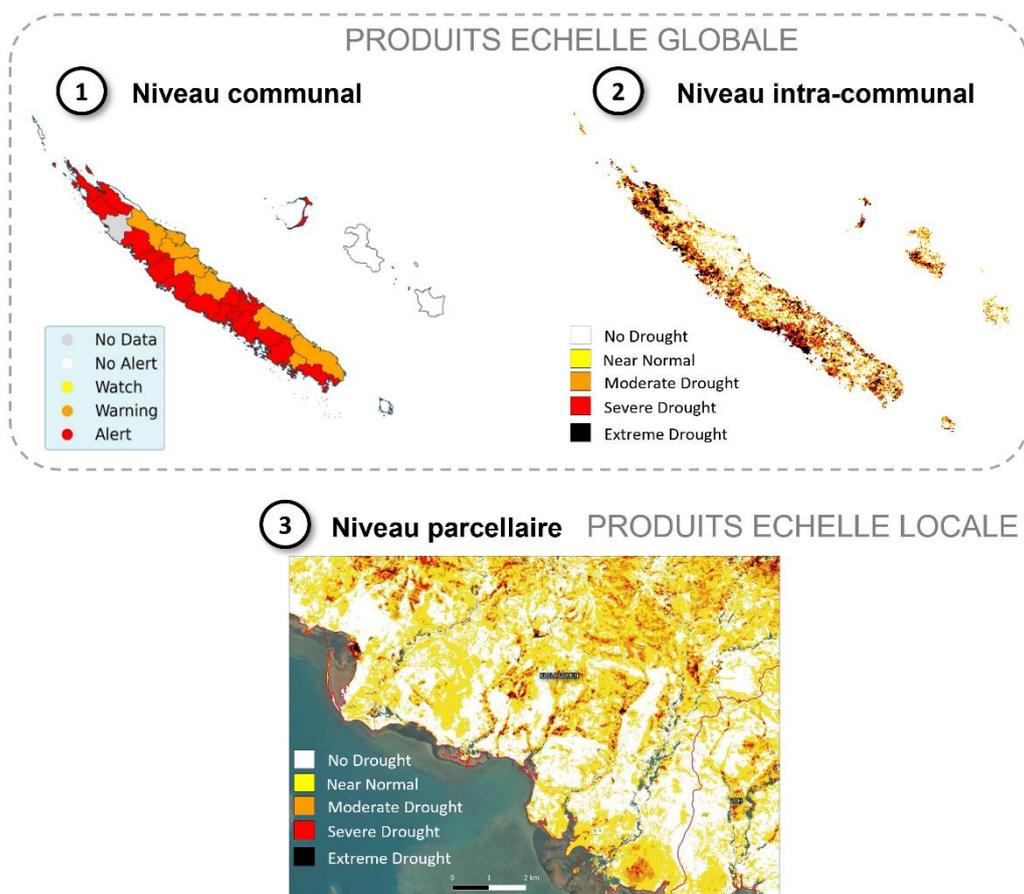


Figure 3 : Les trois niveaux "utilisateur" de l'information sécheresse

2.4. Déroulement

Le déroulement de l'étude se décompose en **six « Work Packages » (WP)** aboutissant à la mise au point de l'outil :

- WP1 Bancarisation de la donnée : stockage et organisation des données satellites disponibles sur le territoire de la Nouvelle-Calédonie. Un lien sera également fait avec les différentes données de Météo-France Nouvelle Calédonie utiles à EO4DM
- WP2 Indicateurs Actuels : réalisation d'une chaîne de traitements des images satellites pour la production d'indicateurs actuels aux échelles (1) locales et (2) globales
- WP3 Indicateurs Prévisionnels : mise en place du calcul de l'indice SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*), évaluation de la prévisibilité et tendances d'évolution de la sécheresse végétale
- WP4 IHM Actuel : développement d'une maquette de l'IHM pour la diffusion des indicateurs actuels
- WP5 IHM Prévisionnelle : diffusion des indicateurs prévisionnels et finalisation de l'IHM
- WP6 Clôture : recettage de l'IHM, retour d'expérience et valorisation des produits

Les différents comptes rendus de réunion se trouvent en annexes 1 à 4, synthétisant à la fois les éléments de discussions techniques et utilisateurs de ce projet.

3. BANCARISATION DE LA DONNEE

Dans cette partie, nous détaillons les différents produits utilisés dans cette étude pour accéder à la sécheresse végétale. Dans un premier temps, nous présentons les indicateurs météorologiques déjà mis en place par Météo-France de manière opérationnelle sur la Nouvelle-Calédonie et servant de référence pour la validation des indicateurs développés dans le cadre de cette étude.

Ensuite, une attention particulière sera portée à la description des **produits satellites** (indices de surface) servant de données d'entrée pour le calcul des indicateurs de sécheresse spatialisée (voir section 4.1). Ces produits représentent une part importante dans ce projet en termes de stockage et d'organisation de la donnée. Ils sont issus de différents types de capteurs (optiques, thermiques et micro-ondes) permettant d'accéder à plusieurs variables de surface (état de la végétation, température et humidité du sol). Deux échelles spatiales sont adressées : une **échelle globale** informant sur la sécheresse sur l'ensemble du territoire (Provinces, Communes) et une **échelle locale** dédiée au suivi plus fin pour les parcelles agricoles. En raison de la quantité importante d'images satellites utilisées dans ce projet, un serveur de calcul a été spécifiquement mis en place afin de permettre le stockage et le traitement en local des différentes données. L'infrastructure IT est présentée et décrite plus en détails en annexe 5.

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

Echelle	Produit	Variable observée	Résolution	Répétitivité	Période	Stockage
1) Echelle Globale	SPI, SPEI	Précipitations, Evapotranspiration	Stations	1 mois	1960 - ce jour	100 Go
	MODIS	Etat végétation, Température	250 m - 1 km	8 jours	2000 - ce jour	
	ASCAT	Humidité du sol	12.5 km	1 jour	2007 - ce jour	
2) Echelle Locale	S2-THEIA	Etat végétation	10 m	5 jours	2016 - ce jour	5 To
	L7	Etat végétation	30 m	15 jours	1999 - 2013	
	L8	Etat végétation	30 m	15 jours	2013 - ce jour	

3.1. Les produits météorologiques

Météo-France NC dispose d'un réseau complet de stations sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie ainsi que sur Wallis-et-Futuna (Fig. 4) permettant de mesurer divers paramètres climatiques tels que les précipitations, la température de l'air ou encore la force du vent. Rien qu'en Nouvelle-Calédonie, 80 stations sont réparties dans les différentes communes et fournissent des données quotidiennes. Ces mesures peuvent être prélevées de deux de manières : (1) automatiquement avec un envoi toutes les 6 min des données au centre Météo-France à Nouméa ou (2) par prélèvement bénévoles avec un pas de temps plus faible de l'ordre du journalier.

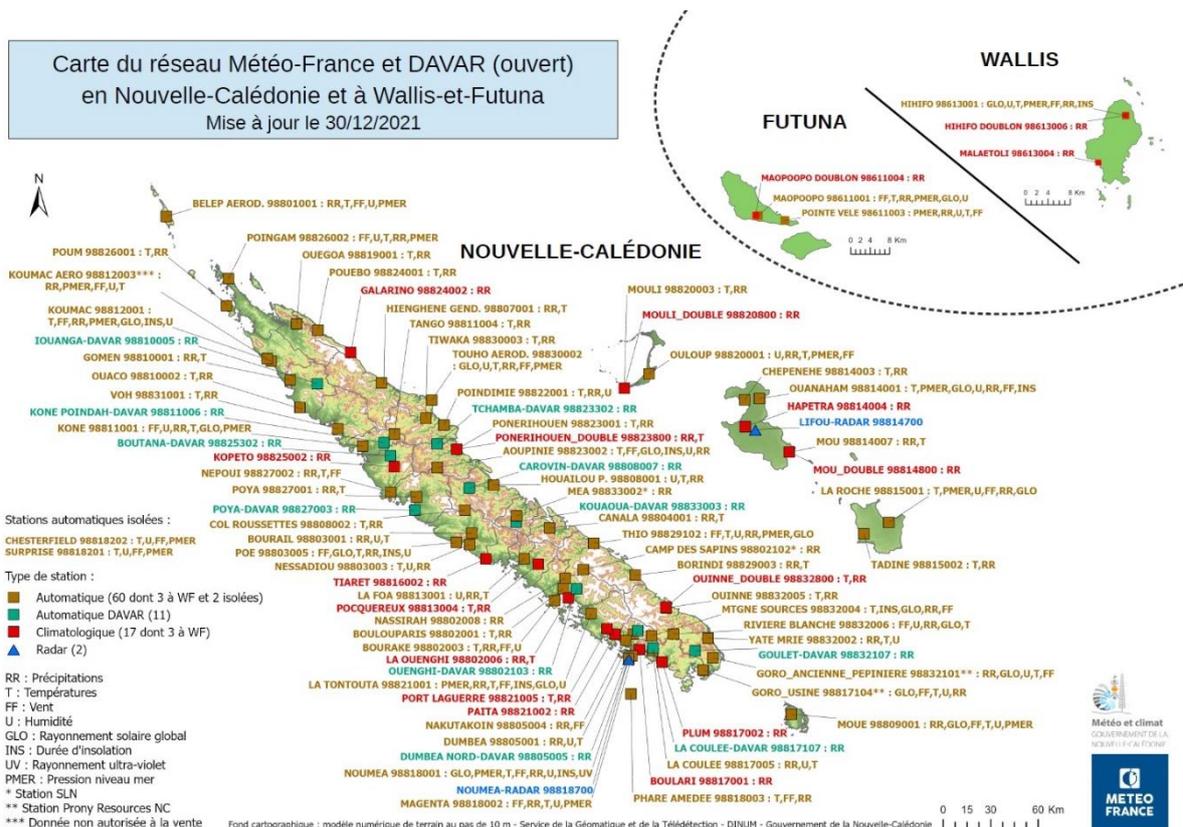


Figure 4 : Le réseau de stations Météo-France Nouvelle-Calédonie

3.1.1. Standardized Precipitation Index

Le **SPI (Standardized Precipitation Index)** est un indice recommandé par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) qui permet d'observer et de quantifier les phénomènes de sécheresses « météorologiques ». Il s'agit d'un indice dit de probabilité calculé par normalisation de séries historiques de données pluviométriques (Mckee et al., 1993). Les valeurs de l'indice varient positivement ou négativement autour d'une valeur de référence (entre +3 et -3) correspondant respectivement à des situations anormalement humides ou anormalement sèches. Différents seuils permettent de définir l'intensité de la sécheresse (dans le cas de valeurs négatives) ainsi que la durée de retour de l'évènement qui est le temps nécessaire pour revenir à un état normal (Tableau 2).

En Nouvelle-Calédonie, les produits de SPI sont issus d'une chaîne de traitement développée par Météo-France NC et la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques. Ces produits sont obtenus à partir des cumuls de précipitation relevés aux stations. Ils sont fournis pour différents pas de temps (de 1 à 12 mois), sur 41 stations et avec une actualisation mensuelle.

Tableau 2 : Classification et signification des valeurs de SPI

Valeurs du SPI	Qualification	Durée de Retour
2,00 et plus	Extrêmement humide	DR > 43 ans
1,50 à 1,99	Très humide	15 ans < DR < 43 ans
1,00 à 1,49	Modérément humide	6 ans < DR < 15 ans
-0,99 à 0,99	Proche de la normale	0 ans < DR < 6 ans
-1,00 à -1,49	Modérément sec	6 ans < DR < 15 ans
-1,50 à -1,99	Très sec	15 ans < DR < 43 ans
-2,00 et moins	Extrêmement sec	DR > 43 ans

3.1.2. *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*

Le SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) est un indice de sécheresse relativement nouveau qui sera développé spécifiquement dans le cadre de ce projet pour la Nouvelle-Calédonie. Le calcul de cet indice est similaire au SPI, à ceci près qu'il inclut une composante supplémentaire, **l'évapotranspiration potentielle**. Cela permet à l'indice de tenir compte du pouvoir évaporant de l'atmosphère sur le développement des sécheresses. Le SPEI a une échelle d'intensité dans laquelle les valeurs sont positives ou négatives suivant qu'il s'agit d'événements humides ou secs. Il peut être calculé pour des pas de temps allant d'un mois à 12 mois ou plus. Des mises à jour mensuelles permettent de l'utiliser de manière opérationnelle, avec des résultats d'autant plus robustes que les séries chronologiques de données disponibles sont longues (Vicente-Serrano et al., 2010).

3.2. Les produits satellites pour l'échelle globale

Ici, nous nous appuyons sur des **produits moyennes résolution** (250 m – 10 km) disponibles sur plusieurs décennies. Ces produits ont l'avantage de fournir des indices de surface déjà opérationnels pour la plupart et largement utilisés par la communauté. Ils sont issus du capteur optique/thermique MODIS (température de surface, indices de végétation) et du capteur micro-ondes ASCAT pour l'accès à l'humidité du sol.

3.2.1. *Températures de surface et indices de végétation MODIS*

Le capteur optique MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) permet un suivi quotidien des surfaces continentales, de l'océan et de l'atmosphère grâce à ses 36 bandes spectrales réparties du visible à l'infrarouge thermique. Celui-ci est embarqué sur deux satellites américains Terra et Aqua, lancés respectivement en 1999 et 2002 par la NASA. Les données sont acquises avec une répétitivité temporelle de 1 jour, et une résolution spatiale pouvant se situer entre 250 m et 1 km selon les bandes d'acquisition.

Les produits de températures de surface LST (*Land Surface Temperature ; Wan et Dozier, 1996 ; Wan, 2014*) utilisés dans cette étude sont des produits de niveau 3 agrégés sur une période de 8 jours et fournis à une résolution de 1 km : MYD11A2 (Aqua) et MOD11A2 (Terra). Ces produits de température sont estimés à partir des rayonnements émis par la surface de la Terre dans le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique (3 – 15 μm). Ces produits ont été téléchargés gratuitement via l'application [AppEARS](#) mise à disposition par le centre d'archivage LP DAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) de la NASA. Cette application permet l'extraction des produits pour une zone et une période souhaitées, et projetés selon le système désiré. Dans cette étude, les produits MODIS ont été reprojétés de leur système initial (grille sinusoidale) vers le système géographique WGS84.

Pour accéder à **l'état de stress hydrique de la végétation**, trois indices de surface seront testés et évalués à cette échelle :

- 1) le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index ; Tucker et Sellers, 1986*) informe sur l'activité photosynthétique des plantes. Cet indice est couramment utilisé en télédétection pour l'étude des surfaces continentales et s'obtient par combinaison et normalisation des réflectances de surface observées dans le proche-infrarouge (PIR) et le rouge (R) :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

1

Celui-ci varie entre -1 et 1, avec des valeurs positives correspondant à la végétation, des valeurs proches de 0 correspondront au sol nu, et des valeurs négatives pour l'eau.

- 2) l'EVI (*Enhanced Vegetation Index ; Huete et al., 1994, 2002*) est une version améliorée du NDVI présentant une plus grande sensibilité aux végétations à forte biomasse et ainsi qu'une atténuation des effets atmosphériques. Celui-ci est obtenu en intégrant à l'équation les réflectances dans le bleu (B) ainsi que certains paramètres de correction :

$$EVI = G * \frac{PIR - R}{PIR + C_1 * R - C_2 * B + L}$$

2

avec L la canopée d'ajustement, C_1 et C_2 les coefficients de correction atmosphérique.

- 3) le NDWI (*Normalized Difference Water Index ; Gao, 1996, Serrano et al., 2000*) informe également sur l'activité photosynthétique, mais avec une sensibilité plus importante au contenu en eau de la végétation. Il est obtenu en combinant les réflectances acquises dans le rouge et le moyen infrarouge (MIR), ce qui lui permet d'être moins sensible que le NDVI aux effets atmosphériques et à l'inverse d'être plus sensible à l'humidité de la plante ainsi que celle du sol :

$$NDWI = \frac{PIR - MIR}{PIR + MIR}$$

3

Certains tests réalisés sur les surfaces continentales montrent des valeurs négatives obtenues pour les sols nus, des valeurs situées autour de 0.1 pour des surfaces majoritairement composées de prairies, et des valeurs proches de 0.2 pour les parcelles agricoles.

Les indices NDVI et EVI sont pré-calculés par la NASA et fournis dans les produits de niveau 3 *MYD13Q1/MOD13Q1*, correspondant à une période d'acquisition de 16 jours et définis à une résolution spatiale de 250 m. Le NDWI n'était pas pré-calculé, nous avons utilisé les produits de réflectances de surface *MYD09A1/MOD09A1* auxquels nous avons appliqué l'équation (3). En particulier, nous avons utilisé les bandes B2 et B6 de MODIS correspondant respectivement aux réflectances du PIR (0.85 µm) et MIR (1.6 µm), corrigées des effets atmosphériques et fournies tous les 8 jours à 500 m de résolution.

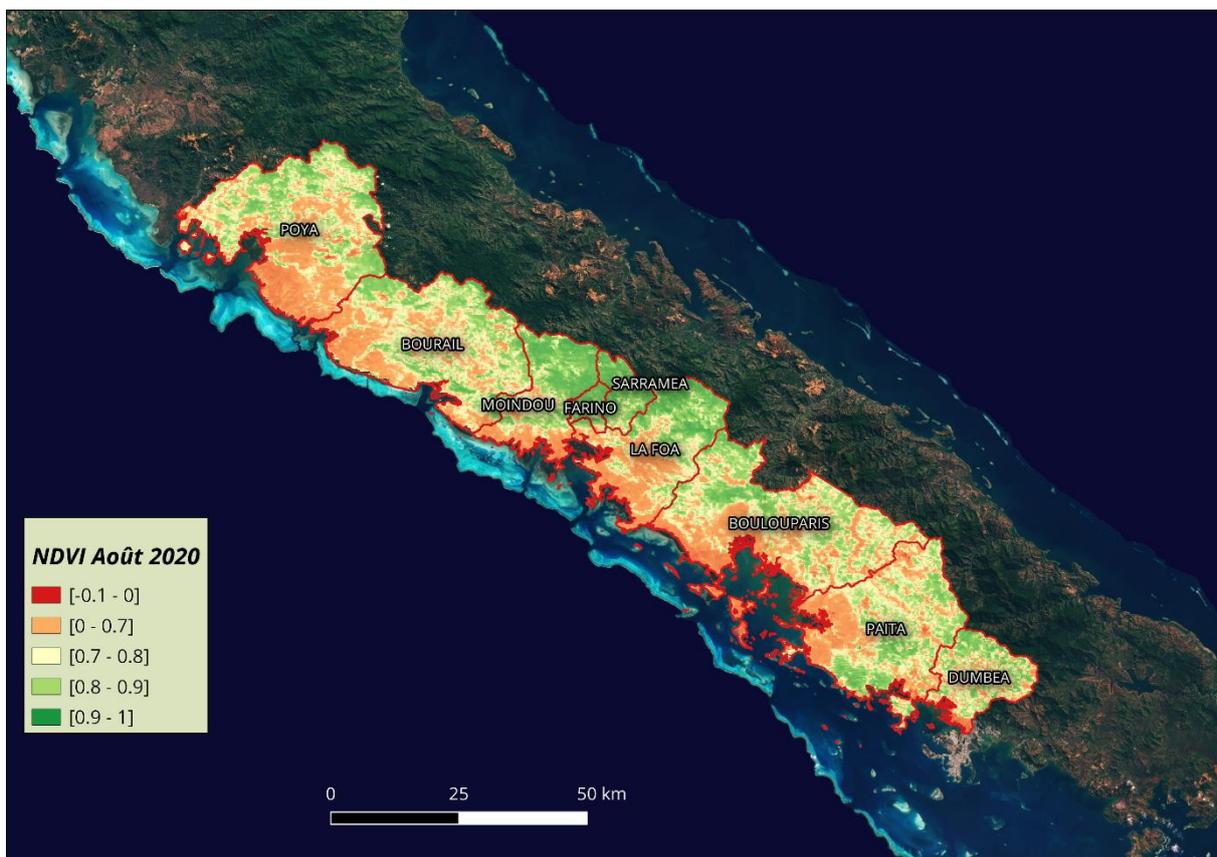


Figure 5 : Echelle globale des produits de sécheresse issus du capteur MODIS. Cas du NDVI représenté sur la côte Sud-Ouest de la Nouvelle-Calédonie, pour le mois d'août 2020 (début de période sèche).

De manière générale, les produits MODIS sélectionnés pour cette étude sont des **produits composites**, c'est-à-dire issus d'un processus de composition temporelle. Cela permet de sélectionner la meilleure observation pour chaque pixel durant la période en

question. Les critères de sélection incluent : la couverture spatiale, l'angle de vue, la présence de nuages et d'aérosols. Du fait de sa localisation en zone intertropicale, la Nouvelle-Calédonie présente une couverture nuageuse annuelle relativement importante (50% de nuages en moyenne sur toute l'année). Dans le cas d'indices de surface issus de capteurs optiques, il est alors préférable de travailler avec des produits composites permettant de réduire le pourcentage de données manquantes liées aux nuages. La figure 5 ci-avant présente un exemple de produit NDVI MODIS obtenu sur la Nouvelle-Calédonie.

3.2.2. Indices d'humidité du sol ASCAT Copernicus

Le capteur micro-ondes ASCAT (*Advanced SCATterometer*) est embarqué sur la plateforme MetOp lancée en 2007 par l'organisation européenne EUMETSAT (*European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*) afin de réaliser le suivi quotidien des surfaces continentales, de l'océan et de l'atmosphère. Ce capteur radar fonctionne en bande C, c'est-à-dire pour des ondes dont la fréquence est comprise entre 4 et 8 GHz, lui permettant notamment d'accéder à l'humidité contenue dans les cinq premiers centimètres de la colonne sol (*Petropoulos et al., 2015 ; Wigneron et al., 2003*) tout en s'affranchissant de l'effet de l'atmosphère comme les nuages ou les aérosols.

Dans cette étude, nous avons utilisé les **produits d'indices d'humidité du sol SWI** (*Soil Water Index*) fournis par le [Copernicus Global Land Service](#). Ces produits informent sur le taux d'humidité du sol à différents niveaux de profondeur. Ce taux varie entre 0 et 1 (0 pour des surfaces sèches, 1 pour des surfaces humides). Les indices SWI sont obtenus à partir des humidités directement mesurées par ASCAT auxquelles est appliqué un modèle d'infiltration (*Wagner et al., 1999*). Ce modèle décrit l'évolution de l'humidité de surface SSM (*surface soil moisture*) en fonction du temps, et donc de la profondeur d'infiltration, tel que :

$$SWI(t) = \frac{\sum_i SSM(t_i) e^{-(t-t_i)/T}}{\sum_i e^{-(t-t_i)/T}} \quad \text{pour } t_i \leq t$$

4

avec t et t_i représentant respectivement les temps d'observation des mesures courantes et précédentes de SSM. T est un paramètre qui définit le temps d'infiltration de l'humidité dans le sol. Huit valeurs de T sont appliquées à cette équation (entre 1 et 100 jours). Pour une même date et même zone, huit valeurs de SWI sont alors fournies, correspondant à différents niveaux de profondeurs incluant la surface (donnée brute ASCAT) et la zone racinaire (données modélisées dans le premier mètre du sol). Les données sont produites de manière journalière, à une résolution de 12.5 km et localisées selon le système WGS84. Notons que dans le cas d'indices de surface issus de capteurs micro-ondes, la couverture nuageuse n'ayant pas d'impact sur le signal, il n'est donc pas nécessaire de travailler avec des produits composites.

3.3. Les produits satellites pour l'échelle locale

Pour ce qui est de l'échelle locale, nous nous appuyerons sur des **produits haute résolution** (décamétrique), issus de trois satellites : Sentinel-2, Landsat-7 et Landsat-8. Il s'agira ici de réflectances de surface desquelles seront calculés les indices NDVI et NDWI décrits précédemment, et ce afin d'accéder à l'état de stress hydrique de la végétation. L'intérêt d'utiliser ici plusieurs satellites est double : (1) augmenter la répétitivité temporelle et ainsi limiter l'impact des nuages sur la période de recouvrement des satellites Sentinel-2 et Landsat-8 (2016 – ce jour), (2) accéder à l'état de la surface pour des dates relativement anciennes (jusqu'à 1999 via Landsat-7).

3.3.1. **Réflectances Sentinel-2 THEIA**

La mission **Sentinel-2** (S2) s'inscrit dans le cadre du programme européen d'observation et de surveillance de la Terre, Copernicus. Initié en 2001 par l'ESA et l'Union Européenne, ce programme a pour objectif de rassembler et de générer de manière opérationnelle des produits de télédétection et in-situ permettant une étude globale de la planète. Dans ce contexte, les deux satellites Sentinel-2A (S2A) et Sentinel-2B (S2B) ont été lancés respectivement en juin 2015 et mars 2017. Ils fournissent des images multispectrales (treize bandes) à haute résolution spatiale (décamétrique) et forte répétitivité temporelle (une image tous les dix jours, et tous les cinq jours considérant les deux satellites).

Les données acquises par S2 sont récupérées par l'ESA et regroupées sous forme de tuiles correspondant à une surface au sol d'environ 100 x 100 km². Ces données constituent les images brutes, correspondant à des luminances ou radiances et appelées produits de niveau 1A selon la nomenclature définie par l'ESA et le CNES. Pour permettre une utilisation opérationnelle par la communauté scientifique, l'ESA applique divers prétraitements : orthorectification (niveau 1B), corrections radiométrique (1C), et correction atmosphérique (2A).

Les produits de réflectances utilisés dans cette étude sont des produits de niveau 2A fournies par le centre de données [THEIA](#). Pour ces produits, la phase de correction atmosphérique n'a pas été réalisée par l'ESA mais par le CNES via la chaîne MAJA (*MACCS-ATCOR Joint Algorithm ; Hagolle et al., 2010, 2015; Rouquié et al., 2017*). Cette chaîne permet une correction atmosphérique ainsi qu'une détection des nuages et de leurs ombres au moyen de méthodes multispectrales et multi-temporelles qui présentent des performances égales voire supérieures à celles des méthodes mono-temporelles comme celles de l'ESA (*Baetens et al., 2019*). En particulier, nous utiliserons dans cette étude les réflectances issues de **trois bandes spectrales** : B4 (0.66 µm), B8 (0.84 µm) et B11 (1.6 µm) correspondant respectivement au R, PIR et MIR. Ces produits sont fournis à 10 m de résolution (20 m pour B11), et projetés selon le système WGS84 en projection UTM-58S (*Universal Transverse Mercator, zone 58S*). La figure 6 ci-après présente un exemple de produit NDVI S2-THEIA obtenu sur des parcelles agricoles en Nouvelle-Calédonie.

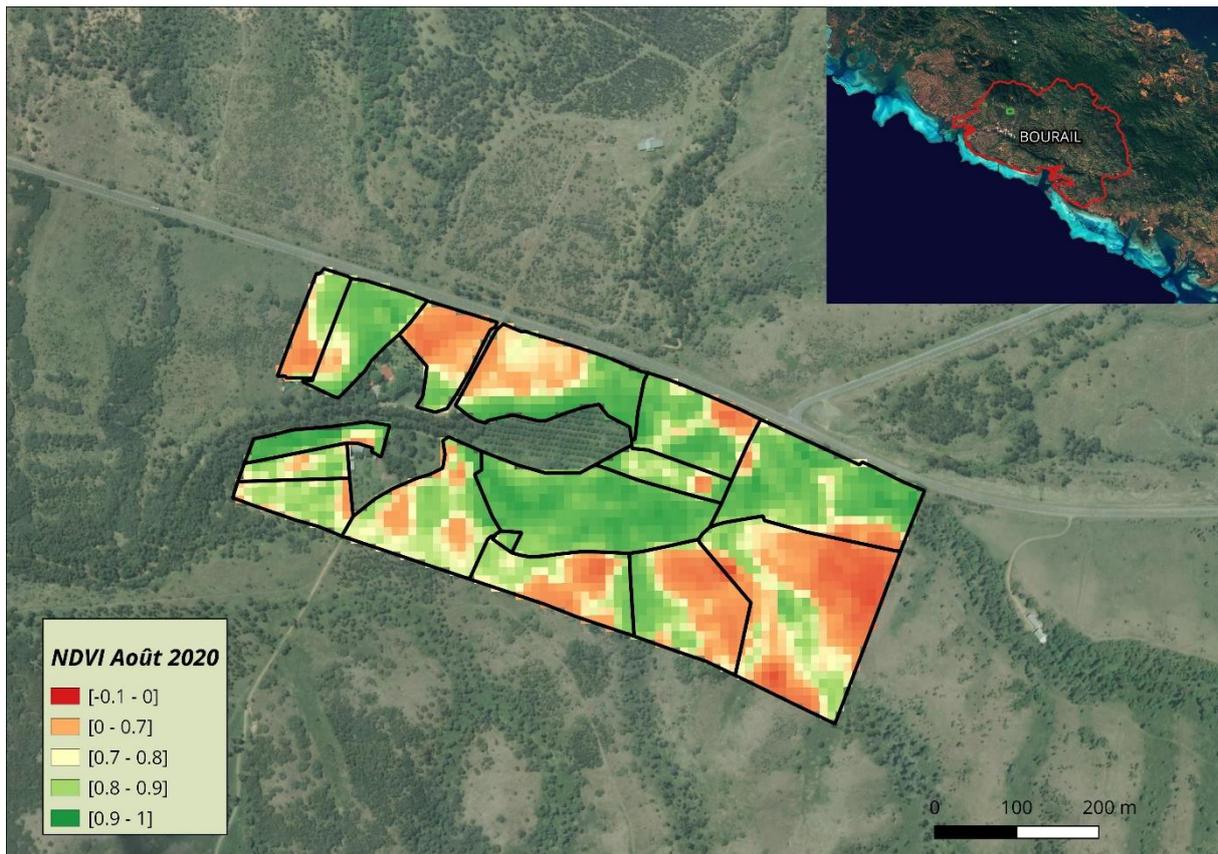


Figure 6 : Echelle locale des produits de sécheresse issus du capteur Sentinel-2. Cas du NDVI calculé sur des parcelles agricoles dans la commune de Bourail (août 2020).

3.3.2. Réflectances Landsat USGS

Le programme Landsat présente la plus longue série de données en télédétection spatiale dédiée à l'Observation de la Terre. Depuis 1972, neuf satellites ont été lancés par la NASA et l'USGS (*United States Geological Survey*), rendant possible l'étude sur plusieurs décennies du changement climatique. Dans ce projet, nous utilisons les données acquises par deux satellites Landsat : Landsat-7 (L7) lancé en 1999, et Landsat-8 (L8) lancé en 2013. Ces deux satellites fournissent chacun des données tous les 15 jours, acquises dans une dizaine de bandes spectrales. Grâce à ces deux satellites, nous pouvons accéder aux réflectances de surface à une échelle décamétrique sur une période comparable à celles des produits MODIS et ASCAT (une vingtaine d'années).

Les produits de réflectances utilisés ici sont des produits de niveau 2 délivrés par l'USGS via leur plateforme [EarthExplorer](https://earthexplorer.usgs.gov/). Ils sont issus de la deuxième collection de produits Landsat (la dernière à ce jour) qui fournit des données ayant été retraitées (derniers algorithmes de corrections géométriques, radiométriques et atmosphériques), améliorant l'interopérabilité des différents produits de l'archive dans le temps. En particulier, les réflectances de surface L7 et L8 sont fournies à une résolution de 30 m, et regroupées sous forme de tuiles d'environ 180 x 180 km², projetées selon le système WGS84 en projection UTM-58N.

La figure 7 ci-dessous présente la position des **différentes bandes spectrales** de L7 et L8 ainsi que celles de S2. Afin de calculer les indices NDVI et NDWI, nous avons utilisé les bandes B3 (0.66 μm), B4 (0.84 μm), B5 (1.65 μm) pour L7, et B4 (0.66 μm), B5 (0.87 μm), B6 (1.6 μm) pour L8.

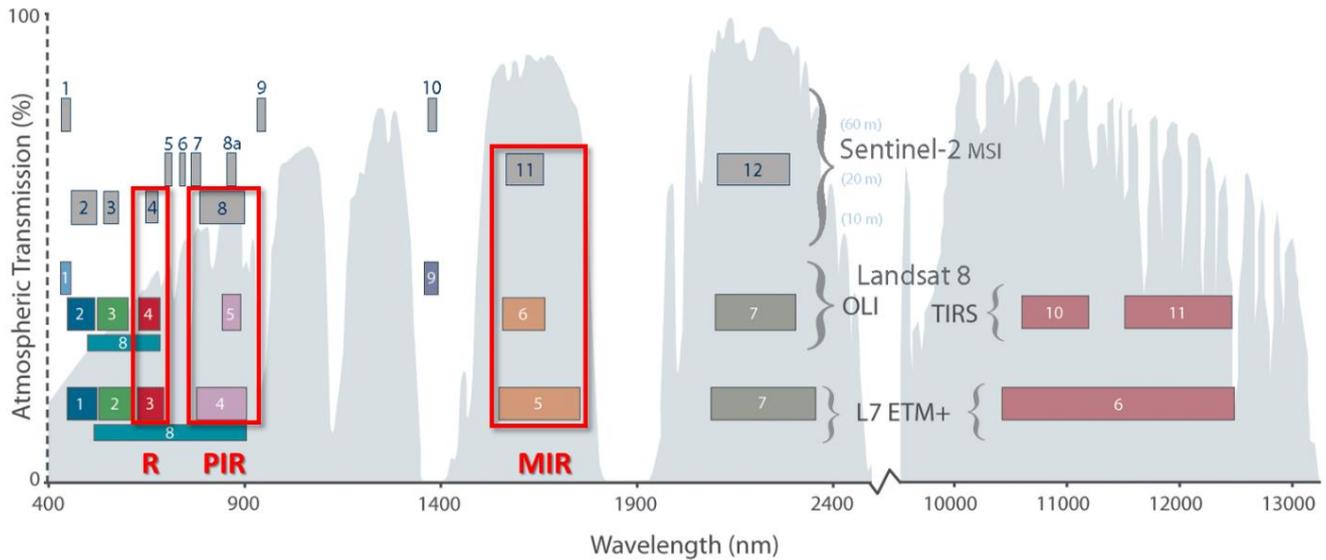


Figure 7 : Comparaisons des bandes Landsat-7 et Landsat-8 avec Sentinel-2

(source : <http://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/Landsat.v.Sentinel-2.png>)

4. INDICATEURS ACTUELS

Cette partie présente les développements pour la production des indicateurs actuels de la sécheresse aux échelles globales et locales. Une première sous-partie fera un état des lieux des principales méthodes utilisées en télédétection pour estimer la sécheresse végétale en se focalisant notamment sur celles testées et évaluées dans ce projet. Ensuite, nous ferons une brève présentation du contexte climatique en Nouvelle-Calédonie et de son impact sur la végétation. Puis, deux sous parties présenteront pour chaque échelle traitée la méthodologie suivie et les résultats. Enfin, nous terminerons par une conclusion faisant le lien avec les produits visés par l'utilisateur.

4.1. Le suivi de la sécheresse par télédétection

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. Il s'agit d'un phénomène relatif qui reflète l'écart entre la disponibilité de l'eau et la demande en eau de l'homme (pour des besoins de production, d'élevage, d'alimentation...).

Une multitude de méthodes et d'indicateurs ont été développés dans la littérature pour assurer la caractérisation et le suivi de la sécheresse au sens large. Les premiers indicateurs développés et qui restent aujourd'hui les plus utilisés à l'échelle globale reposent sur des **mesures météorologiques**, se basant par exemple sur des données pluviométriques tel que le SPI (*McKee et al., 1993*) ou plus récemment combinant précipitations et températures de l'air comme le SPEI (*Vicente-Serrano, 2010*). Ces indicateurs sont notamment centralisés et diffusés via le [Global Drought Observatory](#) du [service de gestion des risques de Copernicus](#) afin d'alerter en cas de fortes sécheresses imminentes. Ces indicateurs nécessitent un réseau de station de mesures dense et précis afin de couvrir de grandes étendues. De tels équipements exigent cependant un investissement important, relatifs aux instruments de mesures, à leur maintenance, ainsi qu'à la récupération et au traitement des données récoltées.

L'arrivée en masse de données satellitaires, avec la facilité d'accès à des données résolues et aux séries temporelles qu'elles constituent, laisse entrevoir des possibilités intéressantes pour le suivi à la fois spatial et temporel de phénomènes à large échelle. De plus, la capacité des capteurs spatiaux à observer dans plusieurs bandes spectrales, permet d'accéder à divers paramètres de la surface en lien direct avec la sécheresse de la végétation. De ce fait, 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).

4.1.1. Les indicateurs basés sur la végétation

Certaines méthodes consistent à situer **l'état actuel de la végétation par rapport aux valeurs extrêmes** observées sur une période relativement longue (ici plus d'une vingtaine d'années). C'est le cas du VCI (*Vegetation Condition Index* ; Kogan et Sullivan, 1993 ; Kogan, 1995, 1997) qui compare la valeur actuelle d'un indice de végétation VI (le NDVI dans ce cas) à la gamme de valeurs observées sur plusieurs années :

$$VCI = \frac{VI - VI_{min}}{VI_{max} - VI_{min}}$$

5

Les VI_{min} et VI_{max} correspondent respectivement aux valeurs minimales et maximales pour une période temporelle (par exemple, un mois) à l'aide de plusieurs années de données satellitaires. Un VCI 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). Cet indicateur fut un des premiers indicateurs satellites permettant d'estimer l'état de santé de la végétation, en particulier la sécheresse agricole (McVicar et Jupp, 1998). Il fut initialement testé lors du lancement du capteur satellite NOAA-AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer*) en utilisant le NDVI et permettant de fournir des cartes de la sécheresse végétale à l'échelle globale et à une résolution de 4 km tous les 7 jours.

D'autres méthodes consistent à estimer des **anomalies** à partir des séries temporelles d'indices. A titre d'exemple, le VAI (*Vegetation Anomaly Index* ; Amri et al., 2011 ; Peters et al., 2002) est obtenu en normalisant et standardisant l'état de la végétation :

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

6

avec \overline{VI} la moyenne et σ_{VI} l'écart-type calculés pour une période temporelle (par exemple, un mois) 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.

Depuis le début des années 2010, les recherches sur l'utilisation de ces indices pour le suivi de la sécheresse et de ses conséquences en agriculture sont nombreuses (Hazaymeh et Hassan, 2016 ; Sadeghi et Hazbavi, 2017 ; Vaani et Porchelvan, 2018), montrant leur pertinence pour évaluer la sécheresse agricole sur le territoire calédonien via ce présent projet. De manière générale, le NDVI est l'indice de végétation le plus utilisé pour calculer les indicateurs de sécheresse, lié notamment à sa corrélation significative avec les précipitations et l'humidité du sol. Néanmoins, d'autres indices de végétation ont également montré leur intérêt pour étudier la sécheresse comme le NDWI et l'EVI (Gu et al., 2008 ; Xie et Fan, 2021), le fAPAR (*fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* ; Sepulcre-Canto, 2012) informant sur la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la canopée, ou encore

l'évapotranspiration (*Anderson et al., 2011*) qui est le résultat combiné de la transpiration des plantes et de l'évaporation du sol.

4.1.2. *Les indicateurs basés sur la température et l'humidité*

Un état anormal de la végétation peut dans certains cas être causé par d'autres facteurs que la sécheresse (maladies par exemple). C'est pourquoi il est intéressant d'observer le comportement **d'autres variables de surface** afin de vérifier le lien avec la sécheresse végétale. Un déficit d'humidité du sol ou à l'inverse une température anormalement haute de la surface sont directement liés à l'état de stress de la végétation. Des indicateurs se basant sur ces variables ont été largement utilisés en télédétection pour étudier la sécheresse agricole, tels que le TCI (*Temperature Condition Index ; Kogan, 1995, 1997*) ou le MAI (*Moisture Anomaly Index ; Amri et al., 2012 ; Le Page et Zribi, 2019*). Tout comme le VCI, le TCI s'obtient en comparant la température actuelle LST aux extrêmes, à la seule différence que cette valeur est soustraite à la température historique maximale LST_{max} du fait du lien inverse entre la température et le stress des plantes (un TCI nul indiquant une sécheresse, et TCI unitaire une situation favorable). Le MAI quant à lui correspond aux anomalies de l'humidité du sol sur les années étudiées. Ces deux indicateurs se calculent de la manière suivante :

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}}$$

7

$$MAI = \frac{SWI - \overline{SWI}}{\sigma_{SWI}}$$

8

4.1.3. *Les indicateurs combinés*

Des indicateurs issus de la **combinaison de plusieurs indices de surfaces** ont également été proposés dans la littérature. Parmi les plus connus et couramment utilisés, nous pouvons citer le VHI (*Vegetation Health Index ; Kogan, 1997, 2000*) qui intègre le VCI et le TCI :

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

9

où α est un paramètre définissant la contribution relative du VCI et TCI. Dans la plupart des travaux, cette valeur est définie à 0.5, supposant une même contribution de la température et de l'indice de végétation. Le VHI a été notamment utilisé pour estimer l'impact de la sécheresse sur le rendement des cultures (*Unganai et Kogan, 1998*) ou encore déterminer avec précision l'étendue de la sécheresse agricole à partir d'images Landsat (*Sholihah et al., 2016*).

Tableau 3 : Classification des valeurs de VHI pour estimer l'intensité de la sécheresse végétale (d'après Kogan, 1997)

Valeurs du VHI	Catégories
> 0,4	Pas de stress hydrique
0,4 à 0,31	Proche de la normale
0,3 à 0,21	Modérément sec
0,2 à 0,11	Très sec
0,1 à 0	Extrêmement sec

Par la suite, d'autres indicateurs combinés ont été proposés, tels que le SMADI (*Soil Moisture Agricultural Drought Index*; Sanchez et al., 2016) faisant intervenir l'humidité du sol SMADI, ou encore des indicateurs intégrant également les précipitations comme le CDI (*Combined Drought Indicator*; Sepulcre-Canto et al., 2012) ou l'ECDI (*Enhanced Combined Drought Index*; Enenkel et al., 2016). Grâce à la combinaison de variables climatiques (précipitations) et de surface (humidité, température, activité photosynthétique), ces indicateurs combinés fournissent une information robuste sur l'état de la sécheresse à une échelle globale. A titre d'exemple, le CDI est produit de manière opérationnelle par [l'European Drought Observatory](#) et fournit tous les 10 jours et à 5 km de résolution des cartes d'alertes informant sur les zones affectées ou qui seraient potentiellement affectées par la sécheresse agricole. Pour cela, il se base sur la **relation de cause à effet de la sécheresse agricole** qui dit qu'une perte de production de la végétation (sécheresse végétale) est causée par un déficit d'humidité du sol, qui lui-même est dû à un déficit pluviométrique (sécheresse météorologique). Le CDI présente 3 niveaux d'alertes ("Watch", "Warning" et "Alert") correspondant au niveau où l'on se situe dans la relation, tel que :

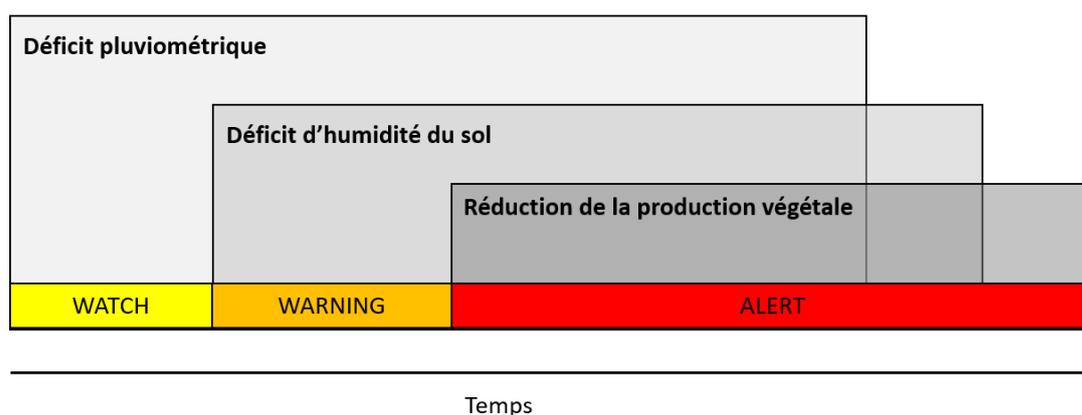


Figure 8 : Relation de cause à effet de la sécheresse agricole (d'après Sépulcre-Canto et al., 2012)

4.2. Climat et végétation en Nouvelle-Calédonie

La sécheresse est directement liée aux facteurs climatiques du milieu tels que les précipitations ou la température de surface (évapotranspiration) mais aussi à l'occupation du sol et notamment aux différents types de végétation composant la surface. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître les caractéristiques environnementales de la Nouvelle-Calédonie afin de comprendre leur impact potentiel sur la sécheresse végétale.

La Nouvelle-Calédonie est un territoire insulaire qui se compose d'une île principale, la Grande-Terre, et de plusieurs îles que sont les îles Belep au Nord, les îles Loyauté à l'Est, et l'île des Pins au Sud. Du fait de sa position dans le Pacifique Sud, la Nouvelle-Calédonie bénéficie d'un climat subtropical avec deux saisons principales (*Chaud et humide* de novembre à avril, *Fraîche* de mai à novembre). Deux saisons intermédiaires plus modérées lient ces deux régimes : la saison *Sèche* de septembre à novembre, et une saison avec diminution des précipitations entre avril et mai.

La répartition des précipitations sur le territoire est fortement influencée par la topographie (Romieux, 2011). Sur la Grande-Terre, la Chaîne centrale crée une rupture Est/Ouest (Fig.9.a) induisant de fortes précipitations sur le Nord et le Sud de la côte Est pouvant atteindre 3500 mm par an (Mont Panié) et à l'inverse des moyennes plus faibles sur les plaines de la côte Ouest (800 mm). Trois grands types d'environnements sont donc présents sur la Nouvelle-Calédonie :

- 1) La côte Ouest et le Nord de la Grande-Terre sont caractérisés par des précipitations minimales et un relief se composant de vastes plaines dont la végétation dominante est de type fourrés, savanes, maquis miniers, forêts sèches (Fig.9.b). La majorité des terres agricoles de Nouvelle-Calédonie se trouvent sur ces plaines, avec une activité centrée autour de l'élevage bovin principalement, les céréales ainsi que l'agriculture vivrière.
- 2) La côte Est et le Sud de la Grande-Terre, avec des précipitations maximales, sont caractérisées par un relief montagneux (versants de la chaîne) et dont la végétation est majoritairement de type forêt tropicale humide à l'Est et maquis miniers au Sud. Une faible part de l'activité agricole se retrouve sur ces terres, peu propices au développement des cultures du fait du relief escarpé mais aussi des sols ultrabasiques au Sud de l'île.
- 3) Les îles Loyautés sont principalement composées de forêts denses et humides, avec un relief très peu marqué, et avec une précipitation annuelle située autour des 1600 mm. Bien que l'on puisse y trouver de nombreuses exploitations de petites tailles, l'activité agricole y est essentiellement non marchande et donc réservée à une consommation familiale.

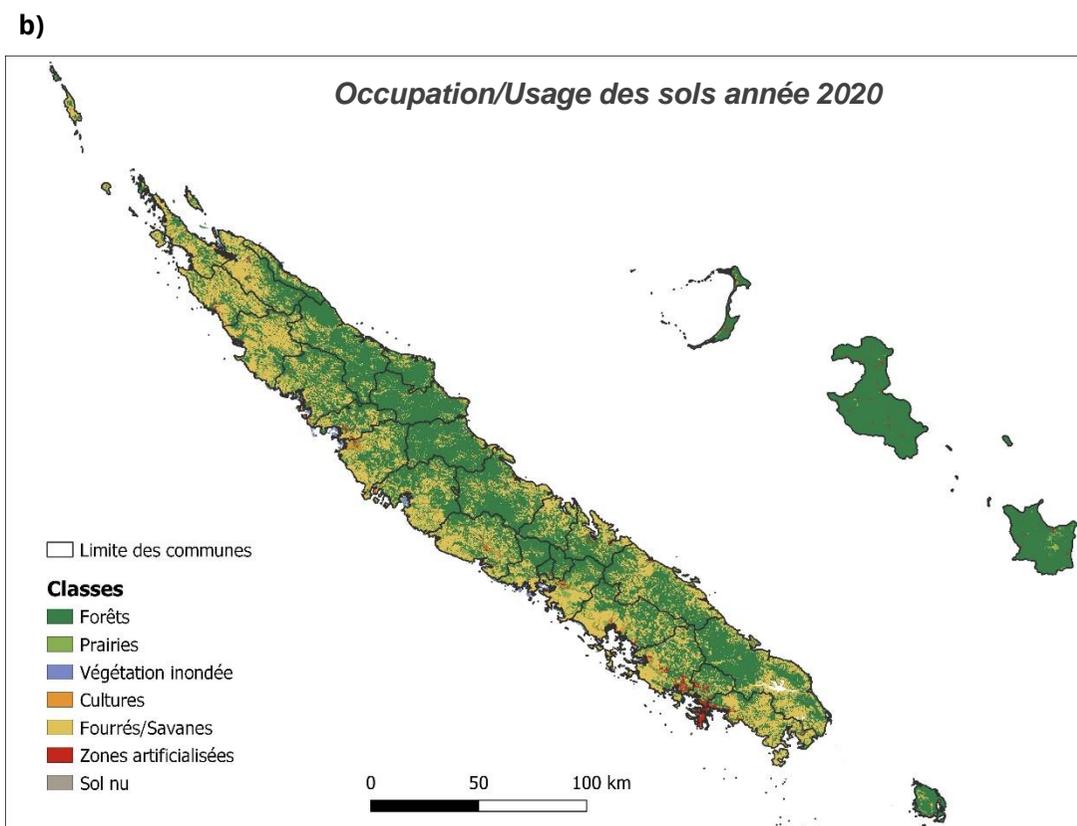
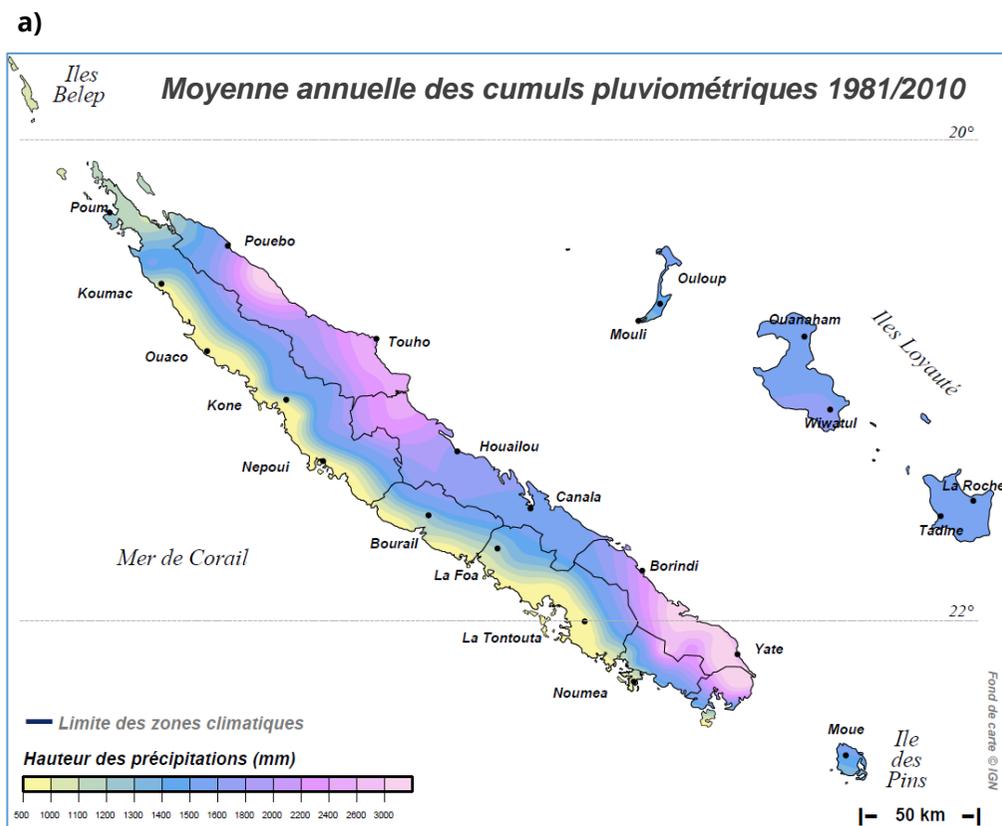


Figure 9 : (a) Précipitations moyennes annuelles pour la période 1981-2010 (Météo-France, 2018) et (b) Occupation/Usage des sols 2020 (ESRI Land Cover, 2020)

Le phénomène ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) joue également un rôle important sur le climat dans la région Pacifique. Tous les 3-4 ans, une alternance est observée entre une phase d'anomalies climatiques positives et une phase d'anomalies négatives : (1) phase *La Niña* se traduisant par une augmentation des précipitations et une diminution de la température de surface des océans, et (2) phase *El Niño* liée à une diminution des pluies et une augmentation de la température. L'intensité de ces phases est variable au cours des années, et peut affecter significativement la période sèche lorsque les anomalies *El Niño* sont très intenses. Certains indices permettent de quantifier et suivre l'intensité de ce phénomène comme l'indice ONI (Oceanic Niño index) :

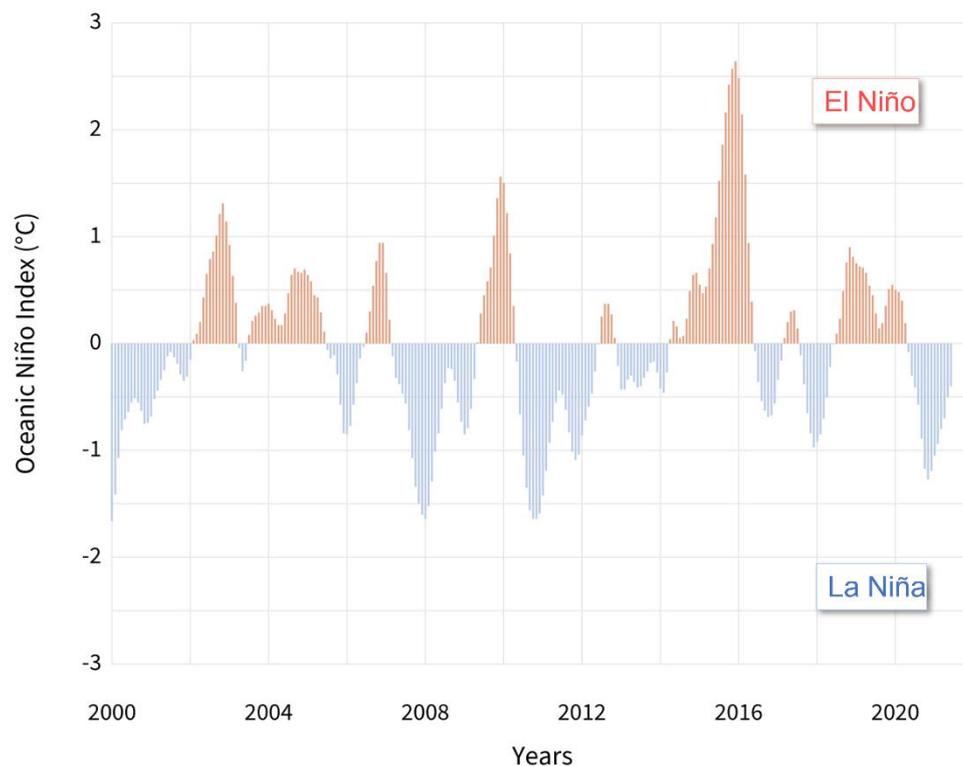


Figure 10 : Indice ONI obtenu à partir des anomalies des températures de surface de la mer dans l'océan Pacifique tropical central. Cet indice est produit par la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) afin de suivre le phénomène ENSO

4.3. Echelle globale

4.3.1. *Méthodologie*

Les indicateurs développés à cette échelle ont pour finalité d'informer sur l'intensité de la sécheresse végétale de manière globale sur le territoire, en répondant notamment aux besoins de l'Agence Rurale d'accéder à un niveau communal et intra-communal (section 2.3). A cette échelle, 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.

La méthodologie suivie ici consiste à calculer plusieurs indicateurs de sécheresse basés sur différents indices de surface (NDVI, EVI, NDWI, LST, SWI) et diverses méthodes de calcul (équations 5 à 9), puis d'en **évaluer les performances** afin de sélectionner un lot d'indicateurs adaptés à une étude globale de la sécheresse végétale se **voulant la plus générique possible** (fonctionnement adapté au mieux à l'ensemble du territoire et des saisons). *Notons qu'une étude visant à combiner indices satellites et météorologiques pour la caractérisation de la sécheresse végétale en Nouvelle-Calédonie a été réalisée en 2018 lors du stage d'Oriane Bruyère à Météo-France NC (Bruyère, 2018). Nous reprenons la méthodologie de cette étude et les conclusions observées, en apportant ici une évaluation complète de la partie satellitaire via notamment l'analyse et la combinaison de différents indices et indicateurs à l'échelle globale.*

Ainsi, différents traitements ont été appliqués aux images satellites :

1. Prétraitements des données :

Chaque produit satellite a été prétraité de manière à supprimer les pixels de mauvaise qualité. En particulier les nuages ont été masqués pour les produits optiques et thermiques, tout comme les pixels ayant subi certaines altérations liées à des problèmes de dysfonctionnement des capteurs. Pour les produits de réflectances de surface MODIS, l'indice de végétation NDWI a été calculé à cette étape (équation 3).

2. Composition temporelle :

Une phase de composition temporelle a ensuite été réalisée afin d'obtenir une image agrégée tous les mois. Ce pas de temps mensuel a été sélectionné car il correspond d'une part à celui des indicateurs météorologiques (SPI) servant de référence pour la validation, et car il permet également de réduire au maximum le nombre de données manquantes (réduction de l'impact des nuages notamment).

3. Calcul des indicateurs satellites :

Ici, différents indicateurs ont été calculés sur un pas de temps mensuel : les produits d'anomalies (VAI, TAI, MAI), les produits basés sur la distance aux extrêmes (VCI, TCI) et un produit combiné (VHI). Pour ce dernier produit, les indicateurs VCI (250 – 500 m) ont été ré-échantillonnés à la résolution des indicateurs TCI (1 km) pour permettre le calcul du VHI (équation 9).

4. Analyse statistique de corrélation :

Une analyse de corrélation (*test de Pearson*) a été réalisée entre chaque indicateur satellite et le SPI-3 mois. Ce SPI est obtenu à partir de cumuls de précipitations acquis sur une période de 3 mois, et présentant d'après la littérature les meilleures scores de corrélation avec la végétation (*Ji et Peters, 2003*). Cette analyse a été réalisée à une échelle communale : les indicateurs satellites ont été agrégés spatialement sur l'ensemble des communes, puis les séries temporelles de chaque commune ont été comparées aux SPI fournis au niveau des stations (SPI également agrégés dans le cas de plusieurs stations par commune).

Le choix de faire une validation de ces indicateurs à un niveau communal (et non à la station par exemple) nous permet d'une part d'avoir une information satellite qui soit statistiquement significative (réduction du nombre de données manquantes par agrégation temporelle puis spatiale), et d'autre part de se placer à une échelle spatiale intermédiaire qui soit cohérente à la fois d'un point de vue de la variabilité spatiale des précipitations mais aussi de celle de la végétation sur l'ensemble du territoire, tout en répondant aux attentes de l'utilisateur (premier niveau d'information souhaité par l'Agence Rurale).

5. Indicateur combiné :

Enfin, cette dernière étape a consisté à tirer parti des différents indicateurs étudiés ici, à la fois satellites (humidité du sol, température, état végétation) et météorologiques (précipitations, évapotranspiration), pour fournir un indicateur combiné de la sécheresse sur le territoire. Cet indicateur se présente sous la forme de carte d'alertes globales qui ont été produites en se basant sur la méthodologie de *Sepulcre-Canto et al. (2012)* (Fig.8) et en y intégrant les produits spécifiquement étudiés et validés dans ce projet sur la Nouvelle-Calédonie.

4.3.2. ***Dynamique spatio-temporelle des indices de surface***

La figure 11 ci-après présente les valeurs minimales par commune obtenues pour les différents indices de végétation (NDVI, EVI, NDWI) ainsi que la température de surface LST. Ces valeurs sont issues (1) de la moyenne spatiale des indices sur chaque région administrative, puis (2) de l'estimation des valeurs minimales sur l'ensemble de la période d'étude (2000 – 2021).

De manière générale, nous pouvons remarquer une **disparité côte Ouest / côte Est** : des valeurs minimales plus faibles sont obtenues pour les indices de végétation sur la côte Ouest de la Grande-Terre, alors que la côte Est ainsi que les îles (Iles Loyauté à l'Est et Ile des Pins au Sud) présentent des valeurs minimales moins faibles. Cela peut s'expliquer par la présence sur la côte Ouest de régions composées principalement de fourrés, savanes et cultures agricoles bien plus sensibles aux aléas de précipitations, et donc aux sécheresses, que le Nord ou les îles dont la surface est principalement occupée par de la végétation dense (forêt humide). Logiquement, la température de surface présente quant à elle un comportement inversé, avec des températures qui atteignent des valeurs minimales sur la partie Est de la Grande-Terre. Ce comportement

inversé peut s'expliquer par une augmentation de la température de surface due à une diminution de l'évapotranspiration de la végétation qui évacue moins bien la chaleur lors que celle-ci est en état de stress.

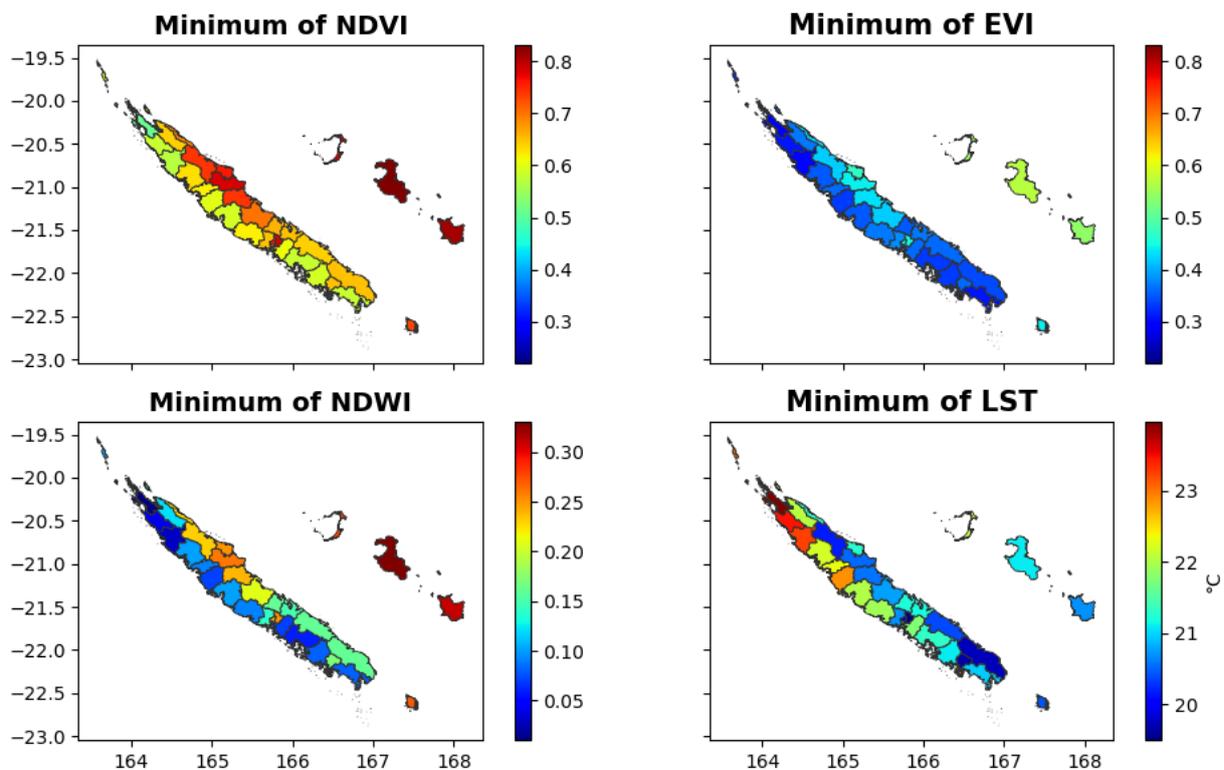


Figure 11 : Valeurs minimales par commune pour les indices de végétation et température de surface

Nous constatons que l'indice EVI atteint des valeurs plus faibles en général (0.2 pour les plus basses) que le NDVI (0.4). Cela est lié à la plus grande sensibilité de l'EVI aux zones à forte biomasse, évitant ainsi sa saturation sur ces zones. Nous constatons la même disparité côte Ouest/Nord-Est pour les indices d'humidités du sol présentés en annexe 6. Nous avons en particulier choisi d'étudier deux produits d'humidité SWI correspondant à deux niveaux de profondeurs : SWI-001 pour l'humidité de surface, et SWI-020 pour l'humidité en zone racinaire.

La figure 12 présente pour chaque commune la date moyenne, ici exprimée en mois, pour laquelle les valeurs des indices de végétation (température de surface) atteignent leurs valeurs minimales (maximales). De manière générale, les mois à plus faibles valeurs d'indices de végétation, et inversement à plus haute température de surface, sont **octobre, novembre et décembre, correspondant logiquement à la période sèche en Nouvelle-Calédonie**. Les indices d'humidité présentés en annexe révèlent un comportement comparable, sans différences significatives entre les deux types de produits d'humidité.

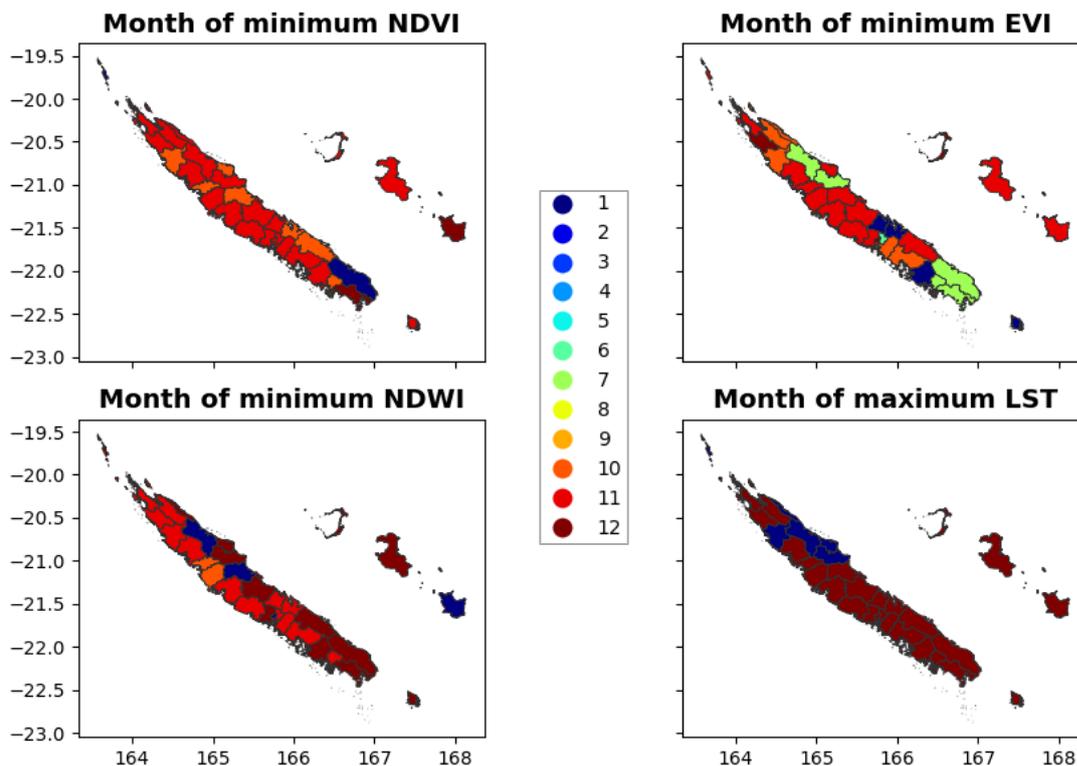


Figure 12: Mois moyens pour lesquels les indices de végétation et températures de surface atteignent leurs valeurs minimales

Nous remarquons que pour certaines régions les valeurs minimales (maximales pour la température) arrivent un peu plus tard : minimums observés en janvier pour le Sud de la Grande-Terre (NDVI), Nord-Est (NDWI, LST). L'EVI présente quant à lui certains comportements inattendus, avec des régions pour lesquelles les valeurs minimales se situent en juillet.

Le graphe de la figure 13 présente les séries temporelles d'indices NDVI pour trois communes de la Grande-Terre : Bourail (côte Ouest), Poindimié (Nord-Est) et Yaté (Sud). L'allure des courbes pour Bourail et Yaté révèlent des valeurs en moyenne plus faible que pour Poindimié, lié à la réponse du NDVI à la forte présence de forêt sur cette dernière région. **La commune de Bourail présente un cycle saisonnier marqué**, avec des valeurs extrêmes plus importantes que pour les deux autres communes, en particulier que pour Poindimié. Ce comportement est encore une fois lié à la concentration importante de surfaces agricoles sur cette commune, dont l'évolution au cours des saisons est fortement marquée par rapport aux zones de forêt.

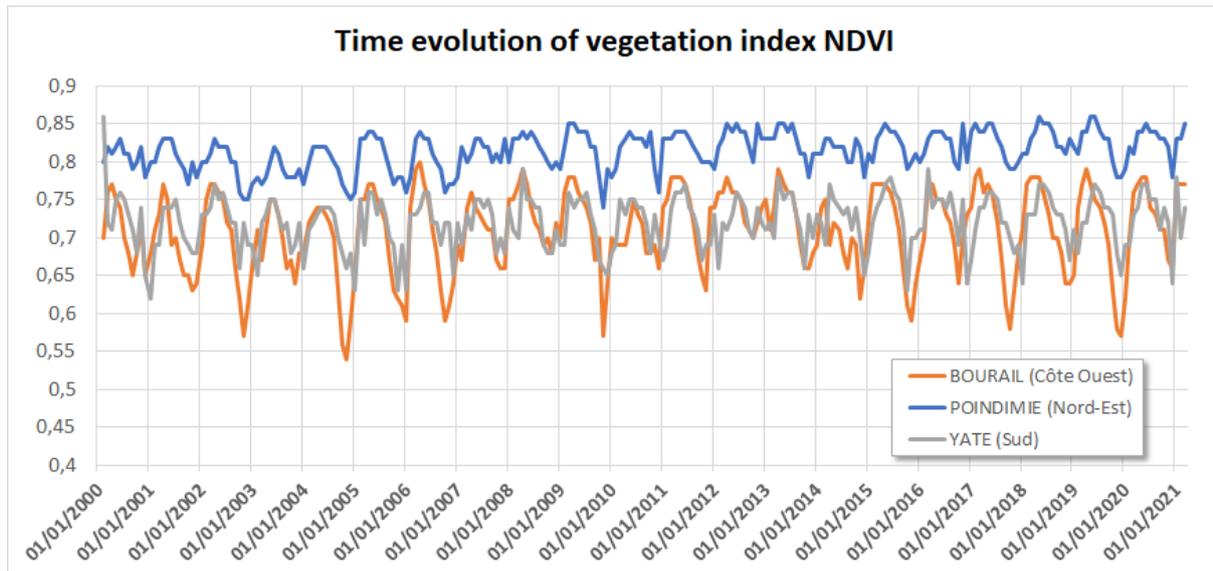


Figure 13 : Evolution temporelle de l'indice NDVI pour trois communes de Nouvelle-Calédonie

La figure 14 ci-après présente les corrélations obtenues sur la période d'étude entre les différents indices de surface. Globalement, sur l'ensemble des communes nous observons une corrélation positive entre les indices de végétation et les indices d'humidité (ici SWI-020, comportement comparable observé pour SWI-001 en annexe 6). Les Iles présentent en revanche une corrélation nulle. Cela peut s'expliquer par l'impact de la mer sur le signal acquis par ASCAT, lié à la taille importante des pixels d'humidité (> 10 km). Pour ce qui est des températures de surface, comme attendu une corrélation négative est observée sur la plupart des communes. Cependant, nous remarquons que l'EVI présente une majorité de commune à corrélation nulle, voire positive pour trois communes (Nord, chaîne centrale et Sud-Ouest). A l'inverse, de fortes corrélations négatives sont observées entre le NDWI et la LST, en particulier pour la moitié Sud de la Grande-Terre et les Iles.

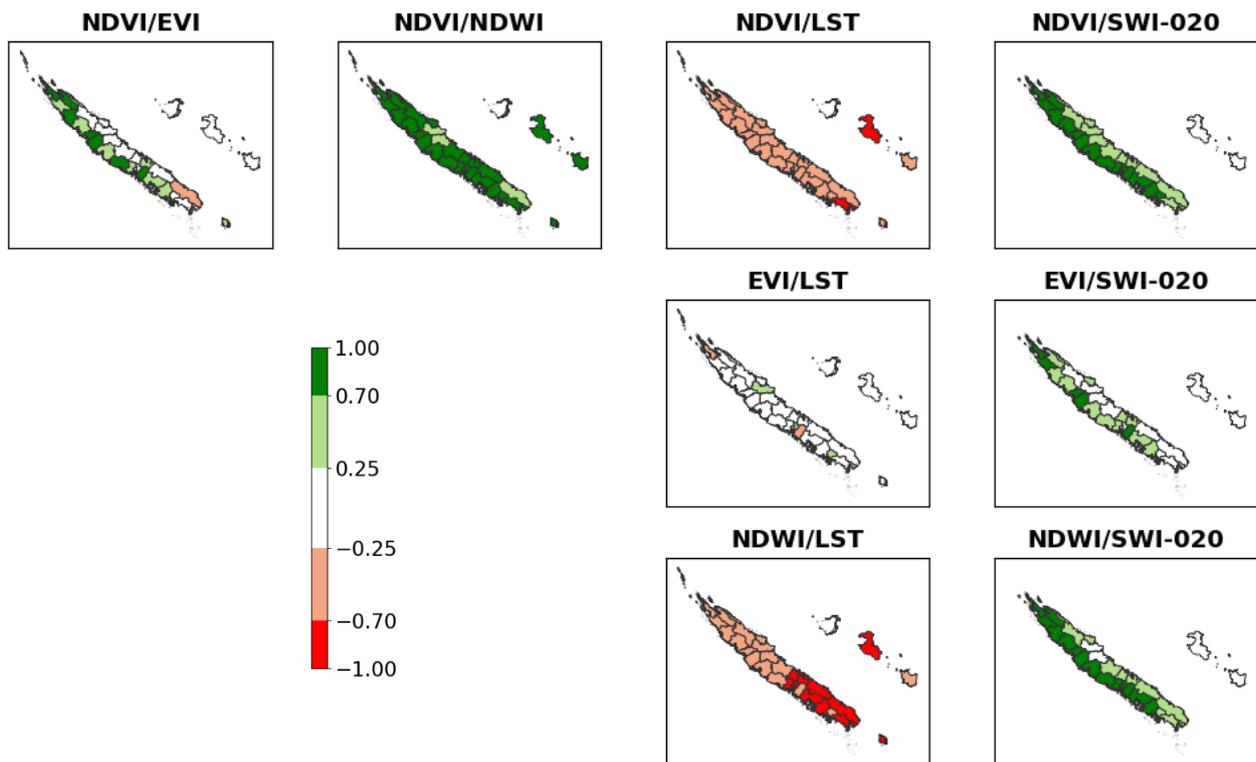


Figure 14 : Corrélations entre les indices de surface pour la période 2000 - 2021

Ces analyses de corrélation confirment que le NDVI, le NDWI, la LST et les produits d'humidité SWI détectent conjointement les dynamiques de la végétation, et ont permis de mettre en évidence certaines disparités spatiales liées à l'occupation du sol (synthèse présentée dans le tableau 4 ci-dessous). **L'utilisation de ces indices montre donc un intérêt pour le suivi de la sécheresse végétale en Nouvelle-Calédonie, en particulier pour les régions situées sur la côte Ouest où se concentre la majorité de l'activité agricole du territoire.**

Tableau 4 : Synthèse des caractéristiques spatiales et temporelles de chaque indice de surface

Indice	Variable observée	Dynamique spatiale (lien avec occupation du sol)	Dynamique temporelle (lien avec cycle végétation)
NDVI	Activité photosynthétique	✓	✓
EVI	Activité photosynthétique	✓	✗
NDWI	Activité photosynthétique, Contenu en eau	✓	✓
LST	Température de surface	✓	✓
SWI-001	Humidité de surface	✓	✓
SWI-020	Humidité en zone racinaire	✓	✓

4.3.3. Etude et validation des indicateurs de sécheresse

La figure 15.a compare les profils temporels du VHI, et du SPI-3 mois sur la commune de Bourail (côte Ouest). Le VHI présenté ici a été obtenu en combinant les températures LST et l'indice de végétation NDWI. Nous constatons une allure relativement comparable entre les deux indicateurs. En particulier, **l'indicateur VHI détecte les évènements de sécheresse intense** qui ont touché la Nouvelle-Calédonie en 2014, fin 2017 et fin 2019/début 2020 (flèches en rouge). A titre d'exemple, deux cartes (Fig.15.b-c) présentent les moyennes par commune du VHI acquis pour les mois de septembre 2012 et septembre 2017. Nous constatons de faibles valeurs de VHI pour l'année 2017, sur les communes de la côte Ouest et en particulier au niveau de Bourail (VHI<0.3), traduisant un état de stress de la végétation. Des évènements non détectés par le SPI sont détectés par le VHI en 2004 et 2010. Des résultats comparables sont obtenus pour les indicateurs de sécheresse basés sur l'humidité du sol (série temporelle du MAI SWI-020 présentée en annexe 7).

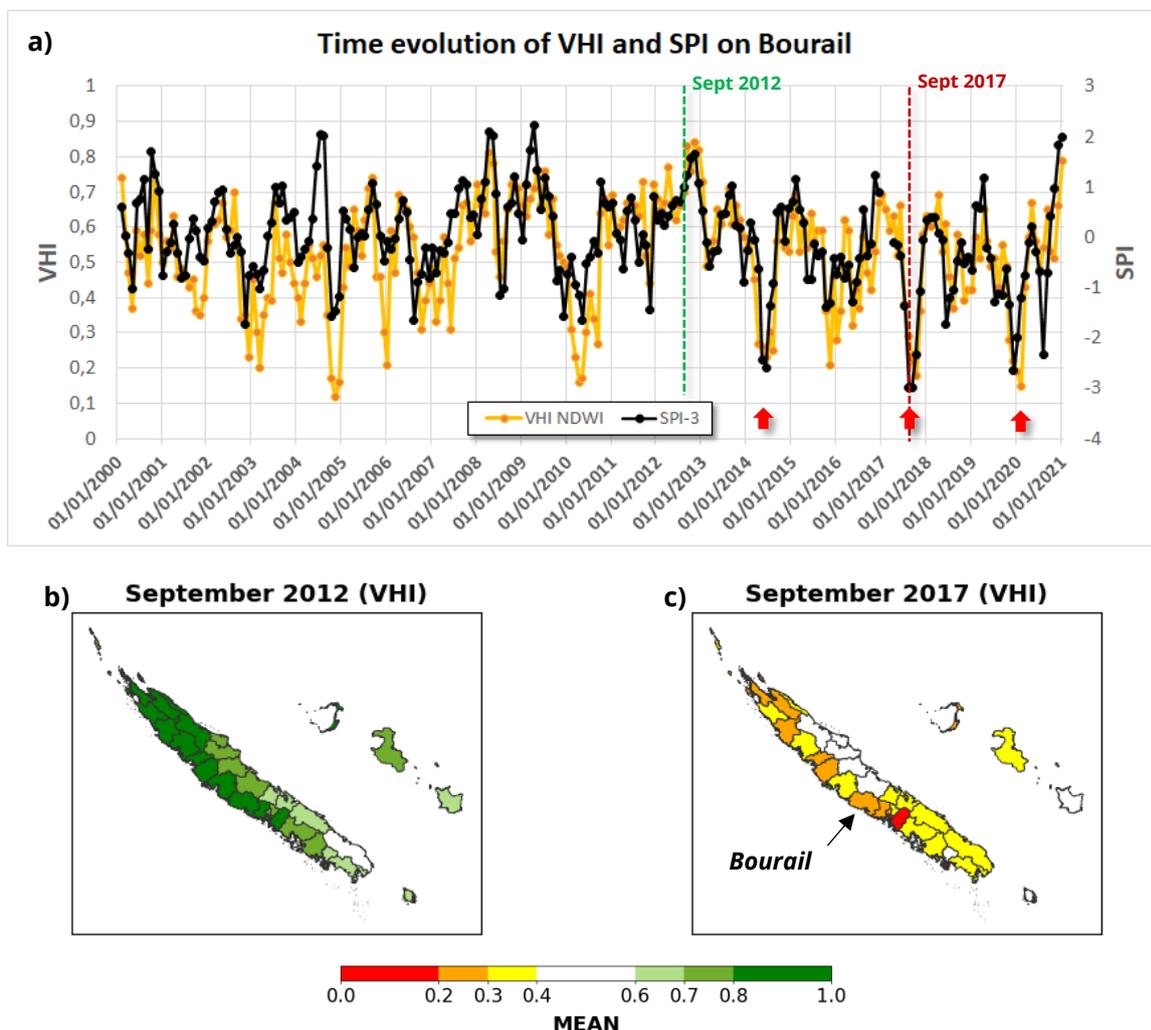


Figure 15 : (a) Comparaison des évolutions temporelles des indicateurs VHI (NDWI + LST) et du SPI-3 mois sur la commune de Bourail, et cartes du VHI moyen par commune obtenues pour Septembre 2012 (b) et Septembre 2017 (c)

La figure 16 présente les coefficients de corrélations entre les indicateurs satellites (anomalies, VHI) et le SPI-3 mois, pour la commune de Bourail. Dans un premier temps, cette analyse a été réalisée par mois de manière mettre en évidence l'impact des saisons sur la corrélation. Les anomalies VAI (Fig.16.a) révèlent une meilleure corrélation (scores situés entre 0.5 et 0.9) pour les mois de la saison sèche (septembre-décembre). Ce niveau de corrélation persiste jusqu'en janvier-février, puis diminue progressivement dès l'arrivée de la saison fraîche vers avril-mai, pour atteindre un score minimale (< 0.3) en juin-juillet-août. Une différence significative de corrélation entre la période fraîche et la période sèche est alors observée pour les indicateurs estimés à partir des indices de végétation, ce qui est moins le cas pour les indicateurs MAI basés sur l'humidité présentant une corrélation un peu moins impactée par les effets saisonniers (scores situés entre 0.5 et 0.9). Nous observons tout de même un effet saisonnier comparable à celui des VAI. Les anomalies de température TAI révèlent des corrélations négatives avec le SPI, ce qui était attendu (axe des ordonnées inversés). L'évolution du TAI révèle un effet saisonnier moins marqué que pour les autres indicateurs, avec notamment une valeur absolue maximale observée en mai (-0.9) et une valeur absolue minimale en juin (-0.2). Nous remarquons néanmoins que ces scores augmentent en période sèche, comme pour les autres indicateurs.

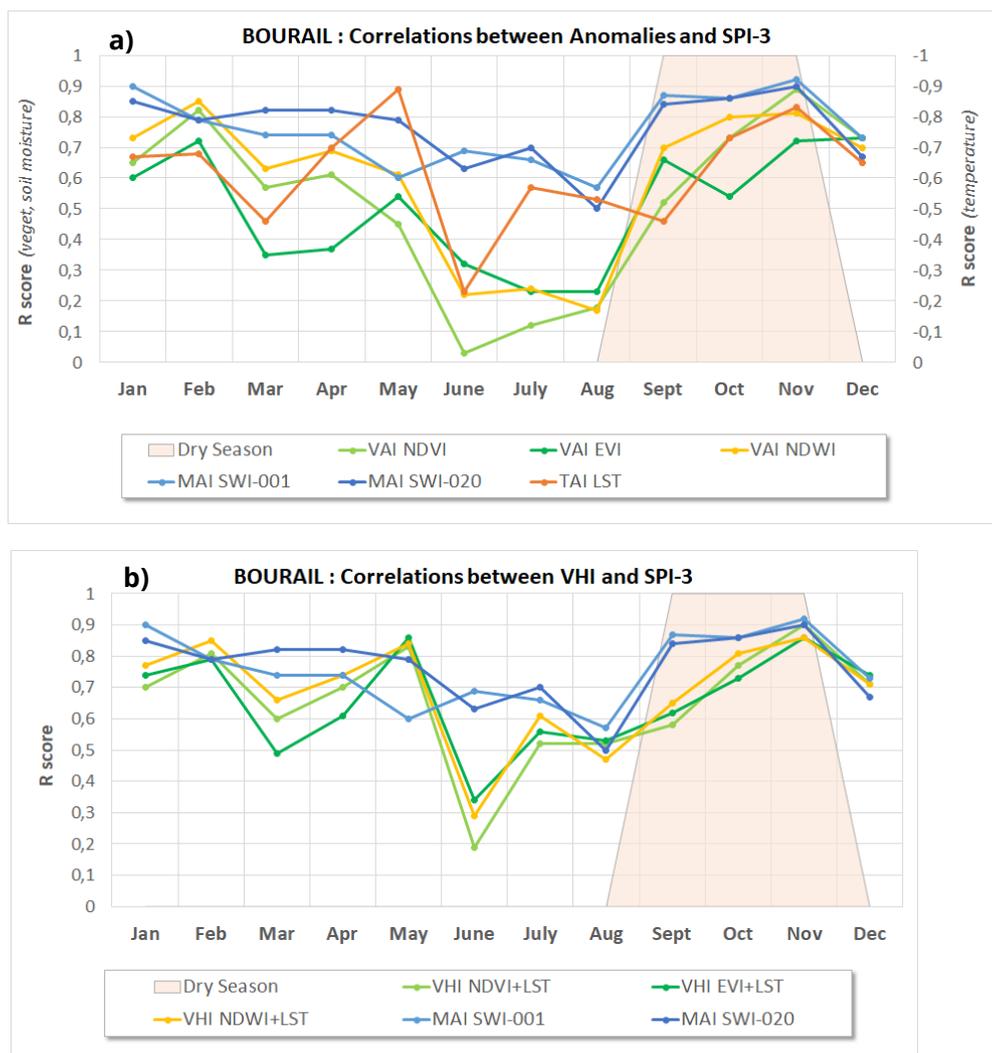


Figure 16 : Corrélations mensuelles entre le SPI-3 mois et les indicateurs obtenus sur la commune de Bourail : (a) par la méthode des anomalies et (b) par la méthode du VHI

Les corrélations obtenues entre le VHI et le SPI-3 (Fig.16.b) sont globalement plus élevées que pour les anomalies. Cela peut s'observer notamment sur les mois de la période fraîche qui présentent de meilleurs scores. Nous remarquons également moins de différence entre les indicateurs VHI, ce qui peut être lié à la contribution commune de la température dans chacun de ces indicateurs (*bien que nous présentées ici par soucis de clarté, des performances similaires à celles des anomalies ont été obtenues pour les indicateurs VCI et TCI*). **Cela révèle l'importance de considérer à la fois la température de surface et l'état de la végétation (activité photosynthétique, contenu en eau) pour détecter les phénomènes de sécheresse de manière globale (impact saisonnier amoindri) dans une région comme Bourail essentiellement composée de fourrés, savane et parcelles agricoles et dont les précipitations moyennes annuelles sont les plus faibles sur le territoire.**

La même analyse a été réalisée sur la commune de Poindimié (côte Est). Cette commune présente un climat et une végétation dominante très différents de ceux de Bourail, avec des fortes précipitations et une surface majoritairement composée de forêt dense et humide. Les résultats sont présentés en annexe 8 et montrent une corrélation diminuée en moyenne sur l'ensemble de l'année (pour tous les indicateurs). La corrélation est plus variable au cours des mois que pour Bourail, avec un cycle saisonnier moins marqué (VAI EVI, VHI EVI+LST, MAI SWI-020) voire inexistant dans certains cas (TAI, MAI SWI-001). Pour certains indicateurs (VAI NDWI, VHI NDVI+LST), de bons scores sont néanmoins obtenus sur certains mois comme la période sèche.

Nous avons également réalisé des tests de corrélation en considérant cette fois-ci tous les mois de l'année (séries temporelles complètes) et en appliquant plusieurs décalages temporels entre le SPI-3 mois et les indicateurs satellites. La figure 17 ci-après représente pour les indicateurs VHI (NDVI, NDWI) et MAI (humidité de surface, humidité en zone racinaire), les scores de corrélation maximum (*R score max*, Fig.17.a) obtenus pour les décalages correspondants exprimés en mois (*LAG*, Fig.17.b), et ce pour chacune des communes. **Nous constatons que les scores sont globalement les plus élevés sur la côte Ouest**, révélant une bonne performance des indicateurs sur les communes correspondantes. Les indicateurs VHI présente des performances moindres sur les communes de la côte Est et le Sud, avec notamment une commune présentant une corrélation proche de zéro pour le VHI-ndvi (commune du Yaté, au Sud). Les indicateurs MAI présentent de manière générale de bons scores que ce soit sur la côté Est ou la côte Ouest de la Grande-Terre. Nous constatons que les communes des Iles, ainsi que Yaté et Mont-Dore pour le MAI-001 (*MAI SWI-001*), présentent néanmoins les moins bons scores, probablement dû à la grande taille des pixels pour ces produits d'humidité.

Pour la plupart des communes et des produits, ces corrélations sont maximales lorsque qu'aucun décalage n'est réalisé ($LAG = 0$), ce qui veut donc dire que **les indicateurs satellites sont plus ou moins synchronisés avec l'indicateur météorologique**. Néanmoins, des régions révèlent un décalage d'un mois dans certains cas. Sur les communes du Nord et Côte-Est ainsi que sur une des îles Loyauté (Lifou), le VHI-ndwi présente un pic de corrélation lorsque celui-ci est avancé d'un mois ($LAG = -1$). Cela signifie que cet indicateur présente un retard par rapport au SPI-3 mois. Pour ces communes, **la sécheresse végétale semble donc se détecter un mois après qu'un**

phénomène de sécheresse météorologique ait eu lieu. Ce comportement est logique, faisant partie du temps de réponse possible de la végétation à un déficit de précipitation (*Sepulcre-Canto, 2012*). Le MAI-020 (humidité en zone racinaire) présente également un retard d'un mois sur certaines communes du Nord-Est, alors que le MAI-001 (humidité de surface) présente une avance d'un mois sur les communes du Sud (Yaté, Mont-Dore) et Lifou. La raison à ce comportement différent entre le MAI-001 et MAI-020 est le temps de propagation de l'humidité de surface vers la zone racinaire, engendrant dans certaines régions une détection retardée de la sécheresse via le MAI-020. En revanche, l'avance du MAI-001 par rapport au SPI est surprenante, un déficit d'humidité étant censé se produire après un déficit de précipitations (*Sepulcre-Canto, 2012*). Ce résultat inattendu peut être lié à la qualité du signal d'humidité pour les communes en question (taille des pixels ASCAT altérant le signal et le rendant moins exploitable).

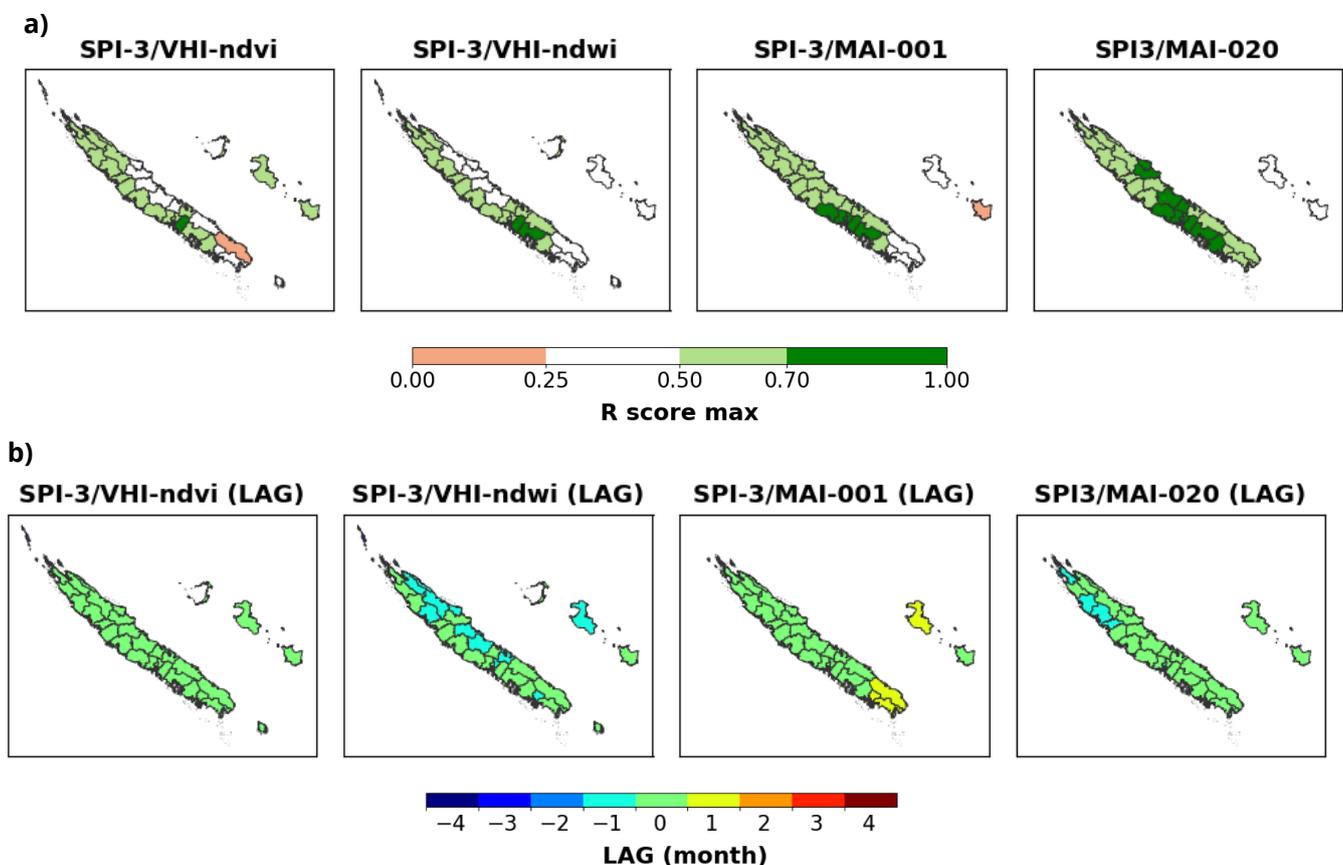


Figure 17 : Corrélations maximum (a) et décalages temporels correspondants (b) obtenus entre le SPI-3 mois et les indicateurs satellites pour la période 2000 - 2021 (SPI/VHI) et 2007 - 2021 (SPI/MAI). A noter que les décalages négatifs (positifs) indiquent que les indicateurs satellites ont été avancés (retardés) par rapport au SPI-3 mois.

Ces différents résultats montrent que les indicateurs satellites sont bien corrélés avec le SPI sur les régions où l'on retrouve la plupart des surfaces agricoles (côte Ouest), et qu'ils sont donc adaptés pour détecter les événements de sécheresse végétale sur les régions qui sont les plus vulnérables aux aléas climatiques. Il est également observé que les indicateurs VHI-ndwi et MAI-020 présentent des performances plus équitablement

réparties sur le territoire (scores > 0.25 pour toutes les communes). Cette différence se confirme par les scores de corrélations maximums obtenus par commune pour les indicateurs non présentés dans cette section (anomalies, VCI, TCI, VHI-evi) et présentés en annexe 9. Une synthèse des performances spatio-temporelles des différents indicateurs est présentée dans le tableau 5 ci-après. **Ainsi, il serait alors recommandé d'utiliser les indicateurs VHI-ndwi et MAI-020 dans le cadre d'une étude globale de la sécheresse végétale réalisée à partir d'indicateurs complémentaires, sur l'ensemble du territoire et sur plusieurs mois de l'année.**

Tableau 5 : Synthèse de l'évaluation spatiale et temporelle des indicateurs satellites par rapport au SPI-3 mois. A noter que le critère de performance est donc basé sur la corrélation entre chaque indicateur et le SPI.

Type	Indicateur	Performance multi-saison (impact minimal des saisons)	Performance multi-région (impact minimal de la région)
<i>Anomalies</i>	VAI ndvi	✗	✗
	VAI evi	✗	✗
	VAI ndwi	✗	✗
	TAI lst	✗	✗
	MAI swi-001	✓	✗
	MAI swi-020	✓	✓
<i>Conditions</i>	VCI ndvi	✗	✗
	VCI evi	✗	✗
	VCI ndwi	✗	✗
	TCI lst	✗	✗
<i>Combinés</i>	VHI ndvi+lst	✓	✗
	VHI evi+lst	✓	✗
	VHI ndwi+lst	✓	✓

4.3.4. *Mise en relation des différents indicateurs sécheresse pour la production d'alertes globales*

Une étape finale de cette étude a consisté à combiner les indicateurs satellites aux indicateurs météorologiques pour permettre d'identifier le niveau d'impact de la sécheresse sur le territoire. 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.8).

Nous avons repris ici la méthodologie proposée par *Sepulcre-Canto (2012)*, en se basant sur les indicateurs spécifiquement évalués et sélectionnés dans cette étude sur

la Nouvelle-Calédonie, à savoir le SPI (*SPI-3 mois*), le MAI (*MAI SWI-020*) et le VHI (*VHI NDWI+LST*). L'indicateur SPEI (*SPEI-3 mois*) a également été utilisé ici, prenant en compte à la fois les précipitations et l'évapotranspiration potentielle pour détecter la sécheresse. Dans le cadre de ce projet, Météo-France a spécifiquement évalué cet indicateur sur plusieurs communes, en appliquant diverses méthodes de calcul (voir note de synthèse en annexe 10). Le SPEI a révélé de bonnes corrélations avec l'indicateur VHI, surtout sur les communes de la côte Ouest. Une première version de cet indicateur a été mise à disposition par Météo-France, se basant sur la méthode *Thornthwaite (1948)*. Nous avons utilisé ici le SPEI-3 mois, qui présente les scores les plus élevés sur les communes de la côte Ouest tout en considérant la majorité des mois de la saison sèche. L'intérêt de cet indicateur est qu'il permet de faire le lien entre la sécheresse météorologique (détectée par le SPI) et la sécheresse de la surface (MAI, VHI), tout en apportant une quantification précise de l'aléa grâce à la période de référence sur laquelle il est calculé (données disponibles sur au moins 30 ans, voire plus pour certaines stations).

La figure 18 présente le fonctionnement de la chaîne de traitement permettant d'obtenir pour un mois donné (ici le mois en cours m) le niveau d'alerte sécheresse par commune. Ce niveau d'alerte correspond au stade d'évolution de la sécheresse détectée sur la Nouvelle-Calédonie :

- **Watch** : Niveau d'alerte minimale correspondant à une détection de déficit pluviométrique, mais sans impact observé sur la surface
- **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
- **Alert** : Niveau d'alerte maximale avec détection d'un état de stress hydrique de la végétation

Pour ce qui est des produits d'entrée de la chaîne, les indicateurs SPI, SPEI et MAI sont considérés pour le mois en cours (m) ainsi que le mois précédent ($m-1$). L'indicateur VHI quant à lui est considéré seulement pour le mois en cours. Ce choix est lié au décalage (retard d'un mois) que nous avons pu observer dans certaines communes entre le VHI et le SPI, et que nous retrouvons également dans certains cas entre le VHI/MAI et le VHI/SPEI (scores et lag de corrélations par commune présentés en annexe 11). Bien que ce décalage ne soit pas observé sur la majorité des communes, nous avons tout de même choisi de prendre en compte les observations du mois précédent de manière globale (sur toutes les communes) afin de s'assurer de ne pas passer à côté d'un déficit de précipitation, d'évapotranspiration ou d'humidité qui pourrait avoir un impact retardé sur la végétation dans certaines régions.

La chaîne développée se compose de plusieurs traitements permettant la combinaison des produits ci-dessus. Ces traitements se regroupent en trois étapes principales :

1) Détection du déficit pour chaque indicateur :

Pour détecter la présence d'un déficit, un seuillage est appliqué à chaque indicateur et chaque mois traité ($m-1$ et m). Les niveaux de seuillages sont ceux utilisés dans la

littérature, à savoir : $SPI < -1$, $SPEI < -1$, $MAI < -1$, $VHI < 0.3$. Trois classes sont alors extraites pour chaque produit : *Deficit*, *No deficit*, *No data*.

A noter que les produits météorologiques seront seuillés pour chaque station, alors que les produits satellites seront seuillés pour chacun des pixels de l'image.

2) Synthèse au niveau communal :

L'information est ensuite ramenée à un niveau communal. Cette échelle a été sélectionnée de manière à rassembler les indicateurs produits à diverses échelles (stations, pixels 1 km, pixels 12.5 km) vers une échelle globale et correspondant aux attentes de l'utilisateur de l'étude.

La sélection de la classe finale de chaque commune est faite en privilégiant le cas le plus défavorable (c.-à-d. *Deficit*) :

- Dans le cas des produits fournis à la station (SPI, SPEI), si au moins une station de la commune détecte un déficit ($C_{station} = Deficit$), alors la classe de la commune sera définie comme telle ($C_{commune} = Deficit$). Si en revanche aucune des stations ne détecte de déficit, alors $C_{commune} = No\ deficit$.
- Pour ce qui est des produits fournis au pixel (MAI, VHI), la classe majoritaire C_{maj} est identifiée. Si celle-ci correspond au cas *Deficit* ($C_{maj} = Deficit$), alors la classe de la commune est définie comme telle. En revanche, si une des deux autres classes est majoritaire ($C_{maj} = No\ deficit$ ou $C_{maj} = No\ data$), alors nous vérifions que la proportion P de pixels *Deficit* par rapport aux pixels de C_{maj} soit inférieure à 0.5. Si c'est le cas, alors $C_{commune} = C_{maj}$. Sinon, $C_{commune} = Deficit$.

3) Affectation du niveau d'alerte :

Pour chaque commune, le niveau d'alerte final correspondra au cas le plus défavorable c'est-à-dire au déficit détecté qui se situe au niveau le plus haut dans la relation : déficit précipitations (*Watch*) → déficit précipitations, humidité, évapotranspiration (*Warning*) → stress végétation (*Alert*).

Ce mode d'affectation priorise toujours le cas le plus défavorable. Le niveau sera affecté à *Alert* ($N_{alert} = Alert$) si un stress de la végétation est observé ($VHI = Deficit$) quel que soit l'état de l'humidité, évapotranspiration et précipitations, alors qu'un niveau inférieur (par ex. $N_{alert} = Warning$) sera affecté si à la fois aucun stress de la végétation n'est observé ($VHI \neq Deficit$) et qu'un déficit d'humidité ou d'évapotranspiration ait été observé ($MAI = Deficit$ ou $SPEI = Deficit$).

Deux autres niveaux d'alerte sont intégrés : le niveau *No alert* lorsque qu'aucune sécheresse n'est détectée sur aucun des produits, et la classe *No data*. Cette dernière classe est affectée à la commune si aucune donnée de SPI n'est disponible pour le mois observé et le mois précédent, et que les autres indicateurs ne sont pas en *Deficit*. Cela part du principe que si aucun déficit n'est observé au niveau de la surface, et que le SPI ne présente pas de données, alors il est préférable de ne pas se prononcer sur le niveau d'alerte (plutôt que de définir un niveau *No alert* qui ne se baserait pas sur les données de précipitations, à l'origine du déficit dans la relation de la sécheresse agricole).

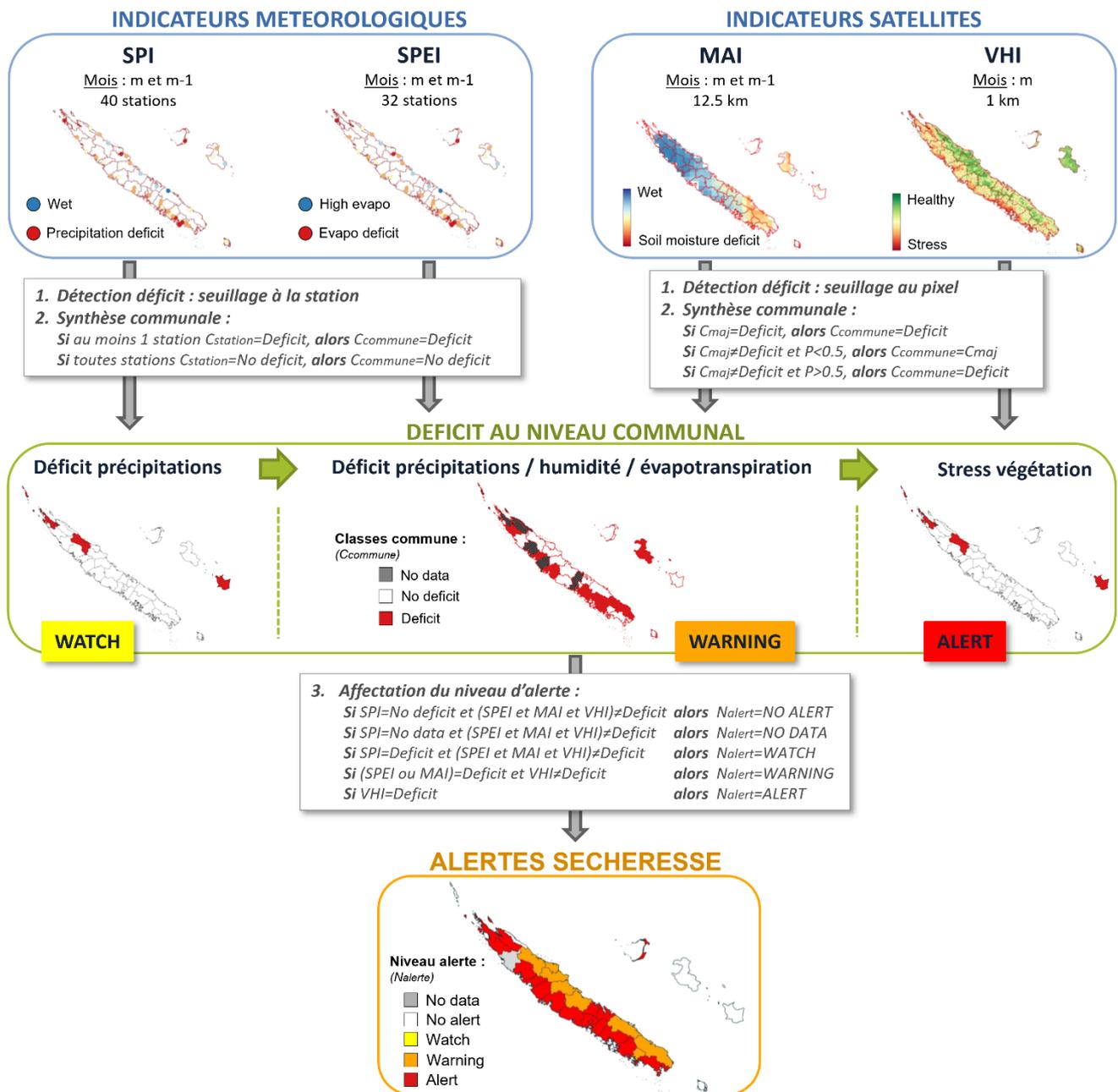


Figure 18: Principe de production des cartes d'alertes sécheresse au niveau communal sur la Nouvelle-Calédonie (cas du mois en cours *m*).

4.4. Echelle locale

4.4.1. *Méthodologie*

L'indicateur développé à l'échelle locale a pour objectif d'informer sur l'intensité de la sécheresse végétale à un niveau parcellaire, correspondant au troisième niveau d'information attendu par l'utilisateur (section 2.3).

A cette échelle, notre travail s'est concentré sur le calcul et l'évaluation d'indicateurs de sécheresse obtenus uniquement à partir **d'indices de végétation NDVI et NDWI**. Cela est dû d'une part à la plus grande difficulté de trouver à cette échelle des produits disponibles et opérationnels (comme par exemple les produits de températures et d'humidité du sol qui restent complexes à produire aux échelles décamétriques), et d'autre part à la volonté de tirer parti des résultats de l'échelle globale ayant révélé de bonnes performances pour les indices NDVI et NDWI.

Etant donné la taille relativement importante des produits, nous avons dans un premier temps focalisé l'étude sur une zone test (ici la région de Bourail) sur laquelle nous avons pu évaluer et adapter les développements, afin dans un deuxième temps de produire un indicateur généralisé sur tout le territoire.

Voici les différentes étapes de traitements suivies :

1. Prétraitements des données :

Une première étape consiste à filtrer les réflectances de surface issues des différents capteurs (Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2) afin de supprimer les pixels de mauvaise qualité liés à la présence de nuages, à la pente de la surface, à l'opacité de l'atmosphère ou à des effets de saturation du capteur. Pour cela nous avons appliqué les différents masques fournis dans chaque produit.

Les indices de végétation NDVI et NDWI sont ensuite calculés en appliquant respectivement les équations 1 et 3, puis une phase de reprojection permet de ramener tous les produits vers le système Landsat (WGS 84 / UTM zone 58N) et à une même résolution spatiale (ré-échantillonnage des produits Landsat à 10 m).

2. Composition temporelle :

Les indices sont agrégés selon un pas de temps de 10 jours. Cette composition par décade permet de diminuer le nombre de données manquantes tout en limitant les artefacts pouvant avoir lieu à cette échelle dans le cas d'une composition mensuelle (l'agrégation de deux images acquises en début et fin de mois pouvant créer des ruptures "anormales" dans l'image finale).

Avant l'agrégation par décade, une phase de calibration radiométrique est appliquée sur les indices Landsat-7 (L7) et Sentinel-2 (S2) pour les ramener à la plage de valeurs des indices Landsat-8 (L8). Cette phase est importante car elle permet de diminuer les différences radiométriques existant entre les indices issus de différents capteurs. En effet, bien que les réflectances des capteurs utilisées ici soient acquises dans des bandes spectrales comparables (cf. Fig.7), il existe tout de même certaines différences radiométriques pouvant être liées à la largeur des bandes (non strictement identique d'un capteur à l'autre) et aux corrections

géométriques et atmosphériques issues d'algorithmes différents d'un produit à l'autre.

3. Calcul des indicateurs satellites :

Ici, les indicateurs ont été calculés sur un pas de temps de 10 jours. Seuls les indicateurs estimés à partir des indices de végétation ont été testés, à savoir l'indicateur VCI basé sur la distance aux extrêmes (équation 5) et l'indicateur d'anomalies VAI (équation 6).

4. Analyse statistique de corrélation :

Comme pour l'échelle globale, une analyse de corrélation (*test de Pearson*) a été réalisée entre les indicateurs satellites et les indices météorologiques SPI-3 mois et SPEI-3 mois.

Cette analyse a été réalisée sur une zone test, à savoir la commune de Bourail du fait de la forte concentration de surfaces agricoles et des bonnes performances des indicateurs de l'échelle globale sur cette région.

A l'échelle décamétrique, plusieurs effets anthropiques peuvent avoir un impact sur le signal observé par satellite comme les zones artificialisées (routes, bâti) et le type de végétation (cultures, fourrages, végétation dense). C'est pourquoi, plusieurs sous-zones à l'intérieur de la commune ont été identifiées afin d'observer l'impact du type de surface sur l'évolution et la corrélation des indicateurs satellites avec les indices météorologiques.

5. Indicateur finalisé :

Enfin, cette dernière étape a consisté à tirer parti des phases de test et d'évaluation sur Bourail pour produire un indicateur généralisé sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie. Ici, le travail a mené à l'élaboration d'une chaîne de traitement appliquée aux différentes tuiles Landsat et Sentinel présentes sur le territoire, et intégrant les phases de (1) pré-traitements (filtrage, reprojection, calibration, composition temporelle), (2) traitements (calculs des indicateurs) et (3) post-traitements correspondant à la suppression de certaines zones présentant un intérêt moindre pour l'utilisateur final (c'est-à-dire les zones artificialisées, sols nus et la végétation dense).

4.4.2. Calibration radiométrique des indices de végétation : exemple du NDWI sur Bourail

La figure 19 présente les séries temporelles de l'indice NDWI acquis sur la commune de Bourail par les différents capteurs de l'échelle locale durant la période 2000 – 2021. A titre de comparaison, nous avons également représenté l'indice MODIS (échelle globale). Ici, les valeurs correspondent à la moyenne spatiale sur l'ensemble de la commune de chaque produit NDWI obtenu après prétraitement et avant composition temporelle. Afin de se concentrer sur la dynamique des surfaces fortement sensibles à la sécheresse et en lien avec les besoins de l'utilisateur final, nous avons exclu dans le calcul moyen les pixels correspondant aux zones artificialisées et à végétation dense (*forêts*, d'après la carte présentée en Fig.9.b).

Nous constatons des **allures globalement comparables entre les différentes courbes, avec un cycle saisonnier relativement marqué tout au long de la période d'étude**. Les indices L7 et L8 (courbes bleu et orange) suivent assez bien, en moyenne, l'indice MODIS (courbe grise). Les quelques écarts observés se situent pour la plupart en saison sèche et saison fraîche (pics minimum et maximum), écarts qui peuvent être causés par la résolution différente des capteurs (MODIS réduisant la dynamique captée aux échelles plus fines par L7/L8). **Concernant l'indice S2, des valeurs plus faibles sont observées en moyenne par rapport aux indices L8 et MODIS**. Ce décalage peut être lié à la chaîne de correction atmosphérique MAJA qui peut affecter la valeur des réflectances de surface et donc des indices de végétation qui en découlent (voir un [article](#) à ce sujet). Nous remarquons tout de même un cycle tout à fait logique avec notamment des valeurs très faibles attendues lors des épisodes de sécheresse intense fin 2017 et fin 2019 (flèches en rouge sur le graphe).

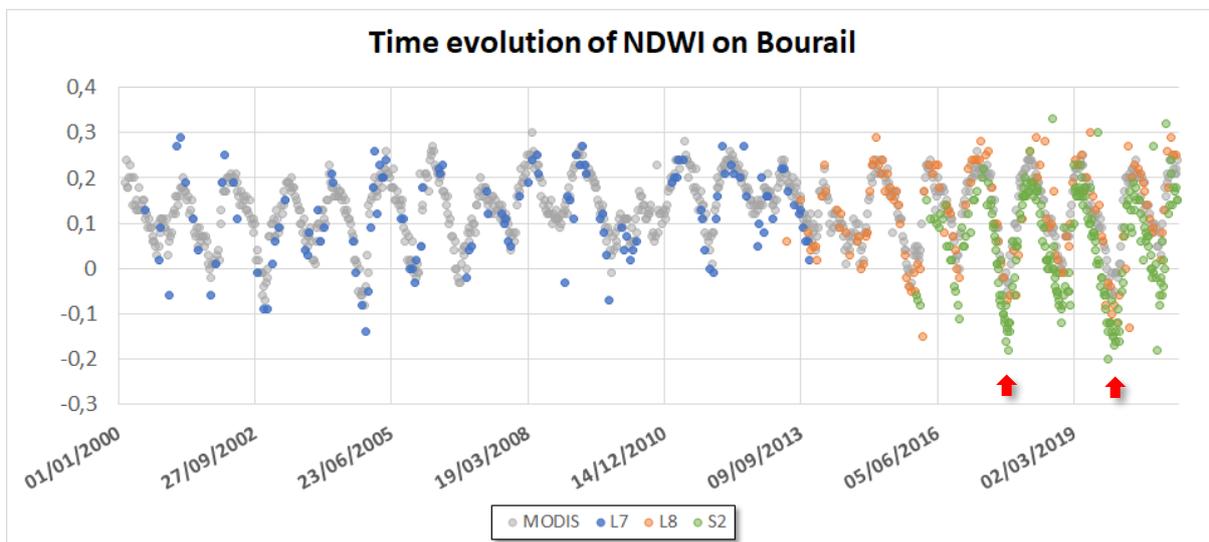


Figure 19 : Evolution temporelle des indices NDWI moyens acquis sur la commune de Bourail par les capteurs MODIS, Landsat-7, Landsat-8 et Sentinel-2. Ne sont pas considérées les zones artificialisées et les surfaces à végétation dense (forêts sèches et humides).

Une calibration radiométrique a été appliquée sur les indices NDWI et NDVI acquis par S2 afin de les ramener sur la plage de valeurs des indices L8. Pour cela, une analyse par régression linéaire a été réalisée et a permis d'extraire pour chaque indice une relation reliant indices S2 et indices L8. L'annexe 12 présente en détails l'analyse réalisée pour l'indice NDWI S2 à trois dates distinctes. *La même analyse a été réalisée pour l'indice NDVI S2 par rapport à L8, ainsi que pour les indices L7 par rapport aux indices L8*. La figure 20 ci-après présente l'évolution temporelle de l'indice NDWI acquis par S2 avant et après calibration, pour la période 2016 – 2021. **L'écart entre l'indice S2 et les indices MODIS/L8 est réduit après calibration (meilleure superposition des courbes), montrant donc l'intérêt de réaliser cette étape avant la combinaison des images issues des différents capteurs.**

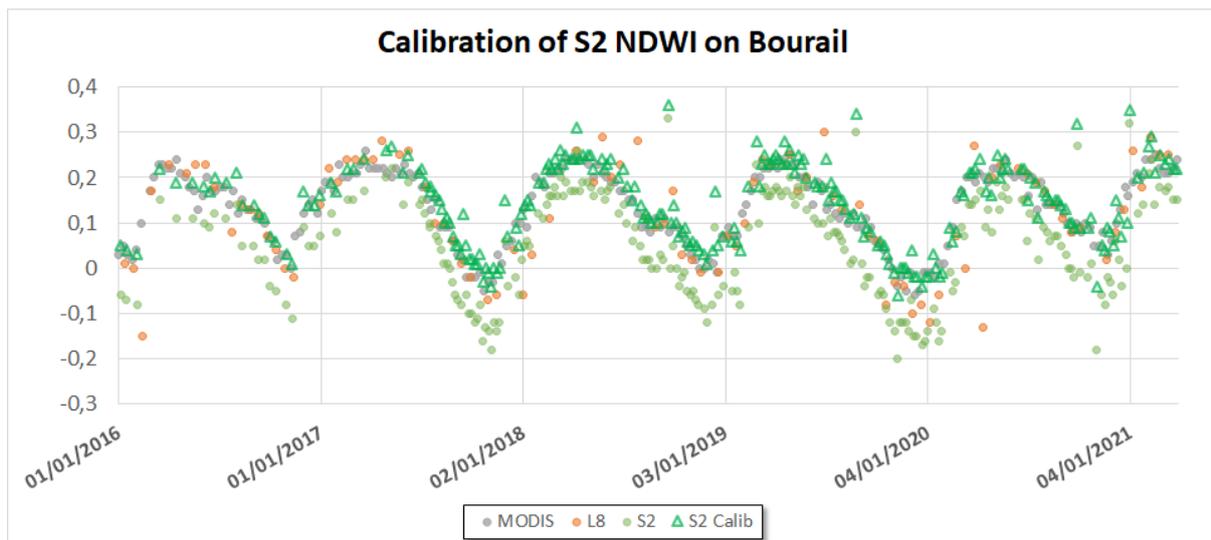


Figure 20 : Effet de la calibration radiométrique sur l'évolution temporelle du NDWI moyen S2 sur Bourail

4.4.3. Sites d'étude pour l'évaluation locale des indicateurs

La carte de la figure 21 ci-après présente les sites sur la commune de Bourail où ont été évalués les indicateurs satellites. Les deux sites sélectionnés correspondent à des zones d'un 1 km de rayon centrées sur les deux stations météorologiques de la commune. Cette spatialisation des sites d'étude permet d'analyser localement le comportement spatio-temporel des indicateurs satellites en fonction de l'occupation du sol et du niveau de sécheresse météorologique, tout en limitant au minimum l'effet des nuages (agrégation de plusieurs pixels par site et par type de surface étudiée). L'annexe 13 présente la proportion des types de surface (occupation/usage des sols) pour les sites d'études concernés, à savoir :

- Le site de Bourail (village)

Localisé dans les terres, ce site dispose en majorité de surfaces de type cultures (céréales, oléagineux, maraîchage) ainsi que de vastes étendues de prairies, fourrés et savanes. Les zones artificialisées présentent une part assez importante de la surface totale dû à la concentration de commerces, habitations et routes.

- Le site de Nessadiou :

Situé sur le littoral au Sud de la commune, cette zone dispose en majorité de surfaces de type prairies, fourrés et savane. L'agriculture y est principalement fourragère. La végétation dense prend une part relativement importante, incluant des zones de forêts principalement et quelques zones de végétation inondée (mangrove). A l'inverse peu de zones artificialisées sont présentes sur ce site. *Nous faisons remarquer que les zones de mangrove ne seront pas considérées ici comme des surfaces continentales et seront donc exclues de l'analyse.*

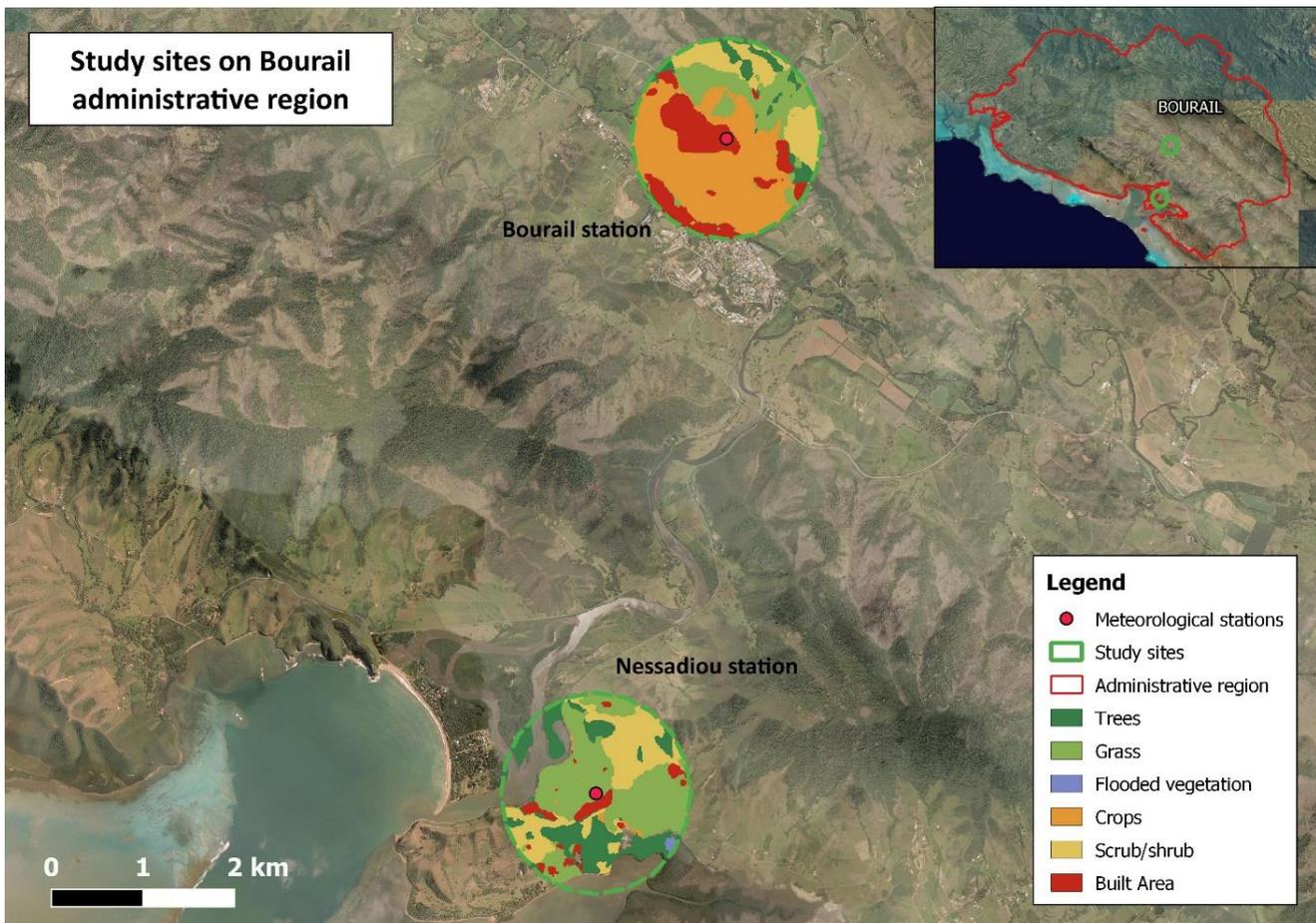


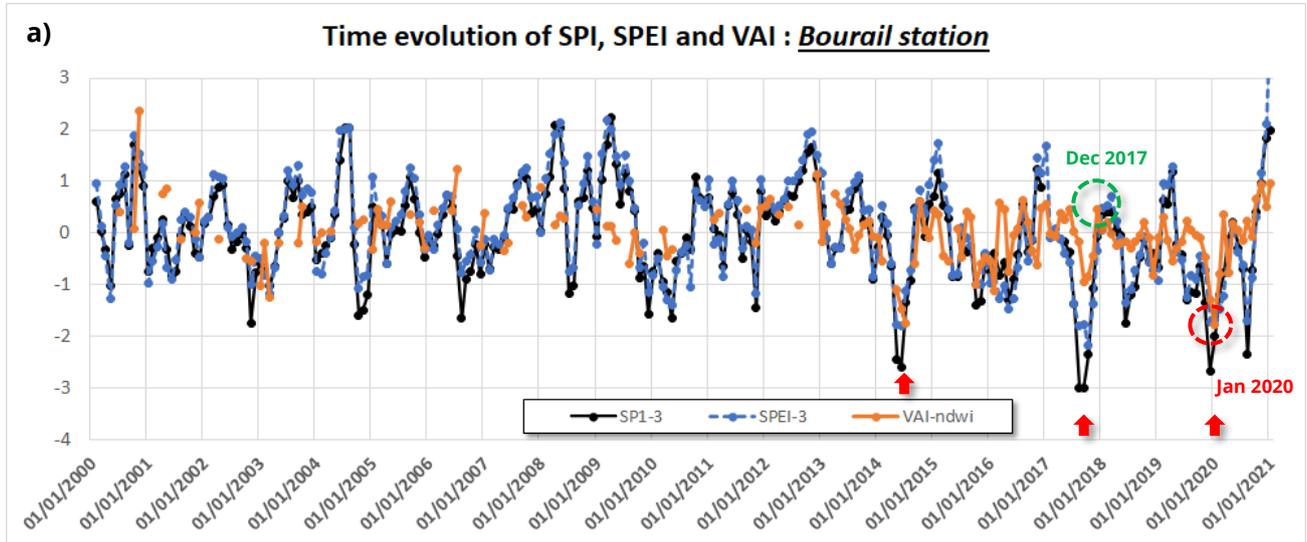
Figure 21 : Sites d'études sur la commune de Bourail pour l'évaluation à l'échelle locale des indicateurs de sécheresse végétale

4.4.4. Evaluation des indicateurs

La figure 22.a ci-après présente sur la période 2000 – 2021 l'évolution de l'indicateur VAI estimé après composition temporelle du NDWI puis calcul des anomalies (équation 6). La valeur présentée ici correspond à l'agrégation spatiale de l'indicateur dans un rayon d'1 km autour de la station de Bourail et en excluant dans le calcul moyen les pixels correspondant aux zones artificialisées et à végétation dense (Fig.22.b). Les zones considérées dans le calcul correspondent à des surfaces de type fourrés, savane, prairies et cultures. *A noter que ces valeurs sont présentées ici à un pas de temps mensuel pour permettre la comparaison aux données météorologiques de SPI et SPEI.*

D'après la figure 22.a, nous constatons une allure relativement comparable entre le VAI et les indicateurs météorologiques. **Le VAI détecte les évènements de sécheresse intense** en 2014, fin 2017 et fin 2019/début 2020 (flèches en rouge), avec une dynamique globale qui est tout de même moins marquée pour le VAI (valeurs minimales et maximales moins élevées en valeurs absolues que pour les SPI/SPEI). Nous remarquons cependant que pour les évènements de 2014 et 2019/2020 les pics minima de VAI et de SPEI sont relativement proches par comparaison aux pics observés sur le SPI. Pour ces périodes, le VAI et le SPEI détectent un niveau de sécheresse comparable, confirmant l'intérêt de considérer l'état de la surface dans le calcul de la sécheresse

végétale et ainsi l'apport de ces indicateurs par rapport à un indicateur uniquement basé sur les précipitations. *Nous notons l'absence de valeurs pour certains mois en 1^{ère} moitié de période (points manquants sur la courbe VAI-ndwi). Cela est lié à l'effet combiné de la couverture nuageuse et de l'absence des satellites S2A et S2B sur cette période (avant 2016).*



b)

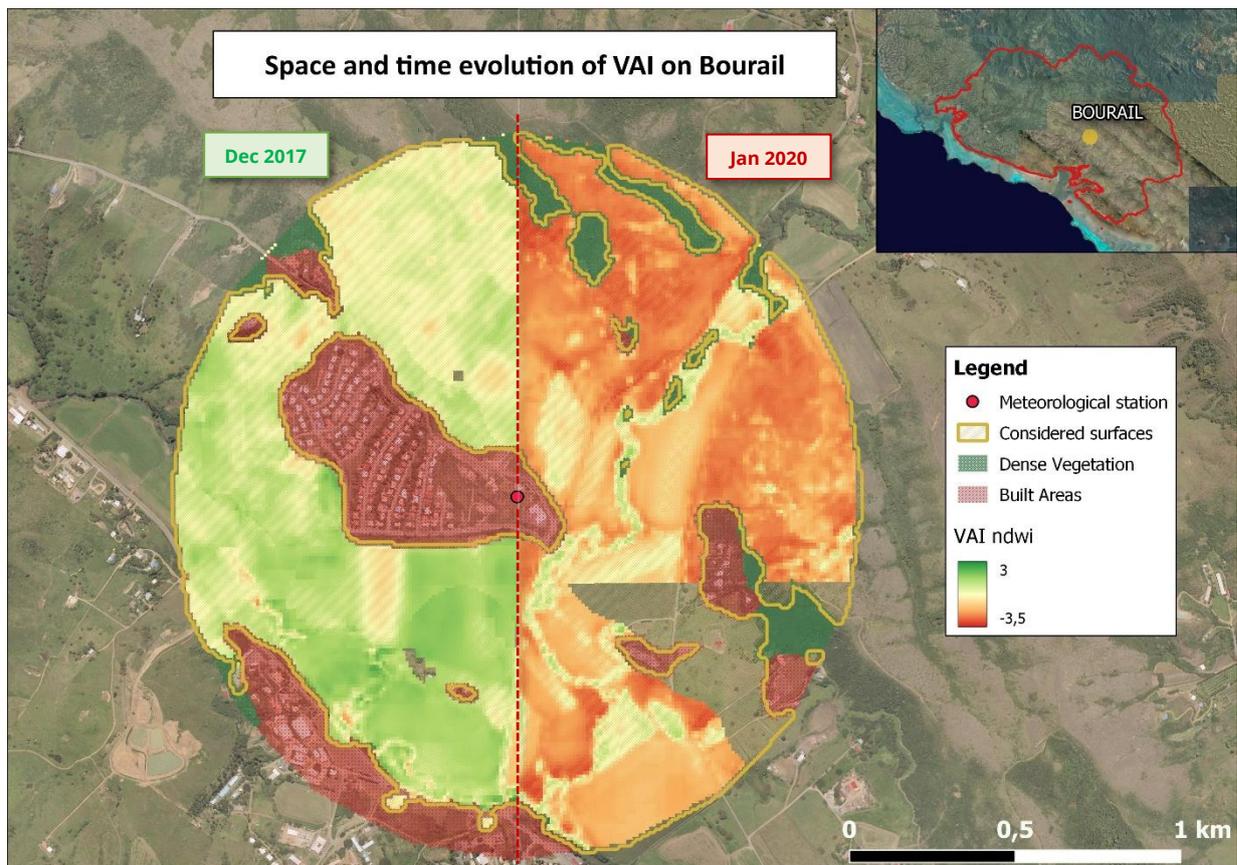


Figure 22 : (a) Comparaison des évolutions temporelles des indicateurs SPI-3 mois, SPEI-3 mois et VAI-ndwi au niveau de la station météorologique de Bourail. (b) Carte du VAI acquis dans un 1 km autour de la station de Bourail pour les mois de décembre 2017 et janvier 2020.

La carte en figure 22.b présente les images du VAI pour les mois de décembre 2017 (moitié gauche de la zone d'étude) et janvier 2020 (moitié droite). Pour ce dernier mois, nous observons une majorité de valeurs négatives de VAI, pouvant atteindre -3.5 pour certains pixels de la zone étudiée et **traduisant un état de stress important de la végétation**. La même analyse a été réalisée sur la station de Nessadiou et montre également une détection des événements de sécheresse pour ce deuxième site (résultats présentés en annexe 14).

Afin d'estimer plus en détails les performances des différents indicateurs satellites évalués à cette échelle (VAI-ndvi, VAI-ndwi, VCI-ndvi, VCI-ndwi), des tests de corrélation ont été réalisés entre ces indicateurs et les indicateurs météorologiques (SPI-3 mois, SPEI-3 mois). La figure 23 présente les scores maximum (pour un lag de 0 ou -1 mois selon les produits) obtenus avec le SPI-3 mois pour différentes échelles et surfaces d'étude :

- A l'échelle de la commune entière, les corrélations ont été estimées pour trois catégories de surface qui sont (1) un groupe incluant les terres agricoles et la végétation ouverte et/ou arbustive (en orange sur le graphique), (2) la végétation dense et/ou de grande taille (en vert), (3) toutes les surfaces (en gris).

Nous constatons une moins bonne corrélation pour le groupe 2 (végétation dense), toute méthode confondue.

Pour chaque groupe, les indicateurs estimés à partir du NDWI présentent les plus hauts scores, dépassant 0.55 pour les surfaces agricoles et savane (groupe 1).

- A l'échelle des sites d'études (stations), la méthode d'estimation des indicateurs a peu d'impacts sur les scores de corrélation. La station Nessadiou présente des scores plus élevés (0.55 - 0.6) que celle de Bourail (0.45).

Cette différence peut être liée à la surface qui est composée en majorité de fourrés, savane, prairies sur Nessadiou alors que Bourail présente une majorité de cultures.

Des comportements comparables sont observés avec le SPEI-3 mois, présenté en annexe 15. Bien qu'un peu moins marquée, la meilleure corrélation avec les indicateurs obtenus à partir du NDWI se retrouve sur le SPEI-3, en particulier lorsque toutes les surfaces sont considérées (groupe 3).

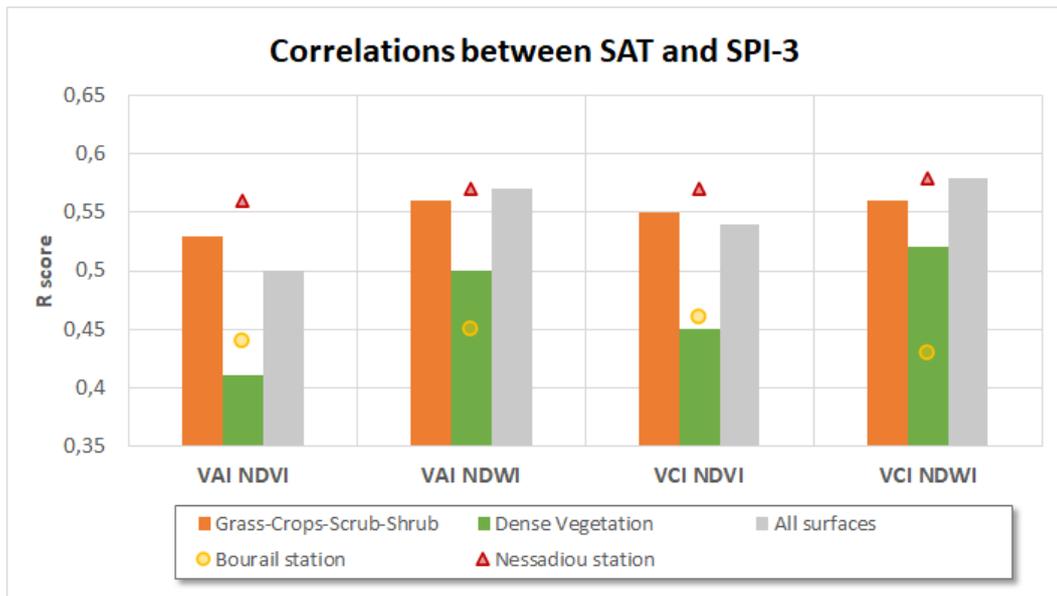


Figure 23 : Corrélations maximum entre le SPI-3 mois et les indicateurs satellites pour 5 catégories de surface. Pour celles situées à la station (Bourail station, Nessadiou station), la végétation dense et les zones artificialisées n'ont pas été prises en compte.

La figure 24 ci-après représente l'évolution des corrélations en fonction du décalage temporel (lag) obtenues entre le VAI-ndwi et les trois produits SPI-3, SPEI-3, VHI (indicateur de l'échelle globale). Deux échelles sont à nouveau considérées ici : l'échelle communale (Fig.24.a) et l'échelle de la station (Fig.24.b). Pour ces deux échelles, seuls les pixels correspondant aux surfaces de types terres agricoles et végétation arbustive/ouverte sont retenues dans le calcul (suppression des pixels correspondant à la végétation dense et zones artificialisées). A l'échelle communale, les pics de corrélations se situent à -1 mois pour le SPI-3, entre -1 et 0 mois pour le SPEI-3 et 0 mois pour le VHI. **Cela montre que l'indicateur local de sécheresse agricole VAI-ndwi est bien synchronisé par rapport à l'indicateur global VHI, et qu'il présente comme attendu un retard par rapport aux indicateurs météorologiques. Le même décalage est observé à la station de Nessadiou, montrant que ce comportement se retrouve à une échelle infra-kilométrique.**

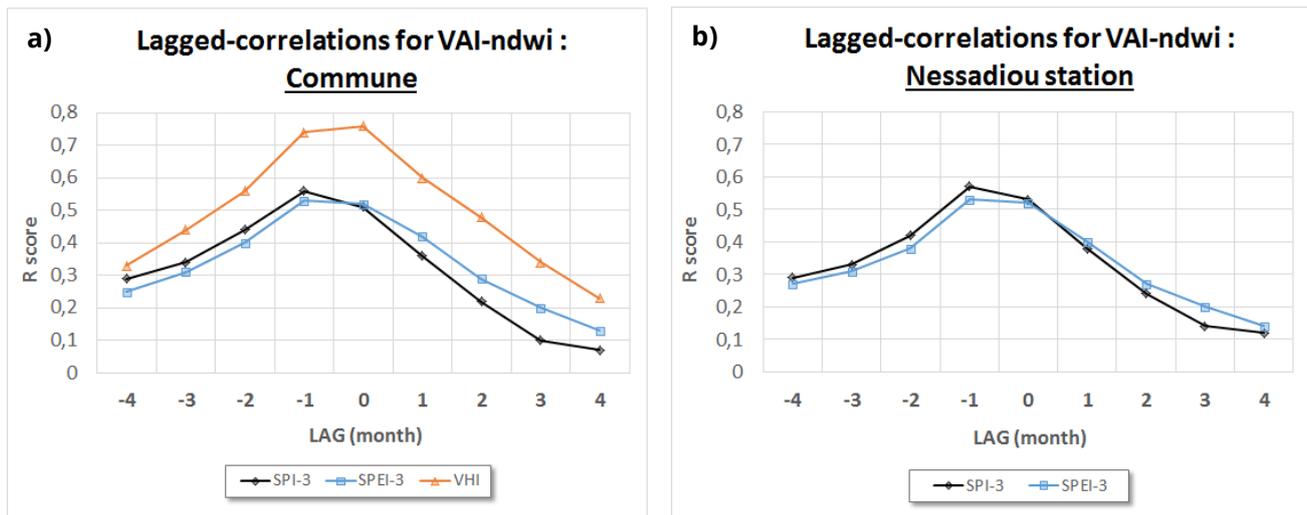


Figure 24 : Evolution des corrélations en fonction du décalage temporel entre le VAI-ndwi et les produits SPI-3, SPEI-3, VHI : (a) à l'échelle de la commune de Bourail, (b) à l'échelle de la station de Nessadiou. Pour ces deux échelles d'étude, seulement les surfaces de type terres agricoles et végétation arbustive/ouverte ont été considérées dans le calcul des corrélations.

Ces résultats à l'échelle locale confirment certains éléments déjà observés à l'échelle globale. En effet, les surfaces comprenant des terres agricoles présentent une plus forte corrélation entre les indicateurs satellites et les indicateurs météorologiques. De plus, les indicateurs issus du NDWI semblent également présenter à cette échelle plus de lien avec l'indicateur météorologique que ceux estimés à partir du NDVI, et ce pour des décalages temporels cohérents.

Cette analyse locale apporte tout de même des éléments nouveaux, notamment au niveau de l'effet du type de végétation sur la corrélation. Le site de Nessadiou révèle les plus hauts scores, signifiant que les surfaces majoritaires dans cette zone, à savoir les prairies, fourrés et savane, présentent un état de stress hydrique relativement bien expliqué par le déficit pluviométrique. Le site de Bourail, où la plupart des surfaces considérées sont des cultures, présente un état de stress hydrique moins directement lié aux précipitations. **Une raison à cela peut être l'impact des cycles de cultures sur l'état de la végétation :** les phases de semis et de récoltes induisent à une échelle très locale un effet anthropique sur l'évolution temporelle de la végétation, avec notamment l'apparition/disparition de sols nus affectant le signal du NDWI et donc la valeur des indicateurs de sécheresse satellite. Ainsi, la dynamique temporelle est moins corrélée aux conditions purement climatiques (précipitations notamment). A l'inverse, les fourrés, savanes et prairies (dans ce cas les prairies naturelles) sont des végétations peu impactées par les effets anthropiques et dont l'état de stress est davantage lié aux aléas climatiques.

Dans cette étude, nous avons fourni une première analyse montrant la relation aux échelles communale et locale entre les indicateurs satellites haute résolution de sécheresse végétale et les indicateurs météorologiques produits par Météo-France. Cette étude a également mis en évidence certaines limites de l'évaluation proposée à l'échelle locale. **A cette échelle, d'autres produits pouvant expliquer et compléter**

l'information issue des indicateurs déjà proposés sont nécessaires pour quantifier précisément l'état de stress hydrique à un niveau parcellaire. Ces produits peuvent être l'humidité du sol, la température de surface ou encore le type de couvert végétal associé aux phases de cultures (irrigation, semis, récoltes...).

4.4.5. Production de l'indicateur local sur la Nouvelle-Calédonie

A partir des tests réalisés sur Bourail, nous avons mis en place une chaîne de production de l'indicateur sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie. Pour le calcul de l'indicateur, la méthode retenue et implémentée dans la chaîne est celle des anomalies de NDWI (VAI-ndwi). Ce choix a été fait en raison des bonnes corrélations de cet indicateur avec les indicateurs météorologiques sur des surfaces essentiellement agricoles, et présentant également des corrélations tout à fait correctes sur d'autres types de surface (végétation dense).

Du fait de l'utilisation de plusieurs produits satellites fournis sous forme de tuiles aux dimensions et projections différentes (Landsat, Sentinel-2), nous avons fait le choix proposer une chaîne fonctionnant par tuile Landsat. Cela permet d'obtenir des indices et des indicateurs sur des tuiles relativement grandes, limitant ainsi le nombre de produits en sortie (7 tuiles au total couvrant l'ensemble du territoire). La figure 25 présente les étapes de la chaîne qui réalise les différents traitements pour une tuile Landsat. Deux blocs principaux constituent la chaîne :

1) Le bloc de construction du référentiel historique (Fig.25.a) :

Ce bloc traite l'ensemble de la série temporelle de produits disponibles, servant de référentiel historique pour le calcul des indicateurs. Il réalise les différents prétraitements qui permettent de passer des réflectances de surface journalières (produits L2A) issus de chaque capteur, à des indices de végétation composites fournis par décade. Ces indices sont le NDWI servant par la suite au calcul du VAI, et le NDVI que nous utiliserons en fin de chaîne pour le post-traitement.

Pour une tuile Landsat, plusieurs tuiles Sentinel-2 sont identifiées (interceptant la tuile Landsat en question). Ces tuiles sont tout d'abord prétraitées séparément : calcul d'indices, filtre qualité, ré-échantillonnage à 10 m des tuiles Landsat, reprojexion des tuiles Sentinel-2. Puis, une procédure de composition temporelle par décade est appliquée. Cette procédure intègre une étape de calibration radiométrique ainsi qu'une étape d'agrégation permettant d'optimiser la répétitivité temporelle (agrégation à 10 jours), tout en réduisant la propagation des données manquantes sur les indices de végétation et donc sur les futurs indicateurs de sécheresse (agrégation au mois si un nombre important de données manquantes est observé par décade). La procédure est présentée plus en détails en annexe 16.

2) Le bloc de calcul de l'indicateur de sécheresse (Fig.25.b) :

Une fois le référentiel construit, le deuxième bloc permet la production de l'indicateur de sécheresse pour chaque mois et chaque décade. Le schéma de la figure 25.b présente les étapes de traitements pour un mois m et pour une tuile. Ici, les anomalies de NDWI sont estimées pour chaque décade prise séparément

(D1, D2, D3). Ainsi, l'équation 6 s'applique en considérant les séries historiques des produits composites $NDWI_{D1,m}$, $NDWI_{D2,m}$ et $NDWI_{D3,m}$, donnant respectivement les séries d'indicateurs $VAI_{D1,m}$, $VAI_{D2,m}$ et $VAI_{D3,m}$.

Le calcul des anomalies est fait en intégrant dans chaque série de décade des produits composites de type "décade" (COMP_{D1}), mais aussi les produits de types mois (COMP_M, COMP_{D1M}) et de type jour (DAY). Bien que cela ne soit pas totalement exact, cette méthodologie permet une estimation par décade des statistiques du NDWI (moyenne et écart-type de chaque série) qui soit moins impactée par l'absence de données dans les produits. Nous considérons ici que la longueur de la série temporelle (plus de 20 ans de données) réduit l'erreur pouvant être engendrée par cette méthodologie.

Un indice de confiance (QSCORE) est également fourni pour chaque produit VAI, permettant d'informer sur la qualité de la donnée. Il est estimé en deux étapes :

- A l'issue de la composition temporelle (1^{er} bloc), le nombre de données valides ayant permis l'estimation des produits composites est sauvegardé (indice COUNT) permettant d'estimer ici un premier indice de confiance tel que $QSCORE_COMP = COUNT/TOTAL$ avec TOTAL le nombre total d'images disponibles sur la période de composition.
- Ensuite cet indice est adapté pour considérer également le pourcentage de données valides utilisées dans le calcul des anomalies. Il s'agit ici de prendre en compte la propagation des données manquantes (ou à l'inverse "valides") issues de l'historiques (série temporelle) dans l'indicateur de sécheresse final. Pour cela, un indice moyen historique est estimé pour chaque mois et chaque décade tel que $QSCORE_HISTO_{D,m} = moy(QSCORE_COMP_{D,m,a})$ avec a les années traitées variant de 1999 à 2021. Enfin, cet indice est à nouveau moyenné à l'indice composite $QSCORE_COMP$ pour obtenir l'indice final :
 $QSCORE_{D,m,a} = moy(QSCORE_COMP_{D,m,a}, QSCORE_HISTO_{D,m})$.

Une dernière étape consiste à post-traiter les indicateurs en filtrant les sols nus et la végétation dense. Pour cela, nous utilisons les produits composites de NDVI que nous seuillons afin d'obtenir un masque pour chaque produits de VAI. Nous utilisons les seuils suivants : $NDVI < 0.2$ et $NDVI > 0.8$ pour suppression des sols nus et de la végétation dense respectivement.

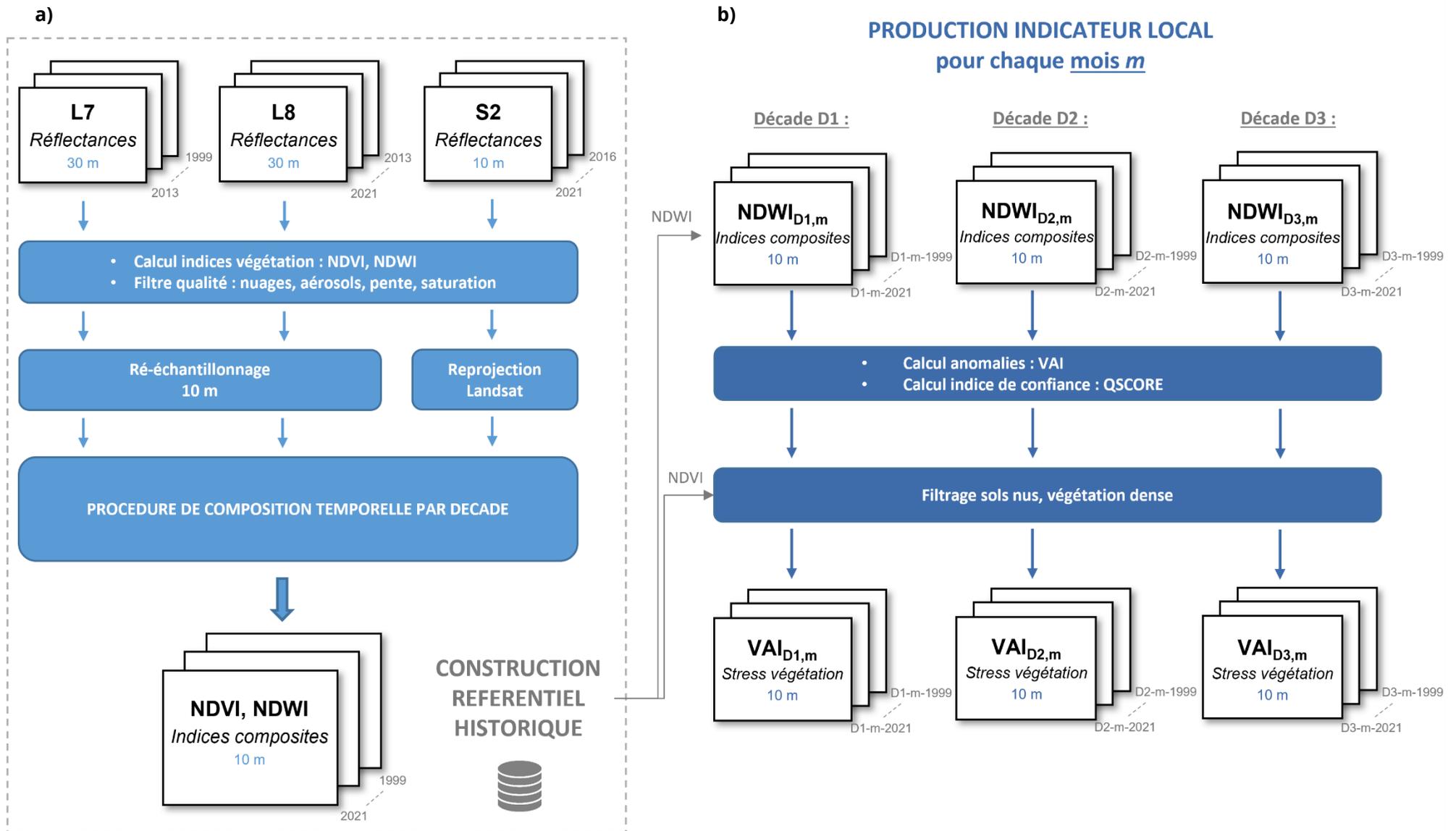


Figure 25 : Principe de production de l'indicateur local sur la Nouvelle-Calédonie : (a) Construction du référentiel historique et (b) Production de l'indicateur de sécheresse végétale pour un mois m et par décade.

4.5. Conclusion et Produits finalisés

L'étude réalisée à l'échelle globale a permis d'évaluer les performances d'indicateurs satellites pour détecter la sécheresse végétale à partir de plusieurs indices de surface (végétation, température, humidité du sol). Pour la plupart des indicateurs, de bonnes corrélations ont été observées avec l'indicateur de sécheresse météorologique fourni par Météo-France. Les meilleures corrélations ont été observées sur les communes de la côte Ouest et pour les mois de la saison sèche. Cela confirme d'une part l'impact significatif des précipitations sur l'état de stress hydrique de la végétation dans ces régions, et d'autre part la fiabilité de certains indicateurs satellites pour détecter la sécheresse végétale sur les zones du territoire où se trouvent la majorité des surfaces agricole. En particulier, deux indicateurs satellites complémentaires (VHI et MAI) ont été sélectionnés pour leurs performances spatiales et temporelles vis-à-vis de l'indicateur météorologique SPI.

Concernant l'étude à l'échelle locale, les indicateurs satellites ont été évalués sur la commune de Bourail, présentant une part importante de terres agricoles. Ces indicateurs ont été obtenus à partir d'indices de végétation issus de plusieurs capteurs haute résolution. Tout comme l'échelle globale, des corrélations maximales entre les indicateurs satellites et météorologiques sont observées sur les surfaces fortement impactées par les aléas climatiques (hors végétation dense et zones artificialisées). En particulier, les indicateurs obtenus à partir du NDWI présentent en moyenne les meilleures corrélations vis-à-vis des indicateurs SPI et SPEI. Une analyse plus fine de l'effet de l'occupation du sol a révélé un lien plus marqué entre indicateurs satellite et météorologique sur des zones moins affectées par des effets anthropiques (fourrés, savane et prairies). A l'inverse, les zones de cultures présentent des corrélations plus faibles, induisant la nécessité d'intégrer d'autres données de validation pour expliquer la dynamique des indicateurs satellites à cette échelle.

Ainsi, les indicateurs sélectionnés aux deux échelles ont permis d'aboutir à **trois produits sécheresse**, correspondant au mieux aux besoins de l'utilisateur (cf. section 2.3) :

- 1) **Des cartes d'alerte sécheresse** (combinaison de produits météorologiques et satellitaires) fournissent une information au niveau communal, à un pas de temps mensuel. Il s'agit du niveau le plus complet et global permettant de localiser les communes affectées ou qui seraient potentiellement affectées par la sécheresse agricole. Ce produit se base sur la chaîne de traitement et les catégories d'alertes décrites en 4.3.4. La figure 26 ci-après présente la carte d'alerte obtenue pour le mois de novembre 2019, lors d'un épisode de sécheresse intense.
- 2) **Un indicateur global de sécheresse végétale** (obtenu à partir de l'indice de végétation NDWI et des températures de surface LST) fournit une information au niveau intra-communal, à une résolution kilométrique et à un pas de temps mensuel. Le produit finalisé se présente sous la forme d'images d'intensité de sécheresse végétale classées en 5 catégories (selon les seuils présentés dans le tableau 3) allant de l'état de sécheresse extrême (*Extreme Drought*) à un état d'aucune sécheresse (*No Drought*). La figure 27 présente ce produit pour le mois de novembre 2019.

3) **Un indicateur local de sécheresse végétale** (anomalies de NDWI) fournit une information au niveau parcellaire, à une résolution décimétrique et tous les 10 jours. Une chaîne de traitement spécifique a été développée pour produire cet indicateur sur l'ensemble du territoire (section 4.4.5). Le produit se présente sous la forme d'images d'intensité de sécheresse végétale classées selon les mêmes catégories d'intensité que l'indicateur global (selon des seuils précisés dans le tableau 6 ci-après). Un indice de confiance est également fourni (Q score) indiquant la qualité de la donnée (0 qualité minimale, 1 qualité maximale). La figure 28 ci-dessous présente ce produit pour le mois de novembre 2019 sur une commune de Nouvelle-Calédonie située au Nord (côte Ouest).

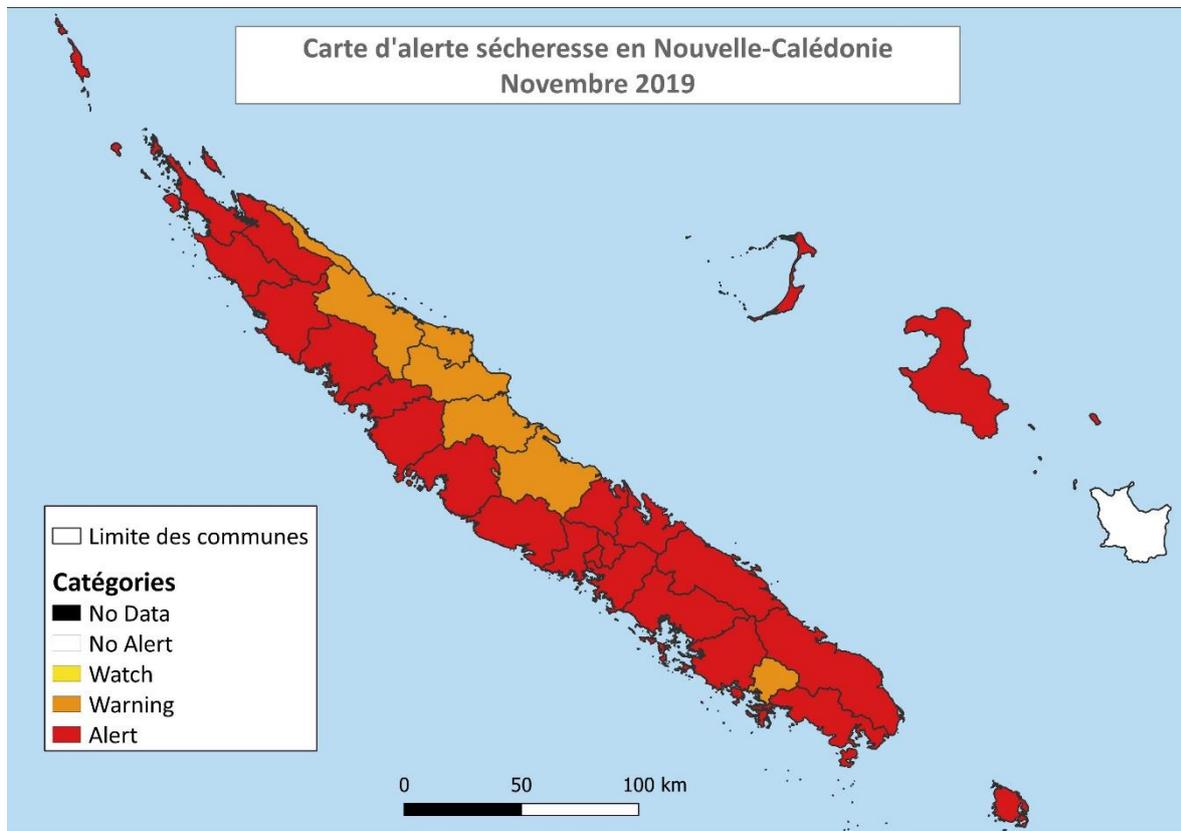


Figure 26 : Carte d'alerte sécheresse pour le mois de novembre 2019

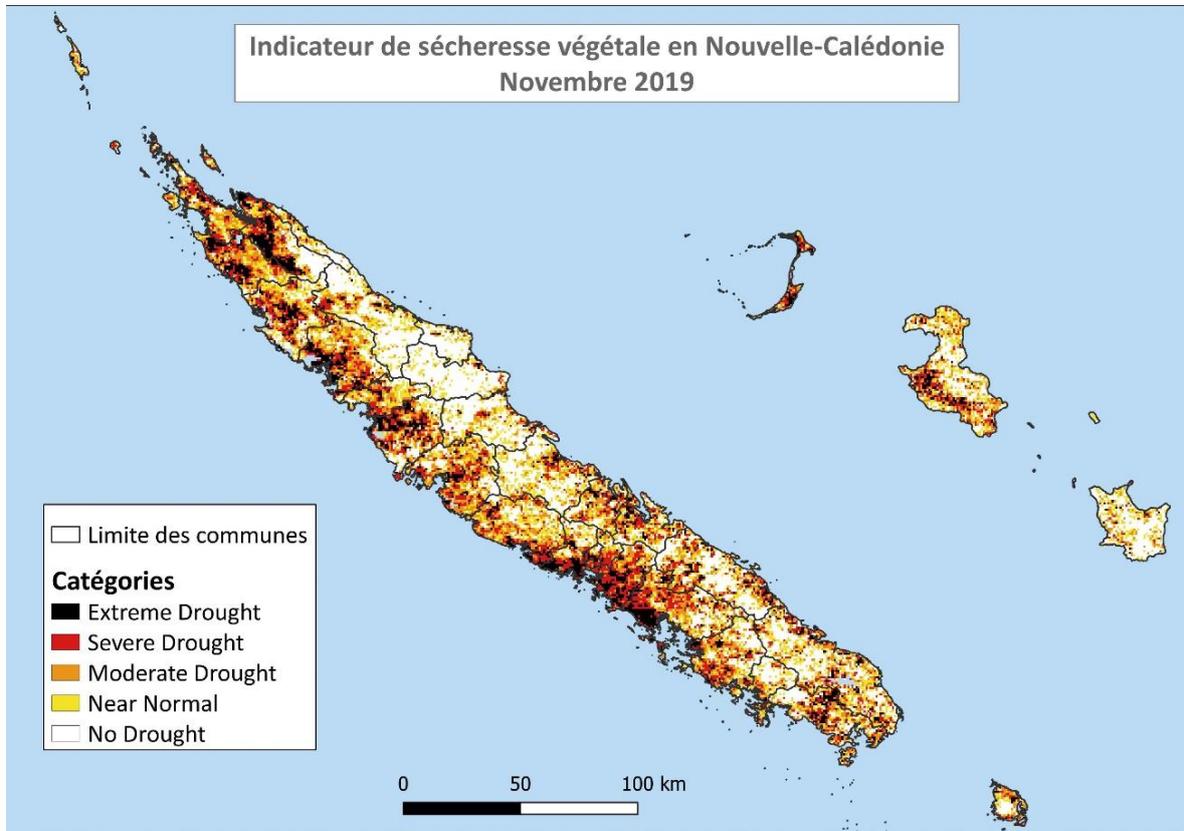


Figure 27: Indicateur global de sécheresse végétale pour le mois de novembre 2019

Tableau 6 : Classification des valeurs de VAI pour estimer l'intensité de la sécheresse végétale à l'échelle locale

Valeurs du VAI	Catégories
> 0	Pas de stress hydrique
0 à -0,99	Proche de la normale
-1 à -1,49	Modérément sec
-1,5 à -1,99	Très sec
< -2	Extrêmement sec

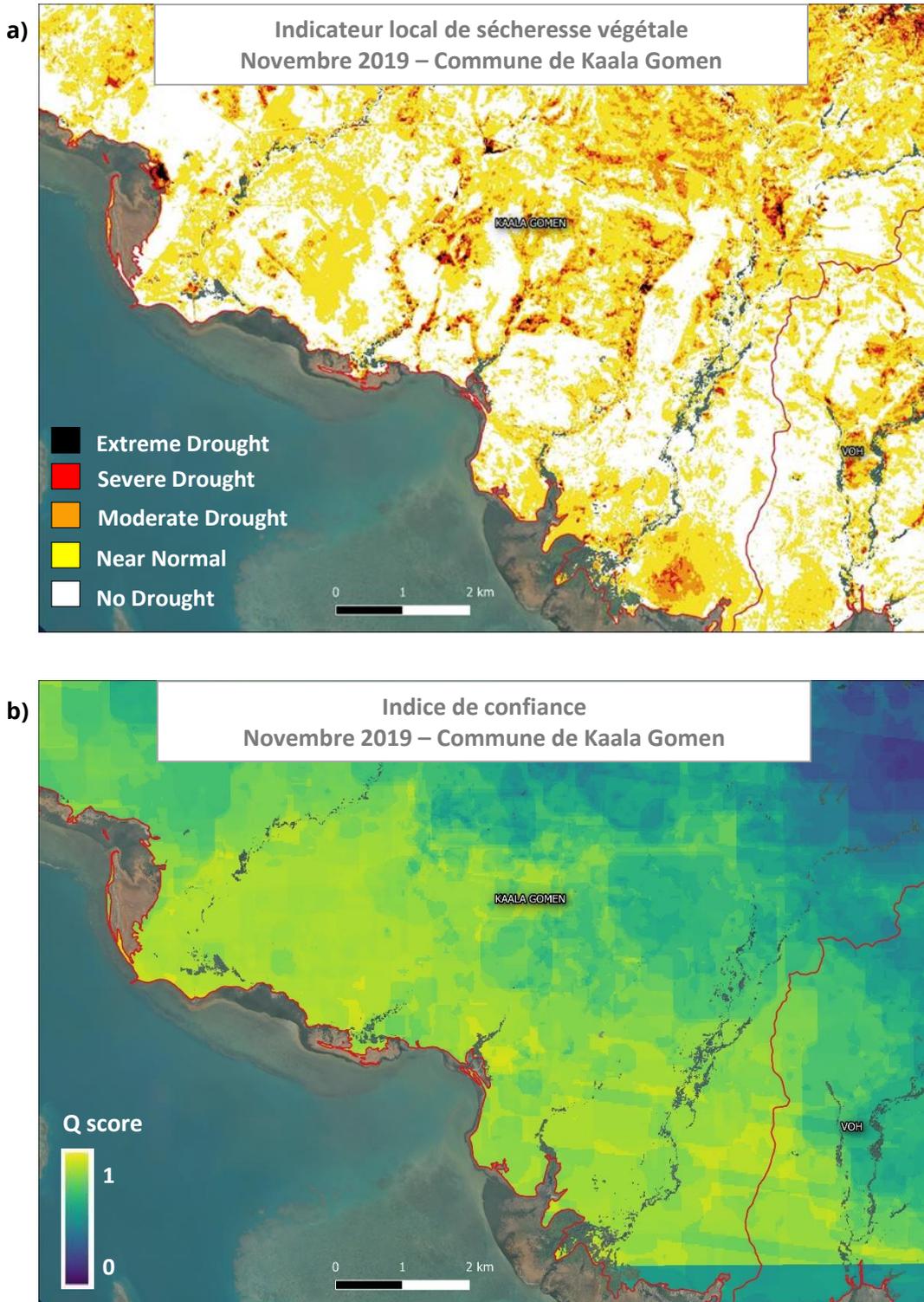


Figure 28: (a) Indicateur local de sécheresse végétale sur la commune de Kaala-Gomen (Côte Nord-Ouest) et (b) Indice de confiance correspondant (Q score).

5. ANNEXES

Annexe 1 : Compte Rendu de réunion – 28/05/2021

REFERENCES :

<u>EO4DroughtMonitoring</u>	
<u>DATE</u>	<u>Lieu</u>
28/05/2021	<u>Météo France</u>
<u>Présents</u>	
Alexandre PELTIER	Météo France
Christophe POINT-DUMONT	Météo France
Mathis NEUHAUSER	INSIGHT SAS

ORDRE DU JOUR :

Réunion technique sur la méthodologie globale : développements indicateurs satellites actuels, développements indicateurs météorologiques prévisionnels, comparaison données météo et satellites, secteurs à tester pour validation

DISCUSSIONS :

Plage temporelle données satellites (historique) :

- La période doit inclure des évènements intenses de sécheresse
- 20 ans suffiraient sur la NC car forte sécheresse en 2017 et 2019
- Eventuellement, tester NOAA AVHRR (1981-2005) : anomalies comparables à celles de MODIS sur période commune (2000-2005) ?

Période temporelle (intra-annuelle) :

- Toute l'année ou sur une période particulière ?
- Période particulière = période à risque sécheresse = **Juin à Janvier**

Occupation du sol :

- **Types de surface** réagissant différemment à la sécheresse météorologique (déficit pluie) :
 - (1) Fourrés + savanes (terres agricoles) : côte Ouest/Nord/côte Est, réaction rapide Végétation avec SPI
 - (2) Forêt dense humide : Chaîne Centrale, pas de variations significatives
- Si carte sécheresse, pas nécessité de filtrer selon occupation du sol



- Si séries temporelles sécheresse, considérer masques "forêt dense humide" (alt>500m), zones urbanisées → récupérer AOI Grandes Cultures /!\

Zones climatiques en NC :

- 4/5 zones
- Nord-Ouest, Sud-Ouest, Est, Chaîne Centrale, Îles

Données météo spatialisées (grille) :

- Satellite (TRMM / GPM) → mais pas forcément abouties...
- Stations et modélisation (GPCC) → mais disponibles 1 an après et résol>20km (pas de contraste Est/Ouest)...

Production et prévisibilité du SPI :

- **A la fin de chaque mois** de manière opérationnelle (routine)
- Si besoin, possibilité de fournir bimensuel (mais demande adaptation des process...)
- **Prévisions en début du mois suivant** par [Global Drought Observatory](#) (routine)
- **Prévisibilité** à 1 mois, 3 mois, 6 mois

Evaluation des indicateurs :

- Regarder sécheresses éclaires → 2017, 2019 (?)
- Evaluer la prévisibilité du SPI-1 mois en novembre → estimation de la sortie de la période de sécheresse ?

SPEI :

- SPEI = PRECIPS – ETP
- Précips ← mesurées via stations météo NC
- ETP (évapotranspiration potentielle) ← modélisée ou mesurée (en fonction du vent et température)

PROCHAINES ETAPES DU PROJET :

- **INSIGHT** = Comparaison indicateurs *satellites* et *précipitations* sur zone test (agrèger sur commune de Bourail)
- **Météo France** = Estimer SPEI, vérifier si données et prévisions humidité/température

Annexe 2 : Compte Rendu de réunion – 16/07/2021

REFERENCES :

EO4DroughtMonitoring	
DATE	Lieu
16/07/2021	INSIGHT (Ootech)
Présents	
Jean MASSENET	INSIGHT SAS
Mathis NEUHAUSER	INSIGHT SAS
Thomas TILAK	INSIGHT SAS
Alexandre PELTIER	Météo France
Christophe POINT-DUMONT	Météo France
Guylain DE COUDENHOVE	Agence Rurale

ORDRE DU JOUR :

- Avec Météo France (MF) :** Point technique sur avancement indicateurs satellites à l'échelle globale et indicateurs météo (SPEI, prévisions SPI)
- Avec Agence Rurale (AR) et MF :** Clarification des besoins utilisateur, définition de la mise en forme de l'Interface Homme Machine (IHM)

DISCUSSIONS :

Remarques cycle saisonnier NDVI

[MF] → Cycle saisonnier intéressant du NDVI sur toute la NC : max en juin (transition saison *chaude/humide* et saison *fraiche*)

[MF] → Vérifier si cycle comparable sur une zone avec essentiellement des parcelles et fourrés/savanes (Bourail) ?

Remarques identification seuils de sécheresse agricole (indicateurs satellite)

[MF] → Possibilité d'identifier plus précisément les seuils en regardant l'évolution des indicateurs satellites à pas temporel plus fins (donnée hebdomadaire au lieu de mensuelle), et sur un évènement sécheresse particulier (2017, 2019)

[MF] → Utiliser infos AR sur les phases d'indemnisation agriculteurs : quelles dates de début/fin ? (quand ?), quelles parcelles ? (où ?)

[AR] → Déclenchement global des phases indemnisation (pas au niveau des parcelles ni communes, mais à une échelle plus large). Possibilité de fournir dates de déclenchement, à vérifier côté AR

[MF] → Infos éventuelles sur ces dates dans rapports de sécheresse MF, à vérifier côté MF

Remarque comparaison satellite VS Météo

[MF] → Séries temporelles d'indicateurs : si indicateur satellite ne suit pas SPI, alors vérifier si données manquantes sur cette période

Remarques avancement données météo SPI et SPEI

[MF] → Spatialisation du SPI possible (donnée sur grille) en interpolant les mesures ponctuelles issues des différentes stations. A noter que la donnée n'est disponible sur toutes les stations de la NC qu'à partir de 1981 (avant cette date certaines stations manquent car trop récentes)

[MF] → Avancement SPEI : données produites par MF, en cours de phase de validation/comparaison avec SPI notamment

[MF] → Prévisions : des données de SPI spatialisées vont être fournies par le *Global Drought Observatory* et l'*IRD*, avec une prévisibilité allant (a priori) de 1 mois à 6 mois. Une première phase de validation de cette donnée sera réalisée par MF. L'indicateur prévisionnel final se présentera sous la forme de classes d'évolution de la sécheresse agricole (arrêt, formation, aggravation...). Il sera déterminé à partir des prévisions de SPI (tendance d'évolution) en se basant sur l'indicateur végétal pour ce qui est de l'état actuel (point de départ de l'évolution). Il sera éventuellement possible de fournir un indicateur de confiance de la prévision.

Remarques plage temporelle accessible via données satellites

[MF] → Sécheresse importante en 1993 : intérêt d'accéder à l'état de la végétation à cette date, quels capteurs sat pour observer cet évènement ?

[INSIGHT] → NOAA AVHRR : résolution kilométrique, 1981 – 2005, à vérifier si produits historiques disponibles sur NC

[INSIGHT] → SPOT : résolution sub-kilométrique, à vérifier également

Partie spécifique BESOIN UTILISATEUR et IHM :

[AR] → Jusqu'à présent, pas d'utilisation de donnée sécheresse spatialisée pour déclencher indemnités car celle-ci sont faites à échelle globale et sous forme de rapport fournis par MF

[AR] → Intérêt de l'AR pour un indicateur spatialisé permettant d'accéder à des échelles plus locales (Communes, voire zones découpées à l'intérieur des grandes communes)



[INSIGHT] → Cet indicateur peut être fourni selon tout type de découpage géographique désiré (Provinces, Communes, parcelles agricoles connues), du moment que le découpage est défini par l'AR et accessible par INSIGHT

[INSIGHT] → Cet indicateur peut également permettre d'identifier sur le territoire des secteurs classés selon le seuil de sécheresse et dont les limites géographiques ne seraient pas « administratives » mais « thématiques ».

[AR + INSIGHT] → FORMAT IHM :

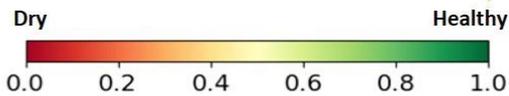
Il a été convenu dans le cadre de ce projet que l'IHM se présentera sous la forme d'un **démonstrateur** (page web de visualisation accessible par l'utilisateur), se limitant aux grands découpages dans un premier temps (Communes) et qui pourra être affiné par la suite.

Un premier prototype du démonstrateur consistera à afficher (1) une carte de l'indicateur de sécheresse actuel ou passé (sélection de la date par l'utilisateur) à l'échelle globale (résolution kilométrique) sur l'ensemble du territoire, (2) une carte de l'indicateur prévisionnel (actuellement en cours de développement donc cette donnée pourra être complétée dans un second temps), (3) un graphique présentant le profil temporel de l'indicateur pour la période traitée (2000 – 2021) et correspondant à un point géographique choisi sur la carte par l'utilisateur.

Exemple d'affichage IHM :

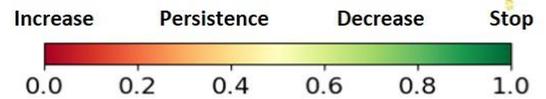
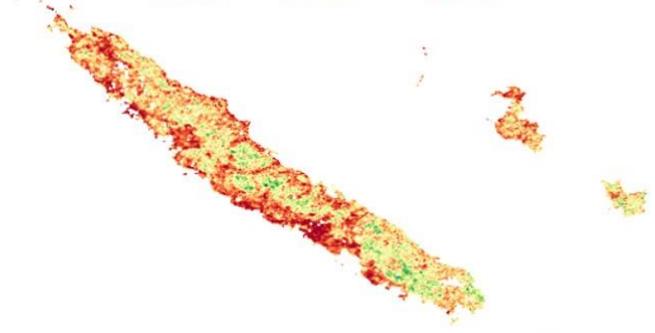
Indicateur ACTUEL ou PASSE

1) Sélection de la **carte du mois** à afficher



Indicateur PREVISIONNEL

2) Sélection de la **carte prévisionnelle** à afficher



Profil TEMPOREL

3) Sélection d'un **point** sur la carte pour affichage du **profil temporel**



PROCHAINES ETAPES DU PROJET et ECHEANCES :

-  **IHM [INSIGHT] → Point début Août (AR, MF, INSIGHT) :**
Premier prototype IHM affichant indicateur actuel à échelle globale et profil temporel
-  **Indicateur actuel ECHELLE LOCALE [INSIGHT] → Point début Août (AR, MF, INSIGHT) :** Application des calculs à l'échelle locale, correspondant en particulier aux traitements des données Sentinel-2 (10 m)
-  **Indicateurs météo actuels et prévisionnels [MF] → Point début Août (AR, MF, INSIGHT) :**
Validation des données actuelles SPEI et premiers résultats SPI prévisionnel
-  **Phases d'indemnisation sécheresse [AR + MF] → Point début Août (AR, MF, INSIGHT) :**
Recherche d'information sur les périodes de déclenchement et d'arrêt, ainsi que sur la localisation des parcelles indemnisées

Annexe 3 : Compte Rendu de réunion – 25/08/2021

REFERENCES :

EO4DroughtMonitoring	
DATE	Lieu
25/08/2021	INSIGHT (Ootech)
Présents	
Jean MASSENET	INSIGHT SAS
Mathis NEUHAUSER	INSIGHT SAS
Thomas TILAK	INSIGHT SAS
Christophe POINT-DUMONT	Météo France
Guylain DE COUDENHOVE	Agence Rurale
Fabien ALBOUY	Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie (OEIL)

ORDRE DU JOUR :

- Avec Météo France (MF) :** Point technique sur avancement indicateurs satellites à l'échelle locale et indicateurs météo (SPEI, prévisions SPI)
- Avec Agence Rurale (AR), l'OEIL et MF :** Présentation d'un premier prototype de l'IHM. Clarification des besoins utilisateur, définition de la mise en forme de l'Interface Homme Machine (IHM)

DISCUSSIONS :

Partie TECHNIQUE :

[MF] → Présentation de l'indicateur SPEI : concept et état d'avancement.

Cet indicateur combine des données de précipitation et de température issues des stations météo, faisant le lien entre sécheresse météorologique et végétale. De premiers tests ont été réalisés en appliquant diverses méthodes de calcul (temps de référence, données d'entrées, etc.). Les résultats obtenus doivent maintenant être validés en comparant aux indicateurs existants (SPI) et indicateurs satellites.

Une fois validé, cet indicateur sera fourni mensuellement, au début du mois suivant (idem routine en cours SPI).

[INSIGHT] → Présentation de l'indicateur satellite local et avancement général.

L'indicateur local (10 m) a été estimé sur une zone teste correspondant à l'emprise d'une tuile Sentinel-2 centrée sur la commune de Bourail. La comparaison des profils temporels de cet indicateur à ceux du SPI et de l'indicateur global (1 km) montre une bonne corrélation sur cette commune, avec détection d'évènements sécheresse (2017, 2019).

Une saturation a été remarquée sur un certain nombre de pixels (valeurs minimales et maximales atteintes "trop souvent"). Deux explications ont été proposées : (1) la saturation des réflectances THEIA Sentinel-2 (impact de la correction atmosphérique), (2) la présence de sols nus détectés comme de la végétation extrêmement sèche. Une solution envisagée est d'appliquer certaines corrections au sein de la chaîne de traitement : sur les produits d'entrée (calcul d'indices de végétation adaptés), et en sortie (suppression des pixels correspondant aux sols nus).

Des tests sont à mener également sur l'apport de produits d'humidité du sol (1 km – 10 km) sur la détection de la sécheresse.

[MF] → Concernant les prévisions SPI, Météo France est en attente du retour de congés de Christophe Lavaysse de la commission européenne pour la diffusion des données.

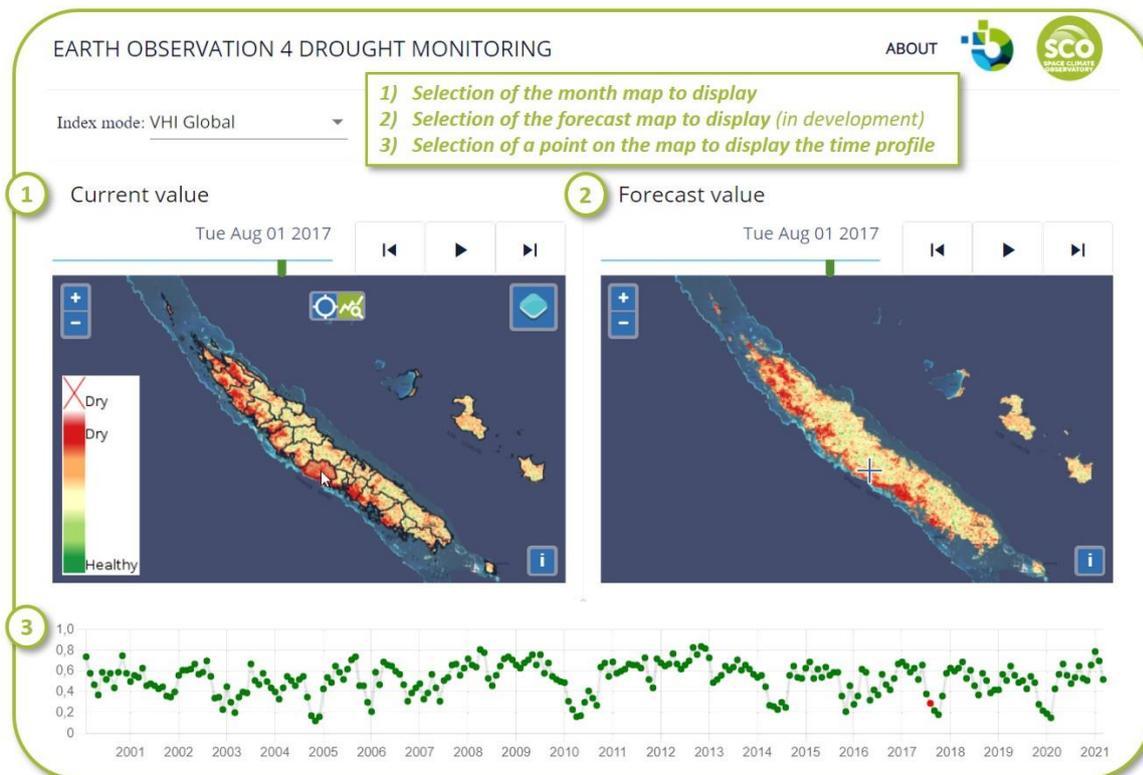
Partie UTILISATEURS :

[INSIGHT] → Présentation d'une première version de l'IHM : (1) affichage carte indicateur global (territoire) ou local (zone test), (2) affichage profile temporel d'un point sélectionné sur la carte ou correspondant à une commune, (3) emplacement dédié à la carte prévisionnelle (en phase de développement).

[AR] → Confirme l'utilité de l'indicateur pour informer sur l'état de sécheresse à l'échelle communale. Cette échelle servira de premier niveau d'information utile à l'Agence Rurale dans les phases de déclenchement de dispositifs d'aide. D'autres échelles sont envisagées (bassins versants, zones cultivées et élevages).

[OEIL] → Intérêt pour la donnée fournie, pouvant servir de donnée de référence dans certaines problématiques environnementales traitées par l'OEIL dont le risque feux. Discussions sur la possibilité de diffuser ce type de données sur portail ouvert, sur le processus de validation technique/scientifique des indicateurs mis en place, ainsi que sur le portage de la mise en œuvre opérationnelle des produits prévus à partir d'avril 2022.

Prototype plateforme V1.0 :



PROCHAINES ETAPES DU PROJET : Point prévu fin septembre

Indicateurs actuels [INSIGHT] :

Correction des effets de saturation à l'échelle locale. Tests avec prise en compte de la donnée d'humidité du sol. Généralisation de l'indicateur local sur tout le territoire.

IHM [INSIGHT] :

Mise à jour de la plateforme avec les nouvelles données produites.

Indicateurs météo actuels et prévisionnels [MF] :

Validation des données actuelles SPEI et premiers résultats SPI prévisionnel.

Annexe 4 : Compte Rendu de réunion – 30/11/2021

REFERENCES :

EO4DroughtMonitoring	
DATE	Lieu
30/11/2021	INSIGHT (Ootech)
Présents	
Jean MASSENET	INSIGHT SAS
Mathis NEUHAUSER	INSIGHT SAS
Thomas TILAK	INSIGHT SAS
Sébastien LAGARDE	INSIGHT SAS
Christophe POINT-DUMONT	Météo France
Guylain DE COUDENHOVE	Agence Rurale
Adrien BERTAUD	OEIL
Hugo ROUSSAFFA	OEIL

ORDRE DU JOUR :

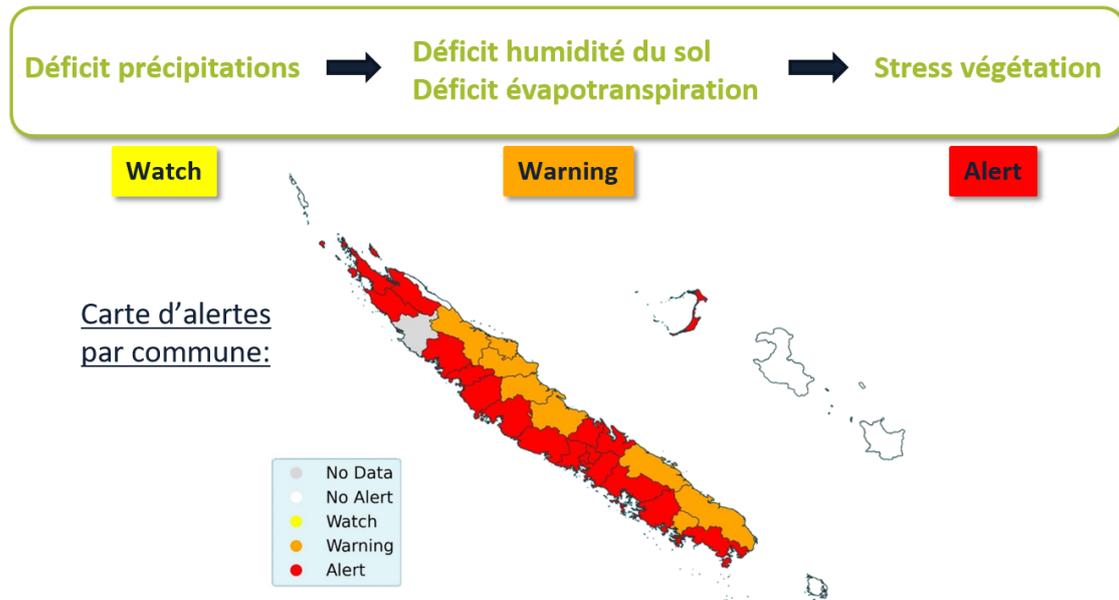
-  Point technique (INSIGHT, MF, OEIL) : avancement indicateurs satellites et indicateurs météo (SPEI, prévisions SPI)
-  Point utilisateur (INSIGHT, MF, OEIL, AR) : présentation d'un deuxième prototype de l'IHM, discussions sur la suite du projet

DISCUSSIONS :

Partie TECHNIQUE :

[INSIGHT] → *Point d'avancement du projet, méthodologie générale, derniers résultats :*

Après avoir rappelé le planning prévisionnel et la méthodologie générale, INSIGHT présente les derniers résultats obtenus sur la partie « indicateurs satellite ». En particulier, des anomalies d'humidité du sol ont été estimées et comparées au SPI sur les différentes communes du territoire. L'humidité du sol apporte une information complémentaire à celle fournie par l'état de la végétation et la température de surface, afin au final de dresser des cartes d'alerte globales de la sécheresse par commune :



Carte d'alertes
par commune:

Globalement, de bonnes corrélations humidités-SPI sont obtenues, mise à part sur deux communes du Sud (Yaté, Mont Dore) et au niveau des Iles Loyauté (Ouvéa, Lifou, Maré). Une explication à cela serait d'une part pour les Iles l'impact de la mer sur le signal, lié à la taille importante des pixels d'humidité (12 km), et d'autre part pour le Sud la taille relativement importante des communes de Yaté et du Mont Dore, impliquant une forte hétérogénéité du paysage. Dans ce dernier cas, la comparaison des valeurs de SPI obtenues à la station et de celles d'humidité du sol acquises sur toute la commune n'est peut-être pas pertinente. Il serait intéressant de réaliser cette comparaison en ne gardant que certains pixels d'humidité situés à proximité des stations.

[MF] → *Discussions sur l'indicateur SPEI (concept, état d'avancement, derniers résultats) :*

Cet indicateur, recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), combine des données de précipitation et de température issues des stations météo, faisant le lien entre sécheresse météorologique et végétale.

Une note de synthèse concernant les corrélations SPEI-VHI a été rédigée par Météo France (déposée sur le basecamp du projet). Plusieurs tests ont été réalisés sur diverses communes, en appliquant diverses méthodes de calcul, et en intégrant des périodes de référence plus ou moins longues.

L'analyse de corrélation entre le SPEI et l'indicateur satellite VHI révèle de bons résultats, surtout sur les communes de la côté Ouest. Les communes du Sud présentent les moins bonnes corrélations (idem résultats humidité ci-dessus). Il a été observé que le mois étudié (SPEI acquis en Aout, Sept ou Oct) pouvait affecter la corrélation.

Les prochaines étapes consistent à déterminer la méthode de calcul optimale vis-à-vis des attentes du projet (couverture spatiale maximale ou qualité maximale). Il est tout de même suggéré en fin de note de synthèse d'utiliser les SPEI issus de deux méthodes de calcul (selon deux périodes de référence différentes) permettant d'avoir une couverture maximale (33 stations) et une meilleure qualité sur au moins 23 stations.

[INSIGHT] → Note la procédure réalisée par Météo France pour l'évaluation du SPEI : les calculs de corrélation sont effectués pour différents mois de la période sèche. Cela permet de mettre en évidence l'impact du mois étudié sur la qualité des indicateurs sécheresse. Cette méthode sera testée pour l'évaluation des indicateurs satellites (l'évaluation satellite ayant été faite jusqu'à présent en considérant l'ensemble de la série temporelle et donc sans distinction mensuelle).

[INSIGHT] → S'interroge sur la possibilité d'intégrer les données de pluie issues des radars Météo France pour bénéficier d'une donnée spatialisée (maille kilométrique) sur tout le territoire.

[MF] → Faisable mais précise que des adaptations de traitement seraient à réaliser et qu'un des radars n'est plus opérationnel actuellement. L'idée est à garder et à intégrer dans les éventuels projets futurs.

[MF] → *Discussion sur les prévisions :*

Météo France est toujours en attente du retour des personnes en charge des modèles prévisionnels au CNRM (Toulouse). Plus d'informations seront fournies dans 2 semaines quant à la mise à disposition des données de prévisions. Deux possibilités sont envisageables : (1) soit les données fournies par le CNRM sont directement les prévisions finales souhaitées, (2) soit les données sont des prévisions « intermédiaires » nécessitant une phase supplémentaire de calcul avant intégration à l'outil sécheresse.

[OEIL] → *Discussion sur la validation des indicateurs :*

Dans l'optique d'une mise en œuvre opérationnelle des produits prévue à partir d'avril 2022, l'OEIL propose une validation globale des indicateurs par son Conseil Scientifique. Cette démarche garantira la qualité scientifique des produits développés pour une diffusion de la donnée sécheresse sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie via le portail de l'OEIL.

Partie UTILISATEURS :

[INSIGHT] → *Présentation d'une deuxième version de l'IHM (voir image ci-après) :*

Ajout à la plateforme d'un affichage par commune : (1) cartes d'alerte sécheresse (synthèse des divers produits), (2) indice de confiance de l'indicateur sécheresse végétale, (3) détail de l'état de chaque sous-produit (déficit ou non).

Mise à jour de la légende pour les cartes de sécheresse végétale fournies à l'échelle kilométrique (*Global Drought Index*) et à l'échelle décamétrique (*Local Drought Index*).

5 catégories sont présentées :

- *No Drought* : pas de stress détecté
- *Near Normal* : état légèrement en-dessous de la normale, début de stress
- *Moderate Drought* : sécheresse modérée
- *Severe Drought* : sécheresse importante
- *Extreme Drought* : sécheresse maximale

A noter que la section dédiée à l'affichage des prévisions (*Forecast Value*) n'est pas encore finalisée car en attente de l'indicateur prévisionnel.

[AR] → *Discussion sur le découpage géographique de l'information sécheresse :*

Confirme l'intérêt de fournir l'information à un premier niveau communal : correspond aux besoins « administratifs » pour le déclenchement des aides aux agriculteurs.

[INSIGHT] → Un découpage plus en lien avec la « nature » serait intéressant à considérer. Note tout de même que le découpage des communes se base en partie sur celui des bassins versants et de la topographie.

[AR] → s'interroge sur la possibilité de réduire le pas de temps pour les données météo (passage de mensuel à bimensuel voir décadaire).

[MF] → faisable mais implique une réadaptation complexe des chaînes météo déjà opérationnelles à ce jour.

[INSIGHT] → travaille en cours pour permettre à l'Agence Rurale d'accéder à la plateforme.

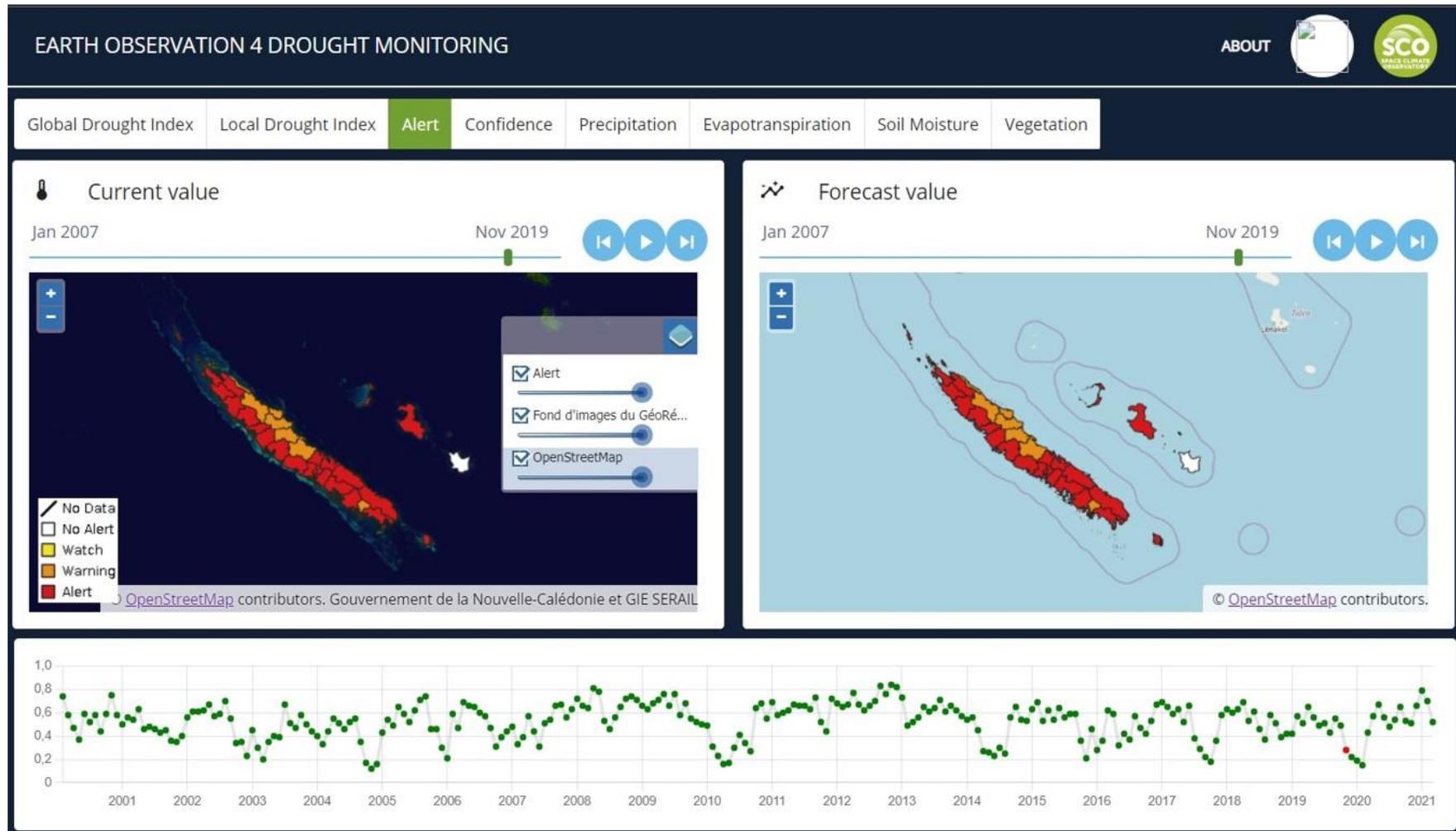
[OEIL] → *Discussion sur la mise en production opérationnelle (préparation de la suite du projet) :*

L'OEIL précise ses besoins techniques (format, traitements, stockage) pour préparer la diffusion des produits sécheresse sur leur portail à compter d'avril 2022. Une réunion est prévue à ce sujet pour clarifier les différents points.

[INSIGHT] → les prochains mois vont être consacrés à l'adaptation de la chaîne pour une production mensuelle (a minima)

[MF] → rappelle que les indicateurs météo seront fournis à INSIGHT à la fin du mois/début du mois suivant par lien FTP (format validé par INSIGHT). Précise que la validation peut prendre plusieurs jours sur certaines stations, impliquant une mise à disposition plus tardive (jusqu'à 20 jours après la fin du mois). Possibilité de faire des envois journaliers par station validée.

Prototype plateforme V2.0 :



PROCHAINES ETAPES DU PROJET :

Indicateurs satellites [INSIGHT] :

Finalisation de l'évaluation sur tout le territoire.
Adaptation des codes pour routine mensuelle.

Indicateurs météo actuels et prévisionnels [MF] :

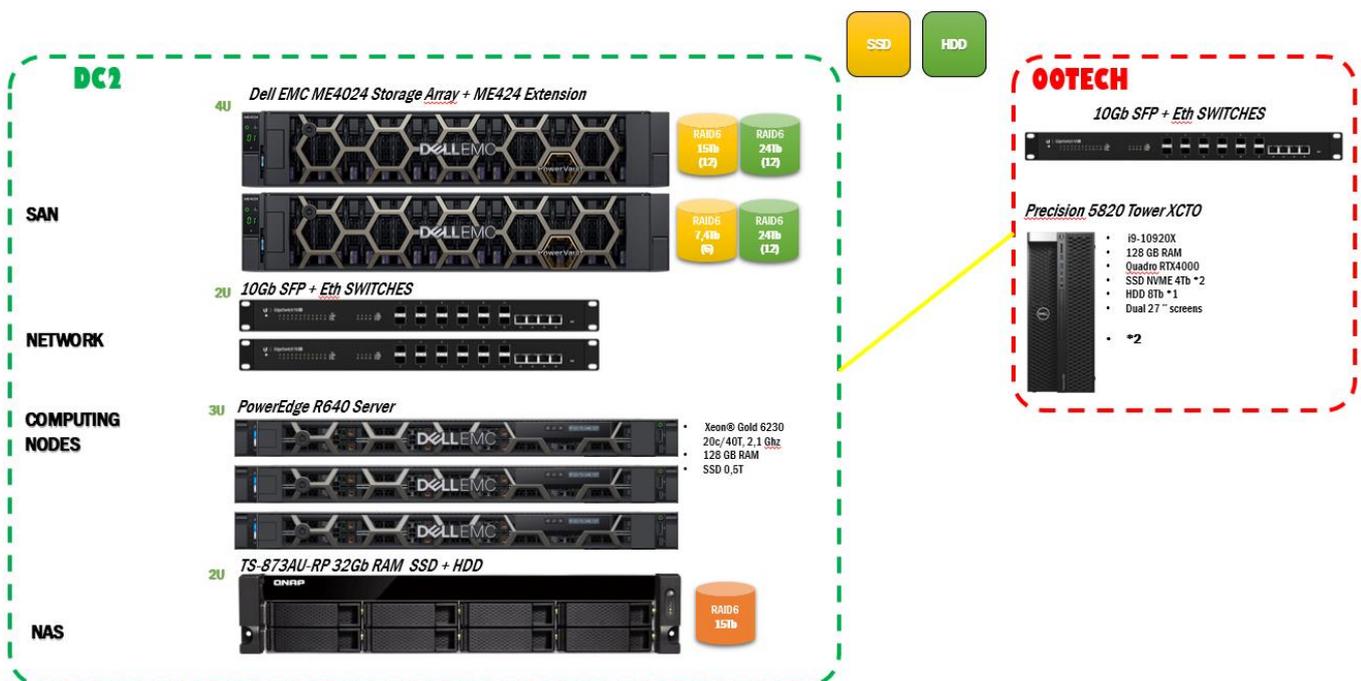
Finalisation de l'évaluation du SPEI.
Format de l'indicateur prévisionnel.

IHM [INSIGHT] :

Mise à jour avec les dernières données produites (indicateur satellite local, SPEI, prévisions).
Ouvrir accès pour mise à disposition de l'Agence Rurale.

Annexe 5 : Infrastructure IT

Dans le cadre du présent projet, 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



Arrangement Physique (Projet SCO)

permettant la manipulation direct de données lourdes.

Annexe 6 : Cartes des dynamiques d'humidité du sol

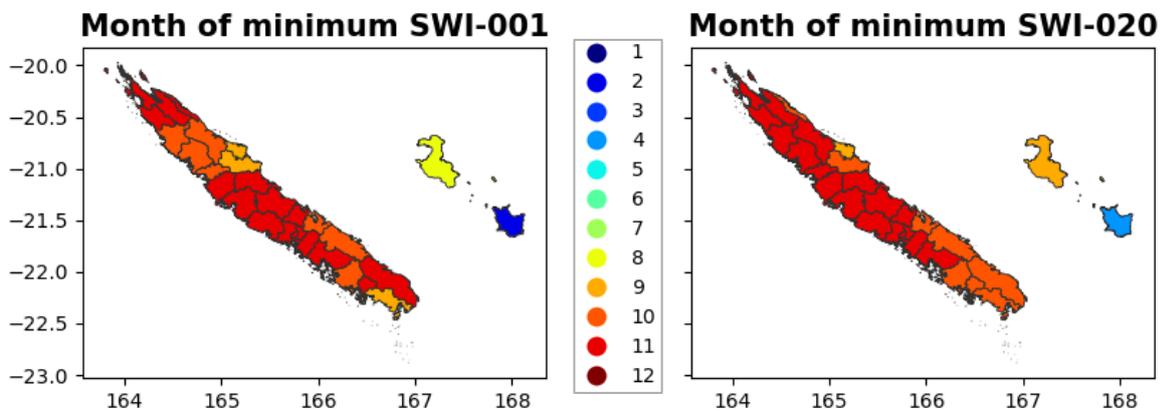


Figure 29 : Mois moyens pour lesquels les indices d'humidité du sol atteignent leurs valeurs minimales

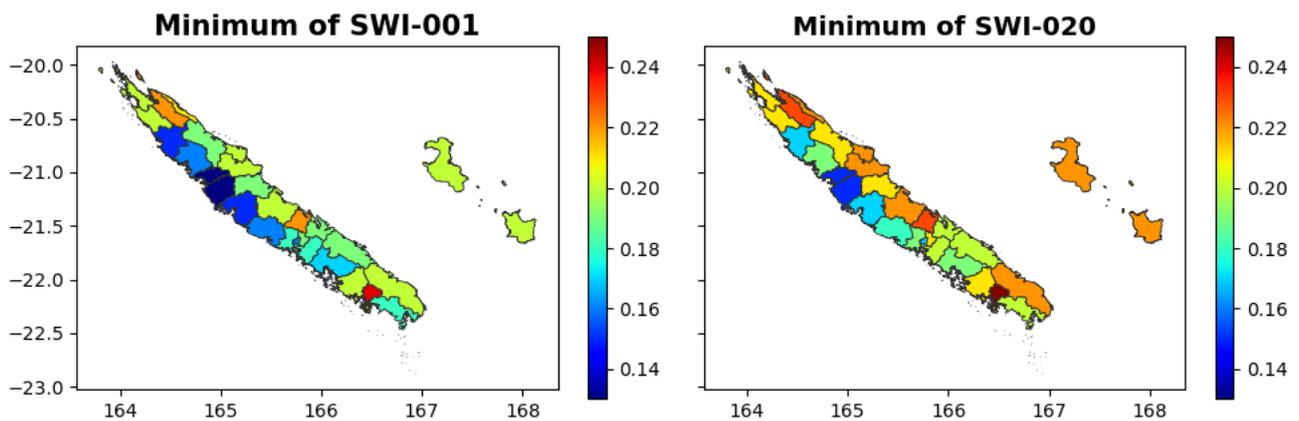


Figure 30 : Valeurs minimales par commune pour les indices d'humidité du sol SWI-001 (en surface) et SWI-020 (en zone racinaire)

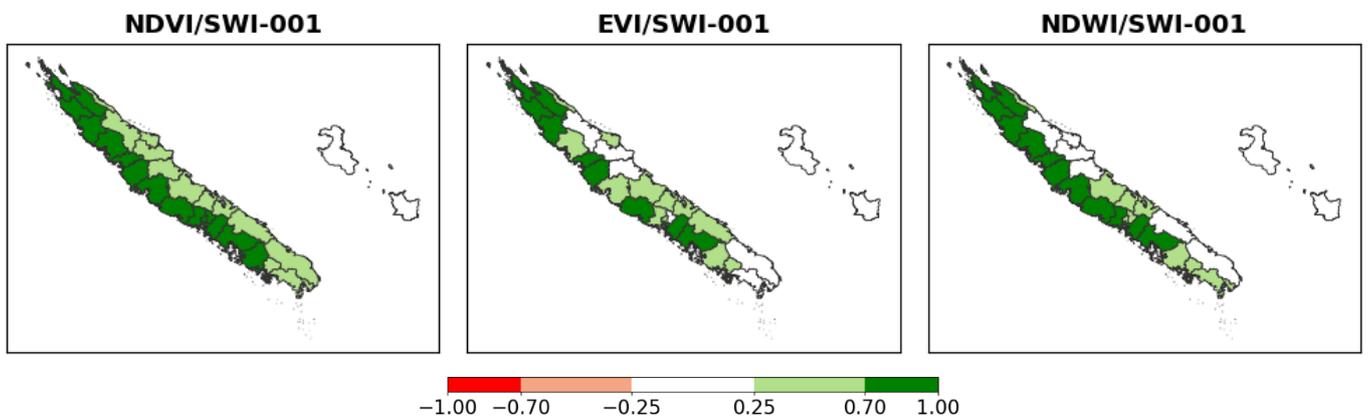


Figure 31 : Corrélations entre les indices de végétation et l'indice d'humidité SWI-001

Annexe 7 : Série temporelle de l'indicateurs MAI

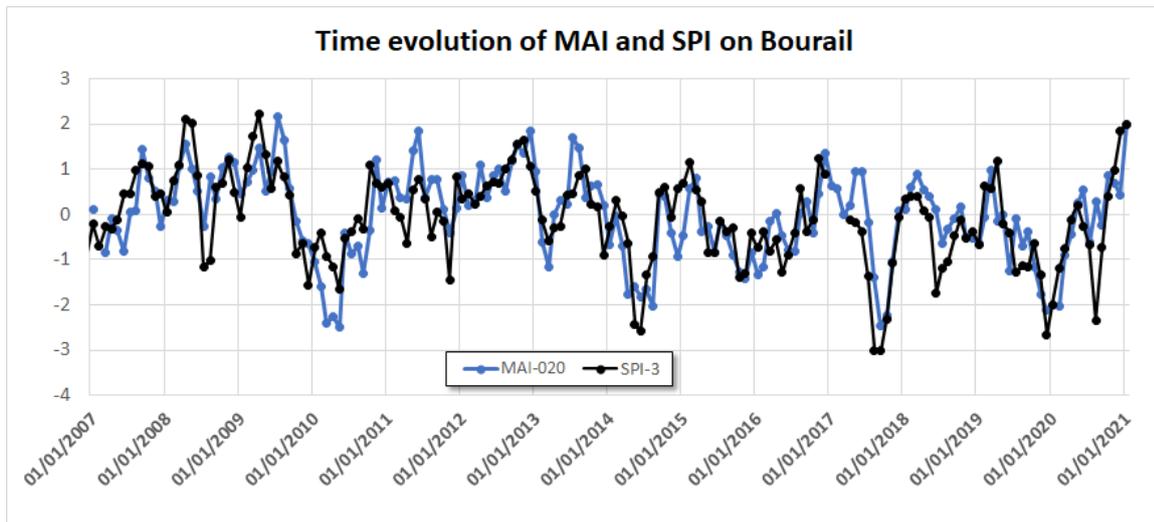


Figure 32 : Comparaison des évolutions temporelles de l'indicateur MAI-020 (SWI-020) et du SPI-3 mois sur la commune de Bourail

Annexe 8 : Corrélations mensuelles entre le SPI-3 mois et les indicateurs satellites sur la commune de Poindimié

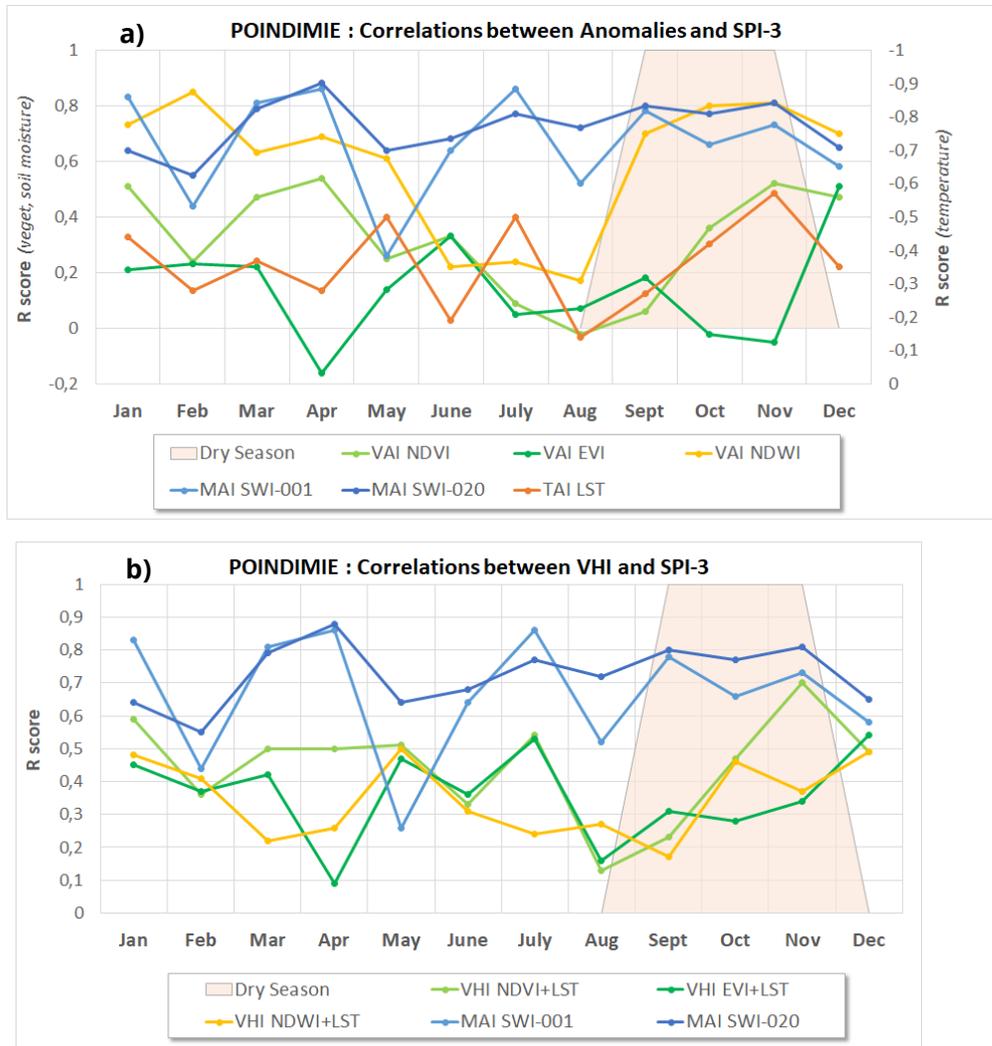


Figure 33 : Corrélations mensuelles entre le SPI-3 mois et les indicateurs obtenus sur la commune de Poindimié : (a) par la méthode des anomalies et (b) par la méthode du VHI

Annexe 9 : Corrélations maximum par commune entre le SPI-3 mois et les indicateurs satellites

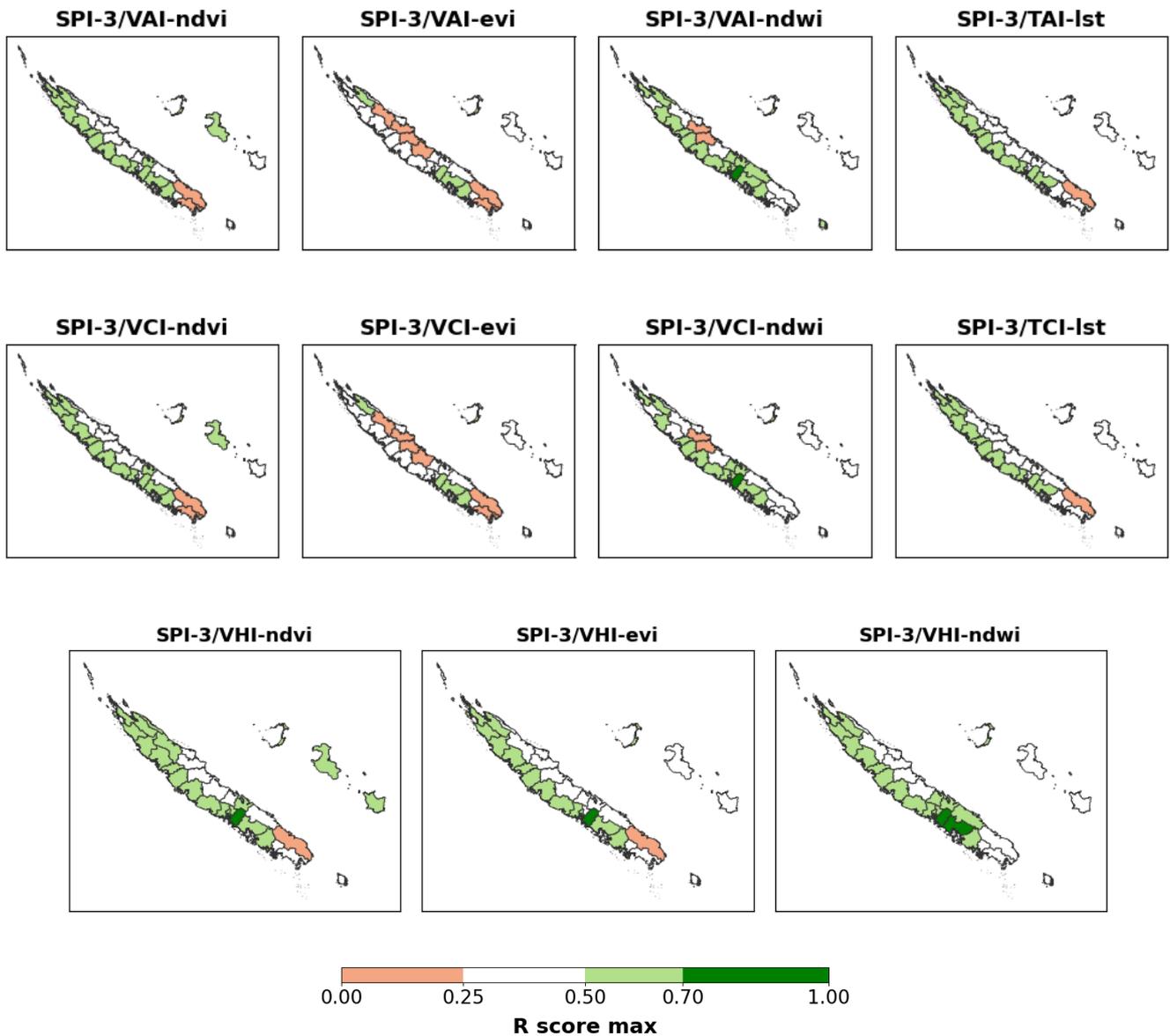


Figure 34 : Corrélations maximum entre le SPI-3 mois et les indicateurs satellites obtenus via l'intégralité des méthodes et indices de surface testés dans cette étude

Annexe 10 : Note de synthèse SPEI (Météo-France)

SPEI NC

note de synthèse n°1

SPEI – Indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé

« Cet indice relativement récent repose sur les mêmes bases que le SPI mais ajoute la température, pour tenir compte de l'effet de celle-ci sur la progression de la sécheresse par un calcul élémentaire du bilan hydrique. Il comporte une échelle d'intensité pour calculer les valeurs positives et négatives, qui signalent les épisodes humides et secs. »

Manuel des indicateurs et indices de sécheresse OMM-N° 1173

Calculs des SPEI 1 à 24 mois

Il existe un package « SPEI » sous R qui permet de calculer les SPEI mensuels pour une station. Pour le calcul du bilan hydrique les précipitations sont nécessaires mais également l'ETP, pour laquelle plusieurs méthodes de calculs sont proposées :

- ETP Thornthwaite qui prend en données d'entrée Tmoy et latitude
- ETP Hargreaves qui prend en données d'entrée Tmin, Tmax, avec ou sans RR
- ETP Penman qui prend en données d'entrée Tmin, Tmax et FF

Comme il est souhaitable d'avoir un maximum de stations qui disposent du SPEI, le mode de calcul prenant en compte l'ETP Penman est pour l'instant écarté. Les SPEI ont alors été élaborés à partir de l'**ETP Thornthwaite** et de l'**ETP Hargreaves avec et sans RR**, de façon à pouvoir par la suite chercher à déterminer quels SPEI sont les mieux corrélés au VHI et/ou au MAI.

Pour ce qui est du choix de la période de référence, l'OMM recommande d'utiliser une période d'au moins 30 ans pour l'élaboration des paramètres de calculs du SPEI. Plusieurs périodes de référence ont alors été testées :

- **1961-2010**
- **1971-2010**
- **1981-2010**
- **1971-2020**
- **1981-2020**
- **1991-2020**

Enfin bien qu'il soit recommandé de disposer de séries de données mensuelles d'observations complètes sur la période de référence, il a été également testé l'élaboration des SPEI disposant d'au moins 90 % de données mensuelles d'observations sur la période de référence. Cela permettant d'augmenter le nombre de stations pour lesquelles le calcul du SPEI est possible.

Ce sont donc 3 méthodes de calculs du SPEI (selon 3 méthodes différentes d'élaboration de l'ETP), qui ont été élaborés pour 6 périodes de références. Et cela dans le cas où l'on prend en compte les stations disposant de 100 % de données mensuelles d'observations sur la période de référence et dans le cas où l'on prend en compte les stations disposant d'au moins 90 % de données mensuelles d'observations sur la période de référence. Selon le cas, le calcul du SPEI est possible pour seulement 3 stations pour le minimum (période de référence 1961-2010 et ETP Hargreaves avec RR et sans RR), et 33 stations pour le maximum (période de référence 1991-2020 et ETP Thornthwaite). Toutefois il reste à déterminer si les différents SPEI calculés au niveau d'une station sont éloignés les uns des autres et quels SPEI sont les mieux corrélés aux indices de sécheresse relevés par satellite tels que le VHI et le MAI.

Analyse des SPEI 3 et SPEI 6 mois

De façon à déterminer si les différents modes de calculs des SPEI testés fournissent des résultats significativement différents et si les valeurs trouvées peuvent être considérées comme satisfaisantes pour le suivi de la sécheresse, une analyse de corrélation entre le VHI dans un premier temps et le MAI dans un second temps et les différents SPEI (3 et 6 mois) disponibles par station dans la commune est réalisée.

Principe et méthode

Pour cela il est en premier lieu nécessaire de tester la normalité de chaque échantillon de VHI (ou MAI), SPEI3 et SPEI6 à l'aide du test de Shapiro-Wilk, puis si les échantillons peuvent être considérés comme suivant une loi normale alors est appliquée le test de corrélation de Pearson, par contre si l'un des échantillons ne semble pas suivre une loi normale, c'est le test de corrélation de Spearman qui est appliqué.

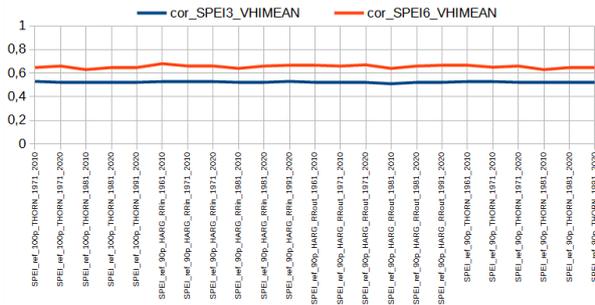
NB 1 : Une analyse de corrélation avec les VHI landMask a été réalisée, mais le filtre landMask n'améliore parfois que faiblement les résultats de corrélation. De même si l'on filtre les VHI avec un QSCORE (données satellites disponibles) supérieur à 0,7, il peut arriver pour certains mois et pour certaines stations que les corrélations soient améliorées alors que pour d'autres cas celles-ci sont diminuées, cela dépendant beaucoup du nombre de données disponibles une fois les filtres appliqués. C'est pourquoi dans un premier temps seuls les résultats de l'analyse de corrélation avec le VHI moyens sur la période 02/2000 à 03/2021 seront présentés dans cette note.

NB 2 : Le nombre de données à analyser étant extrêmement élevé, l'analyse sera portée uniquement sur les mois d'août, septembre et octobre, pour les stations BOURAIL (sud-ouest), KOUMAC (nord-ouest), POINDIMIE (nord-est), THIO P. (sud-est) et OUANAHAM (îles). Cette restriction permettant de diminuer la quantité de données à analyser, tout en centrant l'analyse sur les mois parmi les plus secs en Nouvelle-Calédonie et pour 5 régions du territoire.

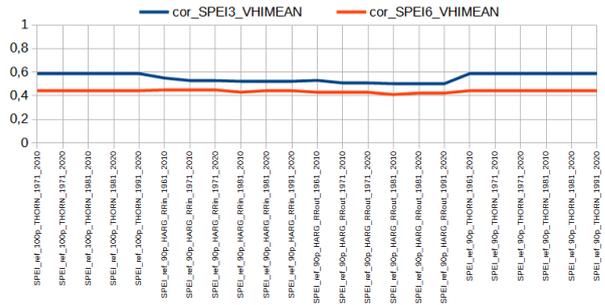
Présentation des résultats

Les graphiques ci-dessous représentent les différentes corrélations des SPEI 3 mois et SPEI 6 mois calculés à la station avec les VHI moyens de la commune pour les mois d'août, septembre et octobre, selon les différentes méthodes de calculs des SPEI.

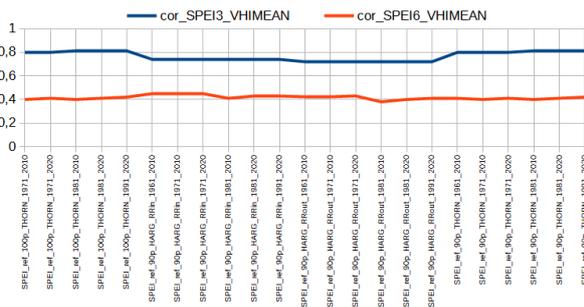
BOURAIL (sud-ouest)



Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec avec VHI moyens, BOURAIL - Août

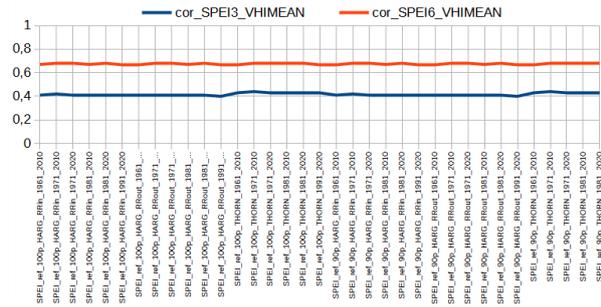


Corrélations SPEI3 et SPEI VHI moyens, BOURAIL – Septembre

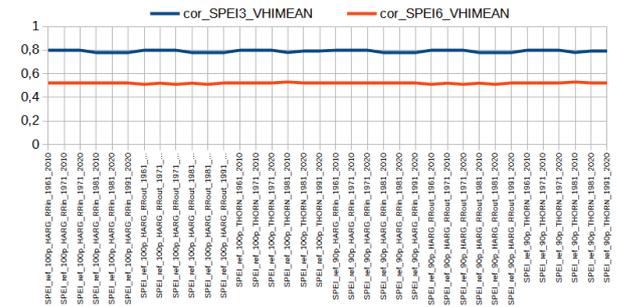


Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, BOURAIL – Octobre

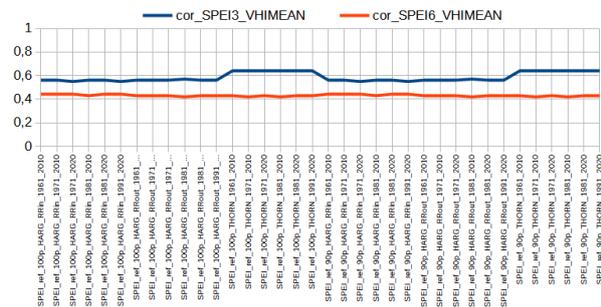
KOUMAC (nord-ouest)



Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, KOUMAC - Août

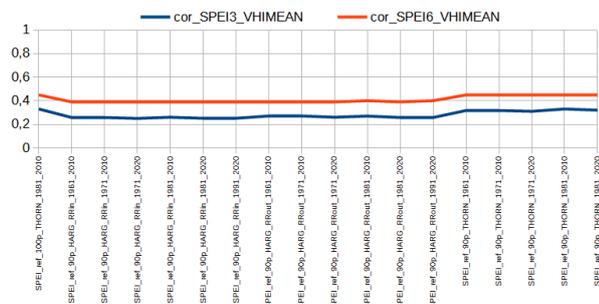


Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, KOUMAC - Septembre

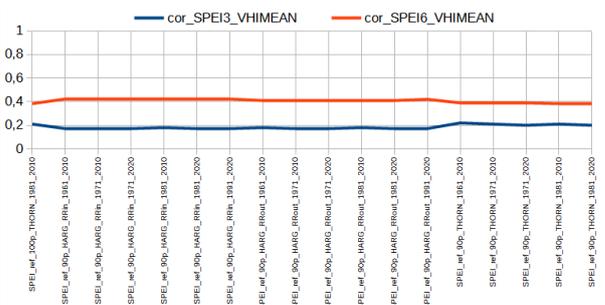


Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, KOUMAC - Octobre

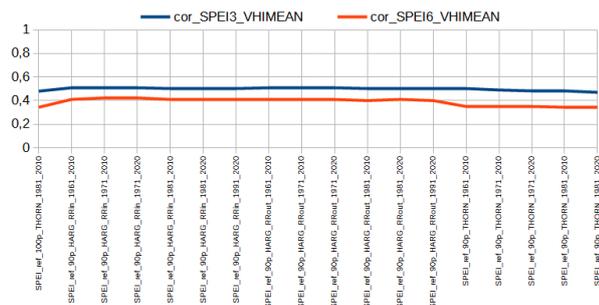
POINDIMIE (nord-est)



Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, POINDIMIE - Août



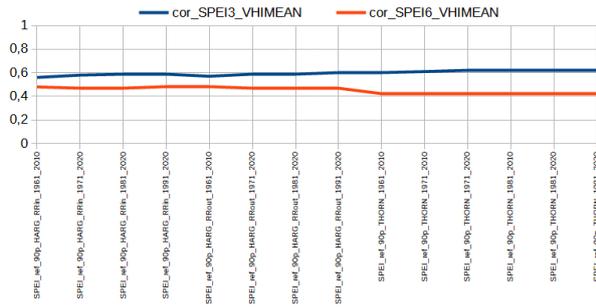
Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, POINDIMIE - Septembre



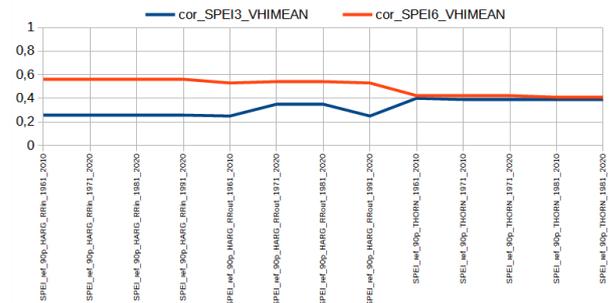
Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, POINDIMIE - Octobre



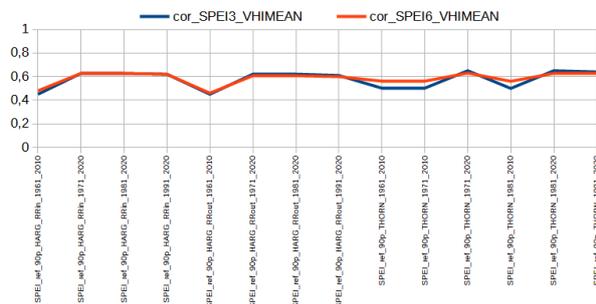
THIO P. (sud-est)



Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, THIO P. - Août

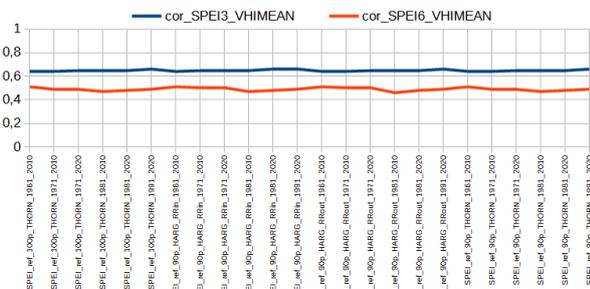


Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, THIO P. - Septembre

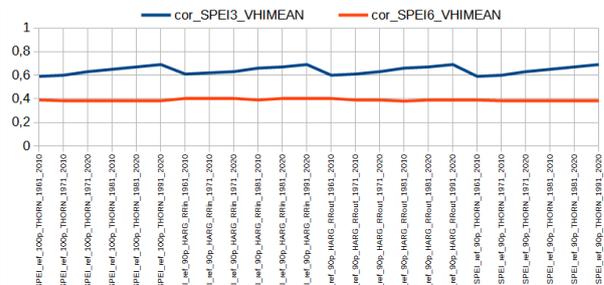


Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, THIO P. - Octobre

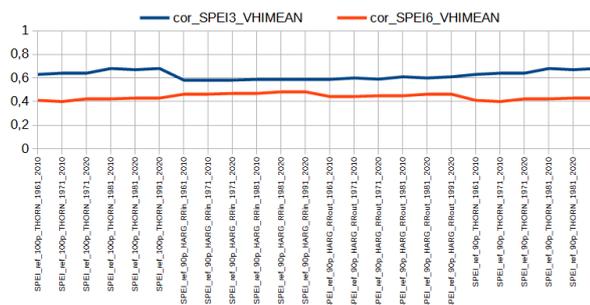
OUANAHAM (îles)



Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, OUANAHAM - Août



Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, OUANAHAM - Septembre



Corrélations SPEI3 et SPEI6 avec VHI moyens, OUANAHAM - Octobre

Synthèse des résultats

Première remarque, l'analyse des graphiques qui présentent pour chaque station les différentes corrélations SPEI3-VHI et SPEI6-VHI en fonction des références choisies (période de référence, mode de calcul de l'ETP et 0 ou 10 % de manque de données sur la période de référence) montre que **les corrélations varient peu, pour une même station et pour un mois donné, selon le mode de calcul utilisé pour élaborer les SPEI**.

Ces observations se confirment si l'on analyse la table descriptive des corrélations SPEI3-VHI et SPEI6-VHI pour chacune des stations citées précédemment (tableau ci-dessous).

STATION	Corrélation SPEI3-VHI				Corrélation SPEI6-VHI			
	Min	Max	Med	Sd	Min	Max	Med	sd
BOURAIL août	0,51	0,53	0,52	0,01	0,63	0,68	0,66	0,01
BOURAIL septembre	0,50	0,59	0,55	0,04	0,41	0,45	0,44	0,01
BOURAIL octobre	0,72	0,81	0,74	0,04	0,38	0,45	0,41	0,02
KOUMAC août	0,40	0,44	0,41	0,01	0,67	0,68	0,68	0,01
KOUMAC septembre	0,78	0,80	0,80	0,01	0,51	0,53	0,52	0,00
KOUMAC octobre	0,55	0,64	0,56	0,04	0,55	0,64	0,57	0,04
POINDIMIE août	0,25	0,33	0,27	0,03	0,39	0,46	0,39	0,03
POINDIMIE septembre	0,17	0,22	0,18	0,02	0,38	0,42	0,41	0,02
POINDIMIE octobre	0,47	0,51	0,50	0,01	0,34	0,42	0,41	0,03
THIO P. août	0,56	0,62	0,60	0,02	0,42	0,48	0,47	0,03
THIO P. septembre	0,25	0,40	0,35	0,06	0,41	0,56	0,53	0,07
THIO P. octobre	0,45	0,65	0,62	0,08	0,59	0,65	0,64	0,02
OUANAHAM août	0,64	0,66	0,65	0,01	0,46	0,51	0,49	0,01
OUANAHAM septembre	0,59	0,69	0,64	0,03	0,38	0,40	0,39	0,01
OUANAHAM octobre	0,58	0,68	0,62	0,04	0,38	0,48	0,44	0,03

On peut toutefois noter que dans certains cas, il semble que les SPEI 3 mois calculés avec l'ETP Thornthwaite soient mieux corrélés que les SPEI 3 mois calculés avec les ETP Hargreaves, comme cela peut être le cas pour les corrélations SPEI3 et SPEI6 avec les VHI moyens à KOUMAC en octobre ou à POINDIMIE en août par exemple.

Deuxième remarque, l'analyse des graphiques qui présentent pour chaque station les différentes corrélations SPEI3-VHI et SPEI6-VHI en fonction des références choisies montre que **les corrélations peuvent être meilleures avec le SPEI 3 mois ou avec les SPEI 6 mois, selon le mois et la station considérés**. Une étude des meilleures corrélations en fonction des mois et des stations est en cours de finalisation de façon à optimiser l'utilisation des indices SPEI en fonction de chaque mois pour chaque station.

Troisième remarque, l'analyse des graphiques qui présentent pour chaque station les différentes corrélations SPEI3-VHI et SPEI6-VHI en fonction des références choisies montre que **les corrélations peuvent être très élevées pour certaines stations et**

certains mois et très faibles pour ces mêmes stations et d'autres mois, ce qui indique qu'un mode de calcul particulier des ETP ne semble pas se démarquer des autres dans la globalité des corrélations étudiées.

Pour conclure, en prenant en compte les remarques précédentes il faut maintenant déterminer le mode de calcul des SPEI à retenir pour exploitation.

Pour cela **plusieurs options sont possibles, par exemple choisir de privilégier la plus grande couverture spatiale possible pour le SPEI**, malgré les faibles corrélations qui puissent exister parfois entre les SPEI d'une station et les VHI de la commune associée pour certains mois. **Ou bien** alors, il peut être préférable de **s'attacher à des valeurs de SPEI corrélées au mieux aux VHI et accepter d'avoir une couverture spatiale pour le SPEI plus ou moins réduite** (sachant que 11 des communes sur les 33 que compte le territoire ne sont, quoi qu'il en soit, pas couvertes).

Suggestion : Calculer les SPEI selon l'ETP Thornthwaite, avec comme périodes de référence 1971-2020 (50 ans) et 1991-2020 (30 ans) pour toutes les stations disposant d'au moins 90 % de données sur la période de référence, ce qui permettrait de couvrir 23 stations dans le premier cas et 33 dans le second.

Annexe 11 : Scores et lags de corrélation entre le VHI et les indicateurs SPI, MAI, SPEI

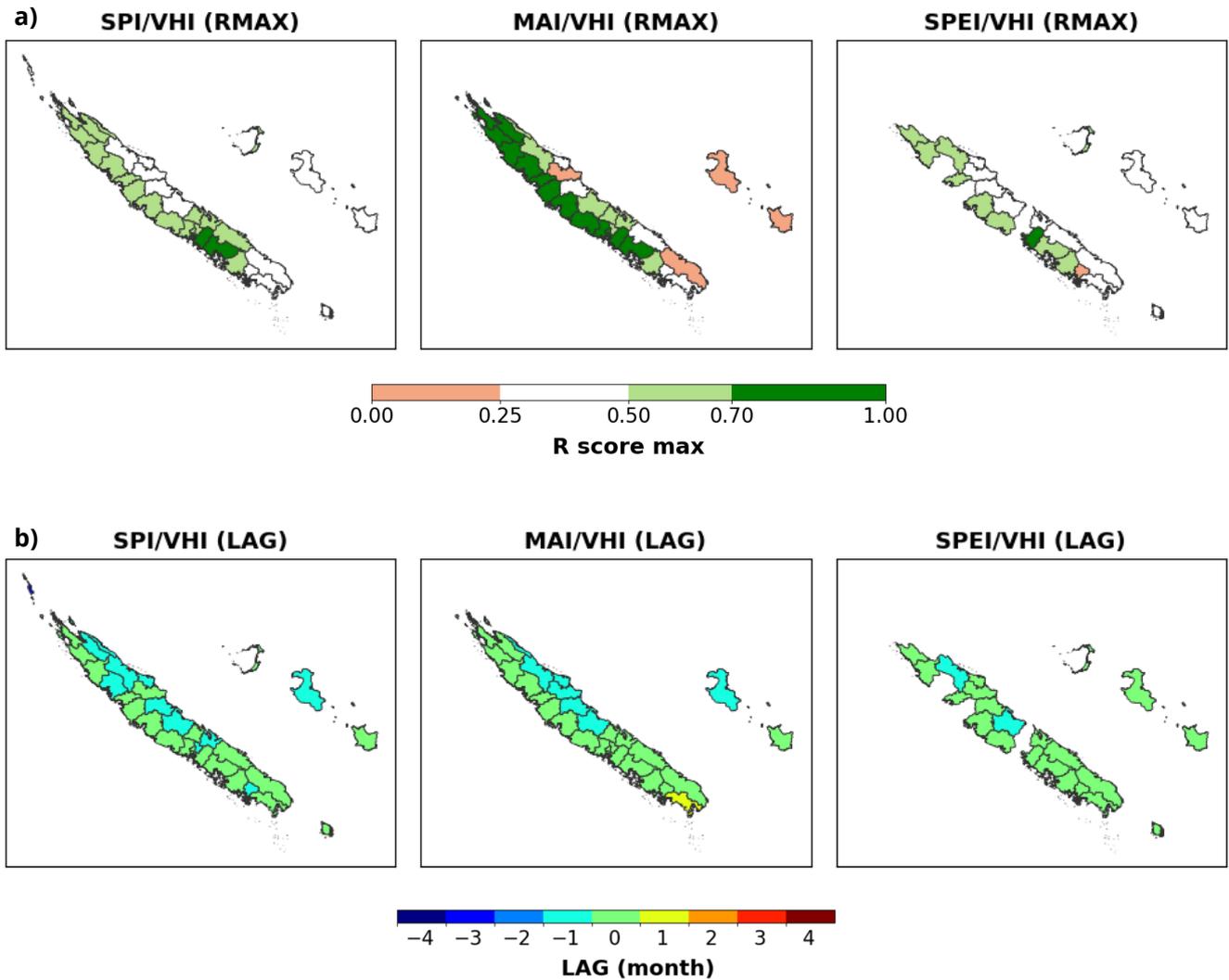


Figure 35 : Corrélations maximum (a) et décalages temporels correspondants (b) obtenus entre le VHI (*VHI NDWI+LST*) et les indicateurs SPI (*SPI-3 mois*), MAI (*MAI SWI-020*) et SPEI (*SPEI-3 mois*) pour la période 2000 - 2021 (SPI/VHI, SPEI/VHI) et 2007 - 2021 (MAI/VHI).

Annexe 12 : Calibration radiométrique des indices NDWI Sentinel-2

Les fonctions statistiques reliant les indices S2 aux indices L8 ont été déterminées en utilisant la méthode de régression linéaire par moindres carrés. Celle-ci a été appliquée sur les paires d'images S2/L8 acquises sur une même zone et à trois dates distinctes (novembre 2019, juillet 2020, janvier 2020). La figure 31 présente pour le mois de novembre 2019 les histogrammes de NDWI S2 et L8, ainsi que le diagramme de dispersion correspondant.

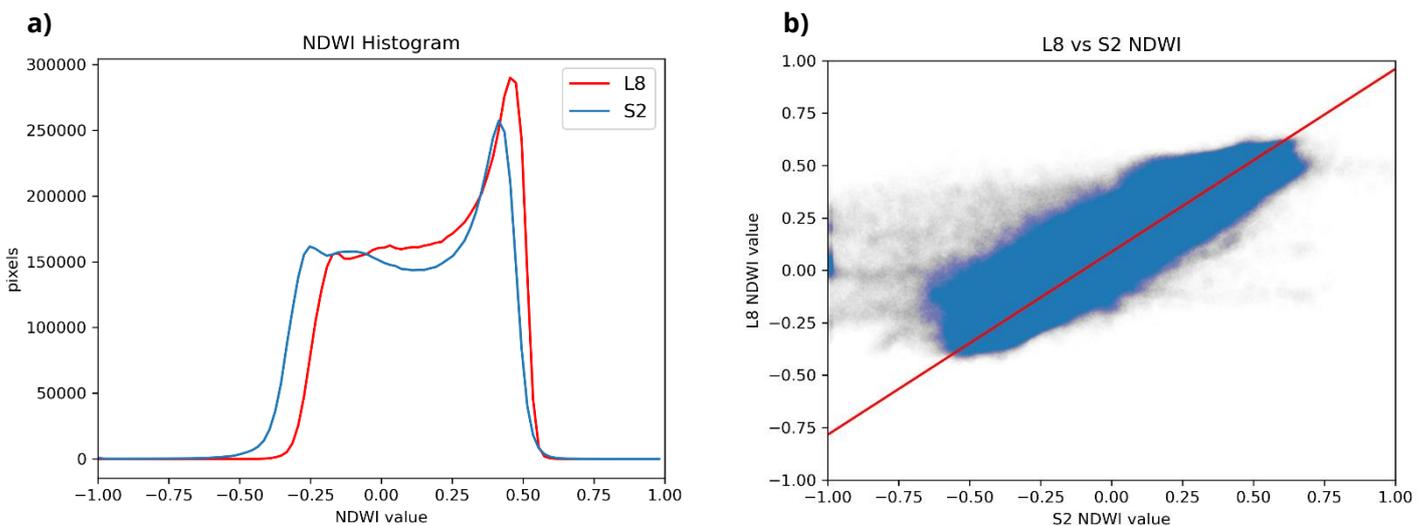


Figure 36 : Histogramme (a) et Diagramme de dispersion (b) de l'indice NDWI acquis par S2 et L8 au mois de novembre 2019. La ligne rouge en (b) indique le modèle de régression linéaire obtenu après analyse par moindres carrés.

Les résultats de la régression linéaire sont présentés dans le tableau 7. La qualité de l'ajustement des régressions a été définie par le coefficient de détermination (R^2) et la signification des régressions (pour un test d'hypothèse nulle étant que la pente soit nulle) a été définie via la p -value. Pour les trois dates, nous obtenons une bonne qualité et une bonne signification de la régression ($R^2 > 0.8$ et $p\text{-val} < 0.01$). A partir de la moyenne des coefficients de régression a et b des trois dates, nous avons extrait une équation générale que nous utiliserons ensuite pour réaliser la calibration radiométrique :

$$NDWI_{calib} = a_{mean} \times NDWI + b_{mean}$$

10

avec $a_{mean} = 0.80$ et $b_{mean} = 0.10$.

Tableau 7 : Résultats de la régression linéaire par moindres carrés appliquée sur les indices NDWI S2 et L8 aux dates nov-2019, juil-2020, janv-2020

Regression linéaire	nov-19	juil-20	janv-20
a (pente)	0,87	0,78	0,76
b (interception)	0,09	0,13	0,08
R2 (coeff détermination)	0,94	0,88	0,90
p-val (test hypothèse pente nulle)	<< 0,01	<< 0,01	<< 0,01

Annexe 13 : Proportion des classes d'occupation / usage des sols sur Bourail

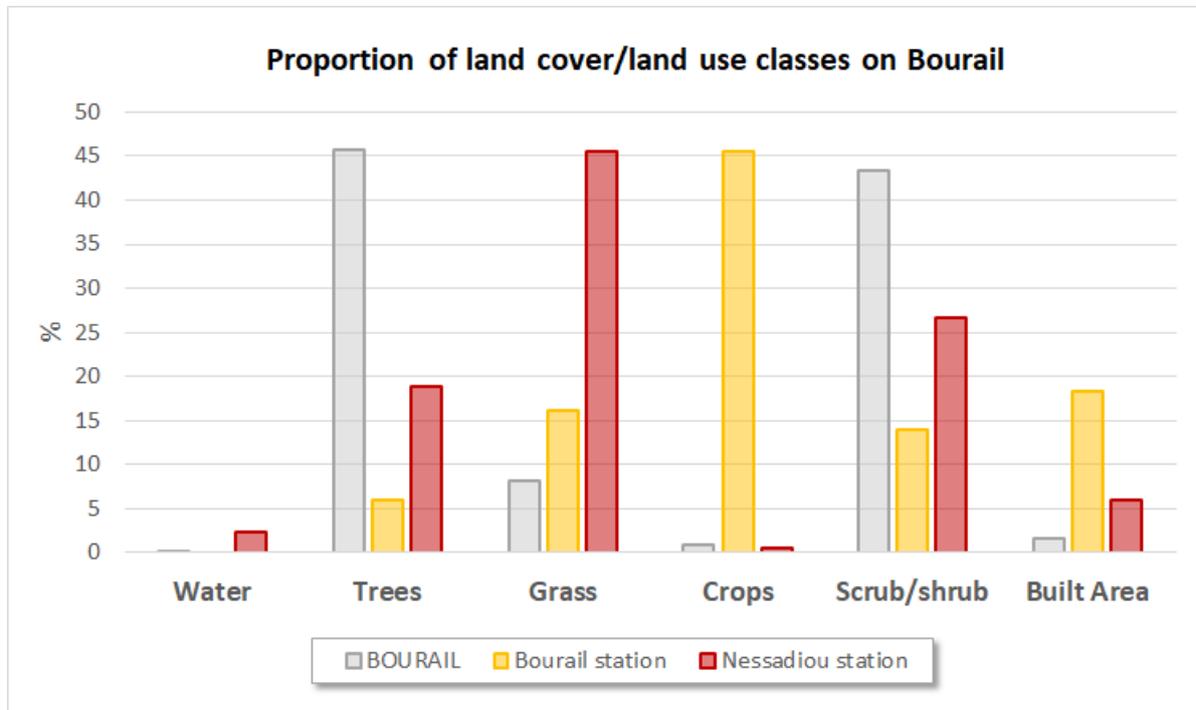


Figure 37 : Proportion des différentes classes d'occupation/usage des sols sur Bourail (*ESRI Land Cover, 2020*). Ces statistiques ont été obtenues pour trois zones géographiques : l'ensemble de la commune (*BOURAIL*) et les deux sites d'étude (*Bourail station, Nessadiou station*). Pour chaque zone, seulement les surfaces continentales ont été considérées dans le calcul (classe de végétation inondée non prise en compte).

Annexe 14 : Variabilité spatio-temporelle de l'indicateur VAI-ndwi sur la station de Nessadiou (commune de Bourail)

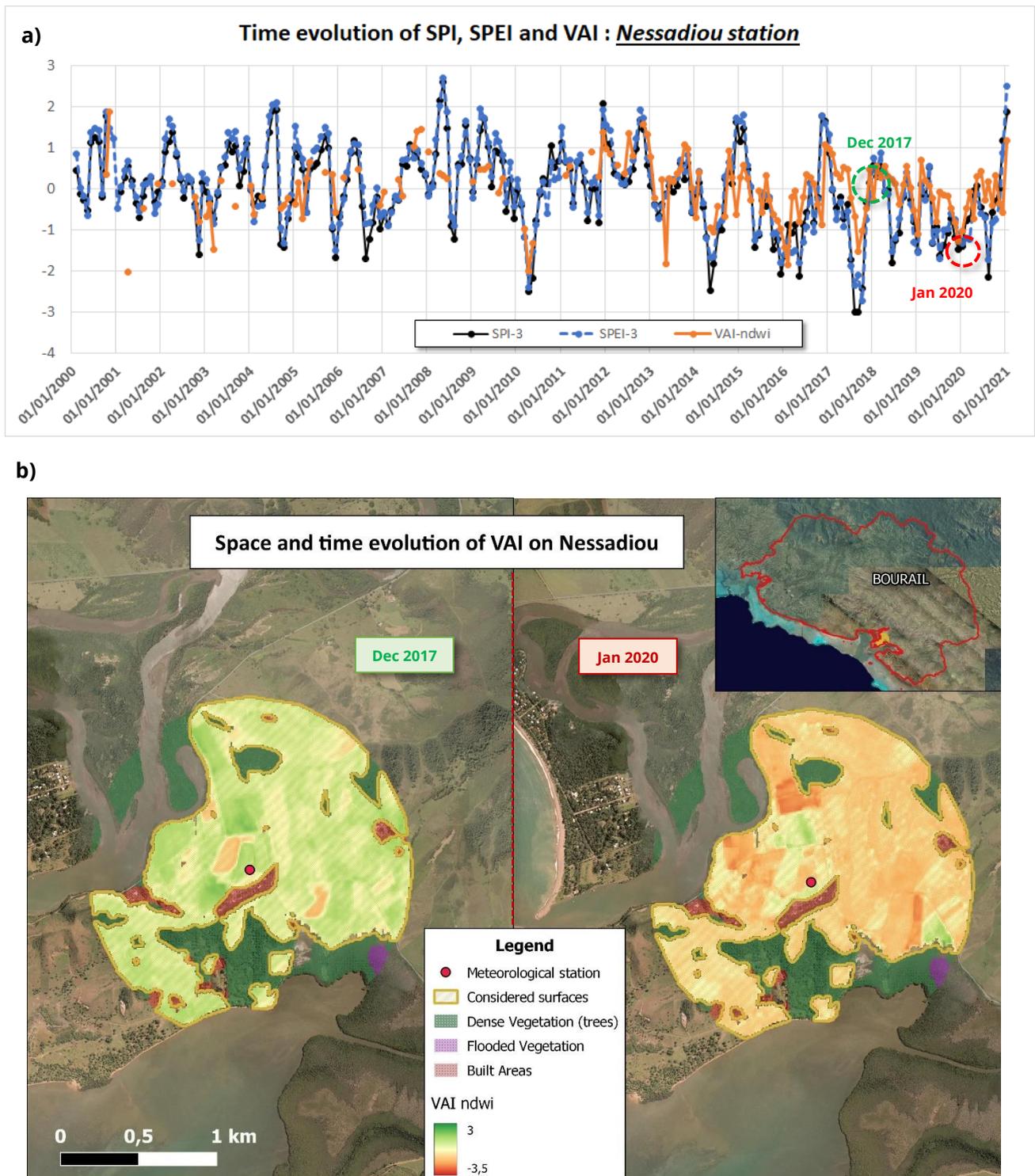


Figure 38 : (a) Comparaison des évolutions temporelles des indicateurs SPI-3 mois, SPEI-3 mois et VAI-ndwi au niveau de la station météorologique de Nessadiou (commune de Bourail). (b) Carte du VAI acquis dans un 1 km autour de la station de Nessadiou pour les mois de décembre 2017 et janvier 2020.

Annexe 15 : Corrélations maximums à l'échelle locale entre le SPEI-3 mois et les indicateurs satellites

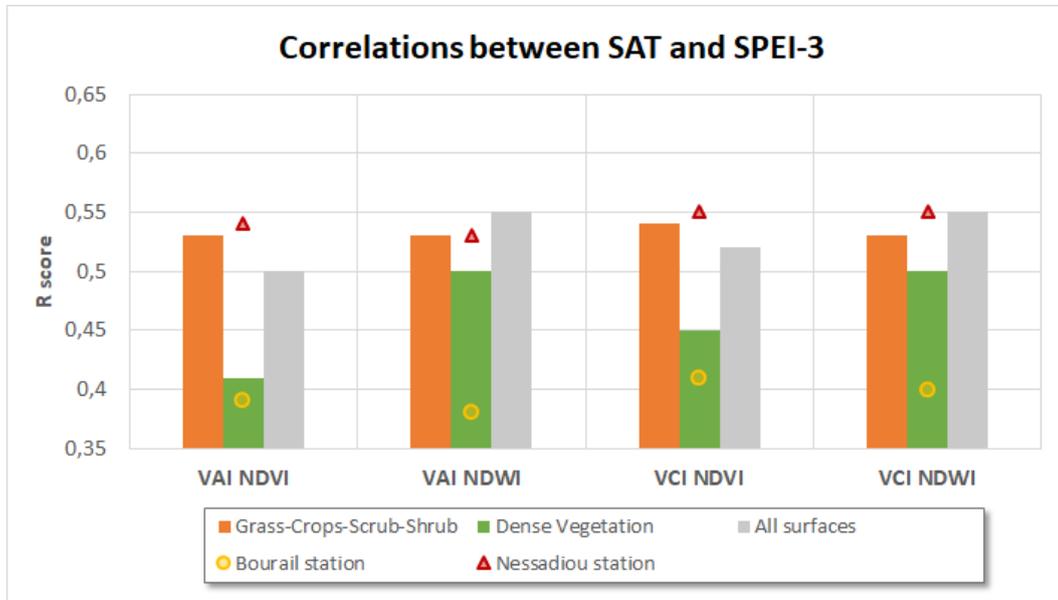


Figure 39 : Corrélations maximum entre le SPEI-3 mois et les indicateurs satellites pour 5 catégories de surface. Pour celles situées à la station (*Bourail station, Nessadiou station*), la végétation dense et les zones artificialisées n'ont pas été prises en compte.

Annexe 16 : Procédure de composition temporelle par décade des indices de végétation

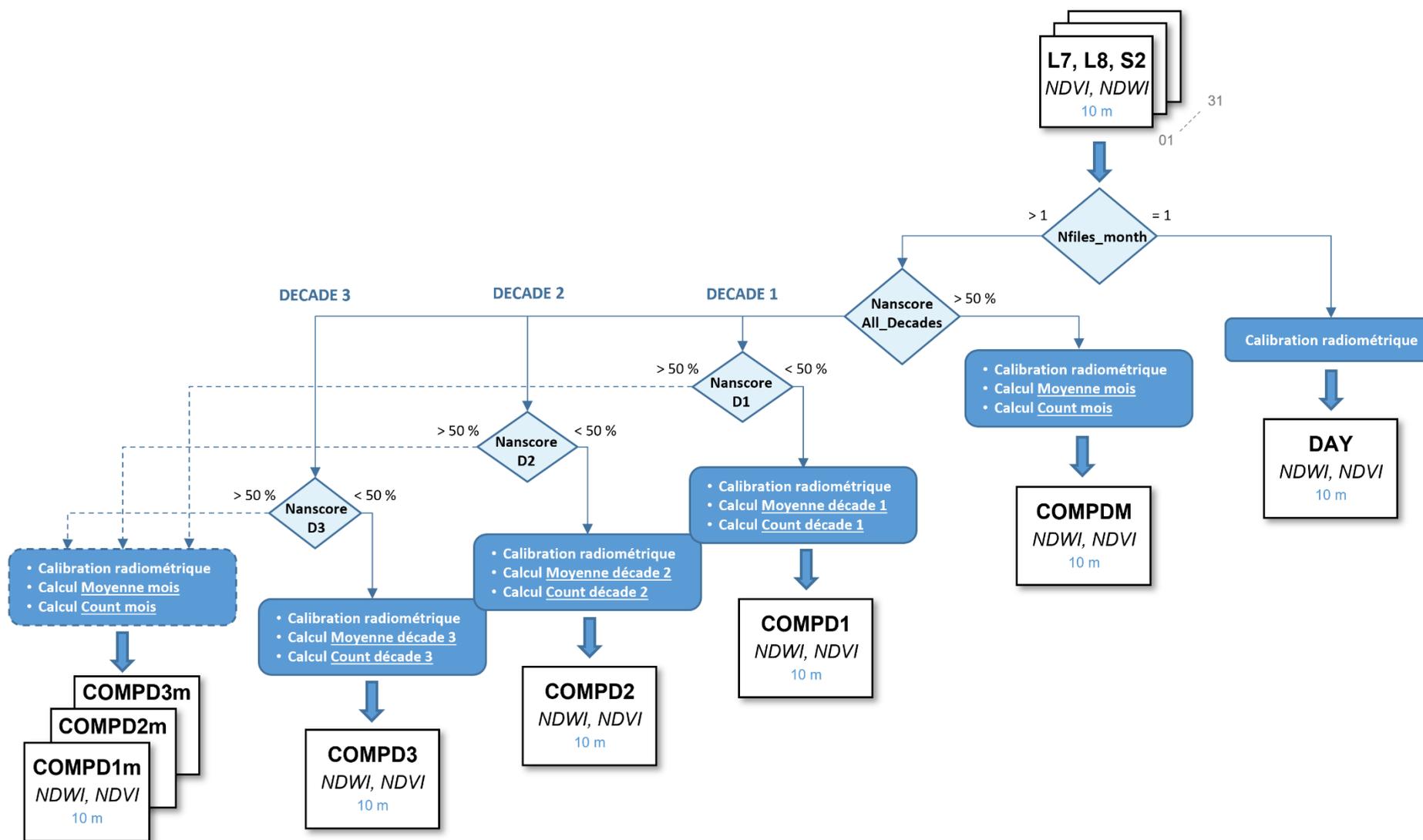


Figure 40 : Procédure de composition temporelle par décade implémentée dans la chaîne de calcul de l'indicateur local de sécheresse (cas d'un mois *m*).

6. 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>

Anderson, M. C., Hain, C., Wardlow, B., Pimstein, A., Mecikalski, J. R., & Kustas, W. P. (2011). Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States. *Journal of Climate*, 24(8), 2025-2044.

Baetens, L., Desjardins, C., & Hagolle, O. (2019). Validation of Copernicus Sentinel-2 Cloud Masks Obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask Processors Using Reference Cloud Masks Generated with a Supervised Active Learning Procedure. *Remote Sensing*, 11(4), 433. <https://doi.org/10.3390/rs11040433>

Bruyere, O. (2018). *Utilisation d'un indice de végétation issu de la télédétection pour la caractérisation et le suivi opérationnel des épisodes de sécheresse agricole en Nouvelle-Calédonie* [Rapport de stage]. Météo-France Nouvelle-Calédonie.

Dutheil, C. (2018). *Impacts du changement climatique dans le Pacifique Sud à différentes échelles : Précipitations, cyclones, extrêmes*. Sorbonne Université.

Enenkel, M., Steiner, C., Mistelbauer, T., Dorigo, W., Wagner, W., See, L., Atzberger, C., Schneider, S., & Rogenhofer, E. (2016). A Combined Satellite-Derived Drought Indicator to Support Humanitarian Aid Organizations. *Remote Sensing*, 8(4), 340. <https://doi.org/10.3390/rs8040340>

Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

Gu, Y., Hunt, E., Wardlow, B., Basara, J. B., Brown, J. F., & Verdin, J. P. (2008). Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. *Geophysical Research Letters*, 35(22), L22401. <https://doi.org/10.1029/2008GL035772>

Hagolle, O., Huc, M., Pascual, D. V., & Dedieu, G. (2010). A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VEN μ S, LANDSAT and SENTINEL-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1747-1755. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.002>

Hagolle, O., Huc, M., Villa Pascual, D., & Dedieu, G. (2015). A Multi-Temporal and Multi-Spectral Method to Estimate Aerosol Optical Thickness over Land, for the Atmospheric Correction of FormoSat-2, LandSat, VEN μ S and Sentinel-2 Images. *Remote Sensing*, 7(3), 2668-2691. <https://doi.org/10.3390/rs70302668>

Hazaymeh, K., & K. Hassan, Q. (2016). Remote sensing of agricultural drought monitoring: A state of art review. *AIMS Environmental Science*, 3(4), 604-630. <https://doi.org/10.3934/environsci.2016.4.604>

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213.

Huete, A., Justice, C., & Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of environment*, 49(3), 224-234.

Ji, J., & Peters, A. J. (s. d.). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85-98.

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).

Kogan, F., & Sullivan, J. (1993). Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 13(5), 219-222.

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.

McVicar, T. R., & Jupp, D. L. (1998). The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia : A review. *Agricultural systems*, 57(3), 399-468.

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.

Petropoulos, G. P., Ireland, G., & Barrett, B. (2015). Surface soil moisture retrievals from remote sensing : Current status, products & future trends. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84, 36-56. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.02.009>

Rouquié, B., Hagolle, O., Bréon, F.-M., Boucher, O., Desjardins, C., & Rémy, S. (2017). Using Copernicus Atmosphere Monitoring Service Products to Constrain the Aerosol Type in the Atmospheric Correction Processor MAJA. *Remote Sensing*, 9(12), 1230. <https://doi.org/10.3390/rs9121230>

Sadeghi, S. H., & Hazbavi, Z. (2017). Spatiotemporal variation of watershed health propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought index (case study : Shazand Watershed in Iran). *Science of The Total Environment*, 587-588, 168-176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.098>

Sánchez, N., González-Zamora, Á., Piles, M., & Martínez-Fernández, J. (2016). A New Soil Moisture Agricultural Drought Index (SMADI) Integrating MODIS and SMOS Products : A Case of Study over the Iberian Peninsula. *Remote Sensing*, 8(4), 287. <https://doi.org/10.3390/rs8040287>

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>

Serrano, L., Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, J. A., & Penuelas, J. (2000). Deriving Water Content of Chaparral Vegetation from AVIRIS Data. *Remote Sensing of Environment*, 74(3), 570-581. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00147-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00147-4)

Sholihah, R. I., Trisasongko, B. H., Shiddiq, D., Iman, L. O. S., KUSDARYANTO, S., Manijo, & Panuju, D. R. (2016). Identification of Agricultural Drought Extent Based on Vegetation Health Indices of Landsat Data : Case of Subang and Karawang, Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.051>

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

Tucker, C. J., & Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395-1416. <https://doi.org/10.1080/01431168608948944>

Unganai, L. S., & Kogan, F. N. (1998). Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 63(3), 219-232.

Vaani, N., & Porchelvan, P. (2018). MONITORING OF AGRICULTURAL DROUGHT USING FORTNIGHTLY VARIATION OF VEGETATION CONDITION INDEX (VCI) FOR THE STATE OF TAMIL NADU, INDIA. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W9, 159-164. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-159-2018>

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>

Wagner, W., Lemoine, G., & Rott, H. (1999). A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment*, 70(2), 191-207.

Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140, 36-45.

Wan, Z., & Dozier, J. (1996). A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 34(4), 892-905.

Wigneron, J.-P., Calvet, J.-C., Pellarin, T., Van de Griend, A. A., Berger, M., & Ferrazzoli, P. (2003). Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations : Current status and future plans. *Remote Sensing of Environment*, 85(4), 489-506. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00051-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00051-8)

Xie, F., & Fan, H. (2021). Deriving drought indices from MODIS vegetation indices (NDVI/EVI) and Land Surface Temperature (LST) : Is data reconstruction necessary? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101, 102352.