

ISABELLE BEAUDIN

**POTENTIEL DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LE
SUIVI ET LA CARACTÉRISATION DES
CONDITIONS DE SÉCHERESSE EN MILIEU
MÉDITERRANÉEN**

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en sciences géomatiques
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

PROGRAMME EN SCIENCES GÉOMATIQUES
FACULTÉ DE FORESTERIE ET GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL

NOVEMBRE 2006

© Isabelle Beaudin, 2006

Résumé court

Les techniques actuelles pour la détection et la surveillance des conditions de sécheresse sont essentiellement basées sur des données fournies par un réseau de stations météorologiques. Ces réseaux sont parfois peu représentatifs car peu de stations, souvent mal situées, les constituent.

Cette étude a pour but d'évaluer le potentiel de l'imagerie satellitaire pour la détection, la caractérisation et le suivi des conditions de sécheresse en Andalousie, au sud de l'Espagne. Les données du capteur AVHRR du satellite NOAA 11 ont été utilisées pour calculer le VCI et le TCI pour des aires de 11 km^2 centrées à onze stations météorologiques. Ces indicateurs sont comparés à un indicateur de sécheresse météorologique, le SPI.

L'analyse de la relation entre le VCI, le TCI et le SPI démontre généralement une bonne corrélation en période de sécheresse et semble supporter l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour le suivi des sécheresses en milieu méditerranéen.

Short Abstract

Current techniques for the detection and monitoring of droughts are based on meteorological networks. The small number of stations, often badly located makes these networks poorly representatives of the area they cover.

The aim of this study is to evaluate the potential of satellite imagery for the detection, characterization and monitoring of drought conditions in Andalusia, in southern Spain. The satellite imagery used in this study comes from the NOAA 11 AVHRR sensor. Two indices (VCI and TCI) were calculated over 11 km² areas centered over 11 meteorological stations. These were compared to the SPI, a widely used meteorological index.

Correlation analysis between VCI, TCI and SPI show a good relation during drought periods and seem to support the use of satellite imagery for monitoring drought in the Mediterranean region.

Résumé long

La sécheresse est un désastre naturel qui affecte des millions de personnes et de grandes étendues à chaque année. Selon les prédictions météorologiques et en tenant compte du réchauffement global de la planète, la probabilité et la sévérité des sécheresses augmenteront sûrement dans les années à venir (IPCC, 1997).

Les techniques utilisées présentement pour la détection et la surveillance des conditions de sécheresse dans le monde sont essentiellement basées sur des données fournies par un réseau de stations météorologiques. Ces réseaux sont parfois peu représentatifs car trop peu de stations, souvent mal situées, les constituent. Depuis plusieurs années déjà, l'imagerie satellitaire est utilisée pour le suivi des conditions météorologiques et environnementales. Plus précisément, les satellites de la série NOAA offrent la possibilité d'acquérir des données météorologiques journalières pour un territoire désiré.

Cette étude a pour but d'évaluer le potentiel de l'imagerie satellitaire NOAA pour la détection, la caractérisation et le suivi des conditions de sécheresse en région méditerranéenne. L'Andalousie, au sud de l'Espagne, a servi de site test.

Les données satellitaires utilisées proviennent du capteur AVHRR du satellite NOAA 11 et elles couvrent les années 1989 à 1994. Deux indicateurs satellitaires (VCI et TCI), ont été calculés pour des aires de 11 km^2 centrées aux stations météorologiques et ont été comparés à un indicateur de sécheresse météorologique fréquemment utilisé, soit le SPI. Les données météorologiques utilisées lors du calcul du SPI proviennent de onze stations possédant une série temporelle de données de température et de pluviométrie d'au moins 30 ans. De plus, un TCI calculé à partir des données météorologiques a été comparé au TCI calculé à partir des données satellitaires afin de vérifier la possibilité d'utiliser des données de température aux stations pour palier au manque de données satellitaires et vice versa.

Les résultats indiquent toutefois que ces deux indicateurs ne sont pas comparables quantitativement quoique leur tendance générale soit semblable. L'analyse de la relation entre le VCI et le SPI démontre quant à elle une amélioration générale des corrélations lorsque la saison sèche est éliminée ou lorsqu'un décalage est introduit. Les meilleurs

résultats se retrouvent en milieux forestiers alors que les milieux agricoles, irrigués ou non, et les milieux avec peu ou pas de végétation montrent de moins bons résultats. L'analyse du TCI face au SPI est quant à elle plus ambiguë. Les corrélations, en général, diminuent après le retrait de la saison sèche. Toutefois, les stations en milieux agricoles ou d'herbacés obtiennent de meilleurs résultats.

En général, les approches satellitaires nous permettent une meilleure caractérisation des conditions de sécheresse à grande échelle par rapport aux méthodes traditionnelles qui se basent sur l'interpolation spatiale afin d'obtenir des résultats pour une zone plus étendue. Toutefois, leur interprétation, de manière locale ou régionale, devrait être effectuée en lien avec l'interprétation des indicateurs de sécheresse basés sur un réseau adéquat de stations météorologiques. Il est donc recommandable d'utiliser ces deux méthodes de façon conjointe ou complémentaire afin d'en arriver à une caractérisation adéquate des conditions de sécheresse sur un territoire.

Long Abstract

Droughts are natural disasters that affect millions of people and wide areas each year. According to meteorological predictions and global warming scenarios, the probability and severity of droughts will likely increase in the years to come (IPCC, 1997).

Current techniques used for the detection and monitoring of worldwide droughts are based on data acquired from meteorological station networks. The small number of stations, often badly located makes these networks poorly representatives of the area they cover.

For a few years already, satellite imagery has been used for monitoring meteorological and environmental conditions. For example, satellites from the NOAA series offer the possibility to acquire daily meteorological data over a vast territory.

The present study aims to evaluate the potential of the NOAA satellite imagery for the detection, characterization and monitoring of drought conditions in the Mediterranean region. Andalusia, in southern Spain is the test site.

The satellite imagery used in this study comes from the NOAA 11 AVHRR sensor and span from 1989 to 1994. Two indices (VCI and TCI) were calculated over 11 km² areas centred on meteorological stations. These were compared to the SPI, a widely used meteorological index.

Meteorological data used in the SPI computation come from eleven stations with temperature and precipitation data spanning over 30 years or more. Moreover, a TCI calculated from meteorological data was also compared to the satellite based TCI to test the possibility to replace satellite temperatures by station temperatures, or vice versa.

Preliminary results indicate that these two indices are not quantitatively comparable despite their similar tendency. The analysis of the relationship between the VCI and SPI demonstrate a better correlation while the dry season is eliminated or when a time shift is introduced. The best results arise over forested land cover whilst agricultural zones, irrigated or not, and areas with little or no vegetation show weaker results. The analysis of the relationship between the TCI and SPI is more complex. The correlations generally

diminish with the elimination of the dry season. However, the results around meteorological stations located around agricultural or grassland areas are the strongest.

In general, satellite methods give a better characterization of drought conditions at large scale than traditional methods, which rely on interpolation of local information to obtain results over wide areas. However, their interpretation, locally or regionally, should be coupled with the interpretation of drought indicators based on an adequate meteorological network of stations. It is therefore recommended to use both methods together in order to achieve an adequate characterization of drought conditions over a territory.

Avant-Propos

Près de 9 ans se sont écoulées entre le début de cet ouvrage en septembre 1997 et son aboutissement en 2006. C'est très long direz-vous! Et je vous l'accorde.

Ces longues années ont toutefois été entrecoupées de près de 4 ans où le destin m'a amené à travailler à l'étranger, en Angleterre pour être plus précise. J'étais partie avec la ferme intention de terminer la rédaction du mémoire à temps partiel, après les heures de travail. La réalité a été très différente. Après un an et toujours aucun document terminé, j'ai renoncé, bien qu'à contre-cœur, à terminer le mémoire. Pendant ces quatre ans d'exile, mon travail, effectué en milieu universitaire, a cependant toujours été lié au domaine des sciences environnementales. Mes dernières années, passées à l'emploi de l'Université de Cranfield en Angleterre puis à l'IRDA au Québec, ont été vouées à l'apprentissage et au perfectionnement de la modélisation hydrologique ainsi qu'au transport des nutriments et pesticides. Quoique d'un point de vue différent, toutes ces années ont été dédiées à l'étude de la gestion des ressources hydriques.

Le lien étroit entre mes études en télédétection et mon travail en modélisation hydrologique, combiné à mon retour précipité au pays, m'a donné la détermination de retourner voir M. Viau et l'Université Laval afin de discuter d'un possible retour aux études afin de terminer une maîtrise dont le sujet n'a jamais cessé d'être d'actualité.

J'ai donc finalement repris le flambeau après plusieurs années d'arrêt. À temps partiel, après le travail, j'ai mis à jour la revue de littérature, retravaillé les chapitres déjà rédigés et terminé l'analyse des résultats et la conclusion afin de vous présenter le présent ouvrage. J'ose espérer que vous y trouverez ce que vous cherchez.

Bonne lecture!

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. Alain Viau qui m'a offert la possibilité d'effectuer ce travail de maîtrise. C'est grâce à ses conseils, son aide et son soutien, tant moral que financier, que j'ai pu réaliser cet ouvrage.

Merci aussi à M. Jürgen Vogt, mon codirecteur de maîtrise et superviseur de stage, pour sa patience et son aide précieuse et précise. Merci d'avoir répondu à mes milles et une questions de façon claire et nette.

Merci aux deux pour m'avoir permis d'effectuer mes études en Italie, à l'Institut des applications spatiales du Centre commun de recherche où j'ai effectuée la majeure partie des travaux.

Je tiens aussi à remercier tous mes amis sans qui mon séjour à Ispra aurait été sûrement beaucoup plus ennuyeux.

Finalement, un « gros » merci à mes parents pour m'avoir encouragé et soutenu pendant ces longues années et plus spécialement pendant ces années charnière où la distance nous a séparés. Sans eux, jamais je n'aurais pu en arriver où j'en suis. Merci mille fois.

Liste des abréviations

ACRES	Australian Centre for Remote Sensing
ARIS	Agriculture and Regional Information System
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AWC	Available Water Content
BIL	Band interleaved with line
BIP	Band interleaved per pixel
CEE	Communauté Économique Européenne
CCR	Centre commun de recherche
CMI	Crop Moisture Index
COGECA	General Confederation of Agricultural Co-operatives in the European Union
COPA	Committee of Professional Agricultural Organisations in the European Union
CRG	Centre de recherche en géomatique
CWSI	Crop Water Stress Index
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Centre allemand de recherches aérospatiales)
EF	Evaporative Fraction
ERA	Environment Related Applications Sector
ESA	European Space Agency
EOS	Earth Observing System
GEMI	Global Environment Monitoring Index
HRG	Haute resolution géométrique
HRTP	High Resolution Picture Transmission
HRVIR	Haute résolution visible et infrarouge
IAS	Institut des applications spatiales
IFOV	Instantaneous Field of View
JRC	Joint Research Centre
KBDI	Keetch Byram Drought Index
LWCI	Leaf Water Stress Index
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRNF	Ministère des ressources naturelles et faune du Québec

MSAVI	Modified SAVI
MSI	Moisture Stress Index
MVC	Maximum Value Composite
NDMC	North Dakota Mitigation Center
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	US National Oceanographic and Atmospheric Administration
NRCS	National Resources Conservation Service
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONU	Organisation des Nations Unies
OSS	Observation du Sahel sub-Sahara
PC	Personnal Computer (ordinateur personnel)
PDI	Palmer Drought Index
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PN	Pourcentage à la normale
SAI	Space Application Institute
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SDD	Stress Degree Day
SEM	Space Environment Monitor
SHARP1	Standard-family HRTP Archive Request Product
SPI	Standardized Precipitation Index
SPOT	Satellite pour l'Observation de la Terre
SWIR	Short Wave Infrared
SWSI	Surface Water Supply Index
Ta	Température de l'air
TBUS	TIROS Bulletin United States
TCI	Temperature Condition Index
TCI station	Temperature Condition Index (aux stations météorologiques)
TIFF	Tagged Image File Format
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder
TIP	TIROS Information Processor
TIROS	Television & Infrared Observation Satellite
Ts	Température de Surface

USFS	United States Forest Service
VI's	Indices de végétation
VCI	Vegetation Condition Index
VGT	Végétation (Capteur de SPOT)
VPI	Vegetation Production Index - Indice de productivité de la végétation
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (Institut flamand pour la recherche technologique)
WFAS	Wildland Fire Assessment System
WDI	Water Deficit Index

*À mon père et ma mère qui ont su croire en
moi, malgré moi.*

Table des matières

Résumé court	i
Short Abstract	ii
Résumé long	iii
Long Abstract	v
Avant-Propos	vii
Remerciements.....	viii
Liste des abréviations.....	ix
Table des matières	xii
Liste des figures	xiv
Liste des tableaux.....	xv
Chapitre I – Introduction.....	1
1.1 La problématique de la sécheresse.....	1
1.2 Les Définitions.....	2
1.3 Objectifs et cadre de l'étude	5
1.4 Limitations et avantages des données météorologiques et satellitaires	7
1.5 Section à venir	9
Chapitre II – L'Andalousie: mise en contexte	11
2.1 Historique des sécheresses.....	11
2.2 Les besoins de l'Andalousie en terme d'outils de détection, de suivi et de décision face aux sécheresses.....	13
2.3 La région d'étude	15
2.3.1 Description biogéographique et climatique de l'Andalousie.....	16
2.3.2 L'utilisation du sol	22
2.3.3 Les caractéristiques socio-économiques	23
Chapitre III – Cadre théorique de l'étude	26
3.1 Revue de littérature des outils de suivi des sécheresses	26
3.1.1 Les approches traditionnelles.....	26
3.1.1.1 Tests statistiques avec une donnée météorologique	26
3.1.1.2 Indicateurs météorologiques et hydrologiques	30
3.1.2 Les approches satellitaires	36
3.1.2.1 Les indices de végétation	36
3.1.2.2 Température de surface.....	44
3.1.3 Les approches combinées	48
3.1.4 Les approches de modélisation physique.....	51
3.2 Choix des indicateurs à l'étude	52
Chapitre IV – Données et méthodologie.....	55
A - INVENTAIRE DES DONNÉES	55
4.1 Données météorologiques	55
4.1.1 Description et sélection des données météorologiques.....	55
4.2 CORINE – Données d'utilisation du sol.....	57
4.3 Données satellitaires	58
4.3.1 Description des données satellitaires	58
4.3.2 Chaîne de pré-traitement des données satellitaires	62

4.3.2.1 Calibrage radiométrique	66
4.3.2.2 Corrections atmosphériques des bandes à ondes courtes (1 et 2)	71
4.3.2.3 Détection des nuages et masque terre/eau	72
4.3.2.4 « Chip matching » ou correspondance des points de contrôle.....	75
4.3.2.5 Corrections géométriques	77
4.3.2.6 Composition de la mosaïque.....	78
4.3.3 Sélection et acquisition des données satellitaires	80
B - PRÉPARATION ET TRAITEMENTS DES DONNÉES	81
4.4 Méthodologie	81
4.5 Calcul du SPI et du TCIstation	84
4.6 Développement des indicateurs satellitaires	84
4.6.1 Calcul du VCI	88
4.6.2 Calcul du TCI.....	89
4.6.3 Masques pour l'océan, les nuages et autres erreurs.....	90
4.6.4. Calcul de l'évolution de la série temporelle des indicateurs satellitaires	91
4.7 Facteurs limitatifs associés à la méthodologie.....	91
Chapitre V – Résultats	95
5.1 Régime pluviométrique.....	95
5.2 Relation entre le VCI, le TCI et le SPI	105
5.3 Les analyses de corrélation VCI/SPI et TCI/SPI	113
5.4 Analyses des images du VCI, TCI et SPI	147
5.5 Relation entre le TCI et le TCI station.....	152
5.6 Corrélations TCI/TCI station	156
Chapitre VI – Conclusions et analyse prospective	160
6.1 Conclusions.....	160
6.2 Limitations et recommandations.....	161
6.3 Analyse prospective	163
Bibliographie	170
Annexe 1 – Synthèse des indicateurs potentiels de sécheresse	181
Annexe 2 – Utilisation du sol en Andalousie	194
Annexe 3 – Images mensuelles VCI, TCI et SPI.....	198
Annexe 4 – Évolution du NDVI et de TS aux 11 stations météorologiques	216

Liste des figures

Figure 2.1 - Localisation de l'Andalousie en Europe	16
Figure 2.2 - L'Andalousie et ses provinces	16
Figure 2.3 - Caractéristiques géomorphologiques de l'Andalousie	17
Figure 2.4 - Températures et précipitations moyennes annuelles	18
Figure 4.1 - Les stations météorologiques andalouses disponibles et les stations retenues	55
Figure 4.2 - Le logiciel de pré-traitement des images: SPACE-II (CCR, Ispra).....	65
Figure 4.3 - Résumé de la méthodologie utilisée	83
Figure 4.4 - Chaîne de préparation des images satellitaires des indicateurs satellitaires	87
Figure 5.1 - Caractéristiques climatiques en Andalousie.....	98
Figure 5.2 - Moyenne des précipitations mensuelles totales.....	99
Figure 5.3 - Évolution temporelle des précipitations des stations A et C	101
Figure 5.4a - Évolution temporelle des précipitations des stations B	103
Figure 5.4b - Évolution temporelle des précipitations des stations B (suite).....	104
Figure 5.5 - Relation VCI, TCI et SPI des stations A et C.....	108
Figure 5.6a - Relation VCI, TCI et SPI des stations B.....	109
Figure 5.6b - Relation VCI, TCI et SPI des stations B (suite)	110
Figure 5.7 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 4515	123
Figure 5.8 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 4515.....	123
Figure 5.9 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 4524	125
Figure 5.10 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 4524.....	126
Figure 5.11 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6327	127
Figure 5.12 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6327	128
Figure 5.13 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 4258	129
Figure 5.14 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 4258.....	129
Figure 5.15 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 5402	131
Figure 5.16 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 5402.....	132
Figure 5.17 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 60972	133
Figure 5.18 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 60972.....	134
Figure 5.19 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6308	135
Figure 5.20 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6308.....	136
Figure 5.21 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 8391	137
Figure 5.22 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 8391	138
Figure 5.23 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6201	139
Figure 5.24 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6201	140
Figure 5.25 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6249	141
Figure 5.26 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6249.....	142
Figure 5.27 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6258	143
Figure 5.28 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6258	144
Figure 5.29 - Zone irriguée en Andalousie	148
Figure 5.30 - Évolution temporelle des 4 classes de VCI par type de végétation.....	149
Figure 5.31 - Évolution temporelle des 4 classes de TCI par type de végétation	150
Figure 5.32 - Relation TCI et TCI station des stations A et C	153
Figure 5.33a - Relation TCI et TCI station des stations B	155
Figure 5.33b - Relation TCI et TCI station des stations B (suite).....	156

Liste des tableaux

Tableau 3.1 - Sévérité du SPI.....	29
Tableau 4.1 - Les stations météorologiques retenues.....	56
Tableau 4.2 - Pourcentage d'utilisation du sol autour des stations (fenêtre de 11 km ²)	57
Tableau 4.3 - Les caractéristiques du capteur AVHRR de NOAA 11	59
Tableau 4.4 - Le nombre d'images satellitaires retenues par année.....	80
Tableau 5.1 - Régime pluviométrique moyen des 11 stations retenues	96
Tableau 5.2 - Nombre de paires de données utilisées dans les corrélations.....	116
Tableau 5.3 - Résultats de corrélation VCI/SPI et TCI/SPI	118
Tableau 5.3 - (suite) Résultats de corrélation VCI/SPI et TCI/SPI.....	119
Tableau 5.4 - Nombre de paire de données utilisées dans les corrélations	157
Tableau 5.5 - Résultats de corrélation TCI/TCIstation	158
Tableau 6.1 - Capteurs sélectionnés lancés après 1997	165

Chapitre I – Introduction

1.1 La problématique de la sécheresse

L'occurrence, depuis les dernières décennies, d'importantes sécheresses occupant de grands territoires sur tous les continents souligne l'importance de ce phénomène. Les pays en voie de développement tout comme les pays industrialisés en sont touchés. Alors que les effets peuvent être désastreux, voir mortels dans les pays sous-développés, les conséquences associées aux sécheresses dans les pays industrialisés sont plutôt d'ordre économique, environnemental et social.

Depuis quelques années, plusieurs études ont porté sur les changements planétaires, dont plusieurs se sont attardées aux sécheresses (Wilhite et Glantz, 1985; Kogan et Sullivan, 1993; Kogan, 1997; Park *et al.*, 2004; Jang, 2004). Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses et 1,3 milliards en sont mortes de causes directes ou indirectes (Obassi, 1994). Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Watson *et al.*, 1997). L'augmentation de la population humaine qui entraîne une pression accrue sur l'environnement y contribue grandement. Dans plusieurs régions du globe, une pratique agricole non-adaptée aux conditions environnementales et climatologiques, combinée à la surexploitation des réserves hydriques accélère le processus des sécheresses et entraînent parfois une situation irréversible, la désertification (ONU, 1997; UNCCD, 2004).

Il est donc important de se doter d'outils qui permettent de détecter et de suivre les conditions de sécheresse partout sur le globe et plus particulièrement dans certaines zones arides ou semi-arides, comme la région de la Méditerranée. Celles-ci sont sujettes aux sécheresses répétitives et ont subit dans les dernières décennies d'importantes périodes sèches.

L'Andalousie, en Espagne méridionale, est une de ces régions qui a été durement touchée vers la moitié des années 1980 (Pita Lopez, 1987), au début des années '90 (Garrido et

Gomez-Ramos, 2000; Barcelo, 1995) et plus récemment entre 2004 et 2006 (Keely, 2005; El Pais, 19 avril 2006; El Pais 28 avril 2006). C'est de cette région dont la présente étude fait l'objet.

1.2 Les Définitions

« La sécheresse est une aberration climatique temporaire et diffère de l'aridité car cette dernière est restreinte aux régions à faible régime pluviométrique et est une caractéristique permanente du climat » (NDMC, 2005).

Il n'existe aucune définition de la sécheresse qui soit unanimement acceptée. Les définitions retrouvées dans la littérature diffèrent selon la région étudiée, les besoins ou les perspectives du champ de travail dont elles proviennent. Toutes cependant trouvent leur origine dans un manque de précipitation sur une certaine période de temps. Ce manque génère une insuffisance en eau pour une activité, un groupe ou un secteur environnemental.

Selon le « National Drought Mitigation Center » des États-Unis (NDMC, 2005), deux types de définition des sécheresses existent. Le premier type, dit conceptuel, aide à mieux saisir la notion de la sécheresse.

« La sécheresse est une période de temps prolongée où un manque de précipitation provoque des dégâts sévères aux cultures et entraîne une perte de rendement » est un exemple de définition conceptuelle.

Le second type, dit opérationnel, sert à mieux cerner le début, la fin et la sévérité des sécheresses. Ces définitions qualifient généralement la condition actuelle d'une variable climatique par rapport à une condition normale historique afin de déterminer des seuils, plus ou moins arbitraires, du début, de la fin et de l'intensité d'une période de sécheresse. Selon les définitions opérationnelles, il existe quatre grands types de sécheresse: les sécheresses **météorologiques, hydrologiques, agricoles et socio-économiques**.

Les sécheresses dites **météorologiques** sont basées sur le degré d'aridité d'une période sèche par rapport à la normale (médiane ou moyenne) et sur la durée de cette période sèche.

Ces définitions doivent être considérées spécifiques à une région puisque les conditions météorologiques normales changent grandement d'une région à l'autre. Les définitions qui suivent (Wilhite et Glantz, 1985) montrent comment celles-ci sont adaptées à un cadre géographique et climatique régional.

États-Unis (1942) :	<i>« ...moins de 2,5 mm de pluie en 48 heures »</i>
Angleterre (1936) :	<i>« ...15 jours consécutifs avec moins de 0,25 mm de pluie »</i>
Libye (1964) :	<i>« ...précipitation annuelle de moins de 180 mm »</i>
Inde (1960) :	<i>« ...précipitation saisonnière actuelle ayant reçu moins de deux fois l'écart-type »</i>
Bali (1964) :	<i>« ...une période de 6 jours sans pluies »</i>

Les définitions **hydrologiques** des sécheresses sont plutôt associées aux effets des périodes de carence en précipitations pluvieuses et neigeuses sur les eaux superficielles et les réserves souterraines. La définition de Linsley *et al.* (1975) retrouvée dans l'ouvrage de Dracup *et al.* (1980) en est un exemple :

« ...période durant laquelle les débits fluviaux sont inadéquats pour fournir les utilisations en eau établies sous un système de gestion des eaux »

La fréquence et la sévérité de ces sécheresses sont souvent calculées pour la région d'un bassin versant. Même si leur origine est un déficit pluviométrique, les hydrologues sont surtout intéressés à l'effet de la carence en eau sur les systèmes hydrologiques tels que les sols, les cours d'eau et les réservoirs. Ces sécheresses sont pour la plupart décalées des sécheresses météorologiques et agricoles car les propriétés physiques des sols et des aquifères produisent un effet tampon qui freine la perte en eau des systèmes hydrologiques. Elles sont de plus influencées par l'utilisation humaine du territoire. Parce que les régions hydrographiques sont souvent interconnectées entre elles, les effets d'un déficit en eau d'une région peuvent se faire sentir dans une autre région. La construction de barrages ou une utilisation du sol en amont peuvent affecter les terres en aval. Par exemple, le Bangladesh a démontré une augmentation des pénuries en eau à la suite de changements dans l'utilisation du sol au pays et dans les pays avoisinants (NDMC, 2005).

Les sécheresses **agricoles**, quant à elles, font un rapport entre les caractéristiques des sécheresses météorologiques ou hydrologiques et les impacts sur le milieu agricole. Elles portent sur l’insuffisance des précipitations, la différence entre l’évapotranspiration réelle et potentielle, et le manque en eau des sols et des réserves hydriques (Wilhite et Glantz, 1985). Ces sécheresses dépendent grandement des conditions climatiques, des caractéristiques biologiques et phénologiques des cultures ainsi que des propriétés physiques et biologiques des sols.

Finalement, les sécheresses **socio-économiques** définissent le lien entre l’offre et la demande d’un bien économique et certains éléments des sécheresses météorologiques, hydrologiques ou agricoles. L’occurrence d’un tel type de sécheresse dépend de la variation temporelle et spatiale de l’offre et de la demande de ce bien économique. Ce bien dépend toujours des conditions climatiques et peut tout aussi bien être l’eau, une récolte ou de l’électricité. Il y a sécheresse socio-économique lorsque la demande pour un bien excède l’offre à cause d’un manque hydrique relié au climat (NDMC, 2005).

Tate et Gustard (2000) décrivent de plus deux autres types de définition des sécheresses basées sur les **eaux souterraines** et la gestion des **opérations**. Les sécheresses en eaux souterraines existent lorsque la recharge des aquifères est inférieure à la recharge annuelle moyenne sur une période de plus d’un an. Puisque peu de données concernant les aquifères sont disponibles, ce type de définition est peu utilisé. Les sécheresses dites opérationnelles quant à elles combinent les déficits pluviométriques, les développements des systèmes hydrologiques et la gestion des décisions opérationnelles. Ces sécheresses sont essentiellement une question d’infrastructure et ne découlent pas nécessairement d’événements naturels. Il y a sécheresse opérationnelle lorsque les quantités d’eau réelles ou attendues sont insuffisantes pour répondre aux activités humaines et en ce sens, cette définition ressemble grandement à la définition des sécheresses socio-économiques.

1.3 Objectifs et cadre de l'étude

En tenant compte du contexte climatique passé, présent et futur, il est important de reconnaître l'importance des sécheresses et de leurs impacts sur notre milieu. Il est donc primordial de se doter d'outils efficaces afin de détecter et de faire le suivi des conditions de sécheresse.

Il existe déjà certains outils pour qualifier les périodes sèches. Ces indicateurs sont généralement basés sur des données climatiques fournies par un réseau de stations météorologiques, comme l'Indice des précipitation standardisé (SPI) (Hayes, 1996) ou par une combinaison de données climatologiques et pédologiques comme l'Indice de sévérité des sécheresses de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965, 1968).

Les réseaux de stations météorologiques fournissent des données ponctuelles sur une période de temps donnée. Ces réseaux sont parfois peu représentatifs car trop peu de stations, souvent mal situées, les constituent (Viau *et al.*, 1994, Vogt et Vossen, 1995). De plus, l'augmentation des coûts associés au suivi des données et à l'entretien des réseaux fait en sorte qu'il est prévisible que ces derniers diminueront dans les années à venir. Il est donc important de trouver de nouvelles méthodes pour qualifier les conditions climatiques et environnementales afin de poursuivre la caractérisation et le suivi des situations de sécheresse.

L'imagerie satellitaire offre de nouvelles possibilités. Certains capteurs à bord des satellites météorologiques, comme par exemple le capteur AVHRR de NOAA, nous permettent de dériver la température de surface et certaines caractéristiques de la végétation avec une résolution spatiale de l'ordre de 1 à 4 km au nadir et en tout point du territoire. Ils ont aussi l'avantage de fournir des données journalières continues à l'échelle régionale et continentale. Certaines études, comme celles de Gutman (1990), Kogan et Sullivan (1993) et Kogan (1997), Jang (2004), Park *et al.* (2004) et Jian *et al.* (2004) ont déjà démontré la possibilité d'utiliser la télédétection à cette fin.

Le but de cette étude est d'évaluer le potentiel de l'imagerie satellitaire NOAA AVHRR pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen.

Certaines hypothèses ont été établies au préalable afin de déterminer l'orientation des travaux.

Hypothèses et objectifs :

1. Étant donné qu'un capteur satellitaire offre une image qui représente les conditions qui prévalent à la surface, il est possible d'utiliser cette information pour caractériser l'état des surfaces et en tirer des informations se rapportant à l'état de stress hydrique de ces surfaces.
2. Comme il existe un lien entre la température et les situations de sécheresse et que les résultats d'une précédente étude ont démontré le lien entre la température de l'air et la température de surface (Vogt *et al.*, 1997), il est possible d'utiliser la température de surface pour caractériser les situations de sécheresse.
3. La végétation réagit aux changements des conditions hydriques. En situation de sécheresse, le contenu en eau de la végétation diminue et la réponse spectrale de la végétation est alors différente. La réflectance dans le domaine du proche infrarouge diminue et la réflectance dans la région spectrale du rouge augmente (McVicar et Jupp, 1998). Il est donc possible de caractériser l'état de la végétation chez les plantes, et par extension les situations de stress hydrique, grâce aux indices de végétation satellitaires, comme le NDVI, le SAVI et le VCI. Il est donc possible d'utiliser ces indices pour la caractérisation des situations de sécheresse.
4. Le stress hydrique chez les plantes engendre une diminution des échanges gazeux avec l'atmosphère car les stomates des feuilles se ferment pour conserver l'humidité (Mader, 1987). La fermeture des stomates entraîne une augmentation de la température du végétal. Cette hausse de température peut être captée par les capteurs thermiques des satellites. La température de surface peut donc être utilisée pour détecter l'état de stress hydrique des plantes et donc les conditions de sécheresse.

5. La résolution spatiale du capteur NOAA AVHRR (1,1 km au nadir) permet la caractérisation et la représentation de l'ensemble du territoire de manière plus détaillée que les méthodes traditionnelles basées sur les stations météorologiques et l'interpolation spatiale des données.

À partir de ces hypothèses, l'objectif principal est de comparer les indicateurs satellitaires aux indicateurs météorologiques afin de déterminer la possibilité d'utiliser les données satellitaires en combinaison ou en remplacement aux données météorologiques. Les objectifs spécifiques sont les suivants:

- 1- Élaboration d'une méthodologie d'évaluation de l'utilisation des données satellitaires pour la caractérisation et le suivi des sécheresses.
- 2- Comparaison des outils du suivi des sécheresses obtenus par télédétection aux résultats des outils traditionnels couramment utilisés.
- 3- L'établissement et la vérification de critères de sécheresse pour les outils satellitaires retenus et pour la région à l'étude.
- 4- L'évaluation des possibilités de la télédétection pour le suivi à long terme des conditions de sécheresse.

Le site d'étude retenu est la province méridionale de l'Espagne: l'Andalousie. Cette région est sujette aux sécheresses, possède un réseau de stations météorologiques bien développé et est pourvue d'une bonne couverture de données-image.

1.4 Limitations et avantages des données météorologiques et satellitaires

Limitations :

Certaines limitations liées aux données météorologiques et aux caractéristiques du capteur satellitaire doivent être considérées dans l'élaboration de ce projet.

Une condition nécessaire au calcul de certains indicateurs de sécheresse traditionnels calculés à partir des données de stations météorologiques, est un historique de longue durée, habituellement de 30 ans. Seulement quelques stations météorologiques possèdent un tel historique. Il en résulte donc que seul un petit nombre de stations peuvent être utilisées dans le calcul de ces indicateurs de sécheresse. Si une station ayant un historique plus court est utilisée, les résultats seront alors moins représentatifs des tendances à long terme.

La représentativité spatiale des données météorologiques servant d'intrant aux indicateurs de sécheresse peut aussi être limitative. Ainsi, certaines stations, situées trop près de la côte ou en haute altitude, ne sont représentatives que localement (Viau et Paquet, 1996).

La représentativité des indicateurs des sécheresses météorologiques servant de comparaison aux indicateurs satellitaires peut aussi être mise en cause puisque les seuils pour identifier le début, la fin et l'intensité d'une sécheresse sont établis de manière plus ou moins arbitraire (NDMC, 2005). Représentent-ils vraiment une situation de sécheresse?

L'utilisation de la télédétection et plus particulièrement des données pré-traitées de NOAA AVHRR pose certaines limitations directement reliées à la méthode d'acquisition et de traitement de l'information. Il existe certaines limitations bien connues, comme l'influence de l'atmosphère sur les mesures recueillies au satellite, la présence de nuages résiduels malgré les filtres ainsi que les effets dus à la précision géométrique et à la géométrie de vue. La variation de l'émissivité des surfaces terrestres pose aussi un problème important dans le calcul des températures de surface. La différence d'émissivité dans le domaine spectral de 10,5 à 12,5 μm a un effet sur la température de brillance des bandes spectrales 4 et 5 de AVHRR et donc sur la température de surface qui en est dérivée. Des corrections, basées sur la différence d'émissivité de ces deux bandes doivent donc être mises en place dans les algorithmes (Lacaze *et al.*, 1996). De plus, la température de surface enregistrée par ce capteur sature à 47°C et toute température supérieure à cette limite n'est pas enregistrée (Vogt, 1992).

Finalement, le nombre parfois réduit d'images utilisées pour représenter une période est une limite supplémentaire à la représentativité temporelle et spatiale des images.

Avantages

Les outils de détection et de suivi des sécheresses doivent être simples et fournir rapidement de l'information. L'imagerie satellitaire et les indicateurs qui en sont dérivés rencontrent cette condition. Ces indicateurs quantifient directement les conditions qui existent en surface, que ce soit la température ou l'état de la végétation.

De plus, ces images reconstituées représentent les conditions qui prévalent en tout point du territoire au moment où les images ont été prises. En ce sens, elles peuvent être considérées plus représentatives que les valeurs associées à l'interpolation spatiale des indicateurs de sécheresse météorologiques traditionnels.

Les données satellitaires sont de plus déjà disponibles à d'autres fins météorologiques et leur utilisation n'entraîne aucun coût d'acquisition additionnel.

Plus encore, l'arrivée de nouveaux capteurs satellitaires plus performants comme SPOT VGT, EOS MODIS et MSG SEVIRI, ouvrent de nouvelles portes aux études environnementales par télédétection comme celles reliées aux sécheresses.

1.5 Section à venir

La deuxième partie de cet ouvrage fera une mise en contexte de l'Andalousie. Après un bref historique des périodes de sécheresse des dernières décennies, les besoins de ce territoire en terme d'outils de décision face aux sécheresses seront discutés.

La partie suivante présentera une revue de littérature des indicateurs potentiels pour la détection, la caractérisation et le suivi des sécheresses et justifiera le choix des indicateurs retenus pour cette étude.

La quatrième partie, divisée en deux, fera d'abord l'inventaire des données disponibles puis commentera la méthodologie utilisée ainsi que la préparation et le traitement des données.

Finalement, les résultats obtenus seront présentés dans la cinquième partie qui discutera aussi de l'évaluation de la méthode et des améliorations à apporter.

Chapitre II – L’Andalousie: mise en contexte

2.1 Historique des sécheresses

Depuis déjà des milliers d’années, les sécheresses affectent les humains. Certaines théories veulent que des migrations épisodiques aient été déclenchées par des périodes de sécheresses prolongées. L’Europe a été peuplée par des gens venant d’Asie par les Steppes du bassin de la mer Noire. Les périodes sèches auraient poussé les populations nomades des steppes sèches vers les terres avoisinantes occupées par l’agriculture et les communautés urbaines. On explique ainsi l’invasion d’Anatolia par les Hittites (3^e millénaire B.C) ou des Goths par les Huns (4^e siècle A.D.)(Kukla, 1998).

Plus récemment, l’Europe moderne a régulièrement souffert de sécheresses localisées plus ou moins sévères. Par exemple, le sud de l’Angleterre a subit, en 1991, la pire sécheresse du siècle et l’année 1992 a été une période où plusieurs pays européens, comme la France, l’Espagne, le Danemark, l’Autriche et la Grèce, ont fait face aux problèmes associés à ces périodes sèches (Greenpeace, 2004). En Europe, la période sèche de 2003 a causé pour environ 13,1 billions d’Euros de perte globale en agriculture et foresterie, dont 910 millions en Espagne (COPA-COGECA, 2003). La partie sud de l’Espagne, l’Andalousie, n’y a pas échappé. À son apogée, en 1994-1995, la sécheresse de 1990-1995 a aussi causé d’importantes pertes économiques et environnementales (Barcelo, 1995).

L’Andalousie est depuis longtemps un territoire très sec. Le développement humain et économique qui s’est intensifié au cours des derniers siècles et surtout au cours des dernières décennies a eu pour effet d’augmenter le risque et les conséquences reliés aux sécheresses.

Seulement de 1940 à aujourd’hui, 10 périodes sèches ont sévi dans cette région. Les 9 premières, recensées dans l’ouvrage de Pita Lopez (1987), sont les suivantes : 1942-46, 1948-51, 1953-55, 1956-59, 1964-65, 1966-68, 1970-71, 1973-76, 1980-86. Chacune varie en gravité selon la durée, l’intensité et l’étendue spatiale des conditions de sécheresse. Les situations les plus graves se retrouvent aux extrémités de cette séquence, soit de 1942 à

1959 et de 1973 à 1986, alors que la période s'étendant des années '60 jusqu'à la moitié des années '70 fut plus clémence.

Jusqu'à 1959, les périodes sèches ont une durée moyenne d'environ trois ans et sont généralisées à toute l'Andalousie. L'intensité y est grave. Le déficit pluviométrique total de ces sécheresses est de plus de 30 % par rapport aux moyennes annuelles des précipitations. La période 1953-55 atteint même 43 %.

Les périodes de 1964 à 1971 sont beaucoup moins alarmantes. Le territoire n'est qu'en partie touché. La durée qui est en moyenne de une ou deux années ainsi que l'intensité sont moindres que pour les autres périodes recensées. Le déficit n'atteint qu'environ 23 % par rapport à la moyenne annuelle des précipitations.

Ce sont les sécheresses des derniers 25 ans qui ont eu le plus d'impacts. Elles ont affecté tout le territoire sur une plus longue période (4 à 7 ans). L'intensité du déficit hydrique de ces sécheresses a varié autour de 45 % pour la période de 1973-76 et 80 % pour 1980-86.

La période de sécheresse de 1990-1995 en Andalousie a été une des plus désastreuses. En 1991, une diminution pluviométrique commence à se faire sentir dans les régions ouest et centre sud de l'Andalousie et l'année 1992 amorce une série de quatre années très sèches pour la majorité du territoire. De 1990 à 1993, seulement 40 % de la moyenne des précipitations est tombé (El País, 6 septembre 1993)

En août '93, après 5 ans de rares pluies, la situation des réservoirs est critique. Ceux de la péninsule ne sont qu'à 40 % de leur capacité alors que plus au Nord (Cantabriko), ils atteignent 70 %. Ce sont les réservoirs de la région du Guadalquivir qui sont les plus touchés, avec seulement 11 % des réserves normales (El País, 22 Août 1993). En novembre, malgré des pluies torrentielles localisées, les conditions de sécheresse continuent à prévaloir. La terre absorbe les premières précipitations et ne permet pas à ces eaux d'atteindre en grande quantité les aquifères et les réservoirs. Le niveau de ces derniers ne monte pas ou peu (El País, 2 novembre 1993). Les pertes du milieu agricole sont énormes: près de 66 000 millions de pesetas (714\$ millions canadiens)(El País, 5 décembre 1993).

Au début de 1994, le sud de l'Espagne commence l'année avec environ 10% des ressources hydriques normales (*El Pais*, 5 décembre 1993). En mai 94, certaines grandes villes, comme Séville font face à des problèmes de qualité d'eau potable (*El Pais*, 2 mai 1994). Cette même année, 200 000 millions de pesetas (2 163,8\$ millions canadiens) seront perdus en agriculture sur le territoire andalou (*El pais*, 29 mai 1994).

Au début de l'année 1995, des restrictions plus sévères de l'utilisation des ressources en eau sont projetées et emboîtées par cinq des huit provinces (Malaga, Granada, Jaén, Cadiz et Séville). Les heures où l'eau n'est plus disponible sont allongées (*El Pais*, 5 et 9 janvier 1995). La sécheresse prolongée force un changement des cultures dans le sud espagnol et les restrictions en eau continuent à augmenter (*El Pais*, 5 février 1995).

Ce n'est qu'en novembre 1995 que de fortes pluies tombent, mais la situation demeure toutefois critique (*El Pais*, 13, 14 novembre 1995 et 3 janvier 1996a,b). Au début de 1996, les réserves du sud commencent à augmenter et les pluies qui suivent dépassent les meilleures estimations (*El Pais*, 10, 12 et 18 janvier 1996). La sécheresse se termine.

Cette séquence grave de sécheresse n'est toutefois pas la dernière que l'Andalousie ait vécue. Encore en 2005-2006, l'Andalousie et le territoire espagnol ont été touchés par la pire sécheresse depuis 60 ans (Keeley, 2005). Alors que les précipitations du début de 2006 laissent croire une fin imminente de la sécheresse dans la région de la côte andalouse (*El Pais*, 28 avril 2006), la commission sur la sécheresse maintient les restrictions d'utilisation de l'eau pour la majorité du territoire (*El Pais*, 19 avril 2006).

2.2 Les besoins de l'Andalousie en terme d'outils de détection, de suivi et de décision face aux sécheresses

En analysant l'historique des périodes sèches andalouses, et plus particulièrement la période de 1990 à 1995, il est évident que cette région a besoin d'outils de détection, de suivi et de décision face aux sécheresses.

La population grandissante des dernières décennies, couplée à une économie agricole et touristique contribuant à augmenter la demande en ressources hydriques (De Teran *et al.*,

1988; Schouten, 2003) font ressortir le besoin de ce territoire pour des outils de suivi et de gestion des ressources en eau. La demande en eau de l'agriculture andalouse pose une forte pression sur les ressources en eau. Selon Fives (1994), la majeure partie des ressources en eau (34 à 77 %) des principaux bassins versants andalous est utilisée à des fins d'irrigation des terres agricoles et cette demande se fait sentir surtout pendant les mois très secs de juin, juillet et août. Cette période coïncide avec le pic de la saison touristique. L'industrie touristique espagnole a connu une croissance importante ces dernières années. Par exemple, la région Sud-Est de l'Espagne a vu bondir de 50 % le nombre de touristes entre 1996 et 2002 (Schouten, 2003). Cette croissance s'est traduite par une pression accrue sur une ressource de plus en plus limitée. Il est estimé que le secteur touristique du Sud-Est espagnol consommera environ 90 hm³ d'eau en 2012, soit l'équivalent d'une ville d'environ un million d'habitants (Schouten, 2003). Selon Fives (1994) les zones urbaines n'utilisent qu'entre 12 et 19 % de la demande totale alors que la demande des industries est très variable selon les bassins, allant de 2 % dans le bassin Sur à 48 %, dans le bassin Guadiana. Dans plusieurs bassins versants, la demande totale annuelle excède souvent les ressources et, selon les prédictions, cette tendance s'intensifiera.

Au fil des ans, l'Andalousie s'est dotée de barrages afin de retenir et mieux gérer ses ressources. Entre 1996 et 2008, 13 nouveaux barrages étaient prévus dans le bassin Guadiana afin d'accroître les ressources de 38 % et répondre à la demande grandissante de l'agriculture et de l'industrie hydroélectrique principalement. Toutefois, au vu des récentes sécheresses, ces mesures semblent insuffisantes. L'historique des périodes sèches andalouses, ainsi que les scénarios des changements planétaires qui prévoient une recrudescence des périodes sèches (Watson *et al.*, 1997) soulignent encore plus la nécessité de développer de nouveaux outils mieux adaptés au suivi spatio-temporel des sécheresses.

Il existe actuellement des outils basés sur des données météorologiques ponctuelles, comme l'Indice de sévérité des sécheresses de Palmer (PDSI - Palmer Drought Severity Index) (Palmer, 1965, 1968) et l'Indice de précipitation Standardisé (SPI - Standardized Precipitation Index) (Hayes, 1996). La majorité de ces outils nécessite l'utilisation d'une base de données historiques de longue durée afin de situer les conditions qui prévalent

pendant une période donnée par rapport aux situations historiques normales. Ces données ne sont toutefois pas toujours disponibles pour une longue période ou encore le sont de manière discontinue. Il est donc important d'employer de nouveaux outils qui peuvent être utilisés en association ou en complément aux données traditionnelles (météorologiques, phénologiques, pédologiques, etc.).

En ce sens, la télédétection et plus précisément l'utilisation du capteur AVHRR de NOAA, offre la possibilité de fournir une information complémentaire pour l'ensemble du territoire andalou. En offrant une couverture journalière complète à une résolution de 1,1 km, ce capteur météorologique permet de percevoir les variations des conditions de surface, comme la température et l'état de la végétation. À partir de ces données, il est possible de dériver rapidement des indicateurs des conditions de sécheresse qui sont facilement utilisables. C'est l'accessibilité et la facilité d'utilisation de ces indicateurs qui les rendent si intéressants, voir indispensables aux yeux des gens qui doivent prendre des décisions face aux situations de sécheresse.

2.3 La région d'étude

Afin de pouvoir mener à terme une étude comparative des méthodes satellitaires de la caractérisation de la sécheresse aux méthodes et approches plus traditionnelles, il est important de délimiter une zone où l'occurrence des périodes sèches est bien décrites. Cette zone doit être amplement couverte par un jeu de données terrain et d'images. La région de l'Andalousie a été choisie pour la présente étude.

L'Andalousie est la province méridionale de l'Espagne, située à la pointe de la péninsule ibérique (figure 2.1). Cette région s'étend entre 36° et 39° nord et 7°30' ouest et 1°30' est. Elle couvre une superficie d'environ 87 268 km² et comporte huit provinces (figure 2.2) : Huelva au nord-ouest, Cadiz à la pointe sud, Malaga et Granada sur la côte de la mer Méditerranée, Almérie à l'est, Jaén au nord-est, Cordoba au nord et Sevilla au centre.



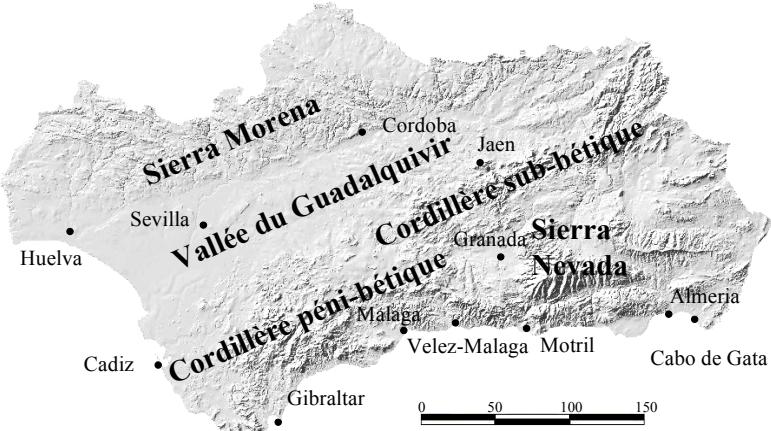
Figure 2.1 - Localisation de l'Andalousie en Europe



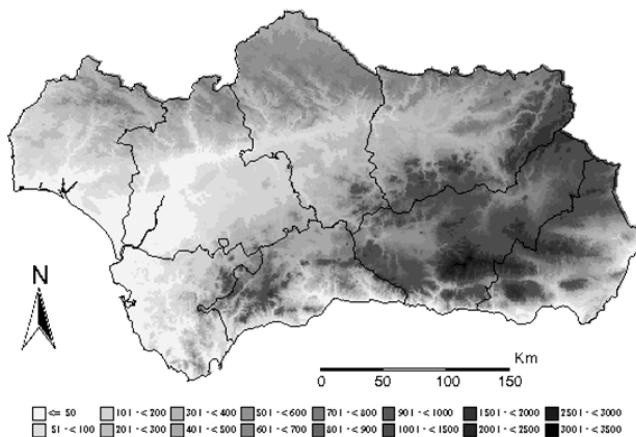
Figure 2.2 - L'Andalousie et ses provinces

2.3.1 Description biogéographique et climatique de l'Andalousie

L'Andalousie est un des territoires très hétérogènes d'Europe. Sa position, à l'embouchure de la mer Méditerranée et de l'océan Atlantique rend son climat vulnérable au courant venant de l'océan comme à ceux venant de la Méditerranée et fait en sorte que l'Andalousie ne possède que deux saisons : un hiver à caractère océanique humide et un été très sec. En hiver, alors que le front polaire est situé au sud de l'Andalousie, la rencontre des masses d'air froid et d'air chaud apporte les pluies hivernales. En été, ce front se déplace vers le nord et l'anticyclone des Açores se place à l'embouchure de la Méditerranée et bloque les mouvements d'air en provenance du Nord. Comme l'anticyclone apporte une masse d'air chaud et sec, les précipitations sont alors très rares (Bosque Maurel *et al.*, 1991).



a- Régions



b- Altimétrie

Figure 2.3 - Caractéristiques géomorphologiques de l'Andalousie

Source : Junta de Andalucía, 2004.

Le climat méditerranéen andalou est d'ailleurs généralement en situation de déficit hydrique. Ce déficit naturel freine la formation des sols. Par ses pratiques en foresterie et en agriculture, l'humain a de plus créé une rupture de l'équilibre naturel qui a mené à une balance négative de formation des sols. L'héritage des climats anciens a par contre laissé à l'Andalousie certains de ses sols riches et cette dernière possède toujours des sols de meilleure qualité que la moyenne des sols espagnols (Bosque Maurel *et al.*, 1991).

La richesse et la diversité exceptionnelles de la flore andalouse témoignent de l'hétérogénéité des conditions physiographiques, pédologiques et climatologiques existantes dans cette région. L'action combinée du climat, du type de sol, de l'hydrographie, du relief ainsi que de l'action humaine fait en sorte qu'il existe sur ce

territoire plusieurs environnements distincts (Bosque Maurel *et al.*, 1991) dont les principaux seront ici discutées.

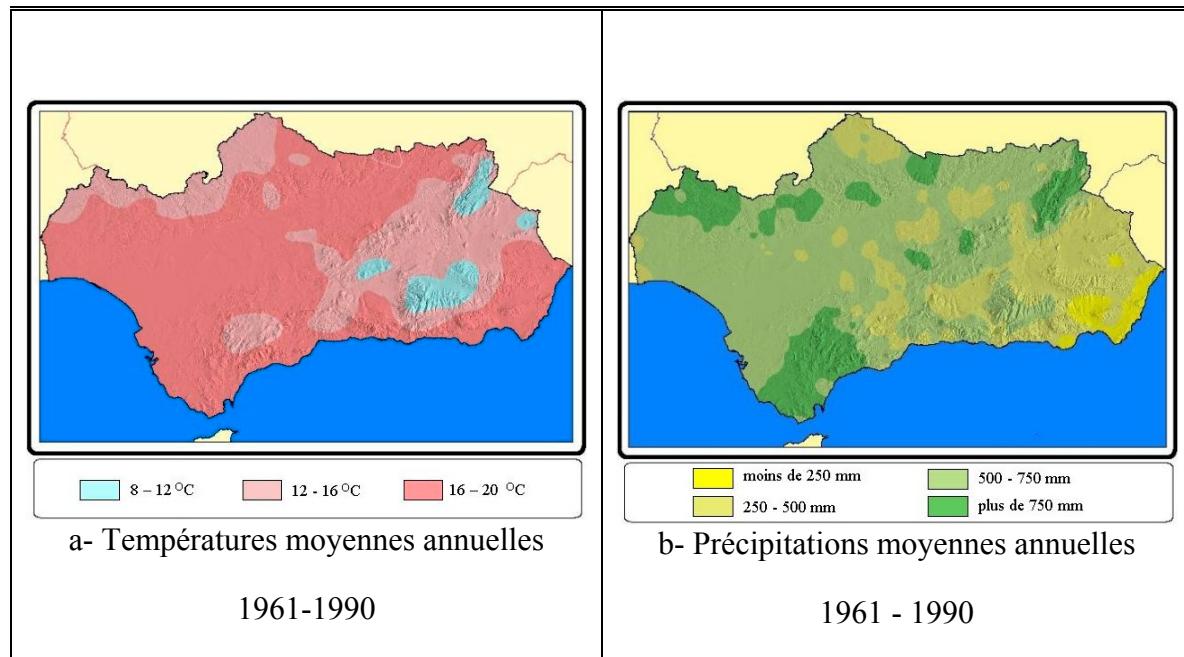


Figure 2.4 - Températures et précipitations moyennes annuelles

Source : Junta de Andalucía, 2004.

La partie du nord de l'Andalousie est formée de la Sierra Morena. (figure 2.3, planche a) Ces montagnes de moyennes altitudes (0 - 1 000 m) sont caractérisées par une topographie plus ou moins douce et relativement uniforme (figure 2.3, planche b). Les sols qui s'y développent sont généralement acides car ils sont développés sur un substrat siliceux. Ils sont peu évolués et retiennent le caractère du matériel souche car ils se forment sur les sommets, les crêtes et les pentes des encaissements fluviaux.

La Sierra Morena possède un climat méditerranéen de montagnes de moyenne altitude. C'est une région affectée par les courants d'air venant de l'Atlantique. Les précipitations y sont élevées à l'ouest (800 - 1 500 mm), où les vents de l'Atlantique délestent leur humidité, et diminuent en direction est (400 - 1 000 mm) (figure 2.4, planche b). La température moyenne, varie de 12° à 18° C selon l'altitude mais peut aussi atteindre -10° C en hiver.

On retrouve dans cette région ce qui reste des grandes chênaies qui recouvriraient autrefois l'Andalousie. Dû à l'action humaine, celles-ci sont maintenant réduites à des boisés de tailles variables, où le chêne vert (*Q. ilex*) côtoie le chêne liège (*Q. suber*), favorisé par les sols siliceux. Les zones qui restent, si elles ne sont pas utilisées à des fins agricoles, sont utilisées comme pâturages ou comme zones de reboisement.

Au sud de la Sierra Morena se trouve la vallée du Guadalquivir, principal fleuve d'Andalousie. La partie ouest de cette région fait face à l'Atlantique et est constituée d'une part de grandes plages de sable et de dunes qui font place vers l'intérieur des terres à la plaine alluviale, alimentée par les alluvions des différentes rivières de cette région. Cette plaine alluviale est séparée de la côte par une région de marécages salés dont une partie est maintenant drainée à des fins agricoles. C'est dans cette région que se retrouve le Parque Nacional de Doñana. Ce parc est une des plus importantes zones humides d'Europe et abrite un nombre et une diversité importante d'oiseaux (Andalucia.com, 2006). Ce parc a été créé en 1969 afin de freiner le drainage de certaines portions marécageuses au profit de l'agriculture (Fives, 1994). En 1982, il a été qualifié d'importance internationale par l'UNESCO (Fives, 1994). Plus près du littoral Atlantique, dans l'aire de l'embouchure du Guadalquivir, on retrouve une zone de marais avec une végétation adaptée aux conditions salines du cycle fluvio-marécal. La zone littorale, située au sud-ouest de Séville est quant à elle une zone de repeuplement de conifères et de feuillus (De la Rosa et Moreira, 1987).

Vers l'intérieur des terres, la plaine alluviale fait place aux terrasses fluviales et aux basses, puis hautes terres du Guadalquivir. Les terres du Guadalquivir sont les seules terres d'Andalousie où la pédogenèse est positive et où les sols sont en création. Ceux-ci sont en grande partie créés à partir des matériaux calcaires des hautes terres et en moindre partie de silice provenant de la Sierra Morena. Ces terres, développées sur sédiments marins et fluviaux, sont en général très fertiles et propice à l'agriculture. La végétation originale a d'ailleurs depuis longtemps fait place aux cultures. Ce sont les cultures permanentes ou non irriguées, comme l'olivier, certaines céréales et les légumineuses qui occupent la majeure partie du territoire des hautes et des basses terres du Guadalquivir. Les cultures irriguées

sont quant à elles situées plus en bordure de la rivière. On y retrouve des cultures de fruits, de produits maraîchers et de riz.

Le climat de la vallée du Guadalquivir peut être divisé en deux zones. D'une part, la région côtière est caractérisée par un climat méditerranéen océanique où les extrêmes thermiques sont adoucis par l'effet tampon de l'océan. La température annuelle moyenne de cette zone varie de 16° à 18°C et la pluviométrie y est aussi moyenne (500 - 750 mm) (figures 2.4). D'autre part, la zone intérieure des terres est caractérisée par un climat méditerranéen continental d'été très chauds. L'ouverture de cette région aux vents de l'Atlantique et du nord entraîne une grande amplitude thermique. Alors que la température moyenne annuelle est de 17° à 18° C, l'amplitude atteint 19°C. La pluviométrie est de type intermédiaire (400 - 800 mm); plus sec au centre et plus humide en bordure à cause de l'effet du relief.

La Cordillère bétique occupe une partie importante du territoire andalou. Située au sud-est de la vallée du Guadalquivir, cette région s'étire sur presque tout le territoire, d'ouest en est. Principalement formée de montagnes calcaires de moyenne altitude, la morphologie de cette région est grandement menée par les processus de calcification et de gel et la genèse des sols est ralentie par le froid et la pénurie hydrique. On y retrouve plusieurs aires de grande beauté souvent protégées. Les montagnes siliceuses des Bétiques, plus rares, sont quant à elles majoritairement situées dans la région du sud-est de la cordillère quoiqu'elles puissent être retrouvées aussi plus à l'ouest, dans la région du Campo de Gibraltar. Les régions de montagnes siliceuses de haute altitude sont généralement caractérisées par une prédominance des micas et l'absence de végétation arborescente. Ces milieux alpins offrent en général des tons très obscurs avec des peu contrastants. Les formes sont douces et la végétation est basse et rare. Faisant aussi partie de la Cordillère bétique, la dépression intra-bétique est caractérisée par sa situation en altitude moyenne et au fait que son territoire soit fermé. C'est une zone intérieure, entourée de montagnes.

Le climat et la végétation de la Cordillère bétique sont à l'image de sa topographie; changeants. On retrouve environ trois types de climats dans les montagnes Bétiques. Au sud-est, les montagnes de moyennes altitudes sont affectées par les courants d'air de la Méditerranée. Le territoire y est plus sec (600 - 1 000 mm) que celui des montagnes de

moyenne altitude de la Sierra Morena (400 - 2 000 mm) alors que les températures y sont semblables (moy. 14° à 18° C). La zone intra-bétique possède quant à elle un climat à caractère continental malgré sa proximité de la mer. Les montagnes qui l'entourent la protègent de l'effet de la Méditerranée. Cette zone est donc caractéristique des hauts plateaux arides. La température moyenne est de 12° à 13°C avec une amplitude de 20°C. Les précipitations pluvieuses sont basses (300 à 400 mm) car une partie tombe en neige. Dans ces régions les périodes de gel sont fréquentes. Les zones de hautes altitudes sont quant à elles représentées par la continuation en altitude des climats retrouvés plus bas. Ce type de climat est caractérisé par des hivers froids, de la sécheresse physiologique et de la sécheresse estivale. Ces endroits sont souvent semi-désertiques ou désertiques.

L'altitude introduit de grandes transformations dans l'environnement de la cordillère bétique et crée un étalonnage de la végétation selon l'élévation, l'orientation des pentes et le type de sol. Au bas des Bétiques, on retrouve les formations forestières avec une prédominance des associations de chênes verts (*Q. ilex*), de chênes-liège (*Q. suber*) et de pins d'Alep (*P. halepensis*). Plus haut, dans la Sierra Nevada mais sans dépasser 1 800 m, le chêne tauzin (*Q. pyrenaica*) et le chêne portugais (*Q. lusitanica*) font leur apparition. Vers 2 000 m commence le domaine des arbrisseaux en alternance avec de grandes étendues de roches nues. L'ouest de la Cordillère, ouvert à l'influence atlantique, est couvert de forêts mixtes qui commencent au haut du complexe chêne vert/chêne-liège vers 800 à 1 000 m. Ces forêts sont composées de denses populations de chênes portugais et de chênes tauzins qui se transforment en altitude en de grandes sapinières d'origine africaine (*A. pinsapo*) (De Teran *et al.*, 1988).

L'hétérogénéité climatique et morphologique de la cordillère bétique fait en sorte que les sols et les processus de pédogenèse de cette région démontrent une grande variabilité. Au sud de la Cordillère bétique, longeant la mer Méditerranée, les basses terres de la côte méditerranéenne possède un climat privilégié où les sols sont pauvres et le paysage dénudé.

Suivant un gradient thermique diminuant d'ouest en est, la végétation, typique aux sols calcaires pauvres et squelettiques de cette région (De Teran *et al.*, 1988) alterne entre palmiers nains, pins d'Alep, caroubiers, myrtes et végétation de repopulation tel que les

eucalyptus et les conifères. Les seules enclaves où la végétation est plus florissante et où les conditions sont favorables à l'agriculture et au développement humain sont les bassins fluviaux de Malaga, Vélez-Malaga et Motril. Sur la majorité du ce territoire, le couvert végétal original est en majorité remplacé par l'agriculture.

Sous ce climat méditerranéen subtropical, les températures de cette région côtière sont chaudes (moy. de 17° à 19°C) car celle-ci est protégée des effets de l'Atlantique et des vents nordiques. Les périodes de gel sont presque inexistantes. De plus, l'effet tampon de la mer évite en général les excès de température (amplitude de 13°C), sauf lorsque les vents sahariens soufflent ou que les vents du nord-ouest passent la barrière des Bétiques. Les précipitations diminuent d'ouest en est, de Gibraltar où elles atteignent 900 mm, jusqu'à Almería où elles deviennent presque nulles.

La région d'Almería est unique en Europe. Constituée de terres semi-arides et arides, ce territoire est caractérisé par une pénurie hydrique sévère mais n'exclut toutefois pas la possibilité de pluies torrentielles. Ces pluies causées par la subsidence orographique, combinées à l'aridité naturelle du milieu et à l'action humaine influencent l'équilibre biophysique, favorisent la dégradation des sols et mènent même jusqu'à la désertification. Cette région est en fait le seul désert climatique de l'Europe. Les températures y sont élevées et les précipitations rares (moins de 150 mm à Cabo de Gata). Les sols de cette région sont peu profonds et peu évolués. Ils se développent sur les matériaux détritiques des dépressions littorales ou pré-littorales et sont riches en calcium et en gypse. La végétation y est presque inexistante.

2.3.2 L'utilisation du sol

Même si l'Andalousie est une région hautement urbanisée, seulement 1,8 % de son territoire est occupé par les zones urbaines. Ce sont les espaces naturels, tels que les pâturages et les forêts de feuillus qui sont les plus répandus (45,9 %). Les cultures non irriguées suivent (36,4 %), dominées par les cultures intensives des herbacés ou les cultures d'arbres ligneux tel que l'olivier, l'amandier ou les vignes. La balance hydrique de ces deux groupes dépend grandement de l'apport en eau de pluies. Ce type de végétation est sensible

aux périodes de sécheresse et son utilisation est donc adéquate pour cette étude. Les cultures avec irrigations ne forment quant à elle que 6,7 % du territoire andalou (De la Rosa et Moreira, 1987). On y retrouve des herbacés, des plantes ligneuses, les cultures de riz ainsi que plusieurs cultures potagères. Les informations tirées de la carte de l'utilisation du sol Corine CLC90 (EEA, 2005) montrent cependant des valeurs légèrement différentes. L'importance des cultures non-irriguées semble s'être accrue (42 %), au détriment des pâturages et des forêts (35 %) (annexe 2). De plus, selon Corine, les cultures irriguées n'occuperaient plus que 4 % du territoire. Ce type d'agriculture utilise toutefois la majorité des réserves en eau des bassins hydriques andalous (Fives, 1994). Ainsi, 77 % des réserves en eau des bassins versants Guadalquivir et Sur sont utilisées à des fins d'irrigation. Comme l'irrigation peut dissimuler l'effet des baisses pluviométriques et masquer les périodes de sécheresses, il est donc avantageux de connaître les plans d'irrigation durant les périodes de sécheresse afin de mieux cerner les zones irriguées.

2.3.3 Les caractéristiques socio-économiques

Le peuple andalou, un des plus vieux peuples de la région méditerranéenne, possède une claire identité culturelle. Depuis déjà longtemps, les Andalous sont en contact avec différentes civilisations, telles que les Romains et l'Islam. La population andalouse représentait en 1981 17 % de la population espagnole et sa croissance démographique dépassait depuis 1950 celle de l'Espagne. De 1950 à 1981, une augmentation de 70 % a été recensée alors qu'elle n'était que de 60 % pour l'Espagne. C'est la disparition de certaines maladies et un haut taux de natalité qui en est responsable.

La distribution spatiale de la population andalouse peut être divisée en deux grandes zones : Guadalquivir et Royaume de Granada. Les régions du bas Guadalquivir (Cordoba et Cadiz) ainsi que certaines zones du littoral méditerranéen possèdent les aires de plus haute densité alors que la Sierra Morena et la cordillère Pénibétique sont les régions les moins denses en population. La dépression intra-bétique, la Sierra sub-bétique et le haut Guadalquivir sont des régions de densité intermédiaire.

Alors que l'immigration et l'émigration andalouse étaient avant les années 40 essentiellement restreintes à l'intérieur du territoire andalou, celles-ci se sont étendues pendant les années '40 et '50 à la grandeur du pays. On y remarque toutefois une tendance générale. Les régions du Guadalquivir et des basses Bétiques semblent attirer les gens, alors que la région du Sud-Est perd sa population. De plus, depuis les derniers 30 ans, les mouvements migratoires se sont étendus à l'extérieur du territoire andalou pour s'étendre à l'Afrique du Nord, l'Amérique hispanique ainsi que les régions de Madrid et de Cataluña, plus industrialisées.

En, 1981, 64 % des agglomérations possèdent plus de 10 000 personnes. Les provinces de Cadiz, de Malaga et de Séville sont les plus urbanisées avec plus de 75 % de leur population vivant dans les villes alors que ce taux varie de 42 % à 65 % pour Jaén, Almérie et Huelva. On retrouve une grande importance des villes de moyenne à grande ampleur (10 000 à 50 000 habitants) dans les régions de la dépression bétique alors que la cordillère est dominée par les petites villes de 1 000 à 5 000 habitants.

L'urbanisation élevée de l'Andalousie ne correspond toutefois pas à la réalité fonctionnelle. Ces villes sont de grands villages où la campagne domine car de 40 % à 60 % de la population active travaille dans le domaine agraire ou un domaine qui y est étroitement relié. Les activités primaires de l'agriculture et des pêcheries sont à la base de l'économie qui est dominée par les grandes propriétés et une agriculture commerciale. Le secteur secondaire est moins important et ne compte que pour 15 %. Quatre grands piliers le composent : les mines, la construction navale, l'industrie alimentaire, étroitement liée au secteur primaire, et la production chimique. Le secteur tertiaire est quant à lui le plus représenté. Il emploie 52 % de la population et représente environ 60 % de la production. C'est un secteur hypertrophié, sans relation avec les bases de l'économie régionale. Traditionnellement, ce secteur était représenté par le commerce et le transport qui s'harmonisaient avec les secteurs de production. Depuis 1960 toutefois, le tourisme est devenu un des éléments importants du développement andalou. Cette région est maintenant la deuxième plus touristique en Espagne, avec 13,8 % du tourisme national. Les entrées provenant de cette industrie sont les plus importantes et surpassent la somme de toutes les

exportations ensembles. Quoique le tourisme ne soit pas nouveau en Andalousie, c'est son caractère massif et violent des dernières décennies qui est nouveau. Il transforme tant le paysage que la société et crée parfois un déséquilibre régional puisqu'il affecte presque essentiellement les zones littorales.

De manière générale, l'Andalousie est sous-développée comparativement à l'Espagne. Le gain per capita est de 29 % plus bas que la moyenne nationale et 67 % de moins que la région de Madrid. Même avec le développement des dernières décennies, l'Andalousie reste dominée par les activités agraires et demeure dépendante du reste de l'Espagne et de l'étranger.

Chapitre III – Cadre théorique de l'étude

3.1 Revue de littérature des outils de suivi des sécheresses

Il existe une multitude d'outils pour caractériser l'état de notre environnement et plusieurs de ceux-ci ont été spécialement développés pour caractériser les situations de sécheresse. Comme les sécheresses sont des phénomènes complexes pour lesquels il existe plusieurs définitions (NDMC, 2005; Tate et Gustard, 2000), les outils qui peuvent être utilisés pour leur suivi sont également nombreux. Alors que certains quantifient le bilan hydrique ou énergétique de surface, d'autres font tout simplement état de la condition de la végétation. De façon optimale, ces indicateurs doivent être en mesure de détecter le début, la durée, la sévérité et la fin des périodes sèches afin d'être utilisés comme aide décisionnel auprès des autorités qui ont à effectuer des choix relativement aux sécheresses.

Les outils potentiels recensés dans la littérature et pouvant être utilisés pour le suivi des conditions de sécheresse en région méditerranéenne sont ici présentés en quatre groupes: 1) les approches traditionnelles, 2) les approches satellitaires, 3) les approches combinées (méthodes traditionnelles et satellitaires) et 4) les approches physiques. L'annexe 1 présente une synthèse de ces indicateurs, ainsi que leurs principaux avantages, désavantages et utilisations.

3.1.1 Les approches traditionnelles

Les approches traditionnelles font appel à des données directement accessibles, habituellement enregistrées aux stations météorologiques (température, vents, précipitation, etc.) ou à des données pédologiques (type de sol, contenu en eau, etc.).

3.1.1.1 Tests statistiques avec une donnée météorologique

Les plus simples de tous ces indicateurs de sécheresse sont les tests statistiques. Ceux-ci ne font appel qu'à une seule variable. Ils utilisent généralement les mesures de précipitation recueillies aux stations météorologiques pour décrire les conditions de sécheresse. Ils ont pour but de comparer les valeurs actuelles à la tendance historique. Ils sont simples, faciles

et rapides à utiliser. Ce ne sont pas formellement des indicateurs de sécheresse mais leur valeur donne une bonne indication des conditions climatiques régnant dans la région autour de la station.

Le Pourcentage à la Normale (PN) (NDMC, 1996) est sûrement le plus simple de tous. Il représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales de la période, calculée à partir d'environ 30 ans de données. Cet indicateur est appliqué à l'échelle locale ou régionale pour des périodes de temps variant de 1 mois à quelques mois, voire même une année.

$$PN = (P / Pm) * 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

où :

P Précipitation totale d'une période (mm)
Pm Précipitation moyenne historique d'une période (mm)

Une condition nécessaire à l'application de cette méthode est la normalité de la distribution des données de précipitation. En réalité, cette distribution est rarement normale pour les périodes de temps de quelques mois ou moins. La moyenne et la valeur médiane sont alors différentes et il faut alors faire un choix quant à la donnée à utiliser comme référence historique.

Le PN est un indicateur très efficace lorsqu'il est utilisé pour comparer une seule région ou une seule saison. En région hétérogène ou pour différentes saisons, il existe une grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations, son interprétation devient plus difficile. Par exemple, 10 % de 150 mm n'a pas la même signification que 10 % de 500 mm. Cette variabilité fait également en sorte qu'il est difficile de calculer la fréquence des écarts à la normale et donc de connaître la fréquence des sécheresses et de comparer les effets entre différentes régions. Cet indicateur est souvent incompris et donc parfois mal interprété.

La méthode des **Déciles de précipitation (D)** (NDMC, 1996) a été développée par Gibbs et Maher (1967) pour palier aux faiblesses du pourcentage à la normale. Cette approche permet de connaître la fréquence d'un événement. Elle divise la distribution des fréquences des événements en 10 parties représentant chacune 10 % de la distribution. Le cinquième

décile représente donc la médiane et le dixième décile le volume maximal de précipitation reçu pour une région et pour une période de temps.

C'est une méthode uniforme de classification des sécheresses qui peut être appliquée tant à l'échelle locale que continentale, sur des périodes variant du mois à une année. C'est une formule simple qui ne nécessite qu'une seule donnée, la précipitation, et qui comporte moins d'hypothèses que les méthodes plus complexes. Il est par contre nécessaire de posséder des données climatiques portant sur une longue période (minimum de 30 ans) afin de calculer les déciles de façon précise et significative. Comme pour le PN, la précision et la représentativité spatiale des déciles sont étroitement reliées à la densité du réseau de stations météorologiques utilisé.

L'Indice de précipitation standardisé (SPI - Standardized Precipitation Index) (McKee *et al.*, 1993, Hayes, 1996) est un autre indicateur statistique communément utilisé pour la caractérisation des sécheresses locales ou régionales. Basé sur un historique de précipitation de longue durée, le SPI permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période. Cette période varie généralement de 3 mois à 2 ans, selon le type de sécheresse que l'on désire suivre.

$$SPI = \frac{(P - Pm)}{\sigma p} \quad [--] \quad (3.2)$$

où :

- P Précipitation totale d'une période (mm)
- Pm Précipitation moyenne historique de la période (mm)
- σp Écart-type historique des précipitations de la période (mm)

McKee *et al.* (1993) a développé cet indicateur afin de faire ressortir l'impact de la période étudiée (ex. 1, 2, 3 mois) sur les différentes ressources en eau. Comme les réserves souterraines, les réservoirs, les dépôts neigeux ou les cours d'eau ne réagissent pas aux variations pluviométriques avec la même rapidité, la période de calcul du SPI fait ressortir l'effet de cette variation sur chacun de ces systèmes hydrologiques. À l'échelle temporelle d'une semaine, par exemple, la réponse du SPI est très variable. Une valeur négative, donc un déficit, ne représente pas pour autant une situation de sécheresse mais serait plutôt représentatif d'une situation de stress hydrique temporaire de la végétation. Des déficits

hydriques de plus longues durées (3, 6 mois, 1 an, etc.) sont par contre nécessaires pour avoir un impact sur les ressources hydriques du sol ou sur les ressources en eau de surface (sécheresse hydrologiques).

Tableau 3.1 - Sévérité du SPI

SPI	Catégorie de sécheresse
2,0 et plus	Extrêmement humide
1,50 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Humide
-0,99 à 0,99	Normal
-1,00 à -1,49	Modérément sec
-1,50 à -1,99	Sévèrement sec
-2,00 et moins	Extrêmement sec

McKee *et al.* (1993) utilisent la classification retrouvée au tableau 3.1 afin de définir l'intensité des sécheresses à l'aide du SPI. Selon l'auteur, une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque le SPI devient positif. La magnitude de la sécheresse est obtenue en additionnant toutes les valeurs du SPI d'une période sèche.

Comme pour le PN, une distribution normale des données de précipitation est nécessaire. Ceci est un des principaux problèmes puisque la distribution des précipitations pour les périodes de temps de moins d'un an n'est pas considérée normale. La distribution des probabilités des pluies doit donc être transformée en distribution normale. Cette normalisation fait en sorte que la fréquence des événements sévères et extrêmes est la même pour n'importe quelle zone ou période de temps. Ceci permet de comparer différentes régions, qui doivent néanmoins avoir un climat relativement semblable. Ainsi, un SPI de -1,25 en région aride comme au sud-est de l'Andalousie, où les précipitations annuelles sont d'environ 295 mm, représente une variation beaucoup plus faible qu'un SPI de -1,25 d'une région où les précipitations sont abondantes. Il est donc important de tenir compte du type de climat lors de l'interprétation des valeurs du SPI.

Le SPI est utilisé opérationnellement depuis 1994 au Colorado pour le suivi des conditions de sécheresse. C'est aussi un des indicateurs qui a été retenu par le NDMC (2005) qui offre des synthèses du SPI, calculées pour des périodes de un mois à un an, à une échelle spatiale variable selon les états américains. Il est aussi inclus dans la formulation du « Drought Monitor » (NDMC, 2005). Le « Drought Monitor » combine plusieurs indicateurs de sécheresse afin de fournir une information concernant l'intensité et l'étendue des sécheresses agricoles ou hydrologiques.

Il existe bien sûr d'autres indicateurs de sécheresse basés sur différentes relations statistiques. Par exemple, il est possible de normaliser les précipitations, de manière similaire à la normalisation des indicateurs satellitaires comme le NDVI (Rouse *et al.*, 1973). Ainsi, la différence entre les précipitations d'une période et les précipitations moyennes historiques de cette période est divisée par la différence maximale des précipitations historiques de cette période. Le résultat est un indicateur qui varie de 0 à 1. Cet indicateur est alors plus facilement comparable aux indicateurs satellitaires. Quiring et Papakryakkou (2003) mentionnent aussi l'**Indice de sécheresse de NOAA (NDI - NOAA Drought Index)** (Strommen et Motha, 1987) qui compare les précipitations mensuelles moyennes à la moyenne historique des huit semaines qui précédent.

Tous ces indicateurs ont cependant la faiblesse de ne tenir compte que des précipitations. Certes, la pluviométrie est le facteur le plus important dans la caractérisation des sécheresses mais d'autres facteurs climatiques (température, vent, etc.) ou pédologiques, comme le contenu en eau du sol, sont aussi importants. Les indicateurs météorologiques et hydrologiques sont des outils qui font intervenir ce genre d'information.

3.1.1.2 Indicateurs météorologiques et hydrologiques

L'**Indice de sécheresse de Keetch Byram (KBDI - Keetch Byram Drought Index)** (Keetch et Byram, 1968) est un des indicateurs météorologiques. C'est un indicateur journalier cumulatif qui décrit la quantité d'humidité manquante dans les sols. Il a été développé pour le Sud-Est américain. Il est utilisé localement pour le contrôle des incendies en milieux forestiers ou en régions naturelles où il estime le déficit cumulatif en humidité

des humus profonds et des couches supérieures du sol. C'est un indicateur dont le calcul est relativement simple et qui est basé sur la capacité en eau d'un sol de 20mm (8 pouces).

$$dQ = \frac{[203,2 - Q][0,968 \exp(0,0875T + 1,5552) - 8,3]dt * 10^{-3}}{1 + 10,88 \exp(-0,001736P)} \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

où :

- | | |
|----|---|
| dQ | Facteur de sécheresse (mm) |
| Q | Déficit en humidité du sol (mm) |
| T | Température maximale journalière ($^{\circ}\text{C}$) |
| P | Précipitation moyenne annuelle (mm) |
| dt | Temps depuis lequel le sol perd son humidité (d) |

Son calcul débute à partir d'une journée où le sol est saturé en eau. Il est donc parfois nécessaire de revoir l'historique des conditions climatiques pour trouver le dernier jour où le sol était à saturation. De plus, afin de calculer les facteurs de sécheresse du KBDI, une série temporelle des valeurs de précipitation doit être disponible pour une longue période. Plusieurs tableaux de facteurs de sécheresse sont créés en fonction de la valeur moyenne des précipitations locales. Ces facteurs, en combinaison avec les valeurs journalières de précipitation et de température forment les intrants au calcul du KBDI. Les facteurs de sécheresse du KBDI sont calculés à partir de données en mesures anglaises. Toutefois, une adaptation pour le système international est disponible dans la publication de Alexander (1990).

Même si le KBDI est relativement simple, c'est un indicateur de sécheresse qui ne se calcule que pour une période journalière et pour une région précise, puisqu'il est basé sur les moyennes de précipitations de cette même région (Keetch et Byram, 1968).

Les indicateurs de sécheresse créés par Palmer (1965, 1968) sont parmi les plus utilisés pour caractériser les sécheresses. Ces indicateurs sont basés sur les équations du bilan hydrique. En plus des données de précipitation, ils incorporent aussi certains paramètres hydrologiques, comme l'humidité des sols et l'évapotranspiration.

Appelé d'abord **Indice de sécheresse de Palmer (PDI - Palmer Drought Index)** (Palmer, 1965), cet indicateur fut modifié afin de pouvoir caractériser le début, la fin et la sévérité

des périodes de sécheresse. La version transformée est appelée **Indice de sévérité des sécheresses de Palmer (PDSI - Palmer Drought Severity Index)** (Alley, 1984).

Le PDI, tout comme le PDSI, sont des indicateurs qui mesurent la différence d'approvisionnement en humidité pour les phases sèches autant que pour les phases humides. Ils sont calculés pour des périodes hebdomadaires ou mensuelles afin de caractériser les conditions régionales. Parce que ce sont des indicateurs normalisés, il est possible de comparer différentes régions.

$$PDSI = X(i) = 0,897X(i-1) + Z(i)/3 \quad [--] \quad (3.4)$$

où :

$X_{i(i-1)}$	PDSI de la période précédente (--)
$Z(i)$	“Moisture Anomaly Index” ou Indice de l'anomalie en humidité (--)
i	Mois de l'année (--)

et

$$Z(i) = K(P - P_C) \quad [--] \quad (3.5)$$

où :

K Facteur de poids (voir Alley, 1984) (--)

P Précipitation actuelle (mm)

P_C Précipitation CAFEC (mm)

$$P_C = \alpha_j PE + \beta_j PR + \gamma_j PRO - \delta_j PL \quad [\text{mm}] \quad (3.6)$$

où :

CAFEC “Climatically Appropriate for Existing Conditions” ou approprié pour les conditions climatiques existantes

$\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ et δ_j Coefficients climatiques mensuels

j Mois de l'année (--)

PE Évapotranspiration potentielle (mm)

PR Recharge du sol potentielle (mm)

PRO Ruissellement potentiel (mm)

PL Perte potentielle dans le sol (mm)

Le PDSI utilise, en plus des précipitations et de la température de l'air, l'humidité contenu dans le sol. Il ne tient toutefois pas compte des ressources hydrologiques de surface pouvant influencer les conditions de sécheresse, comme les cours d'eau, les réservoirs, la couverture neigeuse ou le gel du sol. Il ne tient pas compte non plus des changements pouvant survenir dans l'utilisation des ressources en eau.

Le PDSI est un indicateur basé sur les équations du bilan hydrique. Il n'existe toutefois aucune méthode acceptée à l'unanimité pour le calcul de l'évapotranspiration et c'est la

méthode de Thornthwaite (1948) qui est ici utilisée. Cette méthode, quoique largement répandue, utilise une simplification des équations du bilan hydrique et une approximation de l'évapotranspiration réelle (Alley, 1984) et ne représente donc pas nécessairement très bien la région étudiée.

Le PDSI est aussi fortement influencé par la capacité de rétention utile du sol. Le modèle de Thornthwaite suppose cependant que la capacité de rétention utile du sol est la même pour une région, indépendamment du type de sol, de la saison ou du couvert végétal. En réalité, cette valeur varie grandement en milieu agricole. Pour cette raison, il est parfois difficile de comparer le PDSI pour différentes zones climatiques.

Le PDSI est un indicateur dit de seuil (Alley, 1984), c'est-à-dire qu'il suppose qu'il n'y a pas de transport de l'eau dans le sol jusqu'à ce que la capacité en eau du sol soit atteinte, alors qu'en réalité un écoulement de surface peut se produire avant que la saturation du sol ne soit atteinte. Rushton et Ward (1979) ont trouvé que les bilans hydriques mensuels des indicateurs de seuil mènent à des valeurs 25 % plus basses que les bilans hydriques journaliers et que ces indicateurs tendent à sous-estimer la recharge durant l'été et tôt l'automne (Alley, 1984). Ceci souligne l'inconsistance d'utiliser les mêmes paramètres pour les périodes hebdomadaires et mensuelles.

Cet indicateur ignore aussi le temps de propagation de l'eau dans le sol. Il en résulte donc une surestimation de l'approvisionnement en eau du sol, ce qui introduit un biais dans l'estimation des conditions de sécheresse. De plus, les valeurs représentant le début, la fin et l'intensité d'une période de sécheresse sont arbitrairement choisies.

Même s'il est grandement utilisé sur le territoire nord-américain, le PDSI ne tient toutefois pas compte des conditions hivernales qui peuvent fortement influencer le bilan hydrique. Il donne, malgré tout, une information utile pour la caractérisation des situations de sécheresse. Dû à sa sensibilité à l'humidité des sols, il est amplement utilisé en agriculture mais aussi pour la surveillance des conditions de sécheresse. C'est un outil de décision qui s'est avéré utile puisqu'il place un événement dans un contexte historique (Alley, 1984).

Créé pour surveiller les conditions hydriques hebdomadaires des cultures à l'échelle régionale, l'**Indice d'humidité disponible pour les cultures (CMI - Crop Moisture Index)** est un indicateur météorologique (Palmer, 1968) qui donne le statut de l'humidité disponible par rapport à la demande en humidité. Développé à partir des procédures du PDSI, cet indice définit les sécheresses en fonction de la magnitude et du déficit en évapotranspiration.

$$CMI = EAI + WI \quad [--] (3.7)$$

où :

(WI) « Wetness Index » :

Recharge du sol (Précipitation) combinée au ruissellement (mm)

(EAI) « Evapotranspiration Anomaly Index » :

$$EAI = 0,67Y_{i-1} + 1,8 \frac{ET - ETc}{\sqrt{\alpha}} \quad [--] (3.8)$$

où :

Y_{i-1} CMI de la semaine précédente (--)

ET Évapotranspiration (mm)

ETc Évapotranspiration attendue pour les conditions qui prévalent (mm)

α Coefficient d'évapotranspiration (évapotranspiration réelle/évapotranspiration potentielle) (--)

Il utilise la température moyenne et les précipitations totales hebdomadaires comme intrants, en plus de la valeur du CMI de la semaine précédente pour évaluer les conditions agricoles. Le cumul des CMI des semaines précédentes engendre donc une erreur cumulative dans le calcul du CMI de la semaine.

Le CMI est un indicateur normalisé qui donne un poids par endroit et par période et permet donc de comparer différentes régions. Par contre, il varie rapidement avec un changement des conditions. Il évalue donc les conditions d'humidité à court terme et n'est pas un outil adapté pour la surveillance des conditions de sécheresse à long terme. De plus, comme le CMI est un indicateur développé pour l'agriculture et que la végétation agricole est absente à certaines périodes de l'année, il est difficile d'appliquer le CMI en dehors de la saison des cultures (NDMC, 1996).

Un autre indicateur intéressant pour la caractérisation de la sécheresse est le l'**Indice des réserves en eau de surface (SWSI - Surface Water Supply Index)**. Cet indicateur

hydrologique, créé par Shafer et Dezman (1982), est un complément au PDSI qui incorpore des éléments d'hydrologie et de climatologie.

$$SWSI = \frac{[(a * PN_{sp}) + (b * PN_{pcp}) + (c * PN_{rs}) - 50]}{12} \quad [--] (3.9)$$

où :

a, b, c sont les poids associés à chaque composante
et $a+b+c=1$

sp Couverture neigeuse équivalente en eau (mm)

pcp Précipitation (mm)

rs Réservoir (mm)

PN Probabilité de ne pas excéder (%)

Tout comme le PDSI, le SWSI est un indicateur normalisé qui permet de comparer différentes régions, généralement pour des périodes mensuelles. C'est un indicateur des conditions hydriques spécialement développé pour les régions où la fonte des neiges est la principale source d'écoulement des eaux superficielles. Il incorpore la couverture neigeuse, les précipitations en montagne, les cours d'eau, le contenu des réservoirs en plus du contenu en eau du sol. Il ne tient toutefois pas compte des écoulements dus à la fonte d'une accumulation antérieure de neige. C'est un indicateur des conditions de surface calibré pour une région homogène et il n'est pas conçu pour de grandes variations topographiques.

Le SWSI est simple à calculer et donne une mesure de l'approvisionnement en eau superficielle. Par contre, un réarrangement des stations amène à refaire les distributions de fréquence de chaque station et un changement dans l'exploitation du bassin signifie le développement d'un nouvel algorithme. Il est donc difficile de maintenir une série temporelle de cet index.

Sans être un indicateur de sécheresse comme tel, il est important de mentionner la **Capacité de rétention utile du sol (AWC - Available Water Capacity)** (Florida Agricultural Information Retrieval System, 1998). Le AWC est le contenu en eau disponible pour la végétation dans un sol. Cette variable fait partie des intrants aux indicateurs de Palmer. Elle est calculée en fonction de l'épaisseur de la zone des racines des plantes, de la capacité du sol à emmagasiner l'eau, de la densité du sol ainsi qu'au moment où le flétrissement des plantes est irréversible. La capacité du sol à emmagasiner l'eau est dans la plupart des cas

supposée constante pour l'année et pour une grande zone quoique ce ne soit pas le cas. Elle est habituellement mesurée sur le terrain mais il est aussi possible de l'estimer à partir de mesures faites en laboratoire sur des échantillons de sol. Elle reste toutefois difficile à définir, car elle dépend grandement de la texture, de la structure et des caractéristiques de drainage du sol. Sa représentation spatiale est donc problématique et implique une bonne connaissance du sol à priori (Florida Agricultural Information Retrieval System, 1998).

$$AWC = \frac{T * (RC - PWP) * BD}{DW * 100} \quad [\text{cm}] \quad (3.10)$$

où :

T	Épaisseur de la zone des racines (cm)
BD	Densité volumétrique (g/cm^3)
FC	Capacité au champ du sol (% par poids)
PWP	Point de flétrissement permanent (% par poids)
DW	Densité de l'eau (g/cm^3)

3.1.2 Les approches satellitaires

Les méthodes satellitaires utilisent des données mesurées à partir de capteurs éloignés de la surface pour laquelle ils mesurent l'information. Ces capteurs peuvent être montés sur des avions ou à bord de satellite. Les satellites imageurs, comme NOAA AVHRR, SPOT VGT, Landsat TM ou les plus récents capteurs comme MODIS ou MERIS, sont très utiles pour la caractérisation à grande échelle de l'état des surfaces terrestres, particulièrement celles couvertes de végétation. Ces capteurs perçoivent les longueurs d'ondes réfléchies ou émises par les surfaces terrestres.

3.1.2.1 Les indices de végétation

La végétation verte possède une signature spectrale distincte. En condition favorable, la chlorophylle présente dans la végétation verte absorbe la portion rouge (R) du spectre électromagnétique. Cependant, dans la portion du proche-infrarouge (NIR), les ondes sont fortement diffusées par la structure spongieuse du mésophylle des feuilles. Il s'ensuit un fort retour du NIR vers le capteur satellitaire (McVicar et Jupp, 1998; McVicar et Bierwirth, 2001). En situation de stress hydrique, le retour du NIR vers le capteur est plus faible alors que la réflectance du R est plus élevée. La différence NIR-R est donc plus faible en périodes de sécheresse.

La différence de réflectance entre ces deux portions du spectre électromagnétique a été exploitée depuis plusieurs décennies afin de caractériser la végétation (Huete, 1988; Pinty et Verstraete, 1992, Qi *et al.*, 1994). Différentes combinaisons des ces deux bandes spectrales ont été utilisées afin de développer plusieurs indices de végétation. Dans une revue des indices de végétation effectuée en 1995, Bannari *et al.* ont recensé environ 35 indices de végétation différents. Ces indices tentent de percevoir les changements de réflectance du couvert végétal, causés par un déficit ou un surplus hydrique ou encore une maladie. L'avantage des indices de végétation se situe au niveau de la facilité des calculs. Ils offrent un outil de comparaison rapide et efficace de l'état de la végétation pour une aire et non en un point du territoire. Leur application est possible de manière instantanée jusqu'à une échelle temporelle annuelle, et de manière régionale ou continentale. Comme la végétation possède une réponse anisotropique, les indices de végétation sont tous influencés à différents degrés par l'angle d'illumination et l'angle de vue. Ils sont aussi influencés par les changements de la couleur du sol ainsi que par les changements du signal au satellite causés par les composantes atmosphériques (McVicar et Jupp, 1998)

Les combinaisons les plus communes sont certainement le ratio simple de l'infrarouge sur le rouge (NIR/R) (Pearson et Miller, 1972, cité par Bannari *et al.*, 1995) et le NDVI. **L'Indice de végétation normalisé (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index),** proposé pour la première fois par Rouse *et al.* en 1973 (Bannari *et al.*, 1995) est un des indices de végétation bien connus et très utilisés. Comme les autres indices de végétation, le NDVI est sensible à la présence de végétation verte. C'est un outil efficace pour la surveillance des cultures (Vogt, 1995) mais aussi pour la surveillance des précipitations et des sécheresses (Kogan, 1990; Unganai et Kogan, 1998; Viau *et al.*, 2000; McVicar et Bierwirth, 2001; Boyd *et al.*, 2002).

$$NDVI = \frac{PIR - Rouge}{PIR + Rouge} \quad [-] (3.11)$$

où :

PIR Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge (%)
 Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

Comme cet indice est normalisé, les effets de l'angle d'illumination et de l'angle de vue sont réduits. La normalisation permet aussi de diminuer l'effet de la dégradation de la calibration des capteurs et de minimiser l'effet de la topographie (Bannari *et al.*, 1995).

Le NDVI calculé à partir des données du capteur NOAA-AVHRR est dépendant des caractéristiques de ce satellite. Le grand angle de vue du capteur AVHRR (55,4 degrés) influence considérablement la dimension des pixels (1,1 km à 6,5 km) et donc la quantité et l'homogénéité de l'information perçue. Même s'il est normalisé, cet indice reste sensible à la géométrie de vue et d'illumination, plus spécialement dans les régions où la densité de végétation est faible et où la présence de sol est importante (Bannari *et al.*, 1995). Le NDVI souffre aussi d'une rapide saturation en milieu de végétation dense et la contribution du sol en région de faible densité de végétation rend son interprétation douteuse. Son interprétation peut donc être biaisée dans les régions arides ou sujettes aux sécheresses (Vogt, 1992).

Le NDVI n'en demeure pas moins un indice efficace pour identifier les zones de stress hydrique, plus spécialement dans les milieux homogènes comme en agriculture. Dans les régions hétérogènes où les ressources varient grandement sur de courtes distances, son interprétation devient plus difficile (Kogan, 1990).

Afin de minimiser l'effet du sol ou de l'atmosphère, plusieurs indices ont été créés par la suite. Entre autres, on retrouve **L'Indice de végétation ajusté pour les sols (SAVI - Soil Adjusted Vegetation Index)** (Huete, 1988).

$$SAVI = \frac{(PIR - Rouge) * 1,5}{PIR + Rouge + 0,5} \quad [-] \quad (3.12)$$

où :

PIR Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge (%)
 Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

Cet indice incorpore un ajustement pour le signal vu au satellite en provenance du sol. Comme démontré par Huete (1988), une valeur de 0,5 pour l'ajustement permet une correction optimale de la rétrodiffusion du sol à travers le couvert végétal. En réalité, cet ajustement n'est pas constant mais inversement proportionnel à la densité du couvert

végétal et l'ajustement de l'effet du sol devrait être adapté pour la région étudiée (Rondeaux *et al.*, 1996). Cet indice demeure tout de même affecté par la présence de sol nu et est plus sensible à la végétation sénescante que le NDVI.

Le **SAVI modifié (MSAVI - Modified SAVI)** fut ensuite proposé par Qi *et al.* (1994). Il a été créé afin de minimiser l'effet des sols nus. C'est un indice qui possède une plus grande portée et qui minimise l'influence du sol. Il est plus sensible à la présence de végétation verte que le SAVI et autres indices de végétation (Qi *et al.*, 1994).

$$MSAVI = \frac{2PIR + 1 - \sqrt{(2PIR + 1)^2 - 8(PIR - Rouge)}}{2} \quad [-] \quad (3.13)$$

où :

PIR Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge (%)
Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

Par contre, en région de forte densité de végétation, cet indice souffre parfois de saturation et son application à ces régions est donc limitée (Qi *et al.*, 1994).

Pinty et Verstraete (1992) ont aussi proposé un indice non-linéaire, le GEMI (Global Environmental Monitoring Index - Indice global du suivi environnemental) qui vise à réduire la dispersion et l'absorption par les aérosols et la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Pour les mêmes raisons, Kaufman et Tanré (1992) ont quant à eux proposé l'ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index - Indice de végétation résistant à l'atmosphère).

L'Indice de la condition de la végétation (VCI - Vegetation Condition Index) est un autre indice qui mesure le degré de végétation verte. Utilisant comme intrants les valeurs minimales, maximales et courantes du NDVI de plusieurs années, le VCI est une transformation de ce dernier.

$$VCI = \frac{100(NDVI - NDVI_{\min})}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad [-] \quad (3.14)$$

où:

NDVI	NDVI de la période étudié (--)
NDVI _{min}	NDVI minimum de la période étudié (--)
NDVI _{max}	NDVI maximum de la période étudié (--)

Le VCI tente de séparer le signal climatique à court terme du signal écologique à long terme (Kogan et Sullivan, 1993). Il reflète donc la distribution climatique et non les différences de végétation dues aux différents écosystèmes. En ce sens, il est un meilleur indicateur de la distribution des précipitations que le NDVI (Kogan, 1990). Il permet aussi de comparer l'effet du climat sur des aires d'études différentes. Le VCI apporte donc une amélioration dans l'analyse de la condition de la végétation pour des aires non homogènes (Kogan, 1990). D'abord créé pour suivre les conditions de sécheresse du Mid-Ouest américain, le VCI a été utilisé sur plusieurs continents afin de détecter les situations de sécheresses à grande échelle, mais aussi les conditions d'humidité excessive (Kogan, 1997; Singh *et al.*, 2003; Kogan *et al.*, 2004). Ainsi, plusieurs équipes ont exploité le VCI pour suivre les conditions de sécheresse en Afrique du Sud (Unganai et Kogan, 1998), en Inde (Singh *et al.*, 2003) et en Grèce (Domenikatos *et al.*, 2004). Kogan *et al.* (2004) ont aussi utilisé le VCI pour dériver la biomasse des pâturages de Mongolie ou encore le rendement des cultures de maïs en Chine (Kogan *et al.*, 2004; Kogan *et al.*, 2005).

Le VCI, tout comme les autres indices de végétation satellitaires comporte les mêmes limitations associées à la méthode d'acquisition des données. De plus, l'application du VCI est fortement liée au nombre d'images disponibles ainsi qu'à la qualité de ces images. Comme cet indicateur utilise des images composées, il est important de considérer les jours d'acquisition associés à chaque pixel puisque l'angle de vue et l'angle d'illumination peuvent varier grandement d'un pixel à l'autre.

De plus, le VCI suppose que l'écart entre le NDVI maximal et le NDVI minimal représente la variation maximale possible pour une période donnée et que toutes les valeurs de NDVI à l'intérieur de cet écart possèdent la même fréquence. Cette hypothèse est probablement irréelle et pour y remédier, Sannier *et al.* (1998) ont proposé l'**Indice de productivité de la végétation (VPI - Vegetation Productivity Index)**.

Le VPI estime la distribution statistique du NDVI de manière empirique à partir des données disponibles. D'abord, l'aire d'étude est stratifiée en zones homogènes de NDVI. Cette étape requiert une connaissance de la distribution de la végétation qui peut être

obtenue à partir d'une carte de végétation ou à partir de la classification d'une image satellitaire comme celles de Landsat ou de SPOT. La classification de l'aire d'étude permet la création d'un profil du NDVI représentatif de chaque type de végétation. La distribution des probabilités du NDVI est ensuite calculée pour chaque période d'étude et chaque classe de végétation en utilisant la méthode des probabilité d'un évènement hydrologique extrême (Linsley *et al.*, 1975). Une équation polynomiale des moindres carrés est utilisée afin d'interpoler des estimés de NDVI pour chaque probabilité. Ces valeurs de NDVI peuvent ensuite être divisées en 5 classes. Un VPI bas indique une probabilité basse de retour d'un événement, donc une situation anormalement sèche. Le VPI a été utilisé principalement sur le continent africain où il a servi à surveiller la végétation en Afrique du Sud (Sannier *et al.*, 1998), suivre l'état de sécheresse et d'humidité de la végétation au Kenya (Tanaka *et al.*, 2000) et prédire la biomasse végétale en Namibie (Sannier *et al.*, 2002)

Avec le VPI, chaque type de végétation possède une distribution différente et doit donc être interprété séparément. De plus, dans les régions hautement hétérogènes comme l'Andalousie, cette méthode est difficilement applicable car le nombre élevé de classe de végétation rend les calculs des distributions statistiques du NDVI lourds.

D'autres indices de végétation estiment le contenu en eau de la végétation, qui caractérise l'état santé du feuillage, à l'aide des ondes de l'infrarouge moyen (SWIR), comprises entre 1,2 et 2,5 µm. Dans cette partie du spectre électromagnétique, l'eau et la structure spongieuse du mésophylle des feuilles diffusent les ondes et le retour du signal vers le capteur est fort. La différence entre la réflectance du SWIR et du NIR peut, de la même manière que pour le R et le NIR, être utilisée pour caractériser la végétation. Quoique les premiers indices de végétation exploitant ces deux bandes existent depuis longtemps (Hunt *et al.*, 1987; Hunt et Rock, 1989), ces indicateurs n'ont reçu que peu d'attention jusqu'à récemment. Une raison pour cette impopularité est probablement la faible fréquence de passage de Lansat TM, le premier capteur à comporter une bande spectrale SWIR.

Un des premiers indices utilisant ces deux bandes spectrales est sûrement l'**Indice du contenu en eau des feuilles (LWCI - Leaf Water Content Index)**. Utilisant les bandes 4 et 5 de Lansat TM, le LWCI estime, comme son nom l'indique, le contenu relatif en eau des

feuilles ou d'un couvert végétal, de manière journalière ou hebdomadaire. En combinant le proche infrarouge (TM4) et l'infrarouge moyen (TM5), le LWCI tente de détecter le stress en eau causé par les conditions de sécheresse.

$$LWCI = \frac{-\log[1 - (TM_4 - TM_5)]}{-\log[1 - (TM_{ft} - TM_{ft})]} \quad [-] \quad (3.15)$$

où :

- TM4 Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge de Landsat TM (%)
- TM5 Réflectance de la région spectrale de l'infrarouge moyen (SWIR) de Landsat TM (%).
- ft Pleine turgescence

Introduit par Hunt *et al.* (1987), le LWCI a été testé uniquement en laboratoire et ne semble pas être applicable sur le terrain selon ceux-ci.

Utilisant aussi TM4 et TM5, l'**Indice de stress en humidité (MSI - Moisture Stress Index)** est un simple ratio de l'infrarouge moyen (SWIR) sur le proche infrarouge (Hunt et Rock, 1989). Cet indicateur est hautement corrélé au contenu en eau de la végétation et des sols et donc aux conditions de sécheresse. Le MSI est aussi fortement lié au NDVI (Hunt et al, 1987).

$$MSI = TM_5 / TM_4 \quad [-] \quad (3.16)$$

où :

- TM4 Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge de Landsat TM (%)
- TM5 Réflectance de la région spectrale de l'infrarouge moyen (SWIR) de Landsat TM (%).

Il est par contre peu sensible au changement hydrique. Un couvert végétal pleinement hydraté doit perdre 50% de son contenu relatif en eau pour que le MSI détecte cette différence.

Avec l'avènement de nouveaux capteurs comportant la bande SWIR, comme Landsat ETM+ (1999), SPOT HRVIR, HRG et VGT (1998, 2002 et 1998), MODIS sur Terra et Aqua (1999, 2002) (MRNF, 2005; ACRES, 2006), de nouveaux indicateurs ont vu le jour.

En 1996, Gao proposait l'**Indice normalisé de différence en eau (NDWI - Normalized Water Difference Index)** pour la détection de l'eau contenue dans la végétation. Hardisky

avait déjà proposé en 1983 un indice similaire appelé Indice normalisé de la différence d'infrarouge (NDII- Normalized Difference Infrared Index) pour Landsat TM (Jackson *et al.*, 2004).

$$NDWI = \frac{R_{NIR} - R_{SWIR}}{R_{NIR} + R_{SWIR}} \quad [--] \quad (3.17)$$

où :

R_{NIR}	Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge (%)
R_{SWIR}	Réflectance de la région spectrale de l'infrarouge moyen (SWIR) (%)

Ceccato *et al.* (2002a,b) ont aussi ensuite développé et testé un indice similaire à partir des bandes spectrales de SPOT VGT. Les auteurs ont conclu que la bande SWIR était critique afin d'estimer le contenu en eau de la végétation et que le proche-infrarouge était nécessaire afin de rendre compte des variations de la structure interne des feuilles et du contenu en matière sèche. Selon Jackson *et al.* (2004), Seccato *et al.* (2002a,b) et plusieurs autres auteurs ont conclu que les indices impliquant les bandes SWIR et NIR sont sensibles à la masse volumique de l'eau dans la végétation mais pas à au contenu relatif (pourcentage) d'eau dans la végétation. Cependant, contrairement au NDVI, cet indice ne sature pas, lorsque l'indice de surface foliaire (LAI) atteint un niveau intermédiaire.

L'état de la végétation et sa productivité peuvent aussi être caractérisés par la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif (FPAR - Fraction of Photosynthetically Active Radiation). Cet indicateur illustre la fraction de l'énergie solaire (400 - 700 nm) absorbée par les feuilles vertes. C'est un indicateur qui est reconnu comme un des paramètres de surface fondamental pour les études environnementales qui peut aussi être utilisé comme estimation quantitative des facteurs principaux qui contrôlent la productivité de la végétation (JRC, 2005). Pour cette raison, le FPAR est un produit calculé mensuellement ou annuellement et distribué pour plusieurs pays, dont le Canada (NRC, 2006a) et Les pays européens (JRC, 2005). Comme les sécheresses ont un impact sur la vigueur de la végétation, il est possible d'utiliser le FPAR pour détecter les changements de l'état de la végétation. Entre autre, Gobron *et al.* (2005) ont utilisé les données du capteur MERIS pour évaluer l'état de la végétation à l'aide du FPAR suite à la sécheresse qui a sévi en Europe en 2003.

3.1.2.2 Température de surface

La température de l'air est un paramètre météorologique important dans plusieurs domaines environnementaux tel que la climatologie et l'agrométéorologie où elle sert entre autre à estimer l'évapotranspiration. La connaissance de sa distribution dans le temps et dans l'espace est par contre difficile à obtenir de manière précise avec la méthode présentement utilisée; l'interpolation spatiale.

Une possibilité pour contourner ce problème est l'utilisation de données satellitaires pour extraire une température apparente à la surface. Cette température reflète les conditions qui prévalent à la surface, en tout point du territoire. Il existe une forte relation entre la température maximale de l'air et la température de surface perçue au capteur. L'étude de Vogt *et al.* (1997) a démontré qu'en Andalousie, dans 80 % des cas, la température de l'air peut être calculée à partir de la température de surface avec une précision de plus ou moins 2 K. Cette température pourrait être substituée à la température de l'air dans certains modèles.

L'énergie solaire reçue à la surface est divisée en trois composantes: le flux de chaleur dans le sol, le flux de chaleur sensible dans l'atmosphère et le flux de chaleur latente qui est utilisé pour l'évapotranspiration. Lorsque la demande en eau des plantes est plus grande que l'eau disponible pour les plantes, un stress hydrique se produit. Afin de conserver l'humidité, les stomates de feuilles ferment afin de minimiser les pertes par transpiration. Comme le bilan énergétique doit demeurer équilibré, une partie de l'énergie qui est normalement utilisée pour l'évapotranspiration est alors répartie entre le flux de chaleur dans le sol et le flux de chaleur sensible dans l'atmosphère. Il y a alors une hausse de la température apparente du couvert végétal (Crago, 1996; Mader, 1987; McVicar et Jupp, 1998). Le flux de chaleur sensible qui est capté par le satellite est donc plus élevé en situation de stress hydrique et peut être utilisé pour détecter l'état de stress hydrique des plantes et donc les conditions de sécheresse.

Il existe plusieurs méthodes de calcul de la **température de surface (Ts)** (Vogt, 1996; Jang *et al.*, 2004a). Une d'entre elle fait appel à l'utilisation d'une seule bande thermique afin de calculer la température de surface. Un modèle de transfert radiatif et une connaissance de

l'état atmosphérique au moment de l'acquisition de l'image sont nécessaires. Ces données sont indispensables afin de corriger l'absorption et l'émission de l'atmosphère. Cette information, toujours difficile à obtenir, est pour le moment obtenue à l'aide de sondes atmosphériques.

Une seconde méthode est basée sur la différence d'absorption atmosphérique due à une différence de longueur du trajet optique lorsqu'un objet vu à deux ou plusieurs angles différents. Il est malheureusement difficile avec la technologie présente d'obtenir une vue simultanée à différents angles d'un même objet.

Finalement, la méthode la plus utilisée est appelée « Split Window ». Elle est basée sur la différence d'absorption entre deux bandes voisines dans le domaine infrarouge compris entre 8 et 14 μm . Cette méthode donne lieu à deux équations. Comme le nombre d'inconnu (émissivité spectrale et absorption atmosphérique) est égal au nombre d'équation, il est nécessaire de supposer certaines hypothèses, comme la linéarité de l'équation de Planck, l'égalité de l'amplitude des températures incluses, l'invariabilité spatiale de l'émission des surfaces et la faible absorption de la vapeur d'eau. Plusieurs algorithmes de ce type ont été développés, dont ceux de Price (1983,1984), Becker et Li (1990a), Prata (1993, 1994) et Coll *et al.* (1994). L'algorithme ci-dessous, de Coll *et al.*, (1994), est un exemple de la méthode « Split Window ».

$$T_S = T_4 + A(T_4 - T_5) + B \quad [\text{K}] \quad (3.18)$$

où :

T_4 et T_5 sont les températures de brillance des canaux 4 et 5 (K)

$$A = 1.0 + 0.58(T_4 - T_5) \quad (\text{--})$$

$$B = 0,51 + 40(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon \quad (\text{--})$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2 \quad (\text{--})$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5 \quad (\text{--})$$

où :

β est un coefficient qui diminue selon le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère (--)

ε_4 et ε_5 sont les émissivités des canaux 4 et 5 (--)

Dans une étude comparant six différentes méthodes pour calculer la température de surface, Jang *et al.* (2004a) ont noté que l'algorithme de Coll *et al.* (1994) était moins influencé par l'absorption par la vapeur d'eau que les autres algorithmes retenus.

Dans d'autres publications, Jang (2004) et Jang *et al.* (2004b) ont estimé la température de l'air pour une aire d'étude au sud du Québec à l'aide d'un réseau de neurones artificiel. Les réseaux de neurones artificiels ont déjà été utilisés en télédétection pour calculer certains paramètres comme la vitesse du vent, la concentration en chlorophylle ou classifier les surfaces terrestres (Jang, 2004). En utilisant les cinq bandes spectrales de AVHRR ainsi que l'élévation, l'angle zénithal et le jour julien, Jang *et al.* (2004b) ont obtenu une précision de 3°C entre les températures estimées et celles mesurées aux stations.

À partir des températures de surface, il est possible de calculer l'**Indice de condition thermique (TCI - Temperature Condition Index)** (Kogan et Sullivan, 1993). Cet indicateur est basé sur la température de surface calculée à partir des images du capteur AVHRR de NOAA. Comme pour les indices de végétation, il est applicable à l'échelle régionale ou continentale, de manière instantanée ou pour des périodes variant du jour jusqu'à une année. Combiné au VCI, il augmente la précision de la surveillance des conditions de sécheresse et aide à expliquer la contribution de la température dans l'analyse des sécheresses. Le TCI donne aussi une information utile concernant le stress de la végétation dû à une saturation du sol en eau (Kogan, 1997; Singh *et al.*, 2003; Kogan *et al.*, 2004).

$$TCI = \frac{100(T_{\max} - T)}{(T_{\max} - T_{\min})} \quad [--] \quad (3.19)$$

où :

T Température de surface de la période étudié (K)

T_{max} Température de surface maximale de la période étudié (K)

T_{min} Température de surface minimale de la période étudié (K)

Selon Kogan (1997), le TCI combiné au VCI est une source utile d'informations sur le stress causé à la végétation par la sécheresse. C'est aussi un outil utile afin de surveiller presque en temps réel les conditions de la végétation et l'impact du climat sur celle-ci. Combiné aux données recueillies sur le terrain, ces indices semblent être d'excellents outils pour la surveillance des conditions de sécheresse, plus spécialement en agriculture.

Tout comme le VCI, le TCI fait appel à des images composées. Il est donc important de tenir compte de l'angle de vue car celui-ci fait varier la grandeur des pixels. Comme la végétation possède une réponse anisotropique, il faut aussi considérer l'heure de passage du satellite puisqu'elle influence la géométrie de vue.

Le TCI et le VCI, développés parallèlement (Kogan et Sullivan, 1993), sont généralement utilisés en paire, soit séparément, soit de façon à former un indicateur unique. Ainsi, plusieurs auteurs (Kogan, 1995; Unganai et Kogan, 1998; Kogan *et al.*, 2004; Kogan et al, 2005) ont développé un indice prenant la forme « α VCI+ β TCI », où α et β sont les poids de chacun des indicateurs. Les poids sont généralement obtenus par une analyse de corrélation entre le VCI et le TCI et un paramètre physique (rendement d'une culture, précipitation, etc). Le but est de donner un poids plus important au paramètre qui explique le mieux les changements de l'état de la végétation causés par la sécheresse.

Récemment, Jang (2004) a aussi proposé un indice qui inclus les avantages du NDVI, du NDWI et de la température de surface. Comme le NDVI et le NDWI offrent une information complémentaire sur l'état de la végétation et qu'ils présentent un corrélation positive, l'auteur a d'abord proposé d'additionner le NDVI et le NDWI afin d'obtenir un indice appelé l'Indice d'humidité normalisé (NMI - Normalized Moisture Index). L'indice est ensuite comparé graphiquement à la température de surface. Les points (NMI-Ts) situés à l'intérieur de l'espace graphique présentent une distribution de forme trapézoïdale. Les coins de ce trapézoïde représentent quatre conditions charnières: 1) végétation dense ($NMI > 1,3$) et température de surface faible ($Ts < 11^{\circ}C$), 2) végétation parsemée ($NMI < 0,7$) et température de surface élevée ($Ts > 37^{\circ}C$), 3) végétation parsemée ($NMI < 0,7$) et température de surface faible ($Ts < 18^{\circ}C$) et 4) végétation dense ($NMI > 1,3$) et température de surface élevée ($Ts > 28^{\circ}C$). Cette méthode est applicable à l'échelle régionale ou continentale, avec un pas de temps décadaire ou mensuel, selon le satellite utilisé et la disponibilité des images de base. C'est une méthode simple, qui utilise en combinaison des indicateurs de sécheresse déjà couramment utilisés. La méthode a été validée pour le Québec en comparant les résultats aux indices formant l'**Indice forêt-météo** du Canada (FWI - Fire Weather Index) (NRC, 2006b).

Ce type d'approche, où un indice de l'état de la végétation est comparé graphiquement à la température de surface, semble jouir d'une certaine popularité. Wang *et al.* (2004) ont utilisé une approche similaire pour évaluer l'état d'humidité des sols de Chine. L'indice, appelé Indice de sécheresse température-végétation (TVDI - Température-Vegetation Dryness Index) a été proposé par Sandholt *et al.* en 2002. Cet indice illustre graphiquement la température de surface (axe y) en fonction du NDVI (axe x). L'espace graphique de cet indicateur forme un triangle dans lequel les valeurs (Ts-NDVI) sont illustrées.

3.1.3 Les approches combinées

Les approches combinées font appel aux données in-situ et aux données satellitaires. Un exemple est l'**Indice de stress en eau des cultures (CWSI - Crop Water Stress Index)** (Jackson *et al.*, 1981). C'est un outil basé sur la différence entre la température du feuillage et la température de l'air (Moran *et al.*, 1994). Il peut être calculé à partir de données aux stations ou à l'aide de données satellitaires. Le CWSI est applicable localement ou régionalement, de manière instantanée ou journalière.

$$CWSI = 1 - \left(E_r / E_p \right) = \frac{\gamma(1 + r_c / r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad [-] \quad (3.20)$$

où :

E_r	Évapotranspiration réelle (mm)
E_p	Évapotranspiration potentielle (mm)
r_a	Résistance aérodynamique ($s m^{-1}$)
r_c	Résistance du couvert végétal ($s m^{-1}$)
Δ	Pente de la pression de vapeur d'eau à saturation
γ	Constante psychrométrique ($Pa ^\circ C^{-1}$)

$$\gamma^* = \gamma(1 - (r_{cp} / r_a)) \quad [-] \quad (3.21)$$

$$r_c / r_a = \frac{\gamma_a R_n / (\rho c_p) - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e_a^* - e_a)}{\gamma[(T_c - T_a) - bar_n / \rho c_p]} \quad [-] \quad (3.22)$$

où :

r_{cp}	Résistance du couvert végétal ($s m^{-1}$)
e_a^*	Pression de vapeur d'eau à saturation (Pa)
e_a	Pression de vapeur d'eau de l'air (Pa)
R_n	Rayonnement net ($W m^{-2}$)
c_p	Capacité thermique volumétrique de l'air ($J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$)
T_c	Température de surface ($^\circ C$)
T_a	Température de l'air ($^\circ C$)
ρ	Densité de l'air (kg/m^3)

alternative satellitaire :

$$CWSI = \frac{(T_o - T_a) - (T_o - T_a)^l}{(T_o - T_a)^u - (T_o - T_a)^l} \quad [-] (3.23)$$

où :

- T_o Température de surface ($^{\circ}\text{C}$)
- T_a Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)
- u Limite supérieure de $T_o - T_a$
- l Limite inférieure de $T_o - T_a$

$$(T_o - T_a)^l = \frac{\frac{r_e}{\rho_a c_p} (R_n + G) - \frac{1}{\gamma} (e^*)}{1 - \frac{s}{\gamma}} \quad [-] (3.24)$$

$$(T_o - T_a)^u = \frac{r_e}{\rho_a c_p} (R_n + G) \quad [-] (3.25)$$

- G Flux de chaleur sensible (W m^{-2})
- ρ_a Densité de l'air (kg/m^3)
- r_e^* Résistance aérodynamique externe (s m^{-1})
- e^* Pression de vapeur d'eau à saturation (Pa)

En plus d'intégrer des facteurs environnementaux, le CWSI nécessite des intrants supplémentaires tels que le déficit en vapeur d'eau, le rayonnement au-dessus du couvert végétal et la résistance aérodynamique du couvert (Ottlé *et al.*, 1989, Inoue et Moran, 1997). Il peut toutefois être estimé de façon efficace à partir de données satellitaires et de données météorologiques simples (équation 3.23) (Inoue et Moran, 1997).

Le CWSI est sensible à la présence de sol nu. L'inclusion de portion de sol est une source majeure d'erreur puisque la température du sol et de la végétation peuvent varier grandement. C'est pourquoi son utilisation est généralement restreinte au milieu agricole et pour de petites surfaces (Moran *et al.*, 1996; Colaizzi *et al.*, 2003). Il est généralement utilisé pour la quantification de l'humidité des cultures, pour la détermination des besoins d'irrigation ou pour la prédiction de la production agricole.

De plus, le vent, par son effet sur la résistance aérodynamique, l'affecte grandement et le CWSI augmente avec un accroissement de la vitesse du vent. Un changement rapide des conditions nuageuses affecte aussi la valeur du CWSI, car il existe une grande différence de

température entre régions ombragées et ensoleillées. Il est donc important de prendre toutes les mesures nécessaires simultanément (Jackson *et al.*, 1981).

Plusieurs autres sources d'erreurs sont possibles dans le calcul du CWSI. Une estimation erronée de l'émissivité ou la non-représentativité d'une partie du champ de vue peut fausser le calcul et la valeur du CWSI est alors non représentative des conditions de surface.

L'Indice de déficit en eau (WDI - Water Deficit Index) (Moran *et al.*, 1994) est un raffinement du CWSI pour les régions partiellement couvertes de végétation. Il est équivalent à ce dernier en région de forte densité, car la température de surface et la température du couvert végétal sont équivalentes.

$$WDI = 1 - \left(ET / ET_p \right) = \frac{[(T_s - T_a)_m - (T_s - T_a)_r]}{[(T_s - T_a)_m - (T_s - T_a)_x]} \quad [--] \quad (3.26)$$

où :

E_r	Taux d'évapotranspiration réelle (mm/h)
E_p	Taux d'évapotranspiration potentielle (mm/h)
T_a	Température de l'air ($^{\circ}$ C)
T_s	Température de surface ($^{\circ}$ C)
m	Valeur minimum de $T_s - T_a$
r	Valeur mesurée de $T_s - T_a$
x	Valeur maximale de $T_s - T_a$

Le WDI est par définition lié au ratio de l'évapotranspiration réelle à l'évapotranspiration potentielle. En réalité, il peut être calculé en utilisant des mesures de réflectance et de température à la surface en plus de quelques données météorologiques simples. Il est applicable localement ou régionalement, de manière instantanée ou journalière.

À partir de l'équation du bilan énergétique de Penman-Monteith, La température minimale et la température maximale possibles sont calculées. Ces températures sont associées aux taux minimum et maximum d'évaporation. Graphiquement, ces températures sont par la suite comparées à un indicateur de végétation. Les données forment un trapézoïde qui comporte toutes les valeurs possibles de température de surface pour les surfaces nues ou avec végétation. En un point de ce graphique, il est possible de définir un ratio entre la différence des conditions à saturation et les conditions réelles et la différence des conditions à saturation et conditions de sécheresse. Ce ratio est appelé WDI (Moran *et al.*, 1996).

Cet indicateur peut être utilisé tant pour les régions partiellement couvertes que pour les régions complètement couvertes de végétation. Il est inversement proportionnel à la couverture végétale, et le ratio est influencé par la disponibilité en eau. Il tend toutefois à surestimer le déficit en eau dans les régions où la densité du couvert végétal est faible (Moran *et al.*, 1994).

Une des sources d'erreurs de cet indicateur provient du fait que le WDI suppose que l'échange énergétique du sol ou du couvert végétal avec l'atmosphère se fait de manière séparée. En réalité, cet échange est lié (Moran *et al.*, 1994).

3.1.4 Les approches de modélisation physique

Une dernière approche, l'approche physique, consiste à quantifier le bilan énergétique de surface. Ce sont des indicateurs qui utilisent l'énergie fournie principalement par le Soleil et la Terre pour caractériser les conditions environnementales en fonction d'un manque ou d'un surplus en énergie. Un exemple est l'**Indice simple de stress en eau (WSI - Simple Water Stress Index)** (Lhomme et Katerji, 1991). C'est un indicateur qui quantifie le manque en eau d'une culture. Il est applicable localement et régionalement à une échelle journalière. En plus des données de précipitation, il nécessite des informations spécifiques à chaque culture, comme les coefficients de culture et l'humidité disponible.

$$WSI = \sum WD / \sum ETm \quad [--] \quad (3.27)$$

où :

WD Déficit journalier en eau (différence entre évapotranspiration maximale et actuelle) (mm)

Etm Évapotranspiration maximale ou potentielle (mm)

Le WSI est exprimé par le ratio du déficit journalier en eau sur l'évapotranspiration maximale calculée par la méthode de Penman. Le WSI est un indicateur sensible au contenu maximal en eau du sol. Cette variable est cependant difficile à déterminer. De plus, il ignore la montée capillaire de l'eau qui peut contribuer substantiellement au bilan hydrique dans les sols profonds ou en période sèche.

Quoique très simple, cet indicateur est étroitement lié à un type spécifique de culture. Il est directement lié à la production agricole et peut être utile pour déterminer les dates

d'ensemencement. Son utilisation pour le suivi des conditions de sécheresse à grande échelle reste toutefois à voir.

Un autre indicateur possible à utiliser est la **Fraction évaporatoire (EF - Evaporative Fraction)**. Cet indicateur représente la fraction d'énergie disponible pour l'évapotranspiration (Kustas *et al.*, 1993). Comme l'humidité des sols est influencée par l'évaporation (Crago, 1996), cet indicateur pourrait être utilisé dans la caractérisation des sécheresses. C'est un indicateur local ou régional qui fonctionne à une échelle temporelle instantanée ou journalière.

$$EF = -\frac{LE}{R_n + G} \quad [--] \quad (3.28)$$

où :

LE	Flux de chaleur latente (W m^{-2})
Rn	Rayonnement net (W m^{-2})
G	Flux de chaleur sensible (W m^{-2})

Cet indicateur nécessite une estimation complète du bilan énergétique. Il intègre l'énergie disponible ainsi que les réserves hydriques. Il est aussi possible de calculer cet indicateur à partir de données satellitaires et si la représentativité des valeurs est assumée, le EF est valide à l'échelle journalière.

3.2 Choix des indicateurs à l'étude

Le but de cette étude est d'évaluer le potentiel de l'imagerie satellitaire NOAA AVHRR pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresses en milieu méditerranéen, plus particulièrement en Andalousie, une région qui souffre de sécheresses répétées.

Ce capteur a été retenu pour plusieurs raisons. D'abord NOAA AVHRR couvre l'Andalousie en entier au moins une fois par jour. Dans un contexte où il est important de situer les conditions environnementales par rapport aux situations normales historiques, avoir une information journalière concernant le territoire en entier est un avantage indéniable. En plus de posséder une orbite et une couverture spatiale avantageuse, ce satellite possède aussi des bandes spectrales qui permettent de caractériser les surfaces terrestres. Il est connu qu'à partir des bandes spectrales rouge et infrarouge, il est possible

de déterminer l'état de la végétation et que les bandes thermiques peuvent servir à préciser les températures de surface. Ces deux paramètres ont déjà servi, tel que mentionné dans la section précédente, à caractériser les situations de sécheresse.

Tenant compte des objectifs de cet ouvrage, il a tôt été décidé de comparer un outil satellitaire du suivi des sécheresses à un outil plus traditionnel et couramment utilisé. Pour cette raison, une revue non-exhaustive des outils potentiels du suivi des sécheresses a été effectuée. Les outils recherchés sont de préférence simples à calculer et permettent de déterminer le début, l'intensité et la fin des sécheresses.

Le choix des indicateurs satellitaires a été fait en tenant compte des caractéristiques du capteur retenu. Comme l'infrarouge moyen (SWIR) ne fait pas partie des bandes spectrales du capteur AVHRR, les indicateurs LWCI, MSI et NDWI ont été écartés dès le départ. Plusieurs autres indicateurs de végétation existent cependant, chacun adapté à certaines caractéristiques terrains. Considérant que le but est de suivre les sécheresses, les indices de végétation (GEMI, ARVI) minimisant les effets atmosphériques, moins présents en périodes sèches, ont ensuite été écartés. De plus, comme l'Andalousie est un territoire très hétérogène où se retrouvent zones boisées, zones agricoles et zones quasi-désertiques, il fallait un indice de végétation polyvalent. Les indices SAVI et MSAVI, qui minimisent l'effet des sols nus, auraient pu être intéressants. Toutefois, le SAVI a été rejeté parce que son ajustement pour les sols est constant, alors qu'il devrait être inversement proportionnel à la densité du couvert végétal qui est très variable sur le territoire andalou. Quant au MSAVI, il sature en région de forte densité de végétation. De tous les indices de végétation, le VCI est celui qui était le mieux adapté, car il situe l'état de la végétation d'une période par rapport aux conditions historiques. De plus, les études précédentes utilisant cet indicateur ont permis d'établir un seuil en deçà duquel une sécheresse est supposée sévir. Cet indicateur permet donc de connaître le début, l'intensité et la fin des sécheresses. Comme il est composé de valeurs du NDVI, ce dernier a aussi été calculé. Finalement, le VPI n'a pas été retenu, principalement parce que cet indicateur a été proposé en 1998.

Comme le VCI et le TCI ont été conçus et utilisés en paire par Kogan, spécialement dans le but de suivre les sécheresses aux États-Unis, ils ont donc tous deux été retenus. Il a d'ailleurs été démontré qu'en ensemble, ils offrent une caractérisation efficace des situations de sécheresse (Kogan, 1997). Ils sont applicables régionalement et, contrairement au VPI, le VCI et le TCI permettent de caractériser les aires non-homogènes, comme l'Andalousie. La température de surface, qui compose le TCI, est donc implicitement retenue. L'algorithme de Coll *et al.*, (1994) a été choisi car une étude précédente de Paquet *et al.* (1997) a démontré l'efficacité de cette méthode pour évaluer la température de l'air à partir des données AVHRR en Andalousie.

Afin de comparer ces deux indicateurs de sécheresses satellitaires, un indicateur utilisé opérationnellement était recherché. Pour cette raison, les indicateurs peu utilisés, utilisés localement ou spécialement créés pour étudier les sécheresses agronomiques ou caractériser le contenu en eau du sol, ont été mis de côté. Le KBDI, NDI, CMI et AWC et les approches de modélisation physique, plus complexes, n'ont donc pas été retenus. De plus, les indicateurs faisant intervenir la couverture neigeuse, comme le SWSI, n'ont pas été jugés pertinents dans le cadre d'une étude en Andalousie. Les approches combinées de données aux stations et de données satellitaires (CWSI, WDI) ont aussi été écartées. Parce que ces indicateurs incluent la température de surface dans leur formulation, ils ont de fortes chances d'être corrélés aux TCI.

Des quatre indicateurs qui restent (PN, D, SPI et PDSI), le PDSI a été éliminé parce que les intrants nécessaires n'étaient pas disponibles pour un nombre suffisant de stations météorologiques. Des trois tests statistiques, le SPI est celui qui a été retenu.

Le SPI est un indicateur simple à calculer, applicable localement ou régionalement. Son utilisation à des échelles de temps variables (1, 2, 3, 6 mois, etc.) permet également de caractériser les sécheresses de différents types. De plus, il permet de bien définir le début, l'intensité et la fin des périodes sèches. Finalement, les données pluviométriques nécessaires à son calcul étaient facilement accessibles.

Chapitre IV – Données et méthodologie

A - INVENTAIRE DES DONNÉES

4.1 Données météorologiques

4.1.1 Description et sélection des données météorologiques

Les données météorologiques ont été extraites de la base de données météorologiques de l'Institut des applications spatiale (IAS) du Centre commun de recherche (CCR) de la Communauté européenne (CE). Ces données sont fournies par la « Agencia del Medio Ambiente: La Consejería de Andalucía » (Junta de Andalucia, 2006) et proviennent des différents réseaux météorologiques andalous.

Les paramètres météorologiques de base utilisés dans cette étude sont la précipitation journalière et la température maximale journalière enregistrées aux stations.

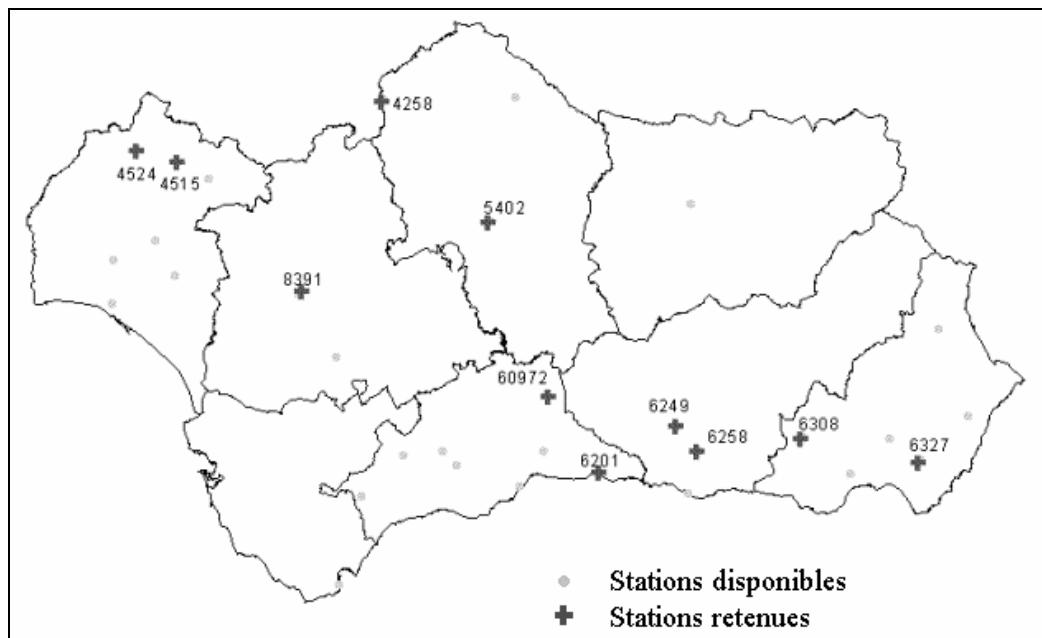


Figure 4.1 - Les stations météorologiques andalouses disponibles et les stations retenues

De la centaine de stations disponibles sur le territoire andalou, onze ont été retenues et utilisées dans le cadre de ce projet. Elles ont été choisies en fonction du nombre d'années

de données disponibles ainsi que de leur localisation sur le territoire. Au départ, seules les stations possédant un historique de données de 30 ans ou plus devaient être sélectionnées. Ce critère laissait la vallée du Guadalquivir sans aucune station représentative. Les stations de Cordoba et Sevilla ont alors été incluses malgré leur historique de données de moins de 30 ans. La figure 4.1 illustre le positionnement des stations en Andalousie et le tableau 4.1 donne les caractéristiques de chacune des stations.

Tableau 4.1 - Les stations météorologiques retenues

Station	Nom	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Historique
4258	Aldea de Cuenca	38,325	-5,563	571	1948-1993
4515	Galaroza	37,923	-6,71	554	1953-1993
4524	Aroche	37,945	-6,959	421	1948-1992
5402	Cordoba/Aeropuerto	37,842	-4,85	92	1975-1992
6201	Algarrobo la Mayora	36,774	-4,041	20	1963-1993
6249	Padul	37,025	-3,627	753	1961-1993
6258	Lanjaron	36,919	-3,488	710	1948-1993
6308	Laujar Monterrey	37,026	-2,899	1280	1950-1993
6327	Nijar	36,967	-2,205	356	1948-1993
8391	Sevilla/San Pablo	37,42	-5,88	34	1975-1998
60972	Archidona	37,094	-4,388	700	1961-1993

Pour chaque station, les précipitations totales mensuelles et les températures minimales et maximales décennales ont été extraites de la base de données journalières à l'aide de scripts SQL.

Les données de précipitation mensuelle, en format ascii, servent d'entrant au programme du calcul du SPI alors que les températures maximales et minimales servent au calcul du TCI calculés aux stations. Dans chacun des cas, les mois ou les décades possédant des données manquantes ont été éliminés.

4.2 CORINE – Données d'utilisation du sol

CORINE (ETC, 1999) est une base de données européenne de l'utilisation du sol créée par le Centre commun de recherche de l'Union européenne (CCR) et l'Agence européenne pour l'environnement (EEA). CORINE CLC90 version 8/2005 (EEA, 2005) est utilisée dans cette étude afin de connaître l'utilisation du sol autour des stations retenues. Cette version est une amélioration de la base de données Corine CLC90 produite et distribuée au milieu des années 1990 (EEA, 2000). Elle a été obtenue à partir du site internet l'Agence européenne pour l'environnement (EEA, 2005).

Cette base de données, à une échelle de 1 : 100 000, a été créée à partir d'images satellitaires tirées du capteur Landsat5-TM, prises entre 1986 et 1995. CORINE possède une nomenclature hiérarchique où se distinguent 5 classes de niveau 1, 15 classes de niveau 2 et 44 classes de niveau 3. La version matricielle, en format TIFF et d'une résolution spatiale de 250 m, a été utilisée. Le logiciel TNTMIPS v6.6 (Microimages, 2006) a été utilisé afin de traiter l'information. L'image a d'abord été transformée de la projection Lambert azimutal équivalente à la projection équivalente conique d'Albers. Ensuite, la zone de l'Andalousie a été extraite de l'amasque européenne.

Tableau 4.2 - Pourcentage d'utilisation du sol autour des stations (fenêtre de 11 km²)

Stations	Zones urbaines	Mines, rocs et aires ouvertes	Cultures permanentes	Plan d'eau et zones humides	Forêts	Prés et Pâturages	Cultures Non-irriguées	Cultures irriguées	Autres
4258	0,00	0,00	0,00	0,00	5,24	0,00	94,76	0,00	0,00
4515	2,55	0,00	3,06	0,00	51,53	0,00	42,86	0,00	0,00
4524	2,55	0,00	54,59	0,00	29,59	0,00	6,63	0,00	6,63
5402	3,57	0,00	0,00	3,06	0,00	0,00	62,24	31,12	0,00
6201	1,14	0,00	5,14	0,00	0,00	0,00	62,86	28,00	2,86
6249	13,74	2,84	0,00	0,00	5,21	4,74	14,22	37,44	21,80
6258	1,53	0,00	13,78	0,00	0,00	0,00	54,59	0,51	29,59
6308	0,51	12,76	4,59	0,00	50,00	0,00	1,53	0,00	30,61
6327	0,00	52,31	0,00	0,00	0,00	0,00	29,74	17,95	0,00
8391	6,63	0,00	15,82	0,00	0,00	0,00	46,94	30,61	0,00
60972	3,57	0,00	39,80	0,00	38,78	2,04	7,65	0,00	8,16

La figure 1 et le tableau 1 de l'annexe 2 présentent l'utilisation du sol en Andalousie selon les 44 classes de niveau 3. Ce sont les terres arables non-irriguées de la vallée du Guadalquivir, les oliveraies des hautes terres du Guadalquivir et les zones boisées qui occupent principalement l'Andalousie. Afin de faciliter l'analyse des résultats, les 44 classes de CORINE ont été groupées en neuf classes, présentées au tableau 2 de l'annexe 2. Le tableau 1 de l'annexe 2 indique comment les 44 classes ont été regroupées alors que la figure 2 illustre l'utilisation du sol en Andalousie selon les neuf classes retenues. Trois classes d'utilisations du sol se distinguent facilement: les cultures permanentes du haut Guadalquivir, les cultures non-irriguées de la vallée du Guadalquivir et les forêts des montagnes et du Campo de Gibraltar. Afin de faciliter l'analyse des résultats, des statistiques d'utilisation du sol autour des stations ont été calculées. À partir de l'image classifiée en neuf classes, des fenêtres de 11 km^2 ont été extraites autour des stations météorologiques et le pourcentage d'utilisation du sol a ensuite été calculé. De plus l'image en neuf classes a aussi été utilisée pour évaluer l'évolution des indicateurs satellitaires par type de végétation.

4.3 Données satellitaires

4.3.1 Description des données satellitaires

Les données satellitaires proviennent du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) du satellite NOAA-11. Le terme «Advanced Very High Resolution Radiometer» ou radiomètre perfectionné à très haute résolution se réfère à la haute résolution radiométrique de l'appareil (10 bits, 1 024 valeurs) et non à sa résolution spatiale. Le capteur AVHRR, mesure la luminance énergétique émise ou réfléchie par les surfaces terrestres à l'intérieur de cinq bandes spectrales: une dans le visible, une dans le proche infrarouge et trois dans l'infrarouge thermique.

Environ douze satellites NOAA-AVHRR (NOAA-6 à NOAA-M) ont été mis en orbite entre 1979 et 2006 (MARS, date inconnue; NOAA, 2000). Ces satellites ont été développés à des fins météorologiques et pour compléter le réseau de satellites géostationnaires de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) qui ne couvrent pas les pôles. Le satellite

NOAA 11 a été sélectionné parce qu'il était fonctionnel durant la période à l'étude et parce qu'il survolait l'Andalousie pendant la journée (14:30h passage à l'équateur). Le tableau 4.3 présente les caractéristiques du capteur AVHRR de NOAA-11.

Tableau 4.3 - Les caractéristiques du capteur AVHRR de NOAA 11

Orbite		Héliosynchrone quasi polaire	
Inclinaison de l'orbite		98,8°	
Altitude nominale		833 - 870 km	
Période de l'orbite		102 minutes	
Orbites par jour		14,2	
Cycle de répétition de l'orbite		9 jours	
Heure de passage à l'équateur		Descendant: 02:30h	Ascendant: 14:30h
Bandes		Écart spectral (μm)	IFOV (mrad)
1	Visible	0,58 - 0,68	1,39
2	PIR	0,725 - 1,10	1,41
3	IR thermique	3,55 - 3,93	1,51
4	IR thermique	10,3 - 11,3	1,41
5	IR thermique	11,5 - 12,5	1,30

Tableau tiré de Vogt, 1992.

À une altitude de 833 km, ce satellite météorologique possède une orbite héliosynchrone quasi-polaire. Avec un angle de vue de 55,4° de chaque côté du nadir, AVHRR possède une trace au sol d'environ 2 922 km. De plus, la vitesse orbitale de NOAA 11 (14,2 cycles par jour) implique qu'entre deux passages ascendants du satellite à l'équateur, la Terre a tourné de 26,25°, ce qui correspond à une distance de 2 842 km à l'équateur. Les traces de AVHRR se chevauchent donc partiellement, ce qui assure une couverture journalière complète de la surface terrestre. La résolution spatiale au nadir est d'environ 1,1 km mais la géométrie de vue de part et d'autre du nadir donne lieu à de fortes distorsions de l'image qui influencent fortement les propriétés spatiales et radiométriques des mesures.

En effet, le système imageur du capteur AVHRR balaie la Terre d'un horizon à l'autre avec un champ de vue instantané (IFOV) de 0,075° et un miroir rotatif reflète la luminance vers

un ensemble de barettes. Pendant une rotation, 2 048 mesures couvrant un angle de vue total de 110,8° sont effectuées. Chaque mesure couvre donc 0,054°, soit moins que le champ de vue instantané et il s'ensuit donc un chevauchement des pixels dans la ligne de balayage. De plus, la fréquence de rotation du miroir (6 Hz, 360 rpm) et la vitesse de déplacement du satellite font en sorte que la distance entre chaque ligne de balayage est d'environ 1,1 km. Toutefois, l'augmentation de la taille des pixels avec l'accroissement de l'angle de vue fait aussi en sorte qu'il y a un chevauchement plus grand des pixels les plus éloignés du nadir dans la ligne de déplacement du satellite. Vogt (1992) offre une description complète de la géométrie de vue des satellites NOAA. Celui-ci mentionne les implications de cette géométrie lorsqu'on désire comparer des mesures prises avec des angles différents. Il soulève entre autre la forte autocorrélation des mesures entre pixels voisins se chevauchant, les différences de mesure dues aux différents trajets optiques, le problème d'anisotropie des surfaces et l'influence du changement de l'angle solaire zénithal, causée par la forte largeur de la trace au sol, sur la réflectance bidirectionnelle. Ces inconvénients peuvent cependant être partiellement éliminés en restreignant l'angle de vue des images utilisées ou en appliquant des corrections. Dans le cadre de la présente étude, les corrections ont été effectuées à l'aide du logiciel SPACE (Millot, 1995), décrit à la section suivante.

Le satellite NOAA 11 comporte un convertisseur analogique-digital 10 bits qui transforme les voltages en un compte numérique de 0 à 1 023. Ces données sont transmises en quatre formats différents: HRTP, LAC, GAC et APT (MARS, date inconnue). Le format HRPT (High Resolution Picture Transmission) est le mode normal de transmission. Sous ce format, le flux de données (toutes les bandes/pixels de AVHRR avec les informations des autres capteurs du satellite) est reçu en temps réel par une antenne au sol. Le format LAC est identique au format HRTP mais possède une couverture spatiale différente alors que les deux autres formats sont de résolution spatiale dégradée.

Les scènes HRPT/LAC incluent, pour chaque ligne de balayage, l'information suivante :

- La date et l'heure (en milliseconde) de l'enregistrement des données;
- Les mesures spectrales des 2 048 pixels pour les cinq bandes, dans un format 10 bits BIP;

- L'en-tête des images contenant les mesures de l'espace lointain et de la cible de calibrage interne qui sont nécessaires pour le calibrage des bandes thermiques;
- Un certain nombre de « drapeaux » (0-1 bit) indiquant certains réglages et erreurs;
- L'enregistrement TIP avec l'information des autres capteurs de NOAA (TOVS, SEM, etc.).

Par convention, les images en format HRTP et LAC sont améliorées par les stations de réception en un format de distribution, dont Level 1B est le plus connus (Kidwell, 1998). Ce format est identique au format HRTP mais pour chacune des lignes de balayage, des octets sont ajoutés pour enregistrer les pentes et les ordonnées à l'origine (gain et offset) des bandes thermiques (obtenues des en-têtes HRTP) et certaines données matricielles, telles que la latitude, la longitude et l'angle solaire zénithal pour 51 pixels choisis systématiquement. Au fil des ans, ce format a subi plusieurs modifications mineures (Kidwell, 1998).

De son côté, l'Agence spatiale européenne (ESA) a développé son propre format, appelé SHARP1 (Standard-family HRTP Archive Request Product). Les données SHARP1 contiennent aussi les facteurs de calibrage des bandes thermiques et les données matricielles mais elles sont ré-échantillonnée à 16 lignes ayant 32 pixels par ligne. D'autres importantes différence sont aussi à noter. En autre, les mesures spectrales sont déjà sauvegardées en format entier 16 bits. Les six bits additionnels sont utilisés pour encoder de l'information vectorielle (côtes, limites des états, etc). Dans ce format, les images AVHRR sont déjà permutes verticalement et horizontalement afin de se conformer aux standards des logiciels de traitement des images. De plus, les images matricielles SHARP1 contiennent aussi toutes les informations concernant la géométrie soleil-terre-satellite (angles solaire et de vue zénithaux, angles solaire et de vue azimutaux). Alors que toutes les informations sont contenues dans un seul fichier pour les images Level1B, elles sont étalées sur cinq fichiers en format SHARP1. Le logiciel n'en requiert cependant que deux: IMAGE (données AVHRR brutes) et LEADER (informations additionnelles). Finalement, les images SHARP1 contiennent un maximum de 1 440 lignes de balayage (ou quatre minutes d'enregistrement AVHRR). Comme les antennes normales captent 10 à 12 minutes de données HRTP, chaque image captée doit être divisée en trois ensembles de fichiers

SHARP1. Selon ESA, au moment de leur conception, une image en format SHARP1 correspondait à la capacité de stockage d'une bande magnétique à haute densité.

4.3.2 Chaîne de pré-traitement des données satellitaires

Dans le cadre de cette étude, le logiciel SPACE (Vowles, 1992; Millot, 1995; MARS, date inconnue) a été utilisé afin de traiter les images satellitaires retenues. Le logiciel SPACE a été créé pour l'Institut des applications en télédétection du CCR de Ispra, selon les exigences du Projet MARS¹. Il a été développé afin de traiter les données de NOAA AVHRR brutes (SHARP1, Level1B, GAC) de manière opérationnelle et en temps réel afin de produire une mosaïque journalière (5 bandes spectrales) pour l'Europe entière.

Le développement de SPACE, depuis sa création vers 1988, a subi maintes modifications. Au départ, SPACE a été développé en langage C sur plate-forme Unix. Cette première version n'acceptait que les fichiers en format SHARP1. En 1993, le développement du logiciel a été repris par la compagnie britannique EOS (Earth Observation Sciences) qui a développé une deuxième version (SPACE-II), toujours en langage Unix-C. SPACE-II comportait aussi plusieurs améliorations au niveau des formats d'importation, des algorithmes (calibrage, corrections atmosphériques) en plus de proposer une interface graphique plus conviviale et la possibilité de traiter les données en groupe. C'est cette version du logiciel qui a été utilisée dans le présent projet. Vers 1998, EOS a introduit plusieurs autres modifications, dont l'instauration d'une version PC dont les algorithmes de corrections atmosphériques ont été améliorés.

L'unité MARS du CCR entrepose depuis 1989 les images NOAA AVHRR en formats SHARP1 dans des archives. Les images couvrant la période de 1989 à 1996 provenaient alors de l'antenne du DLR à Oberpfaffenhofen et étaient transmises en format SHARP1. À partir de 1996, le CCR a fait installer sa propre antenne qui a été en fonction jusqu'en mars 2000. Les données étaient transmises en format brut HRTP, puis transformées en format

¹ MARS (Monitoring Agricultural Statistics with Remote Sensing) est un projet de l'Institut des applications spatiales du Centre commun de recherche. Ce projet consiste à faire une estimation quantitative de la superficie, de la condition et du rendement des cultures des pays membres de la Communauté Européenne.

SHARP1 par le logiciel DARTCOM (<http://www.dartcom.co.uk/>). Depuis novembre 2000, l'organisation belge VITO est responsable des opérations européennes du logiciel SPACE.

Malgré les modifications apportées à SPACE-II après l'utilisation de celui-ci dans le cadre de la présente étude, les différentes composantes du logiciel sont tout de même demeurées presque inchangées. SPACE-II est constitué grossièrement de quatre modules (Figure 4.2).

Avant d'utiliser SPACE, il est cependant nécessaire de créer des gabarits de la région d'intérêt à l'aide d'un utilitaire appelé TEMPLATE (Mars, date inconnue). Ces gabarits sont utilisés par SPACE lors des calculs. À l'aide d'un fichier intrant, l'utilisateur spécifie les références géographiques de la région d'intérêt (Ex. Andalousie); *i.e.* le système de référence géodésique, la projection cartographique, la résolution spatiale et les limites de l'image finale. Ce programme crée quatre fichiers. Le premier est une image à cinq bandes en format BIL 16 bits (entier), avec n colonnes et m lignes, couvrant la région d'intérêt et appelée IMAGE. Au départ, toutes les valeurs sont initialisées à 0, sauf le 16^e bit de la première bande qui contient un masque (valeur 0 ou 1) pour différencier les surfaces terrestres des surfaces couvertes d'eau. La deuxième est une matrice appelée GEOG. Cette matrice contient les positions géographiques (latitude, longitude) de chacun des pixels de la région d'intérêt. Cette matrice est obtenue en inversant les équations de la projection sélectionnée. La troisième matrice, initialisée à 0 à cette étape, se nomme ANGLES. C'est une image à quatre bandes contenant les informations concernant les angles d'illumination et de vue entre le soleil, la terre et le satellite. IMAGE, GEOG et ANGLES ont toutes le même système de géoréférence. Toutefois, GEOG et ANGLES sont de résolution spatiale moins précise. Finalement, toutes les informations auxiliaires sont sauvegardées dans un fichier texte appelé LEADER.

SPACE possède une interface graphique qui permet d'abord de choisir les scènes (format SHARP1, Level1B ou GAC) à traiter selon spécifications de l'utilisateur. L'utilisateur peut spécifier un angle de vue plus approprié afin de réduire les déformations des images. Ce programme vérifie aussi le format des scènes et copie toute l'information concernant ces images dans une base de données situées dans un premier répertoire de travail (Level 1, L1).

Le pré-processeur ordonne ensuite ces scènes par date, par plate-forme et par heure afin de faciliter les traitements ultérieurs. Pour chaque scène, certains paramètres sont extraits et ajoutés aux paramètres spécifiés par l'utilisateur. Entre autres, les informations concernant le numéro du satellite, la date de passage, l'heure centrale de la scène (*scene central time*, t_{sc}) ainsi que le nombre de colonnes et de lignes sont récupérés des images brutes. Les éphémérides, nécessaires dans le calcul des corrections géométriques, sont aussi à cette étape obtenues à partir des informations de la mission, par le biais des TBUS. Dans la version PC de SPACE, le pré-processeur doit ensuite transformer les images, sauvegardées en format Unix « Little-Endian », en format PC « Big-Endian ». Si les scènes entrées sont en format GAC ou Level1B, c'est aussi à cette étape que ces images brutes sont transformées d'un codage 10 bits à un codage 16 bits et permutées en X et Y afin de se conformer au standard de la plupart des logiciels de traitement des images².

SPACE-II élimine aussi les pixels les plus déformés. Par défaut, il écarte les pixels au-delà d'un angle de vue de 48.46°, soit 128 pixels de chaque côté. La trace au sol devient donc 2 081 km. Ces images sont sauvegardées en format SHARP1, dans des répertoires séparés. Le pré-processeur crée aussi trois matrices contenant des informations qui servent aux calculs ultérieurs. Une première matrice (IMG_GRID) contient la longitude et la latitude de chaque pixel de la scène. Cette matrice est calculée deux fois. À l'aide d'un modèle orbital (EOS, 1995; MARS, date inconnue), une version approximative et de moindre résolution spatiale est d'abord créée par le pré-processeur. Cette version sera utilisée par le processeur. Suite aux résultats du « chip matching », le ré-échantillonneur créera ensuite une version améliorée qui servira lors de la correction géométrique. Une deuxième matrice (GEO_GRID) est ensuite aisément obtenue par l'inversion de IMG_GRID. Cette matrice contient, pour chacun des pixels, les positions géographiques³. Une dernière matrice (ANGLES) contient les angles azimutaux et zénithaux du soleil et du satellite pour la

² La plupart des logiciels de traitement des images ont été conçus en fonction des données des satellites qui balaient la portion ensoleillée de la Terre lors de la portion descendante de leur trajectoire. Ces satellites balaient la surface terrestre d'ouest en est. NOAA balaye cependant la portion ensoleillée de la Terre, d'est en ouest, lors de sa trajectoire ascendante. Pour cette raison, les images NOAA doivent être permuteées.

³ La projection équivalente conique d'Albers est utilisée avec l'ellipsoïde WSGS72. La résolution du pixel est de 1100 m par 1100 m.

région d'intérêt. Cette information peut être extraite des images SHARP1 ou calculé à partir d'un modèle pour les images GAC et Level1B.

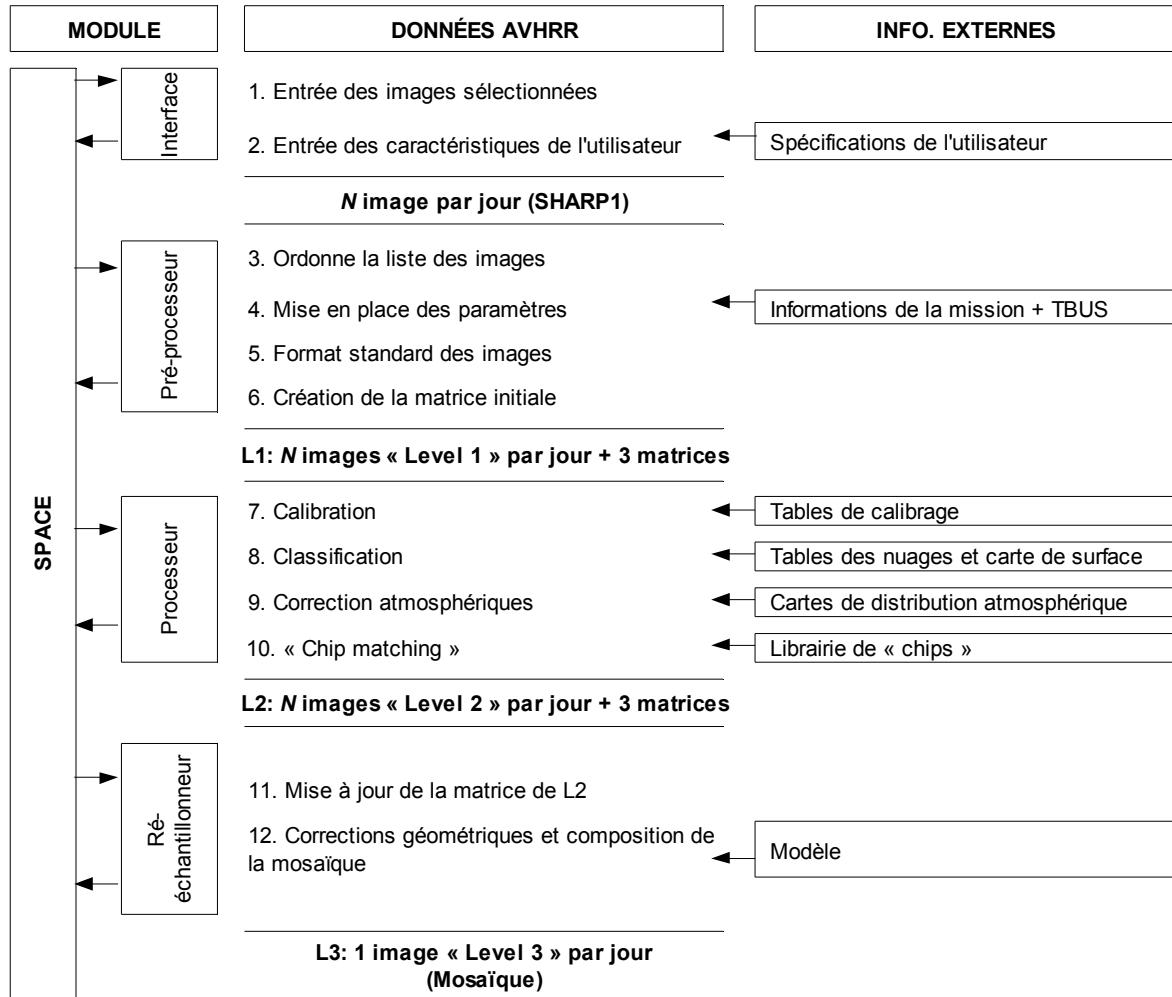


Figure 4.2 - Le logiciel de pré-traitement des images: SPACE-II (CCR, Ispra)

À la fin de cette étape, on obtient n images Level 1 (L1) ayant les mêmes bandes spectrales que les images brutes AVHRR et trois matrices. À partir de ces images journalières, le processeur effectue ensuite le calibrage, la détection des nuages et des pixel d'eau, les corrections atmosphériques et le « chip matching ». Puis, le ré-échantillonneur met à jour les images journalières de niveau 2 (L2), effectue les corrections géométriques et crée la mosaïque journalière européenne. Les sections qui suivent expliquent plus en détails les fonctionnalités des modules du processeur et du ré-échantillonneur de SPACE.

4.3.2.1 Calibrage radiométrique

Le calibrage radiométrique vise d'une part à éliminer la différence de sensibilité entre les capteurs en assignant à chaque bande spectrale un coefficient de correction. D'autre part, le calibrage vise aussi à corriger la dégradation du signal du capteur dans le temps par l'application d'une correction linéaire qui est appliquée à chacun des coefficients de calibrage pré-lancement. Ceci est rendu possible grâce à un dispositif interne de calibrage ou par le suividans le temps de surfaces dont la signature spectrale est connue. C'est aussi le système de calibrage qui convertit l'information brute en quantités physiques. Les bandes spectrales à ondes courtes (1, 2 et 3) sont transformées en pourcentage de réflectance, en tenant compte du stress du décollage, de la dégradation des capteurs, de l'angle solaire ainsi que de la distance Terre-Soleil. En utilisant l'équation de Planck, l'irradiance des bandes spectrales 4 et 5 est quant à elle transformée en température de brillance.

Calibrage des bandes à ondes courtes; rouge et proche infrarouge (1: R, 2: NIR)

Les bandes 1 et 2 sont situées dans le spectre des ondes courtes qui s'étendent de 200 à 3 000 nm. Dans cette région du spectre, les ondes captées par AVHRR proviennent de la portion des ondes en provenance du Soleil qui est réfléchie par les surfaces terrestres. SPACE-II transforme donc les mesures brutes de chacune de ces deux bandes en mesure de réflectance.

Le calibrage convertit les comptes numériques (W_i) en mesure de paramètre physique, soit la luminance spectrale (L_a) au-dessus de l'atmosphère (Top of Atmosphère - TOA), et ce pour la longueur d'onde centrale de la bande. Ce calibrage est basé sur une relation linéaire de type :

$$W_i = W_{SP} + G * L_a \quad \longrightarrow \quad L_a = \frac{(W_i - W_{sp})}{G} \quad [--] \quad (4.1 \text{ et } 4.2)$$

où :

G	Pente ou Gain (--)
W_{sp}	Ordonnée à l'origine ou « Offset » (--)
W_i (--)	Compte numérique obtenu d'une cible ayant aucune luminance énergétique

Au fil du temps, le gain et l'offset de tous les capteurs sont sujets à une dérive (drift). Malheureusement, les capteurs d'ondes courtes d'AVHRR ne contiennent pas à bord de standard de calibrage pouvant mesurer l'évolution de cette dérive. Ceci signifie que seul le gain et l'offset calculés avant la mise en orbite ou des valeurs obtenues à partir du suivi à posteriori de cibles dont la réflectance est constante (océans, déserts) peuvent être utilisés. SPACE-II utilise les valeurs publiées par Teillet et Holben (1994) qui exprime la dérive du gain et de l'offset en fonction du nombre de jours depuis la mise en orbite :

$$G = A * d_L + B \quad W_{sp} = C * d_L + D \quad [--] (4.3 \text{ et } 4.4)$$

où :

G	Pente ou Gain (--)
W_{sp}	Ordonnée à l'origine ou « Offset » (--)
A, B, C, D	Coefficients

Les coefficients A, B, C et D sont publiés pour les bandes visibles et proche infrarouge de NOAA-6 à 11, par année de vie du satellite. La version PC de SPACE utilise aussi les valeurs de Teillet et Holben (1994) pour tous les satellites jusqu'à NOAA-11.

La réflectance est généralement définie comme $R = \pi * L/E$, où L est la luminance et E l'éclairement énergétique. Comme les mesures se prennent au-dessus de l'atmosphère, la luminance est plutôt calculée par la formule 4.2 et l'éclairement énergétique au sol par $E^o * \cos\theta_s/d_s$, où E^o est l'éclairement énergétique extraterrestre, d_s la distance du Soleil à la Terre et θ_s l'angle solaire zénithal. Alors que θ_s peut être récupéré à partir des informations des TBUS (aussi incluses dans les fichiers SHARP1), d_s peut être calculé par une équation faisant intervenir le jour de l'année:

$$d_s = 1 - 0,01672 * \cos(0,9852(jour - 4) * \pi / 180) \quad [AU] (4.5)$$

où :

$jour$	jour julien (--)
--------	------------------

Cette distance est considérée constante pour une journée. Le calcul de la réflectance au-dessus de l'atmosphère R_a devient alors :

$$R_a = \left(\frac{\pi * L_a}{E^0} \right) \left(\frac{d_s^2}{\cos \theta_s} \right) \quad [--] \quad (4.6)$$

Calibrage des bandes thermiques infrarouges (4: TIR et 5: TIR)

Les bandes 4 et 5 de AVHRR sont situées dans les longues longueurs d'ondes, appelées l'infrarouge thermique (TIR). Le calibrage de ces bandes est basé sur la loi de Planck qui prédit la luminance spectrale (L) en fonction de la longueur de l'onde (λ), de la température de brillance de l'objet observé (T), de son émissivité spectrale (ϵ_λ) et des constantes de Planck (C_1 et C_2) selon l'équation 4.7.

$$L_\lambda = \frac{\epsilon_\lambda * C_1 * \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad L_v = \frac{\epsilon_v * C_1 * v^3}{e^{\frac{C_2 v}{T}} - 1} \quad [--] \quad (4.7 \text{ et } 4.8)$$

Comme AVHRR exprime les quantités spectrales en fonction du nombre d'onde ($v=1/\lambda$) plutôt qu'en longueur d'onde (λ), la version de la loi de Planck utilisée par SPACE correspond alors à l'équation 4.8 (Planet, 1988).

En considérant que la Terre agit comme un corps noir ($\epsilon_v = 1$), la température de brillance (T) au haut de l'atmosphère est ensuite calculée. Si le capteur mesurait directement la luminance spectrale (L_v), la température de brillance (T) pourrait être directement calculée par l'équation 4.8. Cependant, les bandes thermiques de AVHRR couvrent plusieurs longueurs d'ondes et la valeur de la luminance spectrale du nombre d'onde central de la bande spectrale (L_{v_c}) est calculée par l'intégrale de L_v sur la largeur de la bande (v_1-v_2), où ρ_v est la courbe de réponse spectrale (équation 4.9).

$$L_v = \int_{v_1}^{v_2} L_v \rho_v dv \quad L_{v_c} \approx \frac{C_1 * v_c^3}{e^{\frac{C_2 v_c}{T}} - 1} \quad [--] \quad (4.9 \text{ et } 4.10)$$

Pour les corps noirs, l'approximation de l'équation 4.9 par l'équation 4.10 est relativement bonne et peut être inversée afin d'obtenir la température de brillance (T) (équation 4.11).

$$T = \frac{C_2 v_c}{\ln(1 + C_1 * v_c^3 / L_{v_c})} \quad [K] \quad (4.11)$$

Le calibrage convertit donc les comptes numériques (W_i) en luminance spectrale en haut de l'atmosphère (L_{v_c}), valide pour le nombre d'onde central (v_c) de la bande spectrale, à l'aide de l'équation 4.12.

$$L_v = I + S + W_i \quad [--] (4.12)$$

En connaissant les valeurs de W_i et L_{v_c} de deux points sur la droite de calibrage, l'ordonnée à l'origine (offset) et la pente (gain) peuvent être calculés. Les valeurs de ces deux points sont obtenues à partir d'un dispositif de calibrage à bord du satellite (pour les bandes 3, 4 et 5) et par une lecture de l'espace lointain. À chaque ligne de balayage de la Terre, le capteur effectue une mesure de l'espace lointain (W_{sp}) et de la cible de calibrage interne (W_{cci}). La luminance de l'espace lointain est supposée être nulle alors que la luminance de la cible de calibrage interne (cci) est calculée à partir de l'équation 4.10, avec la température de la cible, suivie de façon permanente par quatre thermomètres de résistance interne en platine. Dans les données en format SHARP1 l'offset et le gain sont fournis pour chaque bande et pour chaque ligne de balayage. Comme ces valeurs sont considérées stables pendant une orbite, seules quelques lignes sont inspectées et ces valeurs sont utilisées pour l'image entière. Pour chacune des bandes, l'équation 4.12 est ensuite utilisée pour transformer les comptes numériques (W_i) en luminance (l_{v_c}). La luminance est ensuite insérée dans l'équation 4.13 afin de calculer la température de brillance (T). Les températures de brillance sont ensuite converties en 10 bits (0 - 1 023) en échelonnant les valeurs selon la formule suivante : $W_o = 10 * (T-233)$. Les valeurs résultantes sont ensuite enregistrées dans la bande appropriée des images L2.

Toutefois, comme le calibrage n'est pas linéaire, contrairement à ce qui est supposé précédemment, des corrections non linéaires sont appliquées aux valeurs de luminance ou aux températures. Ces corrections sont introduites soit sous forme d'équations linéaires ou quadratiques ou sous forme de table de conversion (Kerdiles, 1997). Ces corrections sont différentes selon les bandes spectrales et le satellite NOAA.

Calibrage de la bande de l'infrarouge moyen (3: MIR)

La bande spectrale du moyen infrarouge mesure la faible luminance ($L_{Vc,MIR}$ ou L_3) qui provient en partie de la réflexion de l'énergie solaire ($L_{3,S}$) et des émissions du système Terre-atmosphère (température $L_{3,E}$). La conversion des comptes numériques (W_{MIR}) de cette bande spectrale en luminance spectrale (L_3) est effectuée de la même manière que pour les bandes thermiques infrarouges (4 et 5) à l'aide de l'équation 4.12. Ce calibrage est basé sur les mesures de l'espace lointain et de la cible de calibrage interne.

Toutefois, comme le signal perçu par le capteur provient de deux sources, il est nécessaire de séparer ces deux composantes. D'une part, la luminance solaire réfléchie peut être calculée par l'inversion de l'équation 4.6 :

$$L_{3,S} = R_{3,a} * \left(\frac{E^o_3}{\pi} \right) * \left(\frac{\cos\theta_s}{d_s^2} \right) \quad [--] \quad (4.13)$$

où :

E^o_3	Luminance extraterrestre au haut de l'atmosphère (constante)
$R_{3,a}$	Réflectance au haut de l'atmosphère de la bande MIR

D'autre part, la contribution thermale de la Terre ($L_{3,E}$) peut être dérivée par l'équation 4.10 en substituant T par la température de brillance de la bande 4 (T_4). Cette contribution terrestre, nommée $L_{3,B}$, considère cependant la Terre comme un corps noir, ce qui n'est pas le cas. Il faut donc aussi tenir compte de l'émissivité (ε_3) de la Terre dans la bande spectrale du moyen infrarouge. Le principe de conservation de l'énergie décrète que la somme des énergies réfléchies, absorbées et transmises est toujours égales à un. Pour la surface terrestre, opaque, la transmittance (τ) est nulle et l'absorptance (α) est égale à l'émissivité (ε) selon la loi de Kirchhoff. En considérant le principe de conservation de l'énergie, l'émissivité de la bande MIR devient donc: $\varepsilon_3 = 1 - \rho = 1 - R_{3,a}$. La contribution terrestres de la luminance, incluant l'émissivité devient donc $L_{3,E} = (1 - R_{3,a}) * L_{3,B}$.

La luminance totale de la bande MIR, incluant la réflexion de l'énergie solaire et l'émission terrestre, peut alors être calculée par l'équation 4.14.

$$L_3 = \frac{R_{3,a} * E_3^0 * \cos\theta_s}{\pi * d_s^2} + (1 - R_{3,a}) * L_{3,B} \quad [--] (4.14)$$

Connaissant toutes les autres valeurs de l'équation 4.14, la réflectance du moyen infrarouge peut alors être calculé par l'équation 4.15.

$$R_{3,a} = \frac{L_3 - L_{3,B}}{(E_3^0 * \cos\theta_s / (\pi * d_s^2)) - L_{3,B}} \quad [--] (4.15)$$

La réflectance du moyen infrarouge n'est cependant pas sauvegardées dans les images L2 mais plutôt enregistrée dans un tableau en mémoire vive (RAM table). Cette information servira par la suite à détecter les nuages. C'est la luminance de la bande spectrale qui est sauvegardée dans l'image L. En multipliant la luminance par 600, les valeurs sont étalonnées de 0 à 1 023 (10 bits, entier), comme pour les autres bandes spectrales. Les résultats sont enregistrés dans la couche trois.

4.3.2.2 Corrections atmosphériques des bandes à ondes courtes (1 et 2)

Les corrections des effets dus à l'atmosphère dans la version de SPACE-II qui a été utilisée fait appel à une adaptation du modèle de transfert radiatif 5S (Tanré *et al.*, 1990). La version suivante du logiciel utilise plutôt les algorithmes de SMAC-V2, de Rahman et Dedieu (1994), une version rapide et paramétrée du modèle de transfert radiatif 5S. Pour les satellites ultérieurs à NOAA-14, la version SMAC-V4 (Berthelot et Dedieu, 1997), qui fait appel à un paramétrage du modèle de transfert radiatif 6S, est utilisée. Le calcul du transfert radiatif à travers l'atmosphère est, pour chacune des versions, basée sur l'équation 4.16:

$$R_a = t_g * \left(\rho_a + \frac{\tau(\theta_s) * \tau(\theta_v)}{1 - R_s * S_a} * R_s \right) \quad [--] (4.16)$$

où :

ρ_a , R_s	Réflectance atmosphérique et réflectance à la surface
S_a	Albédo sphérique de l'atmosphère (résultant de la diffusion de Rayleigh et de Mie) (--)
$\tau(\theta_s)$, $\tau(\theta_v)$	Transmittance totale de l'atmosphère selon les trajets optiques soleil-pixel (θ_s) et pixel-satellite (θ_v) (--)
t_g	Transmission gazeuse totale, incluant l'absorption par les gaz de l'atmosphère

La réflectance à la surface pour chacune des bandes spectrales peut alors être calculée par l'équation inverse :

$$R_s = \frac{R_a - t_g * \rho_a}{S_a(R_a - t_g * \rho_a) + t_g * \tau(\theta_s) * \tau(\theta_v)} \quad [--] (4.8)$$

La partie importante de cette méthode est de définir, pour chaque pixel, les cinq paramètres impliqués dans les équations 4.16 et 4.17 (R_a , S_a , $\tau(\theta_s)$, $\tau(\theta_v)$, t_g). Les mesures géométriques (θ_s , θ_v , φ_s , φ_v) sont obtenues à partir de la matrice ANGLES. La transmission gazeuse totale est calculée en fonction de la transmission de l'ozone, de l'oxygène et de la vapeur d'eau (Rahman et Dedieu, 1994). Le version de SPACE utilisant SMAC-V2 tiennent aussi compte la quantité d'aérosols dans l'atmosphère. (quantifiée par le trajet optique des aérosols à 550 nm, T_{550}).

Comme substitut aux inconnues (concentrations réelles et heure de passage), SPACE se base sur un ensemble de cartes périodiques globales qui illustrent les valeurs climatiques (ozone, oxygène, vapeur d'eau et T_{550}). La relation spatiale entre ces cartes et chacun des pixels est rendue possible grâce à la matrice IMG_GRID qui établie un lien entre les deux cartes et la date. La date des cartes utilisées est celle la plus rapprochée de la date de passage du satellite. Les cartes utilisées par SPACE-II sont celles décrites par Kerdiles (1997) mais leur origine est inconnue.

Les valeurs de réflectance obtenues (0,0 à 1,0) pour chacune des bandes à ondes courtes sont ensuite multipliées par 1 023 et enregistrées comme des entiers 10 bits sur la couche correspondantes de l'image L2 (5 bandes, entier). Les 6 bits inutilisés de chaque bande seront ensuite occupés par des « drapeaux ».

4.3.2.3 Détection des nuages et masque terre/eau

Cette étape comporte deux types de classification. Le premier type vise à classifier chacun des pixels en trois groupes: pixels sans nuages, pixels nuageux et pixels couverts de neige. Le second type de classification distingue les superficies terrestres des étendues d'eau. Cette étape est effectué entre le calibrage et les corrections atmosphériques (Figure 4.2). Pour cette raison, les réflectances des bandes spectrales du visible et du proche infrarouge,

mentionnées plus bas, se réfèrent aux valeurs au haut de l'atmosphère (R_a) et non à celles à la surface (R_s).

La détection des nuages s'effectue à l'aide de quatre tests. Un pixel est considéré sans nuages si les quatre tests sont négatifs. Si un ou plusieurs de ces quatre tests sont positifs, un cinquième test est effectué afin de distinguer les pixels nuageux des pixels couverts de neige. Les résultats de ces tests (0-1; non-oui) sont ensuite enregistrés dans les 6 bits des images L2 qui ne sont pas occupés par les 5 bandes de l'image. Les tests pour les nuages sont en fait une modification de la série de tests développée par Saunders et Kriebel (1988) alors que le test pour la neige est dérivé d'une procédure de Gesell (1989). La section qui suit décrit brièvement ces tests mais une description complète de ces tests sont disponibles dans Kerdiles (1997).

- Un premier test vise d'abord à détecter les nuages froids (altitude moyenne à élevée). Ce test est positif si la **température de brillance de la bande 4 ou 5** (selon la plate-forme NOAA) est **supérieure** à un certain **seuil**. Ce seuil varie selon le type de surface, la saison et la localisation.
- Un **test à seuil dynamique des bandes à ondes courtes** est ensuite effectué. Ce test n'est cependant pas effectué pour les pixels mixtes de la zone côtière. À partir des réflectances du spectre visible pour les surfaces terrestres et celles du proche infrarouge pour les mers et les océans, SPACE crée un histogramme duquel il extrait automatiquement des seuils pour la détection des nuages. Les histogrammes sont créés à partir d'un bloc de 32 pixels par 32 pixels (1 024 valeurs de pixel) entourant le pixel testé. Les basses réflectances sont associées aux pixels sans nuages alors que les fortes réflectances sont associées aux pixels nuageux. Ces seuils peuvent être modifiés par l'utilisateur au besoin. Un seuil thermique est ensuite appliqué pour prévenir les régions désertiques très réflectives d'être classifiées comme des nuages.
- Le troisième test est un simple **ratio** entre les **bandes spectrales 2 et 1** ($R_{a,NIR}/R_{a,VIS}$). Les pixels sont considérés nuageux si ce ratio oscille entre 0,75 et 1,1

correspondant à des valeurs de NDVI entre -0,143 et 0,048. Ce test est basé sur l'hypothèse que les plans d'eau et les surfaces terrestres sans nuages possèdent un ratio inférieur à 0,75 et supérieur à 1,1 respectivement. Ici aussi un test thermique est appliqué afin d'identifier les régions désertiques.

- Le quatrième test est effectué à l'aide de **l'infrarouge thermique** et a pour but de détecter les nuages de basse altitude et la brume. Ce test détecte en fait la plupart des nuages mais particulièrement les cirrus semi-transparents. Ce test est basé sur le fait que les nuages ont une plus grande différence de température ($T_4 - T_5$) que les surfaces terrestres et les plans d'eau sans nuages. Ceci serait dû à la grande différence d'émissivité des nuages dans ces deux bandes spectrales. Les pixels sont classifiés nuageux si la différence de températures dépasse un seuil. Ce seuil varie selon la T_4 et la masse d'air (m) où $m = 1/\cos\theta_v$.
- Finalement, un test pour la **neige** est appliqué sur les pixels dont un ou plusieurs des quatre tests pour les nuages se sont avérés positifs. Ces pixels sont identifiés comme étant couvert de neige si la réflectance du moyen infrarouge ($R_{a,3}$) est inférieure à 2 % et si au moins un des huit pixels voisins sont aussi couvert de neige.

La détection des nuages et des pixels enneigés est en soi une information importante mais elle sert aussi à l'allègement des procédures qui suivent. Son utilité principale réside dans l'amélioration de la procédure de « chip matching » et dans la sélection des pixels sans nuages pour la composition de la mosaïque journalière.

La classification finale entre pixels terrestres ou pixels couverts d'eau s'effectue seulement sur les pixels sans nuages. De cette manière, tous les pixels sont classés dans une des trois catégories suivantes: surface terrestre sans nuages (ou neige), surface d'eau sans nuages, et surface ennuagée. Cette catégorisation est effectuée en vue du « chip matching » vectoriel. Par défaut, les pixels sans nuages sont classifiés comme surface terrestre, sauf quand les quatre conditions suivantes sont simultanément remplies : $T_4 \geq 0^\circ\text{C}$; $R_{a,4} \leq 24,5\%$; $\text{NDVI}_a \leq 0,058$; $\text{NDVI}_a \leq 0,04$ ou $D \leq 266$ où $D = T_4$ (en K) – $R_{a,\text{NIR}}$ (en %).

4.3.2.4 « Chip matching » ou correspondance des points de contrôle

Une fois les trois matrices initiales (Level 1) sont créées, le processeur convertit ces images de Level 1 à Level 2 en appliquant des corrections radiométriques. Sur chacune des images L1, le « chip matching » est appliqué. Cette procédure vise à fournir les points de contrôle au sol qui serviront aux corrections géométriques et à la mise à jour des images L2. Basée sur les algorithmes de Muirhead et Malkawi (1989), cette procédure repose sur deux bibliothèques de micro-images (« chips »); une vectorielle, l'autre matricielle.

Les micro-images vectorielles sont composées de vecteurs qui délimitent certaines parties des rives du littoral et des lacs⁴. Chaque micro-image est conçue de 100 à 200 segments interconnectés, dont un est considéré comme le point de contrôle (« hot spot »). Ce dernier représente un point de repère facilement reconnaissable. Les micro-images matricielles sont quant à elles formées de 40 pixels par 40 pixels de la bande spectrale du proche infrarouge. Ces micro-images couvrent aussi des points de repère facilement détectables et ayant un fort contraste. Le point de contrôle, un pixel, est situé au centre de ces images. Celles-ci peuvent se présenter sous n'importe quelle projection et sont accompagnées de la matrice CHIP_GRID qui, pour chacun des pixels, contient la longitude et la latitude. De plus, ces deux types de bibliothèque sont accompagnés d'un fichier texte contenant toutes les informations auxiliaires.

La correspondance entre les micro-images vectorielles et les images L2 débute en définissant le pixel (colonne, ligne) de l'image L2 contenant le point de contrôle. Cette position n'est qu'un estimé obtenu en entrant la latitude et la longitude réelle du point de contrôle dans la matrice GEO_GRID L2. Autour de ce pixel central, une fenêtre de recherche de 70 pixels par 70 pixels est extraite. La micro-image est ensuite convertie en matrice dans la projection des images L2. Cette micro-image matricielle couvre 20 pixels par 20 pixels. La valeur 1 est attribuée aux zones littorales et la valeur 0 aux autres pixels. La fenêtre de recherche est aussi catégorisée de la même manière. La micro-image matricielle est ensuite systématiquement déplacée à l'intérieur de la fenêtre de recherche et pour chaque localisation, un indice de correspondance est calculé. Cet indice de

⁴ Le système WSGS72 avec coordonnées géographiques est utilisé

correspondance est calculé en sommant les valeurs 1 de chacune des fenêtres (recherche et micro-image). Lorsque les sommes correspondent, la position dans l'image L2 est considérée comme une vraie correspondance et servira de point de contrôle.

La correspondance entre les micro-images matricielles et les images L2 suivent un raisonnement semblable. Cette procédure n'est cependant effectuée que si la correspondance vectorielle n'a pas établi suffisamment de points de contrôle. Les micro-images matricielles sont transformées en une matrice de 40 pixels par 40 pixels dans la même projection que les images L2. La position approximative du centre de cette micro-image est ensuite évaluée. La fenêtre de recherche, extraite de la bande du proche infrarouge, est cependant de 200 pixels par 200 pixels. La micro-image matricielle (NIR) est ensuite systématiquement déplacée à l'intérieur de la fenêtre de recherche et pour chaque localisation, une corrélation matricielle est calculée à partir des valeurs des 1 600 pixels des deux fenêtres (recherche et micro-image). Une vraie correspondance est considérée pour la localisation dans l'image L2 ayant la valeur de corrélation avec la micro-image la plus élevée.

La procédure décrite ci-haut est plus compliquée que l'explication qui en est ici donnée. D'abord, pour chacune des micro-images, le déplacement de la micro-image à l'intérieur de la fenêtre de recherche se fait initialement pour 5 positions: centrale et déplacée d'une certaine distance dans les quatre directions. De plus, lorsqu'une vraie correspondance est trouvée, un ajustement plus précis, de précision sous-pixellaire est effectuée. Tel que mentionné précédemment, les résultats des tests sur les nuages sont aussi utilisés dans cette procédure. Lorsque la couverture nuageuse dépasse 90 %, la procédure n'est pas effectuée, ni la mise à jour des images L2. Les fenêtres de recherche ne sont traitées que si la couverture nuageuse et le ratio terre/eau ne dépasse pas un certain seuil. Finalement, la vraie correspondance n'est acceptée que si l'indice de correspondance ou la corrélation sont supérieures à des seuils minimums. Ces seuils peuvent de plus être modifiés selon les besoins de l'utilisateur.

À la fin de cette procédure, pour chacune des images L2, un fichier texte (MATCHES.TXT) est produit. Celui-ci contient la vraie longitude et la vraie latitude du

point de contrôle des micro-images et la position correspondante (colonne et lignes) sur l'image L2

Le résultat des étapes ci-haut mentionnées est une image en format SHARP1 à 5 bandes spectrales, appelée niveau 2 (Figure 4.2). Chaque bande spectrale est codée sur 16 bits. Dix bits sont alloués à l'image et 6 bits à l'information additionnelle, comme le masque des nuages. La dernière partie de SPACE met à jour les images L2, applique des corrections géométriques, ré-échantillonne les données et crée la mosaïque journalière de laquelle les images utilisées pour ce projet ont été tirées.

4.3.2.5 Corrections géométriques

Pour chacun des points de contrôle établis à l'étape précédente, la différence de position, en nombre de colonnes et de lignes, entre les vrais points de contrôle et ceux estimés sont d'abord calculés. Ce calcul est rendu possible grâce à l'information contenue dans les fichiers MATCHES.TXT. Ces différences de positions sont ensuite soumises à trois filtres différents qui ont pour but d'éliminer les données aberrantes. Ces trois tests sont la distance du mode univarié, la distance euclidienne bivariée de la moyenne générale et un filtre gaussien univarié.

Ensuite, les éphémérides sont actualisées et l'image L2 est mise à jour une première fois. Cette tâche est effectuée si l'information des TBUS a été trouvée et si au moins trois points de contrôle sont disponibles après le passage des filtres. SPACE suppose que les erreurs des matrices initiales sont principalement dues à deux paramètres orbitaux : l'heure centrale de passage du satellite (t_{sc}) et la longitude du nœud ascendant de l'orbite (Ω). L'horloge interne du satellite peut avoir une seconde d'erreur, ce qui se traduit par un déplacement orbital de 6 lignes ou 6,6 km au sol. Pour chacun des points de contrôle, un nouvel estimé des de t_{sc} et de Ω est calculé. Ceci s'effectue à l'aide de la vraie latitude, longitude, colonne et ligne du point de contrôle, en effectuant en sens inverse les équations du modèle orbital. Les autres paramètres de l'orbite sont supposés être corrects. Ce processus est répété pour tous les points de contrôle. À la fin, une moyenne des valeurs de t_{sc} et de Ω est calculée. Ces valeurs moyennes sont les éphémérides mises à jour. À l'aide de ces nouvelles

éphémérides, le modèle géométrique est recalculé afin de mettre à jour les matrices IMG_GRID et GEO_GRID.

Ces matrices sont toutefois toujours considérées imparfaites. Les erreurs résiduelles (d'altitude et de rotation du capteur) sont donc éliminées par régression statistique entre les points de contrôle. Au moins quatre points de contrôle, bien distribués à l'intérieur de l'image, sont nécessaires. Le degré d'agrégation des points de contrôle est évalué à l'aide d'un indicateur d'agrégation qui doit dépasser un seuil (3 par défaut). Si toutes les conditions sont remplies, pour chaque point de contrôle, une longitude et une latitude sont estimées en introduisant les vraies colonnes et les vraies lignes des points de contrôle dans la matrice IMG_GRID. La relation entre les vraies valeurs (latitude, longitude) et celles estimées est calculée par une régression polynomiale de premier à troisième ordre, selon le nombre de points de contrôle disponibles.

Puis, la matrice IMG_GRID est mise à jour en appliquant les polynômes sur toutes les valeurs de la matrice. Comme précédemment, la matrice GEO_GRID est aussi recréée par l'inversion de la nouvelle matrice IMG_GRID.

Finalement, les matrices mises à jour sont sauvegardées dans le répertoire L2. Les nouvelles éphémérides sont écrites dans le fichier de paramètres ainsi que dans un fichier auxiliaire qui reçoit aussi les coefficients polynomiaux. Les positions des points de contrôle (colonne et ligne d'un pixel) sur les images L2 sont sauvegardées (valeur 0 ou 1) sur le 16^e bit de la cinquième bande de l'image.

4.3.2.6 Composition de la mosaïque

La dernière étape de SPACE consiste à mettre à exécution les corrections géométriques et à créer la mosaïque journalière à l'aides des images L2 disponibles et qui se superposent partiellement. Pour chaque journée, le ré-échantillonneur crée un nouveau répertoire de Niveau 3 (Level 3, L3) à l'intérieur duquel se retrouvent les matrices et fichier (IMAGE, GEOG, ANGLES, LEADER) créés par le programme TEMPLATE. GEOG est déjà dans la projection et de la dimension voulue et ne nécessite donc aucun changement. Les matrices

ANGLES ET IMAGE sont encore vides, sauf pour le masque sauvegardé sur le 16^e bit de la bande 1.

Les images L2 sont considérées une à une et pour chacune, le ré-échantillonneur combine la matrice GEO_GRID avec la matrice GEOG (gabarit) pour créer une nouvelle matrice qui récupère, pour chacun des pixels du gabarit, les positions correspondantes de l'image L2 considérée. Pour éviter de devoir balayer le gabarit au complet, SPACE trace les limites de l'image L2 et seuls les pixels L3 où il y a un chevauchement sont inspectés. Pour chacun des ces pixels, les données (5 bandes et masques) des images L2 sont lues. L'utilisateur peut choisir entre deux méthodes de ré-échantillonnage : méthode du plus proche voisin (défaut) ou la convolution cubique. Ce choix est valide pour les données de l'image. Pour les masques toutefois, seule la méthode du plus proche voisin est utilisée.

Lorsque le pixel est situé dans la zone de chevauchement, plusieurs ensembles de valeurs, provenant de différentes images L2, peuvent être retenus. Le ré-échantillonneur choisit la meilleure image en utilisant les quatre critères suivants :

Remplace les valeurs L3 actuelles avec les valeurs de l'image L2 considérée,
SI (L3 est encore vide)
OU
SI(L3 est nuageux)
OU
SI(angle de vue L2 < angle de vue L3)
OU
SI((angle de vue L2 < angle de vue L3) ET NDVI2 > NDVI3)

Ainsi, lors de l'inspection d'un pixel de la mosaïque journalière, si les données de l'image L2 répondent à un de ces critères, ce sont ces valeurs qui entreront dans la composition de la mosaïque. La mosaïque journalière résultante de niveau 3 possède une résolution spatiale d'environ 1,1 km et couvre L'Europe entière. Comme pour le niveau 2, ces images possèdent cinq bandes sauvegardées en 16 bits. Les 10 premiers bits contiennent l'image et les 6 bits supplémentaires contiennent les masques. De plus, pour chacun des pixels, le

numéro d'identification de l'image L2 d'où les données sont prises est sauvegardé sur la bande 3 de l'image L3.

4.3.3 Sélection et acquisition des données satellitaires

Des mosaïques journalières comprises entre 1989 et 1994, les images ont été extraites pour la région de l'Andalousie lorsque la couverture nuageuse totale sur la région est inférieure à 50 % de l'aire du territoire et que l'angle de vue était inférieur ou égal à 30°. La zone extraite s'étend entre 36° à 39° nord et 7'30° ouest et 1'30° est. Au total, 903 images ont été sélectionnées pour les années 1989 à 1994. Le tableau 4.4 spécifie le nombre d'images retenues pour chaque année.

Tableau 4.4 - Le nombre d'images satellitaires retenues par année

Années	Nb d'images
1989	163
1990	137
1991	163
1992	148
1993	145
1994	147
Total:	903

Alors que les images sont nombreuses pendant la période estivale sèche, un nombre beaucoup plus restreint d'images journalières rencontrent le critère de 50 % de couverture nuageuse en hiver, lors de la saison plus humide (novembre à janvier). Il arrive alors que certaines décades ou certains mois n'ont aucune image. Comme il est évident que ces périodes ne représentent pas des situations de sécheresses, leur absence n'est pas si inquiétante. Toutefois, leur absence n'est pas non plus sans conséquence. En éliminant les mois où les conditions hydriques sont favorables, l'état de la végétation en situation où il n'y a aucun stress hydrique n'est pas tenu compte. Les conditions extrêmes ne sont donc pas nécessairement analysées et les résultats en seront donc biaisés.

B - PRÉPARATION ET TRAITEMENTS DES DONNÉES

4.4 Méthodologie

La méthodologie décrite dans cette section est simple (Figure 4.3). Globalement, elle consiste d'une part à comparer les indicateurs satellitaires retenus, soit le VCI et le TCI, à un indice de sécheresse fréquemment utilisé, le SPI. La comparaison est effectuée à l'aide d'une analyse de corrélation aux stations entre les séries temporelles des valeurs du VCI et du TCI par rapport aux valeurs du TCI. Une analyse de corrélation entre le TCI satellitaire et le TCI calculé à l'aide des données météorologiques est aussi effectuée.

Une analyse de l'évolution des indicateurs satellitaires à l'intérieur des classes d'utilisation du sol a aussi été effectuée. Cette analyse consiste à extraire l'évolution temporelle de la proportion des pixels de chacune des quatre catégories (0-35; 35-50; 50-75; 75-100) de VCI et TCI préconisées par Kogan (1990, 1995, 1997). Cette analyse est effectuée à partir des images mensuelles du VCI et du TCI, pour chacun des types d'utilisation du sol suivants: cultures permanentes, forêts, prés et pâturages, cultures non-irriguées et cultures irriguées.

Le SPI a été calculé à partir des données de précipitation mensuelle pour chaque station retenue et pour une période de trois mois qui inclue le mois courant et les deux mois précédents. Une période de trois mois permet de caractériser les effets saisonniers des changements de précipitation et reflète les conditions d'humidité à court ou moyen terme. Un programme en langage Fortran, téléchargé du site internet du NDMC (1996) en 1998 a été utilisé afin de calculer le SPI. Ce programme est maintenant disponible à partir du site internet de l'Université du Colorado (Colorado Climate Center, 2003). À partir des données de température maximale et minimale décadaire à chaque station, un $TCI_{station}$ a été calculé à l'aide de l'utilitaire Excel de Microsoft.

Les indicateurs satellitaires, quant à eux, sont d'abord calculés sur une période décadaire, pour chaque décennie de chacune des années. Une série de programmes en langage C ont été créés ou modifiée (Vogt, 1993; 1994) et utilisés afin de créer les 180 images décadiques des indicateurs satellitaires. De ces images, les valeurs des indicateurs ont été extraites pour des

fenêtres de 3 X 3 pixels (11 km^2) autour des stations retenues. La moyenne de ces valeurs est ensuite calculée pour une période mensuelle (incluant les deux mois précédents), comparable à la période utilisée pour calculer le SPI.

C'est la corrélation linéaire de Pearson (Gilbert & Savard, 1992) qui est utilisée afin de comparer les indicateurs satellitaires et le SPI. Les données corrélées proviennent majoritairement de la période s'étendant d'octobre 1989 à septembre 1993, et dépendent surtout de la disponibilité des valeurs du SPI. Les corrélations ont été effectuées à partir de quatre groupes de données.

- Le premier groupe inclut toutes les valeurs disponibles des séries temporelles des indicateurs. Ces corrélations ont été effectuées pour analyser la relation VCI/SPI, TCI/SPI et TCI_{station}/TCI.
- Le second groupe ne contient que les mois hivernaux et écarte les mois de la saison sèche, soit de juin à novembre. En éliminant la saison sèche, les périodes où les écarts entre les valeurs maximales et minimales sont petits sont éliminées. Ces faibles écarts, qui forment le dénominateur des indicateurs VCI et TCI, rendent ces derniers plus sensibles à de petites variations du nominateur et causent une forte variation de l'indicateur malgré une faible variation des conditions (VCI ou TCI) de la période à l'étude. Ces corrélations ont été appliquées entre le VCI et le SPI et entre le TCI et le SPI.
- Un troisième groupe ne garde que les mois de la saison sèche. Cette relation est particulièrement intéressante pour l'analyse de la relation entre le TCI et le SPI. En hiver, les variations climatiques (vents, température) influencent les valeurs du TCI qui devient plus variable. En été, les conditions climatiques stables font en sorte que le TCI est plus apte à représenter les conditions thermiques de la surface.
- Le dernier groupe introduit un décalage entre la valeur du SPI et les valeurs du VCI lors de la corrélation. Des décalages de une à six décades (2 mois) sont utilisés afin d'évaluer le retard entre les changements du VCI suite à une variation du SPI.

Les résultats de corrélation ont ensuite été analysés en tenant compte de l'utilisation du sol, du type de végétation, de l'élévation ainsi que de l'étude de Vogt *et al.* (1996) qui fait état de la représentativité de certaines des stations météorologiques andalouses.

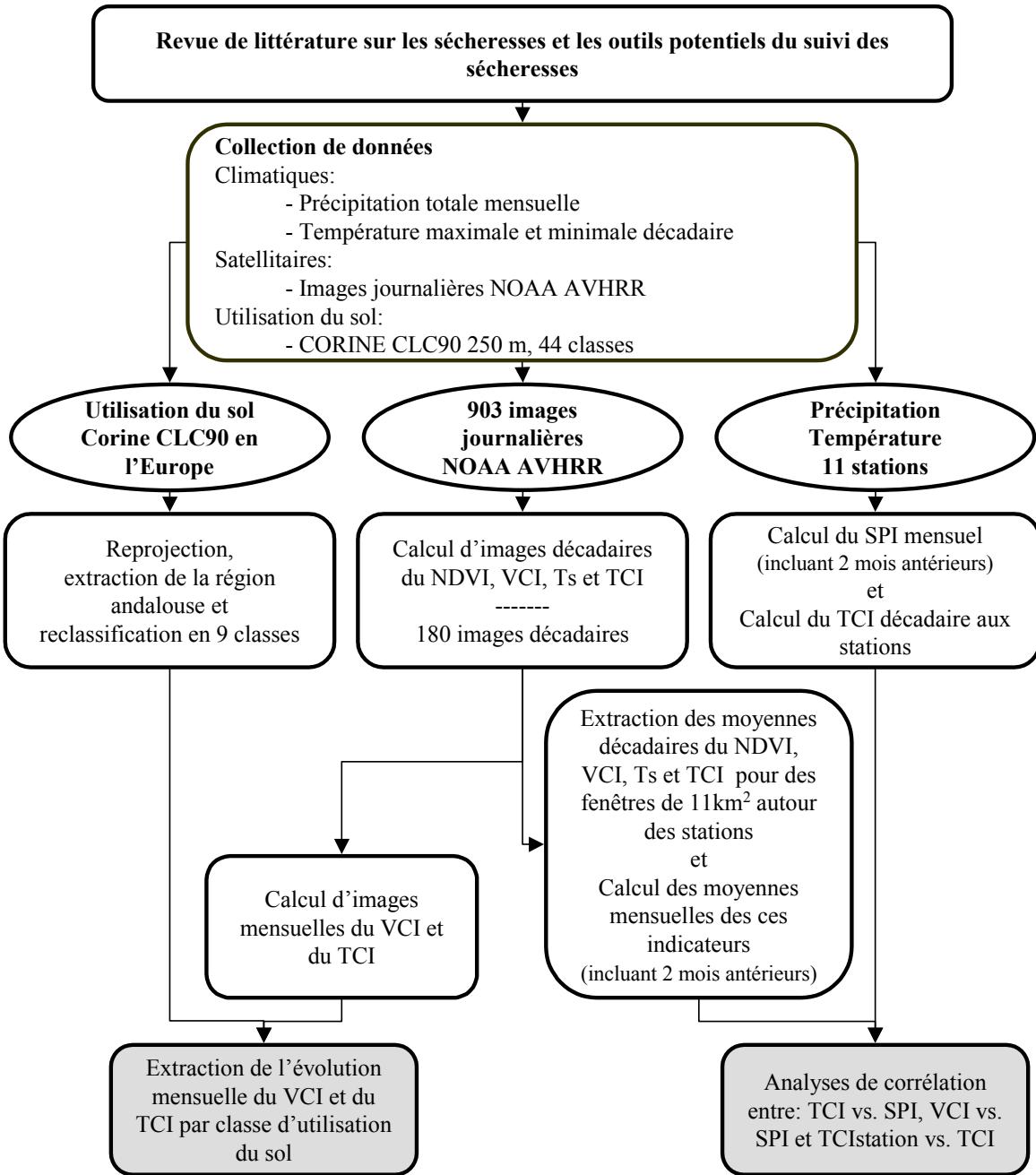


Figure 4.3 - Résumé de la méthodologie utilisée

4.5 Calcul du SPI et du TCIstation

Un programme en langage FORTRAN (Colorado Climate Center, 2003) a été utilisé pour calculer le SPI. À partir des données de précipitation mensuelle, le programme calcule les valeurs du SPI pour des périodes de 3, 6, 12 et 24 mois mouvants. Seule la période de 3 mois (mois courant et deux mois précédents) a été retenue pour effectuer les analyses de corrélation. Comme la base de donnée utilisée fournit des données journalières de précipitation, un script SQL a été utilisé afin d'extraire les données mensuelles de la base de données. Les mois qui affichaient des jours manquants ont été éliminés. Le programme du SPI utilise des valeurs de précipitation mensuelle continue et s'interrompt lorsque les précipitations d'un mois manquent. Pour les stations où les données sont discontinues, le SPI l'est aussi. Les résultats mensuels (incluant les deux mois précédents) ont été transférés dans un fichier Excel (un par station) dans lequel se trouvent aussi les valeurs décadiques des indicateurs VCI et TCI.

Parallèlement, les données de température maximales et minimales décadiques extraites de la base de données météorologiques de l'AIS ont servies pour calculer un TCI décadaire aux stations. Ces valeurs de TCI station ont aussi été introduites dans les fichiers Excel comportant les valeurs des autres indicateurs.

4.6 Développement des indicateurs satellitaires

Une chaîne de traitements semi-automatique des images Level 3 a été développée à l'aide de programmation en C. Ces programmes ont été créés ou adaptés de programmes créés par Vogt (1993, 1994) à l'IAS du CCR. La figure 4.4 illustre le processus de transformation des images satellitaires.

Deux lignes directrices forment la chaîne. Toutes deux utilisent à la base les mêmes 903 images Level 3 décrites précédemment. La première partie (A) a comme but de créer des images décadiques historiques des valeurs minimales et maximales du NDVI et de la température de surface (Ts). Les différences maximales du NDVI et de Ts sont aussi sauvegardées. Le programme crée 36 images décadiques. Dans le cas présent, les valeurs historiques ont été tirées des images comprises entre 1989 et 1994. Les valeurs minimales

et maximales décadiques du NDVI seront utilisées pour le calcul du VCI et celles de la température de surface pour le calcul du TCI. La partie A de cette chaîne de traitement comporte deux programmes distincts: DECADE et MM_TS_NDVI. DECADE utilise une liste, en format ascii, de toutes les images Level 3 journalières. Le but de ce programme est de séparer cette liste en 36 fichiers, représentant chacun une décennie. Chacun de ces fichiers contient les noms des images appartenant à la décennie en cours. Par exemple, le fichier DECADE03 contient le nom des images journalières prise entre le 21 janvier et le 31 janvier de toutes les années comprises entre 1989 et 1994. Le programme DECADE produit aussi un fichier appelé STAT. Ce fichier contient le nom des décennies (DECADE01 à DECADE36) ainsi que le nombre d'images qui entre dans la décennie.

Le second programme, MM_TS_NDVI, utilise les fichiers créés par DECADE ainsi que les 903 images Level 3. Pour chaque décennie, ce programme ouvre le fichier STAT, lit le nom de la décennie (ex. DECADE03) et le nombre d'images dans cette décennie. Ensuite il ouvre le fichier DÉCADAIRES (DECADE03) et y lit le nom des images journalières. Il ouvre ensuite tour à tour ces images, calcule le NDVI et Ts puis stocke ces valeurs dans quatre images temporaires représentant les valeurs minimales et maximales du NDVI et de Ts. À chaque fois qu'une image est ouverte, ses valeurs du NDVI et de Ts sont comparées à celle contenues dans les images temporaires. Si ces valeurs sont plus faibles que les valeurs minimales ou plus élevées que les valeurs maximales, elles remplacent alors les valeurs des images temporaires. Lorsque toutes les images de la décennie ont été lues, le programme calcule la différence entre les valeurs maximales et minimales du NDVI et de Ts. Le résultat de ce programme est une série de 36 images décadiques historiques ayant six bandes: 1). NDVI minimum, 2) NDVI maximum, 3) différence de NDVI, 4) Ts minimum, 5) Ts maximum et 6) différence de Ts.

La seconde partie de la chaîne (B) vise à créer les images décadiques du VCI et du TCI, pour chaque décennie de chaque année. Cette partie est constituée de 2 programmes: MVC_lv3 et MVC_VCI. Le programme MVC_lv3 est un utilitaire qui calcule les valeurs maximales (MVC - Maximum Value Composite) du NDVI et de Ts d'une décennie. Les 903 images Level 3 journalières ainsi qu'un fichier ascii contenant la liste des noms des images

Level 3 journalières faisant partie de cette décennie sont requises par ce programme. Contrairement aux deux autres programmes précédents, MVC_lv3 n'est pas complètement automatisé. Il est donc nécessaire d'entrer le nom des fichiers ascii un à la fois. Dans le cas présent, MVC_lv3 a été utilisé 180 fois, une fois pour chaque décennie, de chaque année pour lesquelles des images étaient disponibles. Pour chaque décennie, le programme ouvre les images journalières, calcule le NDVI et Ts, puis stocke les valeurs maximales dans des images temporaires. À chaque fois qu'une image est ouverte, ses valeurs du NDVI et de Ts sont comparées à celle contenues dans les images temporaires. Si ces valeurs sont plus élevées, elles remplacent celles de l'image temporaire. Le résultat de ce programme est une série de 180 images à quatre bandes: 1) MVC Ts, 2) MVC NDVI. Les bandes trois et quatre contiennent les indices de végétation SAVI et GEMI que ce programme calcule aussi.

MVC_VCI est le programme qui calcule les valeurs décennales du VCI et du TCI. Les intrants sont les 180 images contenant les valeurs maximales décennales (MVC) et les 36 images des valeurs minimales et maximales historiques du NDVI et de Ts. À partir des images décennales, MVC_VCI recueille le NDVI et le Ts de la décennie à l'étude. Ce sont, respectivement, le NDVI et le Ts des équations 4.1 et 4.3. À partir des 36 images décennales historiques, les valeurs maximales et minimales historiques du NDVI et de Ts sont lues. Ce sont les valeurs $NDVI_{min}$ et $NDVI_{max}$ de l'équation 4.1 et T_{Smin} et T_{Smax} de l'équation 4.3. Le résultat est une série de 180 images à six bandes: 1) MVC Ts, 2) MVC NDVI, 3) MVC SAVI, 4) MVC GEMI, 5) VCI et 6) TCI. Toutes les images créées par la chaîne de traitement sont sauvegardées en format ERDAS 7.4 (.lan) (Leica Geosystems, 2006).

Un dernier programme, PROFILE, a comme but d'extraire de la série temporelle des images, les valeurs moyennes des indicateurs satellitaires pour une fenêtre de 11 km^2 centrée autour des stations météorologiques. La moyenne est obtenue de la valeur du pixel central et des huit pixels l'entourant. Ce programme n'est pas automatisé et doit être répété pour chacune des 11 stations météorologiques. Le résultat est un fichier ascii avec les séries temporelles des indicateurs satellitaires.

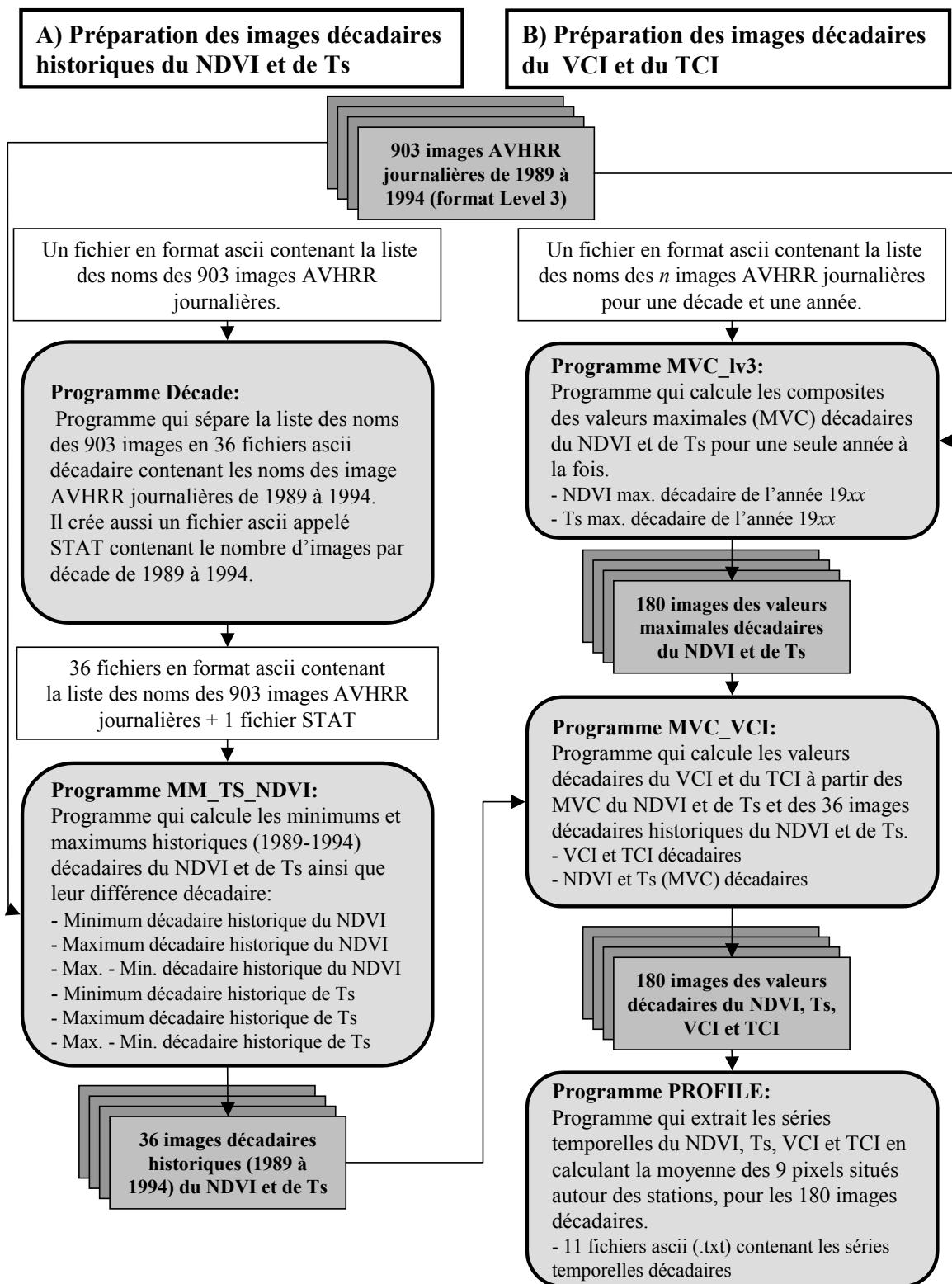


Figure 4.4 - Chaîne de préparation des images des indicateurs satellitaires

4.6.1 Calcul du VCI

Le VCI est un indice de végétation dérivé des valeurs maximale et minimale du NDVI. Le NDVI est calculé à partir des réflectances des bandes spectrales 1 et 2 (rouge et proche infrarouge) de AVHRR, selon la formule 4.1:

$$NDVI = \frac{PIR - Rouge}{PIR + Rouge} \quad [--] \quad (4.1)$$

où:

PIR	Réflectance de la bande 2 de AVHRR (--)
Rouge	Réflectance de la bande 1 de AVHRR (--)

Le NDVI est calculé par les programmes MM_TS_NDVI et MVC_lv3. À chaque fois qu'une image est ouverte par ces programmes, le NDVI est calculé et stocké dans une image temporaire (ou virtuelle). Alors que MM_TS_NDVI crée 36 images contenant les valeurs minimales et maximales historiques du NDVI, MVC_VCI crée une images contenant les valeurs maximales d'une décennie pour une année (ex. décennie 03 de l'année 1990). Dans le cas présent, 180 images ont été créées. De ces deux groupes d'images sont tirées les valeurs nécessaires au calcul du VCI (équation 4.2)

$$VCI = \frac{100(NDVI - NDVI_{min})}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad [--] \quad (4.2)$$

où :

NDVI	NDVI de la période étudié (--)
NDVI _{min}	NDVI minimum historique de la période étudié (--)
NDVI _{max}	NDVI maximum historique de la période étudié (--)

Le NDVI de la période étudiée (NDVI), la décennie, est tiré des 180 images MVC du VCI. Les valeurs maximales et minimales historiques (NDVI_{min} et NDVI_{max}) de la décennie sont quant à elles tirées des 36 images décennales.

Les valeurs du VCI varient entre 0 et 1 et sont sauvegardées de 0 à 100 en 8 bits. Un VCI près de zéro reflète un NDVI qui se rapproche du NDVI minimum un VCI près de 1 reflète un NDVI qui se rapproche du NDVI maximal. Plus simplement, les valeurs basses du VCI représentent des conditions de stress en eau alors que les valeurs élevées du VCI représentent des conditions favorables. Plusieurs auteurs ayant utilisé le VCI pour le suivi

des sécheresses ont conclu que des conditions de sécheresse sont en place lorsque le VCI est inférieur à 35 (Kogan, 1997; Kogan 1995; Kogan et al., 2004).

4.6.2 Calcul du TCI

De manière similaire au VCI, le TCI est un indicateur dérivé de la température de surface (T_s). Celle-ci est obtenue à partir de la température de brillance des bandes spectrales 4 et 5 de AVHRR. L'algorithme de Coll *et al.* (1994) (équation 4.3) a été utilisé pour la dériver.

$$T_s = T_4 + A(T_4 - T_5) + B \quad [K] \quad (4.3)$$

où:

T_4 et T_5 sont les températures de brillances de canaux 4 et 5

$$A = 1,2 + 0,58(T_4 - T_5) \quad (--)$$

$$B = 0,51 + 40(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon \quad (--)$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2 \quad (--)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5 \quad (--)$$

où :

ε_4 et ε_5 sont les émissivités des bandes 4 et 5

β est un coefficient qui diminue selon le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère (--)

T_s est calculé par les programmes MM_TS_NDVI et MVC_lv3. À chaque fois qu'une image est ouverte par ces programmes, T_s est calculé et stocké dans une image temporaire. Alors que MM_TS_NDVI crée 36 images contenant les valeurs minimales et maximales historiques de T_s , MVC_VCI crée une image contenant les valeurs maximales d'une décennie pour une année (ex. décennie 03 de l'année 1990). Comme pour le NDVI, 180 images ont été créées. De ces deux groupes d'images sont tirées les valeurs de T_s nécessaires au calcul du TCI (équation 4.4)

$$TCI = \frac{100(T_{S\max} - T_s)}{(T_{S\max} - T_{S\min})} \quad [--] \quad (4.4)$$

où :

T Température de surface de la période étudié (K)

$T_{S\max}$ Température de surface maximale historique de la période étudiée (K)

$T_{S\min}$ Température de surface minimale historique de la période étudiée (K)

La température de surface de la période étudiée (T_s , équation 4.4), est tirée des 180 images MVC de T_s alors que les valeurs maximales et minimales historiques ($T_{s\max}$ et $T_{s\min}$) de la décennie sont quant à elles tirées des 36 images décadiques.

Les valeurs du TCI varient aussi entre 0 et 1 et sont sauvegardées de 0 à 100 en 8 bits. Un TCI près de zéro reflète un T_s qui se rapproche de T_s maximum et un TCI près de 1 reflète un T_s qui se rapproche de T_s minimum. Plus simplement, les valeurs basses du TCI représentent des conditions de stress en eau alors que les valeurs élevées du TCI représentent des conditions où il n'y a pas de stress hydrique. Dans la formulation de cet indicateur, les valeurs de T_s et $T_{s\max}$ sont inversés par rapport à NDVI et $NDVI_{\max}$ dans la formulation du VCI. La raison est fort simple. Les deux indicateurs évaluent la situation (NDVI ou T_s) par rapport à la situation qui représente les conditions sèches. Dans le cas du NDVI, c'est la valeur minimale qui est indicative d'un état de la végétation moins favorable alors que pour la température de surface, ce sont les températures maximales qui sont indicatives de conditions de stress hydriques. En formulant ainsi les deux indicateurs, leur interprétation se fait de la même manière. Une valeur faible indique un stress et une valeur élevée indique des conditions favorables.

4.6.3 Masques pour l'océan, les nuages et autres erreurs

Les images Level 3 utilisées sont codées sur 16 bits pour chaque bande spectrale. Dix bits sont utilisés pour les valeurs de l'image et 6 bits pour de l'information supplémentaire comme les différents masques.

Quatre masques sont sauvegardés sur les images Level 3:

1. masque de niveau 2; données disponible ou non (codé info != 0)
2. masque terrestre; identifie les pixels terrestres (codé terre = 32768)
3. masque des nuages; identifie les nuages (codé nuage = 8192)
4. masque de l'angle de balayage

Comme les images résultantes sont codées sur 8 bits, il n'est pas possible de garder l'information de la même manière. Les pixels qui n'ont aucune information valide sont codés 252, les pixels d'océan sont codés 254 et les pixels de nuages sont codés 255.

Si un pixel est codé nuage (255), océan (254) ou non valide (252), il est exclu du calcul de la valeur moyenne des indicateurs autour des stations.

4.6.4. Calcul de l'évolution de la série temporelle des indicateurs satellitaires

Afin d'évaluer la progression des indicateurs de sécheresse entre 1989 et 1994, les images décadiques ont été recalculées mensuellement à l'aide du logiciel TNTMIPS v6.6 (Microimages, 2006). Comme le SPI, les valeurs mensuelles du VCI et du TCI incluent les valeurs des deux mois précédents. Les images ont ensuite été classifiées en quatre classes de VCI et de TCI: 1) 0-35; 2) 35-50; 3) 50-75 et 4) 75-100. Les valeurs de moins de 35 sont représentatives de conditions de sécheresse (Kogan 1997; Kogan 1995); la classe 35-50 représente des conditions normales à sèches; la classe 50-75, des conditions normales à favorables et 75-100, des conditions très favorables.

Les 138 images créées ainsi que l'image de l'utilisation du sol à neuf classes, ont ensuite été importées dans ArcView 3.2 (ESRI, 2006). La procédure « Tabulate Area » a été utilisée afin de créer un tableau qui donne le nombre de pixel des classes du VCI et du TCI (1 à 4) à l'intérieur des classes d'utilisation du sol pour chaque mois. Les informations ont ensuite été transférées dans un fichier Excel afin de transformer le nombre de pixel en pourcentage, par classe d'utilisation du sol. Six utilisations du sol ont été retenues: cultures permanentes, forêts, prés et pâturages, cultures non-irriguées et cultures irriguées. Des figures de l'évolution temporelle du pourcentage de représentation des 4 classes de VCI et TCI ont finalement été créées.

4.7 Facteurs limitatifs associés à la méthodologie

Plusieurs facteurs peuvent limiter la portée des résultats et leur interprétation. Ces facteurs proviennent tant des données météorologiques et satellitaires que du choix des indicateurs et de la méthodologie utilisée.

Facteurs météorologiques

Un historique de données trop court pour l'utilisation dont on veut en faire est un premier facteur. En utilisant des stations ayant mois de 30 ans de données, on ne possède pas nécessairement un portrait temporel global des conditions qui prévalent à la station. Une valeur basse ou haute du SPI sur une période de 10 ans peut en réalité représenter une situation normale à long terme. Cependant, très peu de stations en Andalousie possèdent un historique de 30 ans et il est nécessaire de sélectionner certaines stations ayant un historique plus court afin d'obtenir une couverture spatiale plus complète.

De plus, les bases de données météorologiques sont souvent incomplètes ou certaines valeurs sont parfois erronées. Les trous dans les séries temporelles rendent le calcul des indicateurs, comme le SPI, plus difficile, morcelé et moins représentatif et les valeurs erronées créent un portrait faussé des conditions à la station. Malheureusement, les valeurs erronées sont souvent difficiles à détecter.

Facteurs satellitaires.

Plusieurs limites sont associées aux caractéristiques radiométriques et géométriques du capteur satellitaire et de son orbite.

AVHRR est un capteur à grand angle ($55,4^{\circ}$). Ceci permet une couverture du même territoire quatre fois par jour mais engendre une perte au niveau de la résolution spatiale. Celle-ci, d'environ 1 km par 1 km au nadir atteint jusqu'à 2,4 km X 6,9 km en bordure de la trace. Cette augmentation de la grandeur du pixel avec l'angle de vue engendre un chevauchement des pixels et une perte de précision. Afin de restreindre ces inconvénients, les pixels sélectionnés pour créer les images proviennent d'un angle inférieur à 30° .

De plus, l'anisotropie de la réflectance des surfaces engendre un biais supplémentaire. Comme l'angle soleil-surface-capteur varie considérablement à l'intérieur de la trace comme dans le temps, il est essentiel de considérer cette limite lors de l'interprétation des valeurs.

La différence de longueur de parcours de l'onde dans l'atmosphère affecte également la transmission. Il existe une distorsion non-linéaire entre les valeurs des indicateurs de végétation calculés par satellite et ceux calculés à partir de valeurs au sol. Au-delà d'un angle de vue de 25°, la contribution de l'atmosphère augmente et les valeurs de NDVI en bordure la trace peuvent atteindre 0,2 unités de moins qu'au nadir (Vogt, 1995).

Comme la fréquence de passage du satellite NOAA 11 est de 2 fois par jour avec un cycle de 9 jours, l'heure de passage du satellite au-dessus d'une surface varie. Ceci entraîne donc une variation de la réflectance des surfaces en fonction de la géométrie de visée. De plus, l'heure nominale de passage des satellites NOAA varie de 30 minutes par année. Sur la période ici étudiée (1989 à 1992), il en résulte donc un changement d'environ deux heures.

Certains facteurs d'ordre radiométrique reliés au capteur AVHRR sont également limitatifs. Alors qu'il existe à bord du capteur un mécanisme de calibration des bandes spectrales thermiques qui mesure régulièrement l'espace lointain et certains corps noirs dont la température de brillance est connue, aucun mécanisme semblable n'existe pour les bandes spectrales du visible et de l'infrarouge. C'est la chaîne de traitement SPACE qui s'efforce de corriger la dégradation du signal ainsi que les facteurs qui influencent la réponse des surfaces.

Cette chaîne de traitement des images AVHRR laisse toutefois certaines erreurs. Par exemple, des lignes sont apparentes sur quelques images de température de surface Level 3. Ces erreurs proviennent vraisemblablement d'une défaillance d'une ou plusieurs des barrettes du capteur et persiste malgré les traitements effectués par le logiciel SPACE. Les couvertures nuageuses légères ne semblent pas non plus être totalement détectées par la chaîne de traitement. Les valeurs des indicateurs satellitaires apparaissent alors plus basses qu'en réalité. De plus, les bandes spectrales thermiques d'AVHRR saturent à 47°C (Vogt, 1992) et les températures supérieures ne sont tout simplement pas détectées. Les températures de cet ordre sont fréquentes pendant la période sèche en Andalousie et leur exception dans cette analyse amène une source d'erreur additionnelle.

Même si l'Andalousie est une région relativement bien couverte par les données satellitaires, certaines décades sont plutôt mal représentées car aucune ou seulement peu d'images les composent. Ces images manquantes se retrouvent majoritairement pendant la période hivernale humide, où le suivi de la végétation agricole est important.

Facteurs reliés à la méthodologie

Compte tenu de la variété des définitions de ce qu'est une sécheresse, il existe aussi plusieurs types d'indicateur de sécheresse. Le choix du SPI sur 3 mois permet de visualiser les variations saisonnières des précipitations alors que les indicateurs de sécheresses calculés sur 10 jours au départ représentent l'effet des variations pluviométriques sur la végétation. Toutefois, les variations du NDVI peuvent aussi être dues à d'autres facteurs que la sécheresse. Un surplus hydrique ainsi que les ennemis des cultures (parasites, insectes, etc.) peuvent dans certains cas aussi amener une diminution du NDVI, et donc du VCI.

La nature différente des 2 types d'indicateurs utilisés fait aussi en sorte que la comparaison SPI/VCI et SPI/TCI n'est pas directe et que les corrélations n'atteindront jamais un seuil très élevé. De plus, une corrélation linéaire faible n'exclut pas la possibilité d'une relation autre que linéaire puisque les caractéristiques des sols ou des plantes peuvent influencer la réponse du VCI et du TCI.

Chapitre V – Résultats

5.1 Régime pluviométrique

Comme mentionné précédemment, l'Andalousie est un territoire comportant un régime pluviométrique à deux saisons; une saison sèche où les précipitations sont très basses, voire nulles en certains endroits et une saison pluvieuse où le volume des précipitations varie grandement selon la région. Pendant les mois estivaux, les précipitations sont toujours très basses. Les pluies hivernales (novembre à avril) possèdent donc un effet crucial sur le bilan hydrique annuel puisque c'est pendant cette période que les réserves hydriques sont renouvelées. De plus, comme l'hiver est la saison des cultures, un manque de précipitation durant cette période peut s'avérer désastreux.

Due à la grande variabilité spatiale du territoire (physiographie, pédologie, utilisation du sol) ainsi qu'aux différentes masses d'air qui touchent ce territoire, le régime pluviométrique andalou varie grandement tant dans le temps que dans l'espace. Le tableau 5.1 présente une synthèse du régime pluviométrique à chacune des stations retenues dans le cadre de cette étude. Ce tableau donne une idée des variations temporelles (précipitations mensuelles minimales et maximales) et spatiales des précipitations andalouses (moyenne des précipitations totales annuelles). Pour chacune des stations, les mois desquels sont tirées les moyennes mensuelles minimales et maximales sont indiqués. On peut clairement remarquer que les mois les plus secs sont juillet et août alors que novembre et décembre détiennent les plus hauts niveaux de précipitation. Cette tendance est clairement visible sur les figures de pluviométrie mensuelle moyenne retrouvées plus loin (figure 5.2).

Des huit zones climatiques discutées par Bosque Maurel *et al.* (1991), seulement trois zones types peuvent être distinguées par interpolation spatiale des données aux stations météorologiques utilisées. Dû au nombre restreint de celles-ci, certaines régions de haute pluviométrie (figure 5.1b), comme celles de la Sierra del Pinar (sud-ouest), de la Sierra de la Sagra (nord-est) et de certaines zones de la Sierra Morena (nord-ouest), ne peuvent être distinguées alors qu'elles apparaissent clairement sur les images du NDVI et moindrement sur celle du VCI (figures 5.1c et 5.1d). On peut toutefois remarquer, à l'aide de la figure

5.1a, une diminution des précipitations suivant l'axe nord-ouest sud-est. Cette carte a été obtenue par krigeage (type linéaire, échelle:2,17; longueur:28400 m) (Goovaerts, 1997) des précipitations totales annuelles retrouvées au tableau 5.1 à l'aide du logiciel Surfer v.6.04 (Golden Software inc., 1997). Cette illustration présente trois régions pluviométriques: A, B et C. La figure 5.2, présentée plus loin, illustre les distributions des précipitations mensuelles moyennes calculées à partir des données disponibles pour chacune des stations. Cette figure permet de comparer le régime pluviométrique des différentes stations. L'échelle utilisée est la même à toutes les stations afin de mieux visualiser les différences régionales.

Tableau 5.1 - Régime pluviométrique moyen des 11 stations retenues

Groupe	Station	Moyenne mensuelle maximale (mm)	Moyenne mensuelle minimale (mm)	Moyenne des précipitations totales annuelles (mm)
A	4524	107 (décembre)	3 (juillet)	779
A	4515	159 (janvier)	6 (juillet)	1 025
B	4258	74 (décembre)	4 (juillet)	565
B	8391	92 (décembre)	3 (juillet)	440
B	5402	80 (décembre)	4 (août)	525
B	60972	93 (novembre)	3 (août)	610
B	6201	76 (novembre)	2 (août)	439
B	6249	63 (novembre)	1 (juillet)	413
B	6258	72 (décembre)	4 (juillet)	495
B	6308	79 (novembre)	5 (juillet)	587
C	6327	37 (janvier)	0 (juillet)	296

La région A, située au nord-ouest comprend les stations d'Aroche (4524) et de Galaroza (4515). Ces stations, situées à une altitude de 571 m et 554 m respectivement, sont assujetties aux montées orographiques des vents humides provenant de l'Atlantique. Cette région reçoit donc des précipitations abondantes, soit 779 mm par année en moyenne à Aroche et 1 025 mm à Galaroza. La distribution des précipitations totales mensuelles (figure 5.2) est marquée par une grande disparité entre les fortes pluies hivernales (novembre à janvier) et les faibles pluies estivales, particulièrement de juillet et août.

À l'extrême sud-est de l'Andalousie, la région d'Almería (C) est la plus sèche de toute l'Europe, avec des précipitations totales annuelles de seulement 296 mm à Níjar (6327). Les montagnes Bétiques offrent une barrière aux fronts humides en provenance de l'Atlantique qui procurent la majorité des précipitations en Andalousie. Par conséquent, les pluies sont rares dans la région d'Almería. De plus, l'anticyclone des Açores réchauffe en été les sols et cause une subsidence des masses d'air chaud qui repoussent les nuages qui pourraient passer au-delà des montagnes. Ceci fait en sorte que la distribution des précipitations mensuelles moyennes à Níjar sont plus homogènes qu'aux autres stations. Les précipitations hivernales sont de moins de 40 mm et celles en été sont parfois nulles (figure 5.2). Toutefois, les pluies sont irrégulièrement réparties sur environ 30 jours et jusqu'à 40 % des précipitations annuelles peuvent tomber en 24 heures seulement.

Entre ces deux régions très distinctes se devine une région aux précipitations variables où la majorité des stations utilisées sont situées. La délimitation de cette zone est toutefois plus imprécise car plusieurs facteurs, comme la topographie, l'ouverture du terrain à l'Atlantique ou la localisation à proximité de la côte influencent la distribution des isohyètes. On remarque toutefois une certaine démarcation entre la région sud et sud-ouest qui fait face à l'Atlantique et à la Méditerranée et la région nord, à l'intérieur des terres (figure 5.1a).

Les stations de Séville (8391) et de Cordoba (5402) sont typiques du climat semi-continental d'été chauds. Leur position, dans la vallée du Guadalquivir, les rend vulnérables à la pénétration des fronts provenant de l'Atlantique, surtout en hiver mais aussi en été. Les mois hivernaux d'octobre à janvier possèdent les précipitations maximales alors qu'en été les précipitations sont très faibles (figure 5.2).

Les stations d'Aldea de Cuenca (4258) et d'Archidona (60972), situées à 421 m et 700 m d'altitude, comme les stations de haute pluviométrie du Nord-Ouest, sont typiques du climat océanique de montagne moyennes. Toutefois, leur éloignement de l'Atlantique fait en sorte que les précipitations annuelles totales sont plus faibles (565 mm et 610 mm). Comme partout en Andalousie, ces stations reçoivent la majorité de leurs précipitations

d'octobre à janvier. Toutefois, les précipitations printanières y sont non-négligeables (figure 5.2).

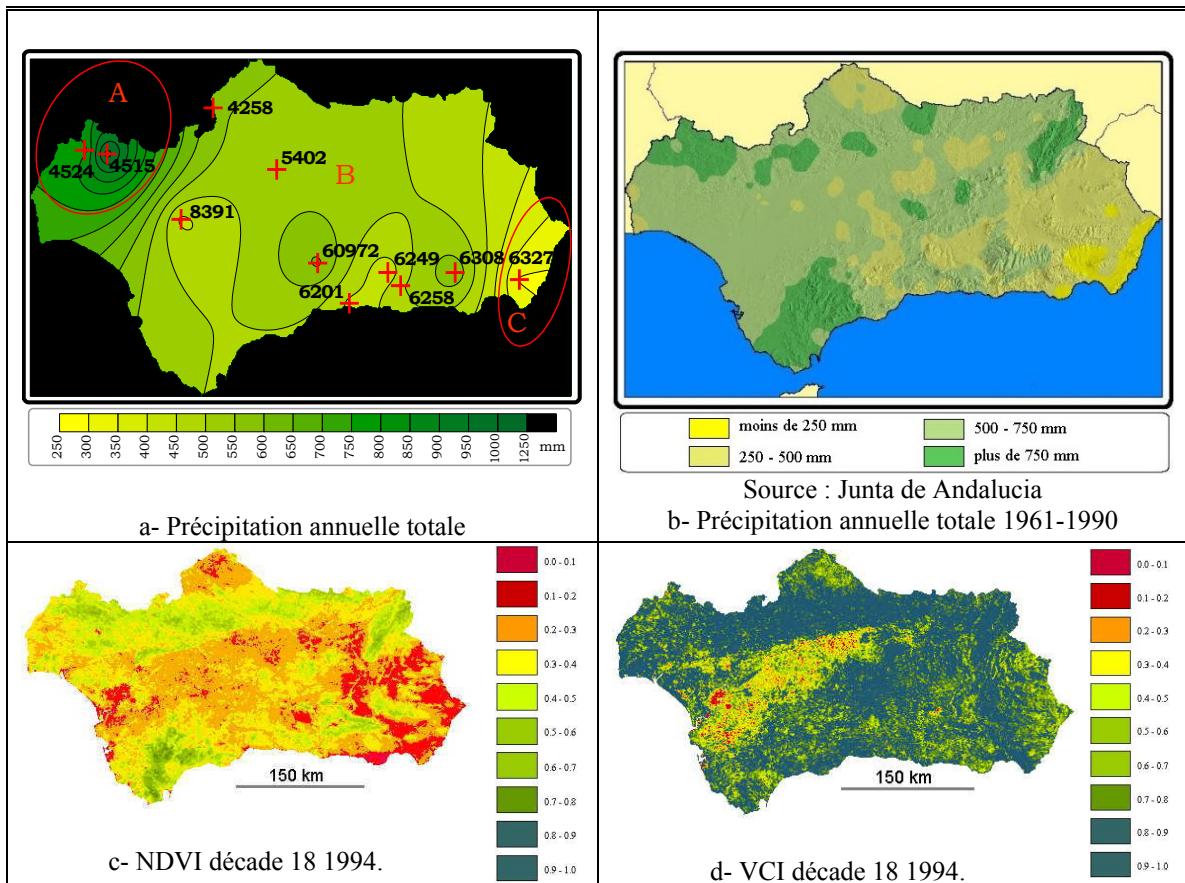


Figure 5.1 - Caractéristiques climatiques en Andalousie

La station d'Algorrobo la Mayora (6201), située à 20 m d'altitude en bordure de la Méditerranée, est représentative du climat méditerranéen sub-tropical où l'influence tampon de la mer se fait sentir. Ici aussi les précipitations mensuelles sont plus fortes en hiver et faibles en été (figure 5.2) mais le total annuel y est moins élevé (439 mm) qu'aux stations à caractère océanique.

Plus au nord, dans les montagnes circum-méditerranéennes, la station de Lanjaron (6258) est elle aussi influencée par la Méditerranée. Dû à son élévation (710 m), ses précipitations totales annuelles (495 mm) sont toutefois plus élevées qu'en bordure de la mer. La proportion des précipitations printanières y est aussi importante (figure 5.2).

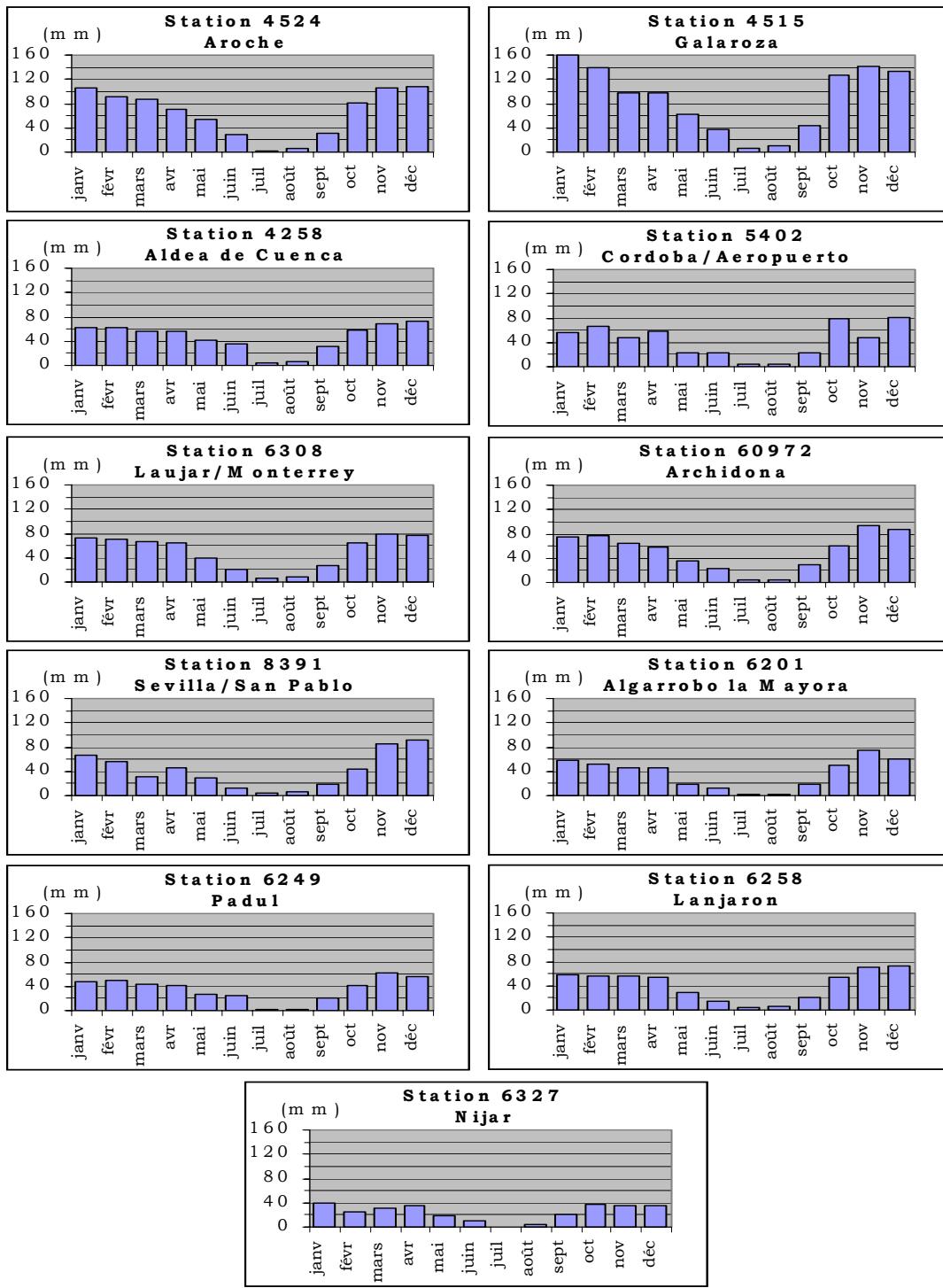


Figure 5.2 - Moyenne des précipitations mensuelles totales

La station de Padul (6249), représentative du climat méditerranéen continental, est située à 753 m d'altitude, sur un plateau en altitude, près de Granada. Cette station reçoit ses précipitations maximales en hiver mais les précipitations printanières y sont aussi importantes (figure 5.2). Toutefois, sa situation abritée par les montagnes fait en sorte que les précipitations totales sont relativement faibles (413 mm).

Finalement, la station de Lanjaron (6308) est représentative du climat de hautes montagnes. Située à une altitude de 1 280 m, cette station reçoit un total de 587 mm de pluie, répartis majoritairement pendant les mois d'hiver, de novembre à février. Toutefois, les mois printaniers reçoivent aussi des quantités importantes de pluie (figure 5.2).

Les figures 5.3, 5.4 et 5.4b présentent les séries temporelles des précipitations mensuelles et du SPI aux stations. Elles illustrent l'évolution des précipitations pour une période de 4 ans qui s'étend d'octobre 1989 à janvier 1993. Cette période coïncide avec la période des données satellitaires (1989-1994) et couvre une phase humide (1989-1990) comme une phase sèche (1990-1995) (El País, 1993 à 1996). Les échelles des graphiques sont variables afin de mieux discerner les changements pluviométriques temporels de chaque région. Une moyenne mobile sur trois mois des précipitations mensuelles y apparaît aussi (rouge) afin de mieux percevoir les changements saisonniers.

De manière générale, les tendances pluviométriques évoluent dans le même sens sur l'ensemble du territoire andalou, sauf peut-être dans la région semi-aride du sud-est, où les faibles pluies hivernales sont normales.

Le portrait est cependant plus nuancé durant l'hiver de 1990-1991 alors que la sécheresse commence à se faire sentir. Une baisse générale des précipitations est visible à chacune des stations de manière plus ou moins marquée entre novembre 1990 et février 1991 (figures 5.3 à 5.4b), sauf à Níjar où les précipitations de décembre 1990 et janvier 1991 (68 mm et 62 mm) sont au-dessus des moyennes saisonnières (35 mm et 38 mm) (figure 5.2). Aux stations du Nord-Ouest (4515, 4524 et 4252) ainsi qu'aux stations de la vallée du Guadalquivir (5402 et 8391), ce sont surtout les mois de décembre et janvier qui possèdent le déficit le plus marqué. Dans la zone côtière méditerranéenne, pour les stations 6201 et

6308, et dans les Bétiques, pour les stations 6249, 6258 et 60972, c'est janvier qui est particulièrement sec. Le SPI des 11 stations (figure 5.3 à 5.4b) y varie de -0,47 (Cordoba (5402)) à -1,46 (Padul (6249)) et indique des conditions oscillant entre normales et modérément sèches.

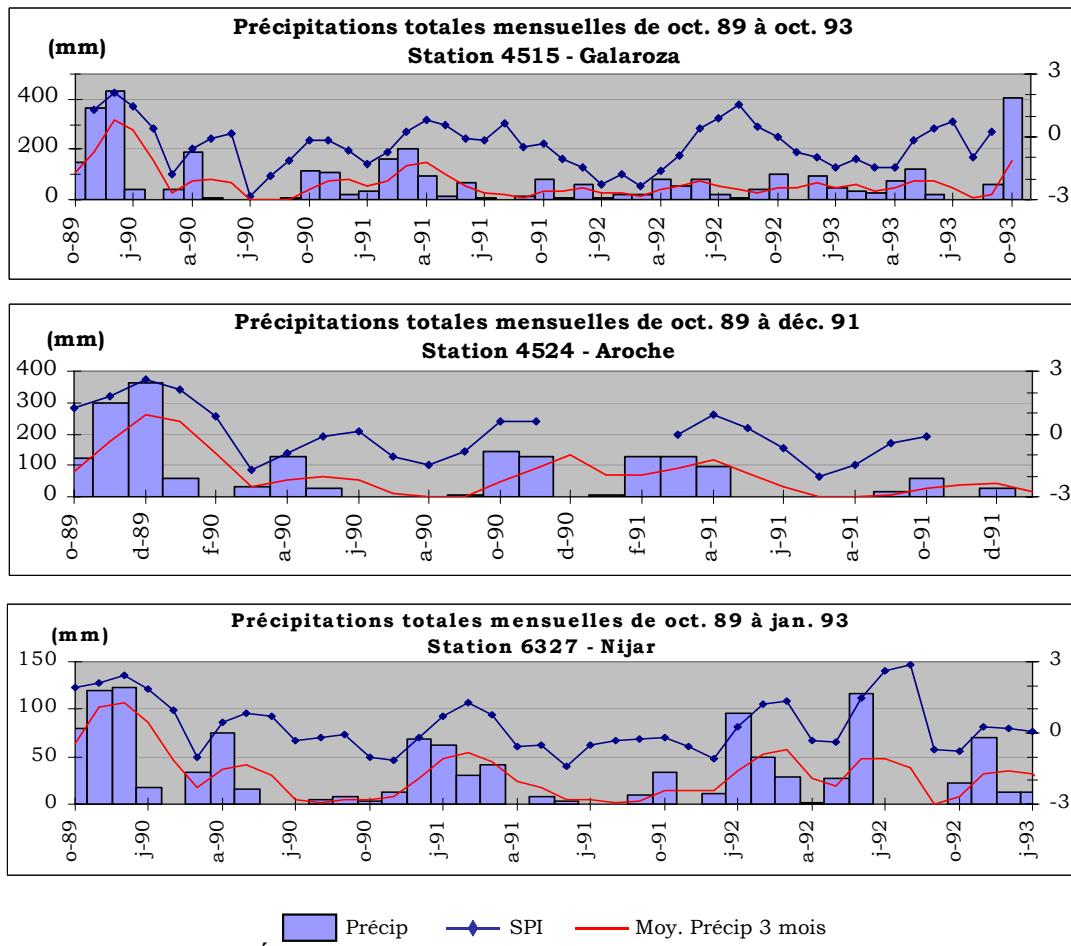


Figure 5.3 - Évolution temporelle des précipitations des stations A et C

C'est durant l'hiver 1991-1992 et 1992-1993 que la sécheresse se fait vraiment sentir. Les baisses de précipitation sont de plus longue durée et d'intensité supérieure à l'année 1990-1991. C'est le Nord-Ouest de l'Andalousie qui présente les déficits pluviométriques les plus sévères. Alors que les précipitations hivernales et printanières à Galaroza (4515) (figure 5.3) sont du même ordre que les précipitations estivales (figure 5.2), le SPI chute jusqu'à -2,24 entre janvier et mars 1992, signe de sécheresse extrême. Après un été ayant eu des précipitations au-dessus des normales, l'hiver 1992-1993 voit se dessiner le même

profil. Les précipitations sont rares et le SPI demeure sous zéro de novembre 1992 à avril 1993 pour atteindre un minimum d'environ -1,5 (sévèrement sec) de janvier à mars 1993.

À Aldea de Cuenca (4258), plus à l'est, le même scénario se répète de manière moins marquée. Les précipitations hivernales de l'hiver 1991-1992 (figure 5.4b) sont sous les normales saisonnières (figure 5.2) et celles de 1992-1993 sont encore plus rares, comme l'illustre bien la courbe des précipitations moyennes, en rouge. À cette station, le SPI demeure légèrement sous les normales à partir de novembre 1991 et atteint des valeurs de -1,12 à -1,29 (modérément sec) de janvier à mars 1992. C'est toutefois à l'hiver 1992-1993 que la sécheresse devient critique et le SPI atteint des valeurs en dessous de -2 (extrêmement sec) de janvier à mars 1993.

Dans la vallée du Guadalquivir, la situation est moins critique. Alors que les précipitations mensuelles hivernales des stations de Sevilla (8391) et Cordoba (5402) (figures 5.4a et 5.4b) sont sous les normales saisonnières (figure 5.2) en décembre 1991 et en janvier 1992, le SPI minimum n'atteint que -1,27 à Cordoba, ce qui indique des conditions modérément sèches.

La sécheresse se fait aussi sentir de manière marquée dans les Bétiques et sur la côte méditerranéenne. À Archidona (60972) et Algorrobo La Mayora (6201), les précipitations de novembre à avril sont faibles, particulièrement en janvier 1992. À la station 6201, le SPI de janvier à mars 1992 varie de -1,07 à -1,56 (modérément à sévèrement sec), alors qu'à la station 60972, il varie de -1,56 à -1,81, indiquant des conditions de sécheresse sévère.

À Lanjaron (6258), et plus particulièrement à Padul (6249), les baisses pluviométriques se maintiennent plus longtemps et le SPI demeure sous la barre des conditions modérément sèches (-1,00 à -1,49) de décembre à février 1992 à Lanjaron et de novembre à mars 1992 à Padul (figure 5.4a).

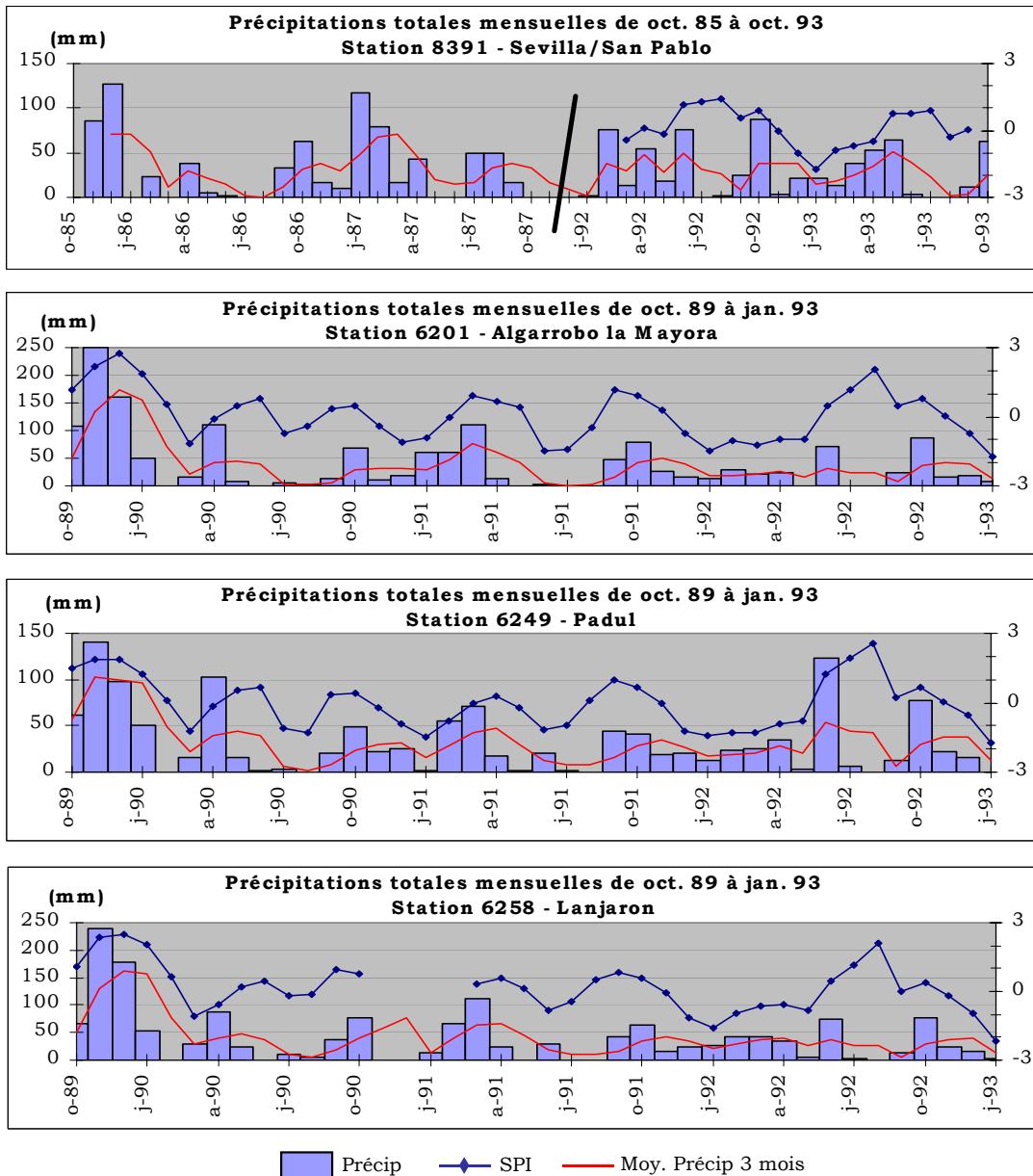


Figure 5.4a - Évolution temporelle des précipitations des stations B

Plus à l'est, les stations de Laujar/Monterrey (6308) et Nijar (6327) sont les moins touchées par la sécheresse. Alors que les précipitations hivernales de 1991-1992 à Nijar (figure 5.3) sont légèrement sous les normales saisonnières (figure 5.2), le SPI atteint à peine -1,06 (modérément sec) en janvier 1992 et demeure collé aux normales par la suite. À

Laujar/Monterrey (figure 5.4b) toutefois, les baisses pluviométriques entraînent en janvier 1992 seulement une baisse du SPI sous la barre des conditions de sécheresse sévère.

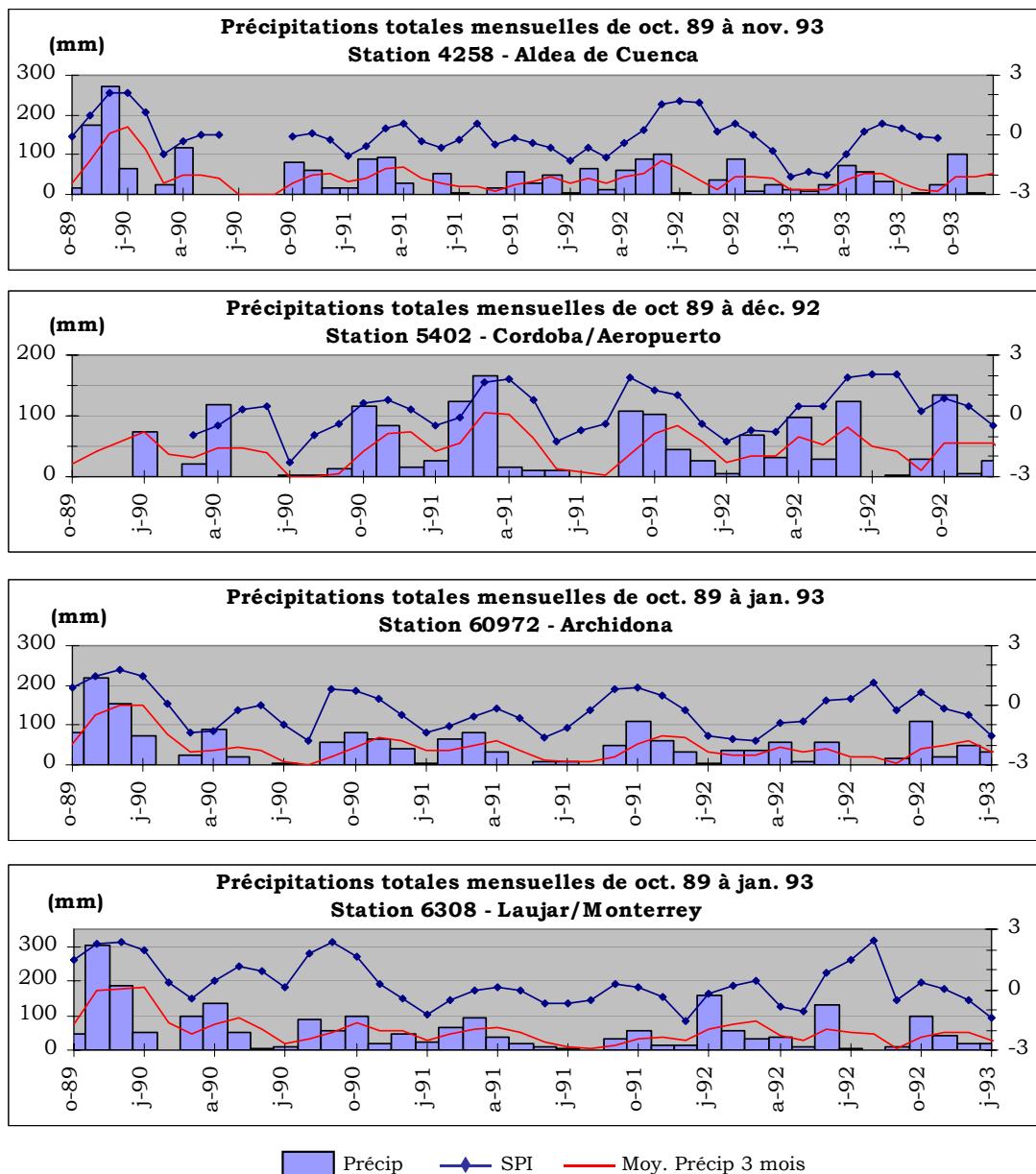


Figure 5.4b - Évolution temporelle des précipitations des stations B (suite)

À toutes les stations pour lesquelles les données sont disponibles jusqu'au début de 1993, sauf à Nijar, la baisse des précipitations et du SPI de la fin 1992 laisse entrevoir une autre

année de sécheresse. Cette tendance est d'ailleurs visible à la station Galaroza (4515) (figure 5.3), où les précipitations sont affichées jusqu'en octobre 1993.

Peu d'importance est accordée aux précipitations estivales. Alors que celles-ci sont souvent au-dessus ou parfois en dessous des normales saisonnières pendant la période étudiée, leur déviation par rapport aux faibles précipitations estivales sont négligeables puisqu'elles ne représentent que de petites quantités d'eau. Ce sont les fortes précipitations hivernales qui rechargent les aquifères et les réservoirs et qui servent à irriguer la majorité des cultures, cultivées surtout en hiver en Andalousie.

En bref, l'évolution temporelle des précipitations durant la période étudiée, quoique similaire, montrait une variation spatio-temporelle selon la zone climatique. Alors que l'hiver de 1989-1990 a amené des précipitations au-dessus des normales saisonnières partout en Andalousie, les hivers subséquents ont démontré des précipitations généralement en dessous des moyennes saisonnières, sauf dans le Sud-Est où elles sont demeurées dans les normales. L'hiver de 1990-1991, mais surtout celui de 1991-1992, a particulièrement été sec. La sécheresse s'est toutefois fait ressentir de manière variable, selon la zone climatique. Ainsi, le Nord-Ouest, généralement pluvieux, a reçu des précipitations plutôt représentatives de la région semi-désertique alors que la vallée du Guadalquivir, plus ouverte aux systèmes dépressionnaires de l'Atlantique, était moins touchée.

5.2 Relation entre le VCI, le TCI et le SPI

La relation entre le VCI, le TCI et le SPI, quoique parfois difficile à percevoir graphiquement, est toutefois incontestable. Plusieurs facteurs, autre que le déficit hydrique, l'influencent également. Parmi ces facteurs se trouve le type de végétation, le type de sol, l'intensité de la pluie mais aussi les pratiques culturales comme l'irrigation. Les figures 5.5, 5.6a et 5.6b illustrent l'évolution des trois indicateurs retenus d'octobre 1989 à septembre 1993 lorsque l'information est disponible. Alors que la figure 5.5 illustre l'évolution temporelle des indicateurs des stations des zones A et C (figure 5.1a), les figures 5.6a et 5.6b illustrent l'évolution des indicateurs aux stations de la zone B.

À la station d'Aroche (4515) (figure 5.5), les valeurs du SPI pour la période commençant en décembre 1991 étaient manquantes et les valeurs du SPI de la station voisine (4515 - Galaroza) ont été incluses sur le graphique et apparaissent en bleu pâle. À la station de Sevilla (8391) toutefois, aucune station à proximité n'était disponible et la figure 5.6b montre un SPI manquant d'octobre 1989 à juillet 1992.

Le territoire autour des stations (fenêtre de 11 km^2) du groupe A, situées au nord-ouest de l'Andalousie est majoritairement occupé par des cultures permanentes ou non-irriguées (Aroche) ou par une couverture forestière (Galaroza). Les images du VCI et du TCI (annexe 3) montrent d'ailleurs des conditions de végétation généralement bonne pour cette région ($\text{VCI} > 50$ et $\text{TCI} > 50$), même lorsque le SPI indique des conditions très sèches (décembre 1990 à janvier 1991) ($\text{SPI} < -1,5$). Cette région est majoritairement couverte de zones boisées (annexe 2, figure 2) et les images laissent entrevoir le potentiel de ces zones pour retenir l'humidité. À ces deux stations, la relation entre les trois indicateurs est aisément visible, plus particulièrement en période de sécheresse, comme de décembre 1992 à septembre 1993 (figure 5.5). Durant cette période, les trois indicateurs varient sensiblement dans le même sens et quand le SPI indique une période extrêmement sèche ($\text{SPI} \leq -2,0$, entre janvier et mars 1992), le VCI atteint aussi des valeurs indicatrices de conditions de stress hydrique important ($\text{VCI} \approx 0,2$ en février 1992 à Galaroza et $\text{VCI} \approx 0,25$ à Aroche). Le TCI demeure toutefois près des normales (Aroche (0,45 – 0,60) et Galaroza (0,58 – 0,74)) durant l'hiver de 1992 mais atteint tout de même 0,3, indicateur de stress hydriques en janvier 1993. Pour cette période, sur les images mensuelles de l'annexe 3, il est aisément de voir que cette région souffre de sécheresse car un fort pourcentage du territoire possède des valeurs de VCI inférieure à 20 (équivalent à 0,2 sur une échelle de 0 à 1) et le SPI aussi démontre une situation de déficit hydrique marqué ($\text{SPI} < -1,8$). En période de pluviométrie normale, comme en 1990, il semble cependant y avoir un clivage entre les hivers humides et les étés secs (figure 5.5). En hiver, le VCI semble mieux s'accorder avec le SPI. Cette tendance est visible de septembre 1990 à mars 1991 à Galaroza. En été, c'est le TCI qui suit mieux les fluctuations du SPI, comme d'avril 1990 à août 1990.

La relation entre les trois indicateurs n'est pas aussi aisément visible à la station de Nijar (6327), située dans la zone semi-désertique de l'Andalousie. Comme les précipitations y sont basses à l'année (figures 5.2 et 5.3) et que l'écart des précipitations est faible, le SPI varie davantage. De plus, alors que l'ensemble de l'Andalousie a souffert de sécheresse, les précipitations à Nijar y étaient souvent supérieures au moyennes saisonnières (section 5.1). À cette station, c'est généralement le TCI qui fluctue de la même manière que le SPI, comme aux stations de Galaroza et d'Aroche en période estivale (figure 5.5). Seules les périodes de juillet 1991 et de novembre 1991 ne suivent pas cette tendance. Dans cette région, tout comme en période estivale aux autres stations, le VCI ne suit pas la tendance du SPI. Une raison possible est qu'il y a très peu de végétation dans cette région. On y retrouve surtout des aires dénudées ou des cultures irriguées, souvent sous plastique (annexe 2). Les images de l'annexe 3 illustrent ce constat. En février et avril 1992, le TCI et le SPI indiquent de bonnes conditions hydriques pour la région alors que le VCI est généralement inférieur à 20. En fait, les trois indicateurs sont mal adaptés aux climat quasi-désertique du Sud-Est; le SPI fait varier des précipitations très faible et le VCI et le TCI caractérisent une végétation presque absente. Le graphique de l'annexe 4 illustre bien le problème. Les valeurs du NDVI à la station de Nijar, presque toujours inférieures à 0,3, sont plutôt représentatives du sol.

Il est intéressant de remarquer que le VCI indique des conditions de stress hydrique de décembre 1990 à février 1991 et de janvier 1992 à juin 1992 sur la figure 5.5, alors que ces périodes ont été témoins de pluies abondantes (96 mm en janvier 1992 et 117 mm en juin 1992). L'intensité de la pluie n'était malheureusement pas disponible mais il est possible que les précipitations soient tombées sur une courte période et que les sols et la végétation n'aient pas pu absorber l'eau. Ceci expliquerait les faibles valeurs du VCI pendant ces périodes. Il se peut aussi que les faibles valeurs des indicateurs soient liées à la présence de nuages pendant cette période. Il n'y a d'ailleurs que quatre images décadiques de décembre 1992. Cependant, il est plus plausible que cette apparente contradiction soit le fruit des limitations associées aux indicateurs utilisés.

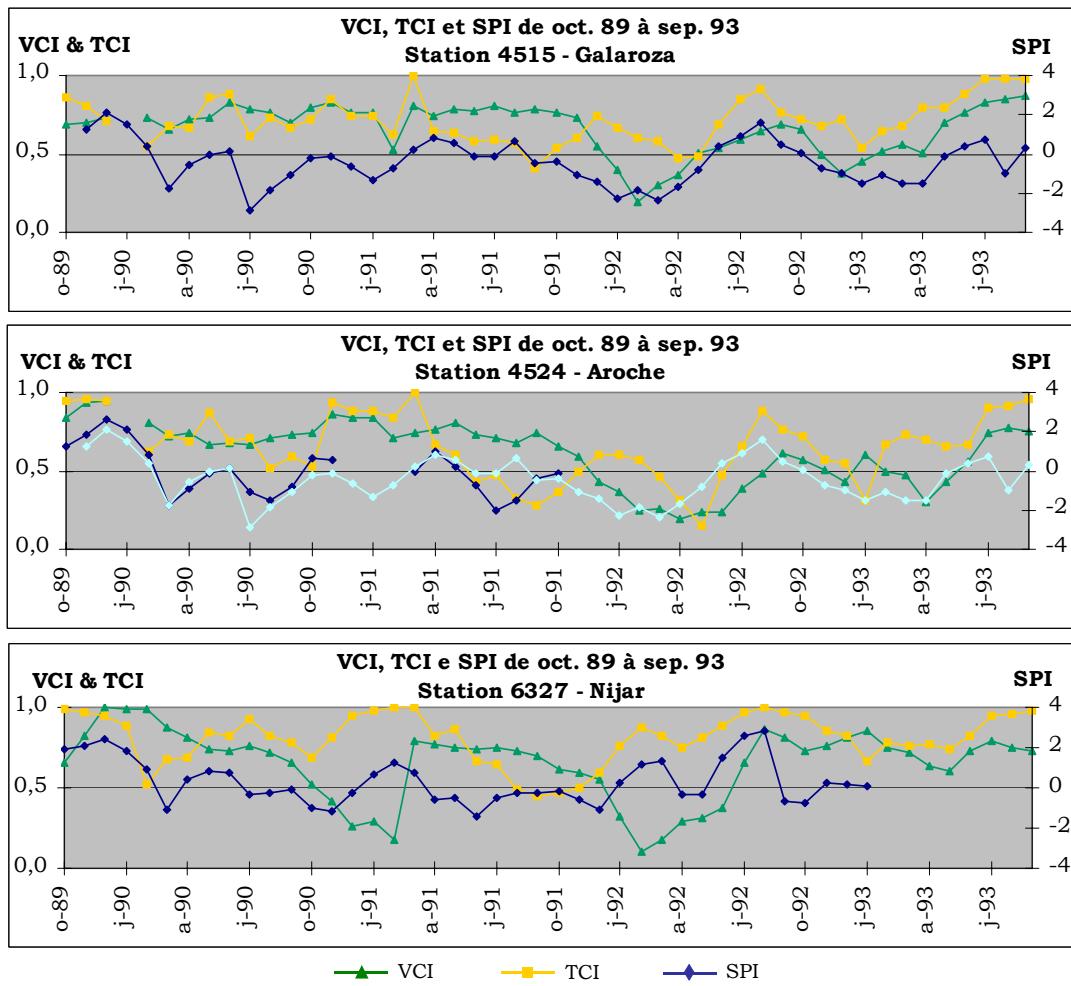


Figure 5.5 - Relation VCI, TCI et SPI des stations A et C

La relation entre les indicateurs VCI, TCI et SPI aux stations de pluviométrie moyenne (figures 5.6a et 5.6b) est généralement facile à percevoir. En période hivernale normale, comme durant l'hiver 1990-1991, le VCI et le SPI varient dans le même sens. Cette tendance est très visible aux stations d'Aldea de Cuenca (4258), d'Archidona (60972), d'Algorrobo La Mayora (6201) et de Padul (6249). Si ce n'était de la valeur douteuse de février 1991, cette tendance y serait encore plus marquée. Les valeurs du VCI et du TCI de février 1991 ne sont obtenues qu'à partir des valeurs décadiques de décembre 1990. Puisque ces images hivernales semblent comporter des nuages, il est probable que des nuages non-détectés par le logiciel SPACE abaissent les valeurs du NDVI, et par conséquent celles du VCI.

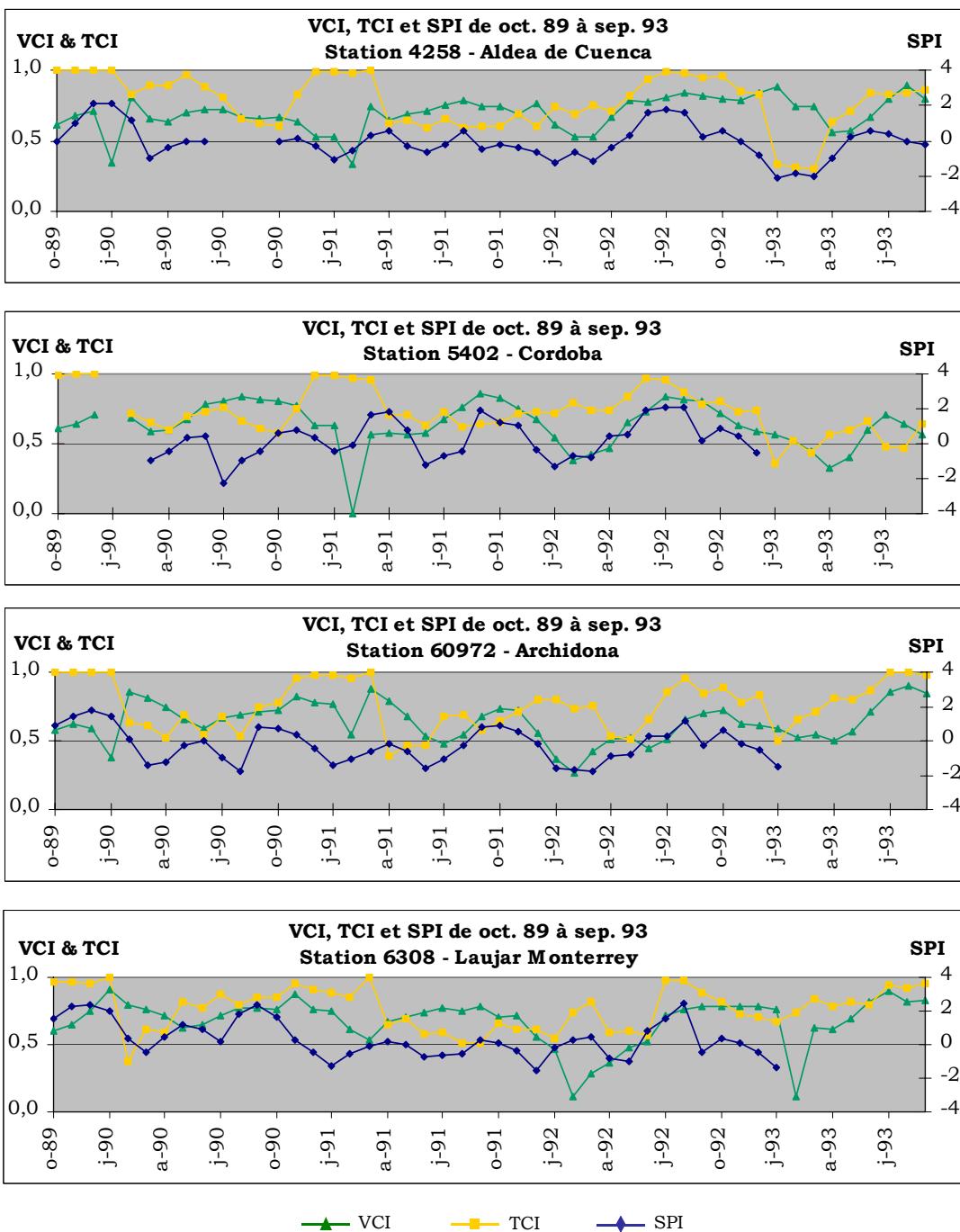


Figure 5.6a - Relation VCI, TCI et SPI des stations B

En observant les images mensuelles de décembre 1990 à avril 1991, l'image de février 1991 détone par rapport aux autres mois, ce qui laisse croire à un problème de détection des nuages. De plus, le SPI pour cette période indique des conditions normales à légèrement

sèches seulement (0 à -0,9). Plus encore, les précipitations totales du mois de février 1991, à Cordoba par exemple, atteignent environ 125 mm (figure 5.4b), soit près du double de la moyenne attendue pour ce mois. Une présence nuageuse importante est donc très plausible.

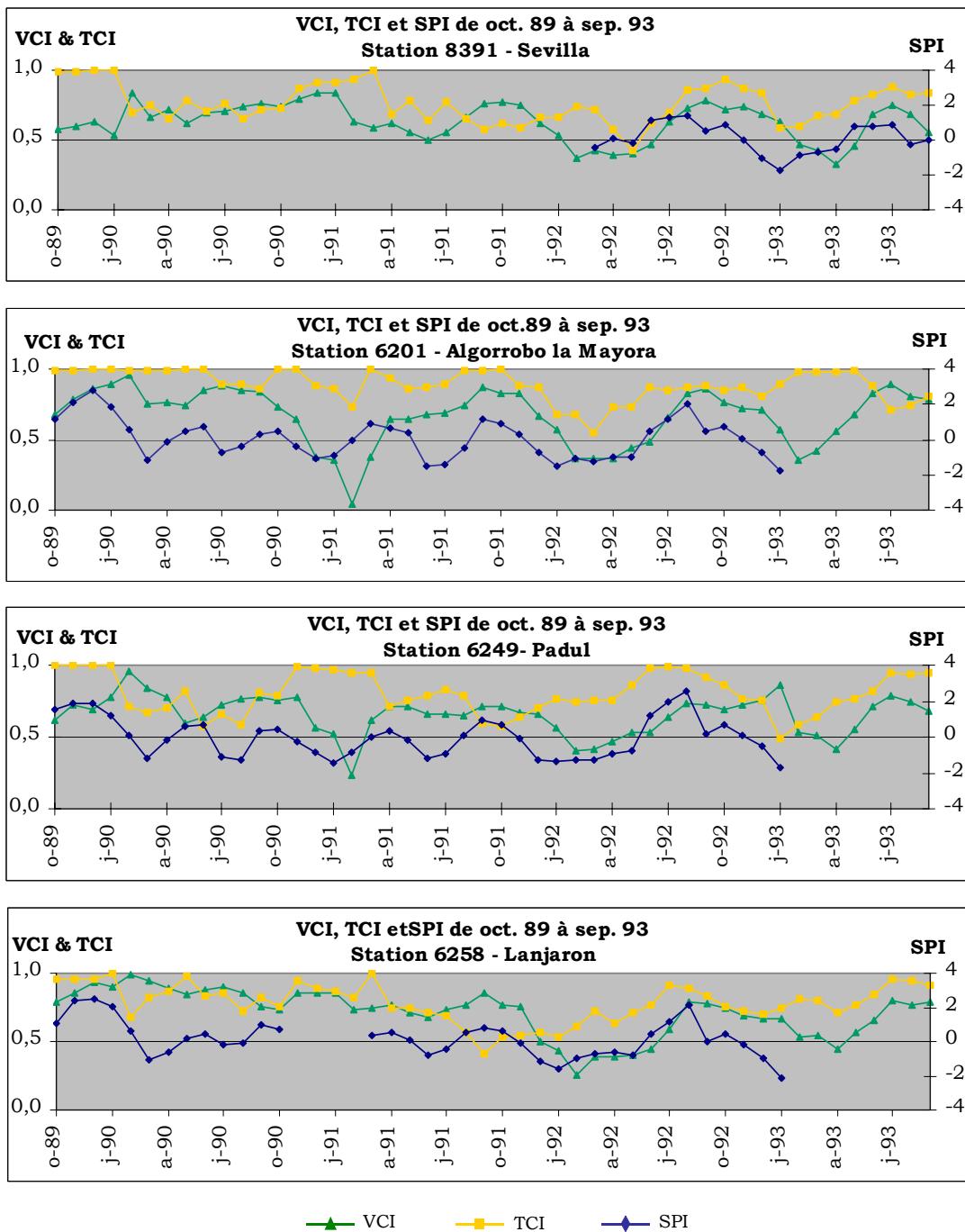


Figure 5.6b - Relation VCI, TCI et SPI des stations B (suite)

Toujours en période considérée normale, mais en été, c'est surtout le TCI et le SPI qui varient dans le même sens. Cette tendance est toutefois moins visible que pour le VCI et le SPI puisque le TCI est plus variable sur de courtes périodes. Les conditions climatiques, comme l'ensoleillement ou les vents, ont une forte influence sur les températures de surface qui constituent le TCI. Aux stations de Lanjaron (6258) et de Laujar Monterrey (6308), de mars 1990 à juin 1990, il est toutefois possible de voir que ces derniers varient dans le même sens.

En période de sécheresse cependant, comme pendant les hivers 1991-1992 et 1992-1993, les trois indicateurs oscillent dans le même sens. Cette tendance est d'ailleurs très claire presque à toutes les stations de ce groupe (B), sauf peut-être à la station de Laujar Monterrey (6308) où le VCI du mois de février 1992 (et février 1993) est très faible. En observant les images mensuelles de janvier à avril 1992 (annexe 3), l'image de février 1992 semble correcte. Le SPI et le VCI montrent tous les deux une situation très sèche dans la région Nord-Ouest de la province. Au Sud-Est cependant, les informations sont contradictoires. Le SPI montre des conditions favorables alors que le VCI indique une situation sèche.

La tendance des indicateurs à osciller dans le même sens pendant les périodes de sécheresses est particulièrement visible à la station d'Algorrobo la Mayora (6201), de novembre 1991 à décembre 2002, et à la station de Sevilla (8391), d'octobre 1992 à mars 1993. Cependant, un retard dans la réaction du VCI par rapport au SPI peut être observé à toutes les stations de manière plus ou moins marquée. Alors que le VCI et le SPI à la station d'Archidona (60972) atteignent des valeurs indicatrices de conditions sèches ($SPI \approx -2$, $VCI \approx 0.25$) en même temps, au mois de février 1992, le VCI de la station de Padul (6249) semble retarder d'environ 2 mois sur les valeurs minimales du SPI de décembre 1992. Ce retard de la réponse de la végétation face aux changements des conditions hydriques est dû au type de végétation ainsi qu'aux pratiques culturales. Le territoire autour de cette station est majoritairement occupé par des cultures irriguées (37 %) dont l'irrigation masque les effets des baisses pluviométriques, mais la végétation sclérophylle, adaptées aux conditions de sécheresse, occupe aussi une partie importante

(21 %). Ce retard est aussi visible à toutes les stations (5402, 8391, 6201, 6249, 6258) dont une partie des cultures est irriguée (tableau 4.2).

De manière générale, l'utilisation combinée des indicateurs SPI, VCI et TCI semble indiquée pour le suivi des conditions de sécheresse en Andalousie. Toutefois, leur interprétation est plus évidente en zone où la végétation est naturelle et où les précipitations sont de moyennes à abondantes. En période de sécheresse, les 3 indicateurs fluctuent dans le même sens. Par contre, en période considérée normale, on peut remarquer une meilleure relation entre le TCI et le VCI pendant les étés secs alors que pendant les hivers plus humides, c'est la relation VCI/SPI qui est meilleure.

Leur utilisation ne semble pas recommandable en zone semi-désertique, où les faibles écarts de précipitation, du NDVI ou de Ts entraînent une plus grande variation des indicateurs. De plus, l'intensité parfois très forte des pluies dans ces régions fait en sorte que l'eau ne s'infiltra pas ou peu dans les sols et ne contribue donc pas au maintien de la végétation ou à la recharge des aquifères. Finalement, la végétation sclérophylle, bien adaptée aux conditions de sécheresse, ne répond pas aux variations pluviométriques aussi fortement que les forêts ou les cultures. Sa présence influence fortement la relation entre le VCI et le SPI.

Une attention particulière doit aussi être portée aux zones irriguées (figure 5.29) qui sont relativement répandues en Andalousie. L'irrigation masque l'effet des baisses pluviométriques en utilisant les ressources hydriques stockées dans les sols ou les réservoirs. Il serait donc important de mieux connaître la distribution spatio-temporelle de l'irrigation lors de l'analyse de la tendance des indicateurs.

Finalement, on peut noter que lorsque le SPI indique des valeurs représentants des conditions de sécheresse, le VCI et le TCI demeurent généralement supérieurs à 0,5 (normal) même en période de sécheresse connue. Alors que Kogan (1993) reconnaît des conditions de stress hydrique lorsque le VCI et le TCI oscillent entre 0,0 et 0,35, cette catégorie serait peut-être plus élevée en l'Andalousie.

En effet, alors que le SPI atteint des valeurs près de -2,0 (extrêmement sec) à plusieurs stations (4258, 60972, 4515, 6201, 6249, 6258), le VCI oscille plutôt autour de valeurs considérées moyennes (0,35-0,75) selon Kogan.

Ces fortes valeurs du VCI et du TCI sont partiellement dues à la manière dont ces indicateurs ont été calculés. Afin d'éliminer les pixels pouvant être contaminés par la présence de nuages, les valeurs décadiques minimales historiques du NDVI ($NDVI_{min}$, équation 4.2) et de Ts (Ts_{min} , équation 4.4) sont tirées des valeurs de la décade ayant les valeurs maximales décadiques les plus basses. Ceci a pour possible effet de diminuer le dénominateur des indicateurs et donc d'en faire augmenter la valeur. La présence de nuages résiduels peut aussi fausser les valeurs considérées normales et faire en sorte que la présence de nuage ou un NDVI réellement faible serait perçu de la même manière.

Cependant, il faut tenir compte de la nature différente des indicateurs utilisés. Kogan a établi une relation (régression) entre les indicateurs VCI et TCI et les rendements de certaines cultures. Il existe un lien beaucoup plus direct entre l'état de la végétation (VCI, TCI) et les rendements des cultures qu'entre l'état de la végétation et un indicateur météorologique qui fait état de sécheresse à moyen terme. Il est donc normal que ces indicateurs donnent des indications un peu différentes. Considérant la nature différente de ces indicateurs ainsi que les faiblesses du SPI en zone semi-désertique, essayer d'établir une relation entre le VCI et le SPI afin d'établir un seuil différent pour l'Andalousie serait peu utile. Le seuil préconisé par Kogan pour détecter les sécheresses (0,35) peut donc être considéré valide pour la présente étude.

5.3 Les analyses de corrélation VCI/SPI et TCI/SPI

Afin de quantifier la force de la relation qui existe entre les indicateurs de sécheresse satellitaires (VCI et TCI) et le SPI, la corrélation linéaire de Pearson (Gilbert et Savard, 1992) a été calculée à partir des valeurs mensuelles de ces indicateurs. Afin de mieux faire ressortir la variabilité spatiale et le caractère saisonnier de la relation entre le VCI et le TCI et le SPI, cinq types de corrélation ont été effectués.

Ces cinq types de corrélation sont:

1. Corrélation **complète**
2. Corrélation **hivernale**
3. Corrélation **estivale**
4. Corrélation complète **avec décalage**
5. Corrélation **hivernale avec décalage**

La corrélation **Complète** tient compte de toutes les paires de données disponibles pour chaque station. Elle caractérise la relation qui existe entre les indicateurs sans éliminer aucune données.

Les corrélations **hivernales** et **estivales** utilisent seulement les données de la saison humide, soit de décembre à mai, ou les données de la saison sèche, de juin à novembre. La corrélation saisonnière fait ressortir le caractère saisonnier de la relation qui existe entre la végétation (VCI et TCI) et les précipitations (SPI). Comme les valeurs mensuelles des indicateurs sont calculées à partir de trois mois, le mois de novembre n'entre pas dans la corrélation de la saison humide car novembre est composé des valeurs de mois de septembre et octobre, plus représentatifs de l'été. De la même manière, le mois de mai n'entre pas dans la corrélation de la saison sèche.

En ne tenant compte que de la saison humide, on élimine une période où l'écart de la variable étudiée (pluie, NDVI ou Ts) est plus faible et où une variation de la valeur décadaire peut entraîner une forte variation de l'indicateur (SPI, VCI ou TCI). Par exemple, une déviation de 10 mm des précipitations par rapport à la valeur moyenne aura un effet plus grand sur la valeur du SPI en période ou en zone sèche puisque l'écart-type (dénominateur du SPI) des précipitations est plus petit. Un SPI négatif en été n'est donc pas nécessairement indicateur de conditions de sécheresse. Comme l'analyse de la section précédente a permis de voir que la relation TCI/SPI est plus forte en été ou en zone climatique plus stable, une corrélation ne faisant intervenir que les données estivales a été calculée entre le TCI et le SPI.

La quatrième forme de corrélation inclue un **décalage** allant de 1 à 6 décades et n'a été appliquée qu'entre le VCI et le SPI. Comme les températures de surface, et donc le TCI,

sont très variables temporellement, un décalage du TCI face au SPI serait sans utilité. De plus, le décalage permet de considérer l'effet de retardement entre les changements des précipitations et la réponse du couvert végétal.

Finalement une corrélation **hivernale avec décalage** a été appliquée entre le VCI et le SPI. Cette corrélation ne tient compte que des mois les plus humides et introduit simultanément un décalage de une à six décades.

Due à la nature très différente des indicateurs (satellite vs pluviométrique), des corrélations plutôt faibles sont attendues. Le SPI est un indicateur météorologique qui situe le niveau des précipitations par rapport à la tendance historique et ce de manière ponctuelle (McKee *et al.*, 1993). Sa représentation et son interprétation pour une région plus étendue se font par l'interpolation spatiale. Dans la présente étude, le krigage (type: linéaire; échelle: 2,17; longueur: 28 400 m) (Goovaerts, 1997) a été utilisé. Le VCI et le TCI sont eux le reflet de la condition du couvert végétal à la surface terrestre. Le VCI situe la condition de la végétation verte (NDVI) par rapport à la tendance historique de la condition du couvert végétal et le TCI, de manière similaire, utilise la température de surface (équations 4.2 et 4.4). Une certaine relation est toutefois attendue, plus particulièrement entre la végétation (VCI) et les précipitations (SPI) puisque la végétation réagit aux changements temporels et spatiaux des conditions hydriques des sols qui sont principalement régies par les précipitations. La relation TCI/SPI est toutefois plus difficile à décrire car la température de surface varie grandement selon l'heure du jour ou la saison (Viau *et al.*, 2000). On s'attend toutefois à ce qu'il y ait une relation puisque cette dernière augmente avec l'augmentation du stress hydrique (Crago, 1996; McVicar et Jupp, 1998).

Tableau 5.2 - Nombre de paires de données utilisées dans les corrélations

Station	Série temporelle	(1) VCI vs SPI TCI vs SPI	(2) VCI vs SPI TCI vs SPI
4515	11-90 à 09-93	46	23 (h,d), 22 (e)
4524	10-89 à 10-91	21	8 (h,d), 13 (e)
8391	03-92 à 09-93	19	9 (h,d), 10 (e)
6201	10-89 à 01-93	40	20 (h,d), 20 (e)
6249	10-89 à 01-93	40	20 (h,d), 20 (e)
6258	10-89 à 01-93	36	17 (h,d), 19 (e)
4258	10-89 à 09-93	45	24 (h,d), 21 (e)
5402	03-90 à 12-92	34	16 (h,d), 18 (e)
60972	10-89 à 01-93	40	20 (h,d), 20 (e)
6308	10-89 à 01-93	40	20 (h,d), 20 (e)
6327	10-89 à 01-93	40	20 (h,d), 20 (e)

1- Corrélation complète et corrélation complète avec décalage

2- Corrélation hivernale (h) et estivale (e) sans et avec décalage (d)

Le tableau 5.2 donne pour chacune des stations retenues l'étendue de la série temporelle ainsi que le nombre de paires de données utilisées pour le calcul de chaque type de corrélation. La colonne (1) de ce tableau indique le nombre total de paires utilisées pour la corrélation complète et la colonne (2) donne d'abord le nombre de paires utilisées pour la corrélation hivernale et la corrélation avec décalage alors que la deuxième valeur représente le nombre de paires utilisées pour la corrélation estivale.

Comme certaines stations n'ont pas un historique de données complet ou de longue durée, certaines stations ne comportant que peu de données ont tout de même été incluses afin de mieux couvrir le territoire andalou. Ainsi, les stations d'Aroche (4524) et de Sevilla (8391) ne comportent respectivement que 21 et 19 paires de données pour la corrélation complète (tableau 5.2) ont tout de même été utilisées. Afin de vérifier le niveau de signification des corrélations obtenues, un test de corrélation a été effectué afin de tester si les corrélations étaient significativement indépendantes (corrélation différente de zéro) (Gilbert et Savard, 1992). En tenant compte de l'implication associée au rejet de l'hypothèse nulle (variables sont indépendantes) et au fait que l'on compare des indicateurs de nature différente, un

niveau de signification acceptable de 10% a été fixé au préalable. Les résultats des corrélations complètes et saisonnières sont présentés dans le tableau 5.3. Les stations sont identifiées par leur numéro unique. La première partie de la colonne 2 du tableau donne les valeurs du coefficient de corrélation de Pearson avec toutes les paires de données alors que la 2^e partie de la colonne 2 indique les valeurs de corrélation saisonnières. Les corrélations avec décalage sont identifiées par le nombre de décades de décalage introduites dans les calculs. Finalement, les corrélations significatives sont identifiées par des astérix.

Les corrélations complètes démontrent des relations généralement faibles. Au mieux, 59 % ($r = 0,77$) des variations du VCI peuvent être expliquées par une variation du SPI (Aroche - 4524) alors que 40 % variations du TCI peuvent être expliquées par une variation du SPI (Aldea de Cuenca- 4258), et ce avec une probabilité de 99 % (tableau 5.3). L'introduction des corrélations saisonnières et/ou d'un décalage semble toutefois améliorer les résultats de corrélations pour la plupart des stations.

Tableau 5.3 - Résultats de corrélation VCI/SPI et TCI/SPI

Complète		Saisonnière		Complète		Saisonnière		Complète		Saisonnière	
		r	r		R		r		r		r
4524				4515				6327			
VCI vs SPI	0,77***	0,81 (h)***		VCI vs SPI	0,48***		0,71 (h)***	VCI vs SPI	0,08n.s.		0,07 (h)n.s.
+ 1 décade	0,77***	0,81 (h)***	+ 1 décade		0,57***		0,83 (h)***	+ 1 décade	0,18n.s.		0,09 (h)n.s.
+ 2 décade	0,71***	0,70 (h)*	+ 2 décade		0,53***		0,79 (h)***	+ 2 décade	0,26*		0,17 (h)n.s.
+ 3 décade	0,56***	-0,37 (h)n.s.	+ 3 décade		0,51***		0,72 (h)***	+ 3 décade	0,35**		0,26 (h)n.s.
+ 4 décade	0,35*	-0,13 (h)n.s.	+ 4 décade		0,42***		0,47 (h)**	+ 4 décade	0,39***		0,28 (h)n.s.
+ 5 décade	0,37**	-0,11 (h)n.s.	+ 5 décade		0,42***		0,52 (h)**	+ 5 décade	0,47***		0,36 (h)*
+ 6 décade	0,31*	-0,37 (h)n.s.	+ 6 décade		0,37***		0,51 (h)**	+ 6 décade	0,46***		0,36 (h)*
TCI vs SPI	0,56***	0,23 (h)n.s.	TCI vs SPI	0,36***		0,26 (h)n.s.	TCI vs SPI	0,50***		0,43 (h)**	
	---	0,68 (e)***		---	0,38 (e)**		---	---	0,53 (e)***		
4258				5402				60972			
VCI vs SPI	0,06n.s.	-0,20 (h)n.s.	VCI vs SPI	0,26*		0,14 (h)n.s.	VCI vs SPI	0,18n.s.		0,10 (h)n.s.	
+ 1 décade	0,22*	-0,02 (h)n.s.	+ 1 décade	0,26*		0,21 (h)n.s.	+ 1 décade	0,36**		0,35 (h)*	
+ 2 décade	0,30*	0,16 (h)n.s.	+ 2 décade	0,29**		0,39 (h)*	+ 2 décade	0,43***		0,44 (h)**	
+ 3 décade	0,20*	-0,03 (h)n.s.	+ 3 décade	0,25*		0,36 (h)*	+ 3 décade	0,28**		0,20 (h)n.s.	
+ 4 décade	0,32*	0,22 (h)n.s.	+ 4 décade	0,17n.s.		0,28 (h)n.s.	+ 4 décade	0,44***		0,55 (h)***	
+ 5 décade	0,34***	0,30 (h)*	+ 5 décade	0,10n.s.		0,24 (h)n.s.	+ 5 décade	0,42**		0,50 (h)**	
+ 6 décade	0,24*	0,23 (h)n.s.	+ 6 décade	0,02n.s.		0,10 (h)n.s.	+ 6 décade	0,21*		0,39 (h)**	
TCI vs SPI	0,63***	0,62 (h)***	TCI vs SPI	0,30*		0,22 (h)n.s.	TCI vs SPI	0,43***		0,32 (h)*	
	---	0,63 (e)***		---	0,48 (e)**		---	---	0,63 (e)***		

6308		R	r	8391	r	6201	r	r
VCI vs SPI	0,16n.s.	0,17 (h)n.s.		VCI vs SPI	0,31*	-0,58 (h)n.s.	0,44***	0,47 (h)**
+ 1 décade	0,18n.s.	0,15 (h)n.s.	+ 1 décade	0,5**	-0,35 (h)n.s.	0,55***	0,60 (h)***	
+ 2 décade	0,26*	0,22 (h)n.s.	+ 2 décade	0,64***	0,11 (h)n.s.	0,63***	0,75 (h)***	
+ 3 décade	0,37***	0,34 (h)*	+ 3 décade	0,73***	0,29 (h)n.s.	0,64***	0,74 (h)***	
+ 4 décade	0,34**	0,25 (h)n.s.	+ 4 décade	0,67***	0,29 (h)n.s.	0,65***	0,77 (h)***	
+ 5 décade	0,45***	0,32 (h)*	+ 5 décade	0,59***	0,31 (h)n.s.	0,62***	0,79 (h)***	
+ 6 décade	0,54***	0,47 (h)***	+ 6 décade	0,78***	0,64 (h)***	0,55***	0,71 (h)***	
TCI vs SPI	0,51***	0,38 (h)***	TCI vs SPI	0,38*	0,07 (h)n.s.	TCI vs SPI	0,52***	0,60 (h)***
	---	0,63 (e)***		---	-0,32 (e)n.s.		---	0,19 (e)n.s.
6249		R	r	6258	r	6201	r	r
VCI vs SPI	0,22*	0,31 (h)*	VCI vs SPI	0,49***	0,56 (h)***	VCI vs SPI	0,49***	0,56 (h)***
+ 1 décade	0,33**	0,39 (h)**	+ 1 décade	0,59***	0,67 (h)***	+ 1 décade	0,59***	0,67 (h)***
+ 2 décade	0,5***	0,65 (h)***	+ 2 décade	0,62***	0,68 (h)***	+ 2 décade	0,62***	0,68 (h)***
+ 3 décade	0,52***	0,70 (h)***	+ 3 décade	0,65***	0,68 (h)***	+ 3 décade	0,65***	0,68 (h)***
+ 4 décade	0,55***	0,80 (h)***	+ 4 décade	0,70***	0,75 (h)***	+ 4 décade	0,70***	0,75 (h)***
+ 5 décade	0,62***	0,87 (h)***	+ 5 décade	0,68***	0,73 (h)***	+ 5 décade	0,68***	0,73 (h)***
+ 6 décade	0,56***	0,78 (h)***	+ 6 décade	0,63***	0,70 (h)***	+ 6 décade	0,63***	0,70 (h)***
TCI vs SPI	0,45***	0,46 (h)***	TCI vs SPI	0,48***	0,66 (h)***	TCI vs SPI	0,48***	0,66 (h)***
	---	0,51 (e)**		---	0,40 (e)**		---	0,40 (e)**

Tableau 5.3 - (suite) Résultats de corrélation VCI/SPI et TCI/SPI

* niveau de signification de 10%
 ** niveau de signification de 5%
 *** niveau de signification de 1%
 n.s non significatif
 (h) Corrélation hivernale
 (e) Corrélation estivale

De manière générale, c'est dans la zone à pluviométrie élevée (stations 4515 et 4524) que les meilleurs résultats de corrélation entre la végétation (VCI) et les précipitations (SPI) se retrouvent ($r = 0,83$ à Galaroza). La relation TCI/SPI, plus faible, est améliorée lorsque seules les données de la période estivale sont utilisées. À l'opposé, la station de Nijar, dans la zone semi-désertique du sud-est démontre une meilleure relation entre le TCI et le SPI qu'entre le VCI et le SPI. La relation faible entre la végétation et les précipitations est toutefois améliorée avec un décalage de cinq décades. Entre ces deux régions, la zone à précipitations médianes offre un portrait plus partagé. D'une part, les stations de l'intérieur des terres (4258, 5402, 60972, 6308), moins sujettes aux effets tampons de l'océan ou de la mer, possèdent une plus forte relation entre le TCI et SPI qu'entre le VCI et le SPI. Les précipitations mensuelles à ces stations qui reçoivent plus de 500 mm de pluie par an sont caractérisées par un clivage plus marqué entre les précipitations hivernales fortes et les précipitations estivales faibles (figure 5.2). La stabilité des masses d'air estivales rend le TCI moins variable qu'en hiver et fait en sorte qu'il oscille davantage dans le même sens que le SPI. Finalement, les stations côtières, ouvertes à l'effet tampon de l'océan ou de la mer (8391, 6201, 6249, 6258) possèdent une plus forte corrélation VCI/SPI que TCI/SPI. Ces stations reçoivent moins de 500 mm de pluie par année et le clivage entre les précipitations hivernales et estivales est moins prononcé, sauf à la station de Sevilla (8391) (figure 5.2). Le climat de ces stations est plus stable à l'année et les corrélations TCI/SPI aux stations de la côte méditerranée (6201 et 6258) sont plus forte en hiver qu'en été.

Malgré ce portrait général, la force de chaque corrélation VCI/SPI et TCI/SPI dépend de plusieurs facteurs, dont l'utilisation du sol, le type de végétation, la phénologie des cultures, les pratiques culturales ou encore les spécificités climatiques régionales. Celles-ci interagissent et font en sorte qu'à chaque station, la force ou la faiblesse des corrélations peut être partiellement expliquée par différents facteurs. Ces facteurs sont ici discutés.

La station 4515 (Galaroza) possède les résultats de corrélation entre la végétation (VCI) et la pluie (SPI) (tableau 5.3) les plus élevés (0,83). C'est une station située dans la zone de pluviométrie élevée, zone A discutée à la section 5.1. Quoique la corrélation initiale soit moyenne ($r = 0,48$), l'utilisation des données hivernales, combinée à une période de décalage de 1 décennie apporte une nette amélioration, faisant passer la corrélation à 0,83, significative

dans 99 % des cas. On peut donc estimer que 69 % des variations de la condition de la végétation en saison humide peut être expliquée par les variations de précipitation. Par contre, la corrélation entre la température (TCI) et les précipitations (SPI) est plus faible ($r = 0,36$). Elle s'améliore (0,38) lorsque seules les données estivales sont retenues. Cela signifie que seul 14 % des variations de température du couvert végétal peut être expliqué par une variation des précipitations.

L'utilisation du sol (tableau 4.2 et annexe 2) (EEA, 2000) autour de la station peut aider à expliquer le comportement des indicateurs. En effet, 52 % du territoire de 11 km² autour de la station est occupé par des populations forestières alors que l'agriculture non irriguée et les cultures permanentes, comme les cultures d'oliviers, occupent respectivement 43 % et 3 %. Ces types de végétation dépendent en totalité des pluies et des ressources hydriques du sol pour leur approvisionnement en eau. La réponse du couvert végétal est donc en lien direct avec les pluies et donc avec le SPI.

Lorsqu'on observe l'évolution du NDVI (annexe 4) à la station 4515, on peut constater que la tendance à la station 6258, quoique généralement moins élevée, est très similaire à celle observée à la station de Lanjaron. Le territoire autour de cette dernière est aussi composé de cultures non irriguées (55 %) et de végétation sclérophylle (30 %). D'autres paramètres, comme les propriétés des sols et le type de végétation (capacité en eau du sol, densité des racines ou stade phénologique, etc.) peuvent aussi influencer les réserves hydriques en emmagasinant l'eau ou en influençant la quantité d'eau utilisée. Cette eau peut alors être disponible pour les plantes plus longtemps et ceci pourrait expliquer le décalage qui existe entre la réaction de la végétation et le moment où le régime pluviométrique a changé.

À la station 4515, la relation TCI-SPI est légèrement plus forte en été, alors que les variations thermiques (Ts et Ta) sont moins grandes. En hiver, les pluies, les vents et les conditions climatiques rendent le TCI très variable sur une courte période de temps. Il est donc difficile d'obtenir une forte corrélation entre un indicateur variant sur une courte période (TCI) et un indicateur ayant une variation saisonnière, comme le SPI.

Les diagrammes de dispersion (figures 5.7 et 5.8) démontrent la tendance du VCI et du TCI à augmenter avec l'augmentation du SPI. Sur la figure 5.7, on peut voir l'amélioration apportée

à la dispersion du VCI lorsque seules les données hivernales (losanges blancs) sont gardées. Les données sont plus regroupées et la relation y est plus forte; on y voit plus clairement la tendance du VCI à augmenter avec une augmentation du SPI. Cependant, même si la majorité des valeurs du VCI indique des conditions au-dessus de la normale (0,5), plusieurs de ces valeurs démontrent des conditions de stress hydrique ($VCI < 0,35$).

Sur la figure 5.8, la tendance du TCI à augmenter avec le SPI est moins visible. Les données sont plus dispersées. Alors que le SPI indique des conditions tant sèches qu'humides, les valeurs du TCI sont presque toutes supérieures à 0,5 et donc au-dessus des normales.

Comme les valeurs du SPI varient de situations très sèches (-2,0 et moins) à très humide (2,0 et plus), quelques valeurs extrêmes du VCI et TCI étaient attendues ($<0,25$ et $>0,75$). Il est toutefois aisé de voir que la majorité de la distribution des valeurs du VCI comme du TCI se situent au-dessus de la normale (0,5).

Ceci peut partiellement être expliqué par la présence de nuages résiduels dans les images. La série de traitements d'images n'est pas parfaite et il reste des pixels où les nuages ne sont pas détectés. Ces nuages font en sorte d'abaisser les valeurs du NDVI et de Ts. Ceci est particulièrement visible sur l'images du VCI du mois de février 1991 (annexe 3) où les pixels nuageux non détectés ont un VCI en dessous de 0,2. Cette baisse des valeurs en période considérée normale au niveau pluviométrique fait en sorte que les valeurs minimales réelles (période de sécheresse) apparaissent plutôt comme des valeurs normales. Il est alors difficile de discerner un NDVI faible dû à la sécheresse ou à l'effet des nuages. Le VCI tend alors à être plus élevé. De la même manière, une baisse de Ts en période normale rend le TCI plus fort en période de sécheresse.

Cependant, cette différence de distribution des indicateurs est sûrement due à la différente nature des indicateurs. Dans cette région, une baisse prolongée et relativement intense des précipitations est nécessaire avant qu'il y ait un effet marqué sur l'état de la végétation.

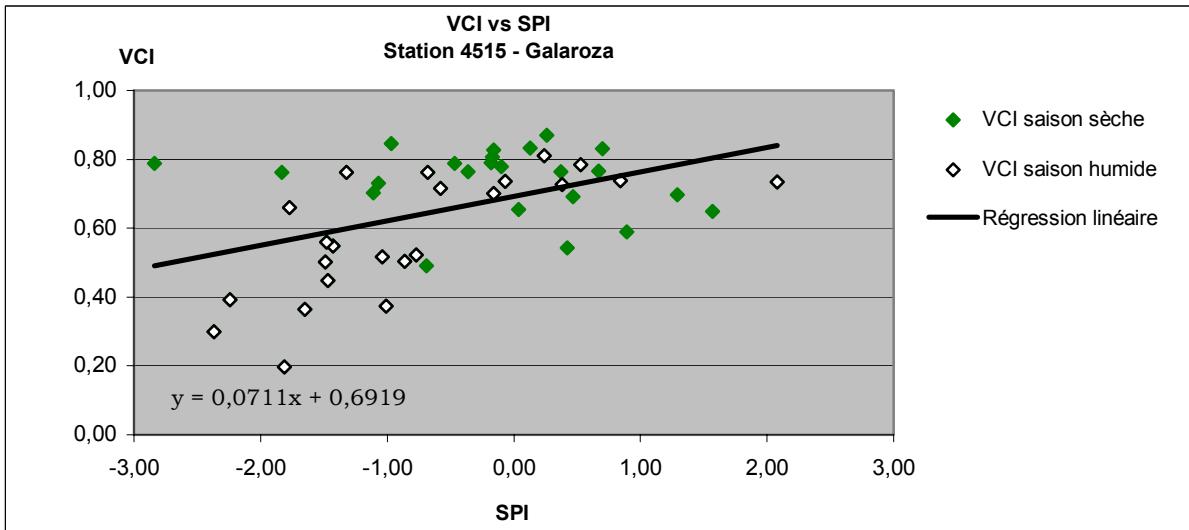


Figure 5.7 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 4515

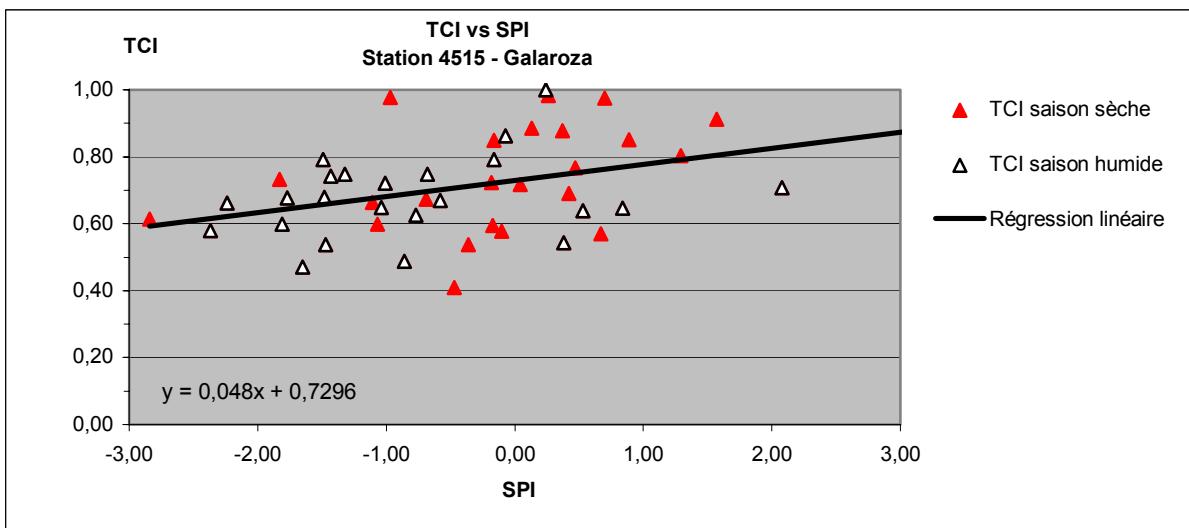


Figure 5.8 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 4515

La station 4524 (Aroche) (figures 4.1, 5.9 et 5.10) fait elle aussi partie de la région à pluviométrie élevée, zone A discutée à la section 5.1. Les résultats de corrélation complète sont dès le départ plus élevés qu'à la station 4515 (Galaroza) qui est tout près. La corrélation complète entre le VCI et le SPI est de 0,77 et celle entre le TCI et le SPI est de 0,55 (tableau 5.3). Lorsque seules les données de la saison humide sont retenues, la corrélation VCI/SPI atteint 0,81 et l'introduction d'un décalage n'améliore pas les résultats. Tout comme à la station précédente par contre, le résultat de corrélation entre le TCI et le SPI est amélioré lorsque seules les données de la saison sèche sont retenues. La corrélation passe alors de 0,55

à 0,68 (tableau 5.3). À cette station, les variations pluviométriques peuvent donc expliquer 65 % des variations de la condition végétative et 30 % des variations de la température de surface (TCI).

Comme le décalage n'améliore pas les résultats, il semble donc que la végétation autour de cette station réagisse plus rapidement aux changements des conditions hydriques que la végétation forestière de la station 4515. La haute corrélation entre la végétation (VCI) et la pluviométrie (SPI) est probablement due au fait que la végétation et le type de sol à cette station ne masquent pas l'effet des précipitations. En effet, ce territoire est couvert à 55 % par des cultures permanentes et à 30 % par des zones boisées. 85 % de ce territoire est donc couvert d'une végétation non irriguée qui dépend directement des pluies pour son approvisionnement en eau. La courbe de l'évolution du NDVI, à l'annexe 4, montre bien que le NDVI est à son maximum de janvier à mai. On peut y voir deux pics, qui correspondent probablement à la période précédant les récoltes ou à la période précédant la saison sèche. Les cultures, permanentes ou non irriguées, ont un système racinaire moins développé et moins profond que les arbres forestiers et sont moins aptes à retenir l'eau des sols ou aller la chercher en profondeur. Pour cette raison, la réponse du VCI face aux précipitations est plus rapide à cette station que pour l'écosystème majoritairement forestier de la station de Galaroza (4515).

Comme pour la station précédente, les résultats de corrélation entre le TCI et le SPI sont plus forts en été qu'en hiver. Encore une fois, ceux-ci peuvent être expliqués par la grande variation des températures de surface et de l'air durant la période hivernale. Toutefois, comme la végétation autour de cette station réagit plus rapidement aux changements pluviométriques, la relation entre le SPI et la température de surface (TCI) est elle aussi un peu plus forte qu'à la station de Galaroza (4515).

Cependant, il est possible que la force des corrélations à cette station soit partiellement due au nombre plus restreint de paires de données utilisées dans le calcul. Alors que 23 paires de données ont été utilisées pour la corrélation hivernale à Galaroza, seules huit paires étaient disponibles à Aroche. Pour la corrélation estivale TCI/SPI, c'est 13 paires qui ont été utilisées à Aroche, comparativement à 23 paires à Galaroza. Cette diminution du degré de liberté entraîne une diminution de la représentativité des corrélations. Le test de corrélation indique toutefois que ces résultats sont significatifs dans 99 % des cas. De plus, on peut voir sur les diagrammes

de dispersion (figures 5.9 et 5.10) que le VCI et le TCI augmentent avec une augmentation du SPI. L'augmentation du VCI avec une augmentation du SPI est toutefois plus faible que pour le TCI et se traduit par une pente moins prononcée de la droite de régression. Les données du VCI sont toutefois beaucoup moins dispersées, ce qui explique la forte corrélation du VCI et du SPI. Toutefois, seules les données partielles de 1989 à 1991 sont représentées sur ces figures. Si, à l'instar de la station voisine, la relation s'améliorait en période de sécheresse (1992) (figure 5.5), la forte corrélation entre le VCI et le SPI devrait être maintenue.

À cette station (Aroche), comme à Galaroza (4515), les valeurs du SPI varient de conditions sèches (négatives) à humides (positives) alors que les valeurs du VCI demeurent toutes dans la zone représentant des conditions favorables pour la végétation.

Les images mensuelles (annexe 3) montrent pour cette région, entre octobre 1989 et janvier 1993, des conditions dans les normales ou au dessus des normales ($VCT > 40$), sauf au début de 1992, une période de sécheresse connue. Le nombre limité de paires de données restreint certainement les valeurs possibles du VCI. À l'aide des images, il est possible de noter des valeurs de VCI indicatives des conditions de sécheresse ($VCT < 35$)

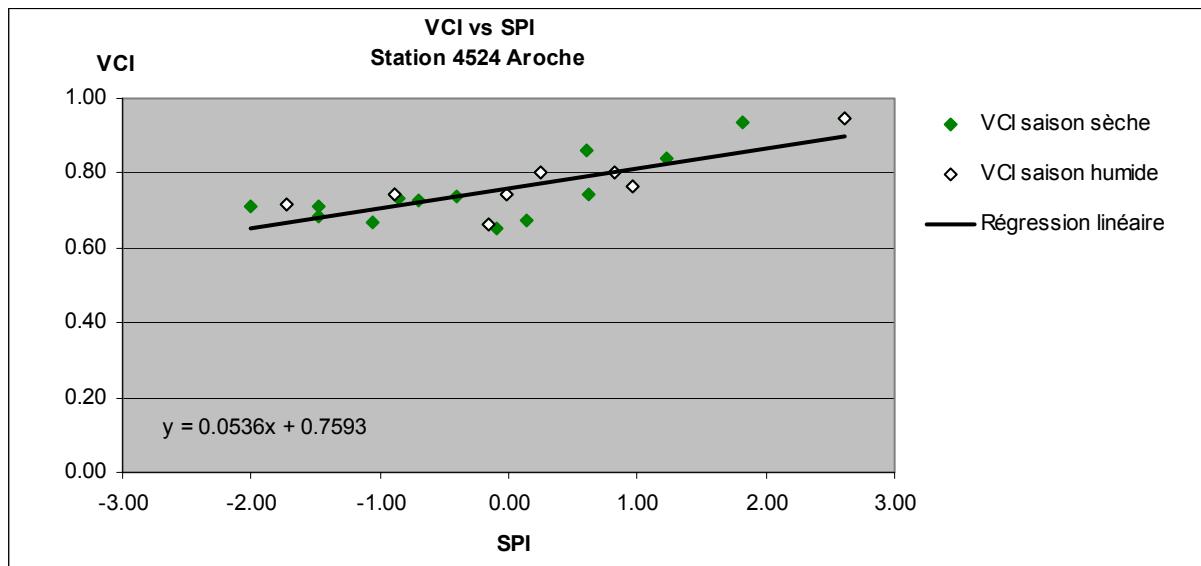


Figure 5.9 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 4524

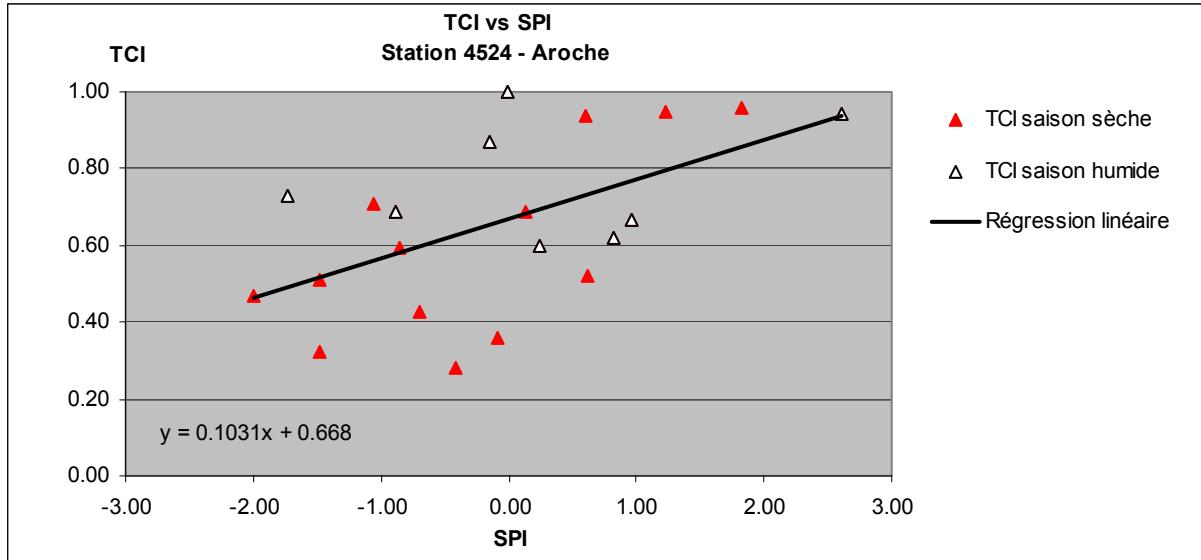


Figure 5.10 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 4524

À l'extrême sud-est de l'Andalousie, la station de Nijar (6327) fait partie du groupe C, où les précipitations sont rares et où le climat y est semi-désertique. Les précipitations y sont faibles à l'année (tableau 5.1) et le territoire autour de cette station est occupé en grande partie (52 %) par des espaces dénudés ou des mines et en moindre partie par de l'agriculture irriguée (18 %) et non-irriguée (30 %). L'évolution du NDVI, en annexe 4, montre d'ailleurs des valeurs et une amplitude annuelle plus faible qu'aux autres stations. Comme mentionné précédemment, l'utilité des indicateurs choisis est cependant douteuse puisque aucun des ces indicateurs n'est adapté pour décrire les zones quasi-désertiques.

Tel que vu sur les courbes d'étalonnage de cette station (figure 5.5), les courbes du VCI et du SPI ont peu de similitude alors que celle du TCI semble mieux suivre les fluctuations du SPI. Ceci se reflète dans les résultats de corrélation. Alors que la corrélation VCI/SPI complète est non significative, celle entre le TCI et le SPI atteint 0,5. Comme cette station est située dans une zone de faibles précipitations à l'année, l'utilisation des données hivernales seulement dans le calcul de la corrélation VCI/SPI n'améliore pas les résultats qui demeurent non significatifs. Avec l'introduction d'un décalage de 5 décades, la corrélation a toutefois atteint 0,47. Malgré une forte proportion (52 %) des espaces dénudés, les cultures occupent tout de même 18 % du territoire (annexe 2). Ceci expliquerait la force relative de la relation. Le fort décalage (50 jours) est causé par la présence de cultures irriguées dont l'approvisionnement en

eau masque le déficit pluviométrique. De plus, comme le climat est stable à l'année, l'utilisation des données estivales pour la corrélation TCI/SPI n'a presque pas augmenté le résultat de corrélation qui a passé à 0,53. À cette station, les précipitations semblent donc responsables de 22 % des variations de l'état de la végétation (VCI) et de 28 % des variations de la température de surface (TCI).

L'éparpillement des points sur le diagramme de dispersion VCI vs. SPI (figure 5.11) illustre bien la faiblesse de la corrélation VCI/SPI. On peut voir, à l'aide de la droite de régression, que les valeurs du VCI n'augmentent pas beaucoup avec une augmentation du SPI. Alors que les valeurs des deux indicateurs (VCI et SPI) oscillent de situations de stress hydrique à situations de surplus hydriques ou de bonne condition de la végétation, cette tendance ne se produit pas simultanément. Considérant que le NDVI n'est pas adapté aux zones sèches où le retour du signal du sol est fort, et qu'une proportion importante du territoire est irriguée, cette faiblesse n'est pas surprenante. Sur le diagramme de dispersion du TCI vs. SPI (figure 5.12), les points sont plus regroupés autour de la droite de régression, signe d'une corrélation plus forte. On peut aussi y voir que le TCI augmente avec une augmentation du SPI. Le TCI demeure toutefois généralement au-dessus de 0,5 et indique une bonne condition de la végétation même si le SPI oscille de situations de stress hydrique à surplus hydrique.

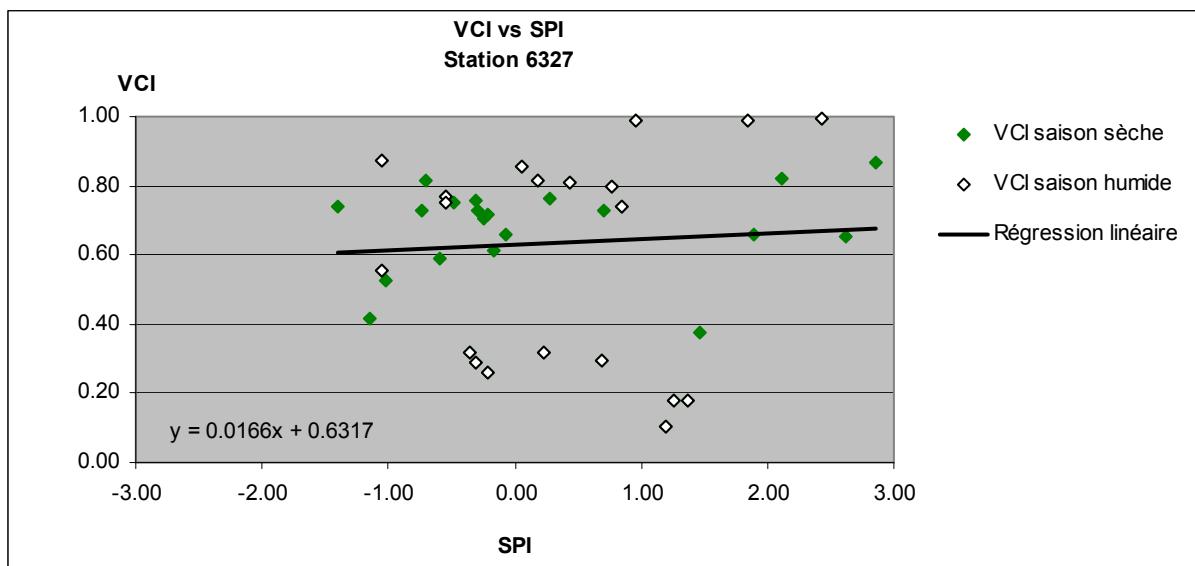


Figure 5.11 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6327

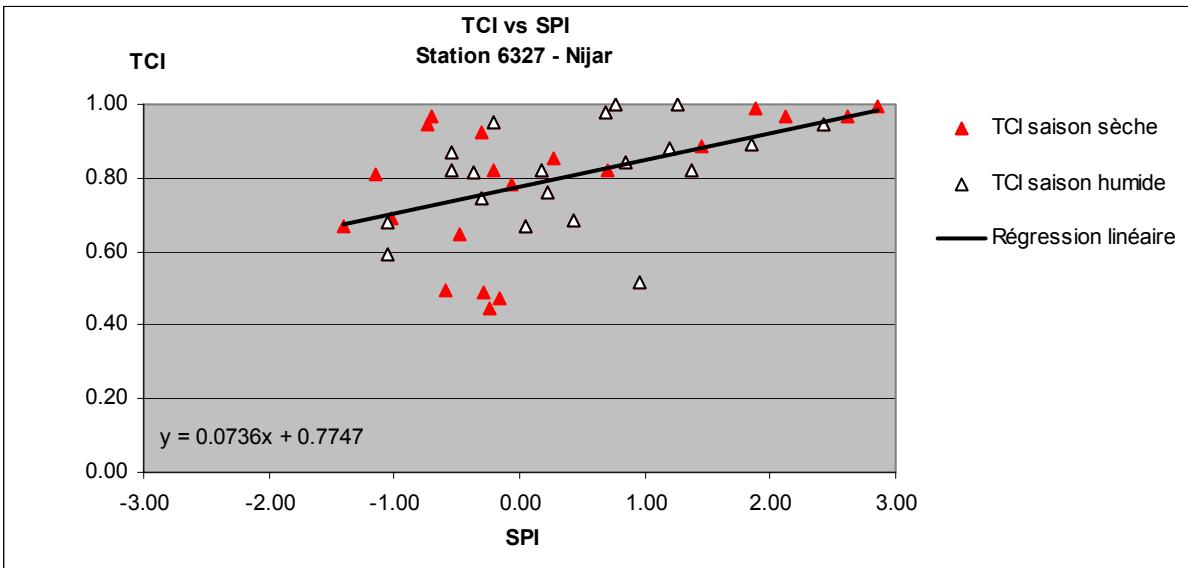


Figure 5.12 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6327

La station d'Aldea de Cuenca (4258) (figures 5.13, 5.14), située à une altitude moyenne (571 m) au nord de l'Andalousie, près de la frontière provinciale, fait partie des stations de précipitation intermédiaire (figure 5.1 et tableau 5.1). Cette station montre de faibles résultats, avec une valeur de corrélation complète entre le VCI et le SPI de seulement 0,06 non significative (tableau 5.3). Avec 95 % de son territoire couvert par des cultures non irriguées, et un degré de liberté de 43, cette corrélation faible et non-significative est très surprenante. L'utilisation des données hivernales seulement rend même la corrélation négative alors que l'introduction d'un décalage de 5 décades améliore les corrélations qui restent tout de même faible ($r = 0,34$ au maximum) (tableau 5.3). Au mieux, les variations du SPI n'expliquent que 12 % des variations du VCI. En observant l'évolution du NDVI à cette station, on peut y voir que ce dernier montre une amplitude très marquée entre les valeurs estivales qui sont presque aussi basses que celles de Nijar et les valeurs hivernales (période de croissance des cultures) qui sont plutôt élevées. Une corrélation plus forte en hiver aurait donc été attendue. Il se peut donc que les cultures soient en partie irriguées, ce qui expliquerait qu'il y ait peu de lien entre les précipitations et la végétation.

La relation entre le TCI et le SPI est par contre bonne ($r = 0,63$) et ni la relation estivale, ni la relation hivernale ne change la valeur de corrélation. Ceci semble indiquer que le climat autour de cette station est plutôt stable, même en hiver. D'ailleurs, la figure 5.2 montre que les précipitations mensuelles d'octobre à avril sont semblables.

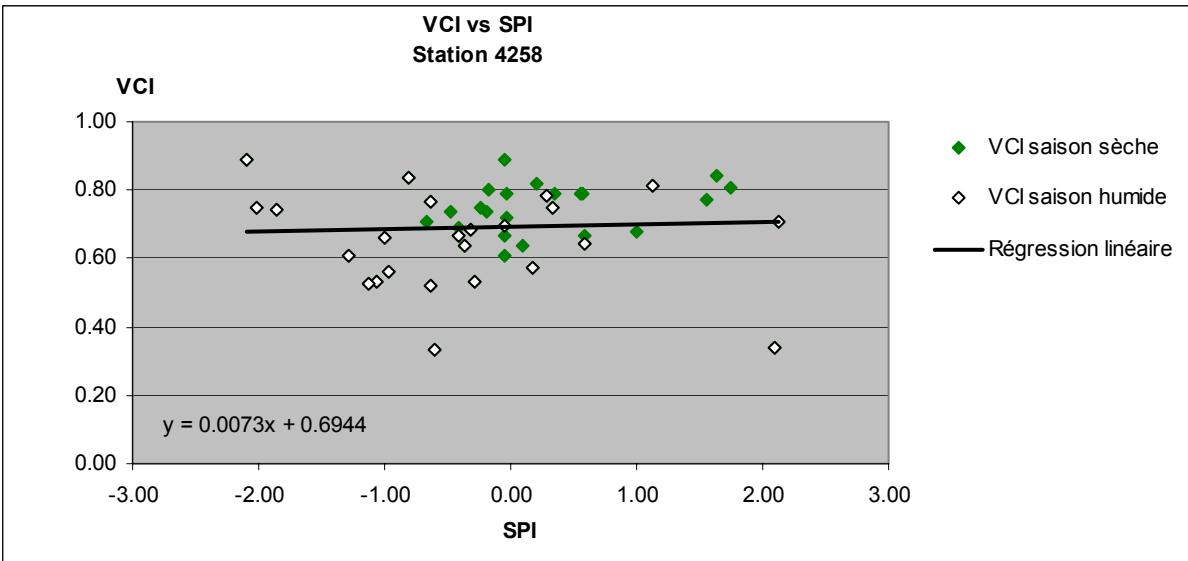


Figure 5.13 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 4258

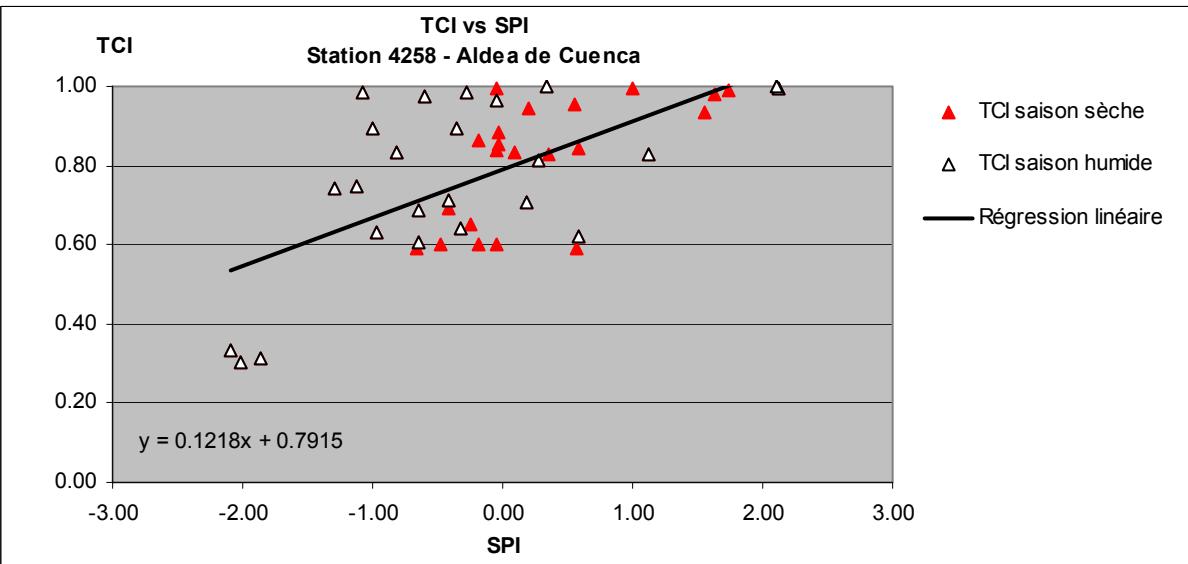


Figure 5.14 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 4258

Le diagramme de dispersion du VCI vs. SPI (figure 5.13) de cette station montre une distribution de points épars qui illustre bien la faiblesse de la corrélation entre ces indicateurs. Sur le diagramme de dispersion du TCI vs. SPI (figure 5.14), la distribution est également plutôt éparpillée autour de la droite de régression. La droite de régression montre toutefois la tendance du TCI à augmenter avec le SPI. On peut aussi y remarquer trois points qui semblent erronés à première vue mais qui, lorsqu'on étudie la courbes d'étalonnage (figure 5.6a), sont

parfaitement en relation avec le SPI durant la période de sécheresse de 1993. Alors que le VCI et le TCI sont généralement élevés (0,5 et plus) et indiquent une condition de la végétation au-dessus de la normale, le SPI indique autant des situations de déficit hydrique que des situations de surplus hydrique. Comme expliqué précédemment, la présence de nuages résiduels dans les images satellites (annexe 3) mais plus probablement la nature différente des indicateurs peut faire en sorte que ces derniers donnent des résultats différents.

Cordoba (5402) (figures 5.15 et 5.16) fait aussi partie des stations à pluviométrie moyenne à élevée. Elle est située sur les hauts plateaux de la vallée du Guadalquivir à une altitude moyenne (525 m)(tableau 5.1). La corrélation complète entre le VCI et le SPI est faible ($r = 0,26$) mais significative dans 80 % des cas. Un décalage de 2 décades en saison hivernale améliore la corrélation qui demeure toutefois faible ($r = 0,39$) (tableau 5.3). Ceci n'est pas surprenant puisque 31% du territoire autour de cette station est occupé par des cultures avec irrigation qui masque la relation entre les précipitations et la végétation en offrant une autre source en eau pour les plantes. L'évolution annuelle du NDVI à l'annexe 4 montre d'ailleurs un NDVI maximal en été alors que les précipitations sont presque nulles. De plus, lorsqu'on observe les images estivales du VCI (ex. juillet 1990 et juillet 1991), il est aisément de voir que le VCI est élevé en été dans la zone bénéficiant d'irrigation (figure 5.29). Toutefois le territoire autour de cette station est majoritairement occupé par des cultures non irriguées (62 %). La faible corrélation entre ces indicateurs est donc surprenante. L'utilisation du sol et les pratiques agricoles sont cependant dynamiques. Il est possible que le territoire ait une vocation différente, ce qui expliquerait la faiblesse des relations observées. La corrélation complète entre le TCI et le SPI est elle aussi plutôt faible (0,30). Comme pour la plupart des autres stations, cette corrélation est améliorée ($r = 0,48$) alors que seules les données estivales sont gardées. À cette station, les précipitations n'expliquent que 15 % et 23 % des variations du VCI et du TCI respectivement.

Ces faibles corrélations sont bien illustrées à l'aide des diagrammes de dispersion (figures 5.15 et 5.16). Sur chacune des figures, l'éparpillement des points autour de la droite de régression décrit bien la faiblesse des relations VCI/SPI et TCI/SPI. La pente ici aussi montre que les valeurs du VCI et du TCI n'augmentent que peu avec l'augmentation du SPI. On peut aisément voir, comme aux stations précédentes, que les valeurs du SPI oscillent entre des

conditions extrêmement sèches (-2 et moins) à extrêmement humides (+2 et plus) alors que le VCI et le TCI se maintiennent au-dessus des conditions normales (0,5). On peut cependant remarquer un clivage du VCI sur la figure 5.15, entre la période estivale (losanges verts) et hivernale (losanges blancs). Les valeurs du VCI estival étant généralement supérieures aux valeurs du VCI en hiver. Ce clivage est probablement dû à l'irrigation estivale qui maintient la végétation dans de bonnes conditions alors qu'en hiver ces cultures ne sont probablement pas exploitées ($NDVI \approx 0,4$ en été et $0,2$ en hiver) (annexe 4). Cette séparation du VCI hivernal et estival est aussi visible sur le diagramme de dispersion de la station Sevilla (8391) (figure 5.21 et 5.22) dont le territoire autour de la station est occupé à 31 % par des cultures irriguées.

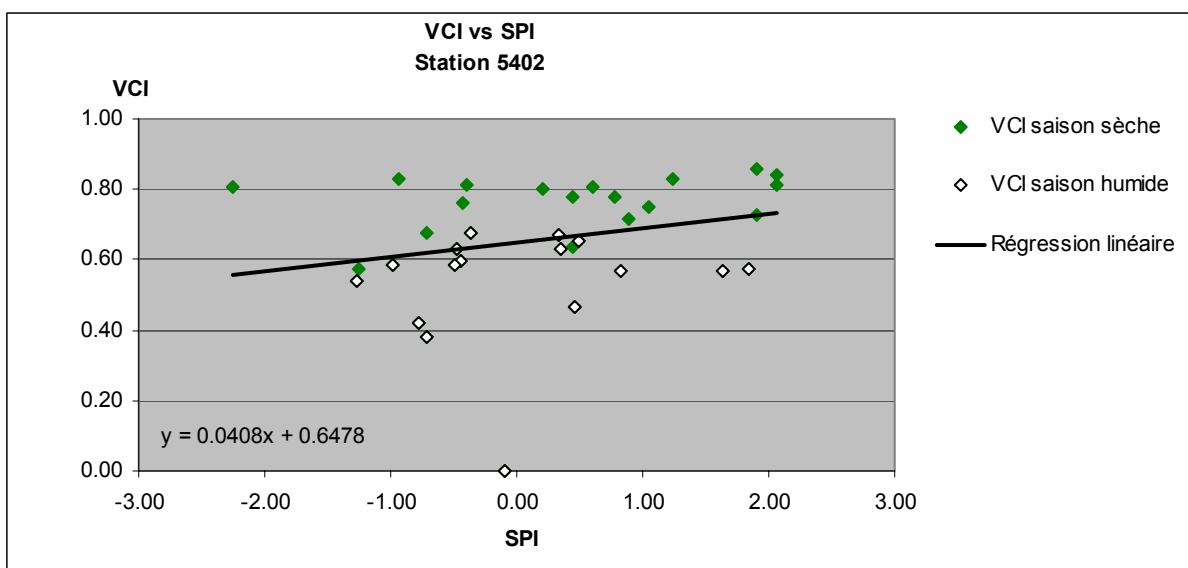


Figure 5.15 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 5402

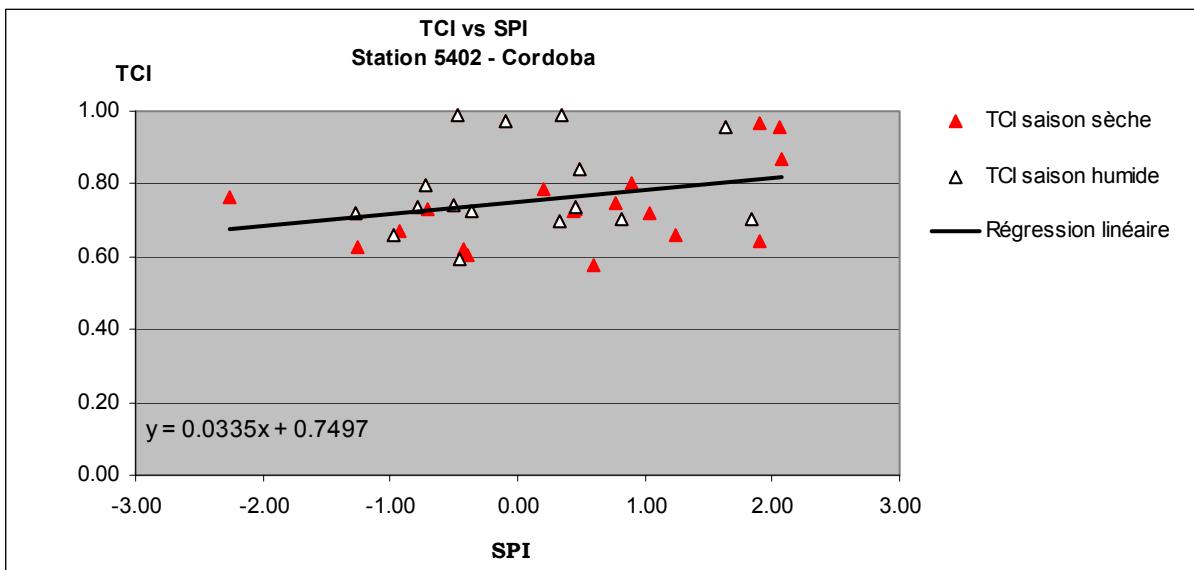


Figure 5.16 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 5402

La station d'Archidona (60972) (figures 5.17 et 5.18) est située dans les montagnes Bétiques à une altitude de 700 m. Elle fait aussi partie des stations à pluviométrie intermédiaire (tableau 5.1). Son territoire est majoritairement occupé par des cultures permanentes (40 %) et par des forêts (39 %). L'évolution du NDVI montre cependant un NDVI qui varie peu mais dont les valeurs maximales ne dépassent pas 0,35, ce qui est peu pour un couvert largement forestier. Ceci laisse croire que l'utilisation du sol de Corine est possiblement erronée.

Le résultat de la corrélation complète entre le VCI et le TCI est d'ailleurs non significatif ($r = 0,18$ n.s.) (tableau 5.3). Un décalage de quatre décades améliore toutefois la corrélation qui devient significative ($r = 0,44$). Lorsque seules les données hivernales sont retenues, cette corrélation passe à 0,55. On peut cependant remarquer qu'un décalage de deux décades apporte un résultat de corrélation supérieur au résultat obtenu avec trois décades de décalage. Cette tendance semble exprimer la réaction différente des forêts et des cultures face aux déficits pluviométrique. Comme aux autres stations à pluviométrie moyenne qui ne sont pas soumises aux effets de la mer, la corrélation complète entre le TCI et le SPI est plus forte ($r = 0,43$) que la corrélation VCI/SPI. En ne retenant que les données estivales, cette corrélation passe à 0,63. À cette station, la pluviométrie explique donc 30 % et 19 % des variations du VCI et du TCI.

Comme aux stations vues précédemment, les valeurs du TCI et du VCI demeurent relativement élevées sur les diagrammes de dispersion (fig. 5.17 et 5.18) alors que les valeurs du SPI oscillent entre des valeurs représentatives de stress hydrique à des valeurs représentatives de surplus hydrique. Les faibles corrélations sont bien illustrées par la grande dispersion des points, de part et d'autre de la droite de régression. Sur le diagramme de dispersion du VCI vs. SPI (figure 5.17), on peut bien voir la séparation entre les données hivernales (losanges blancs) et estivales (losanges verts). Alors que les valeurs du VCI estival restent comprises entre 0,4 et 0,82 (conditions normales), les valeurs du SPI sont indicatrices autant de surplus que de déficit hydrique. En hiver par contre, on peut bien voir que les valeurs du VCI augmentent avec une augmentation du SPI. Deux points se trouvent toutefois à l'extérieur des autres. Ceux-ci correspondent à décembre 1989 et janvier 1990, une période de fortes précipitations (figure 5.4a et annexe 3). De plus, la présence de nuages sur les images mensuelles (annexe 3) est sûrement une cause probable de la faiblesse du VCI pour cette période. D'ailleurs, les valeurs de décembre 1989 ne sont tirées que des images des décades 29, 30 et 31 de 1989, et les valeurs de janvier 1989 ne sont tirées que de l'image de la décennie 31 de 1989. Les images décennales de décembre et janvier 1989 ne pouvaient pas être utilisées à cause de la présence de nuages ou que l'angle de vue était inadéquat.

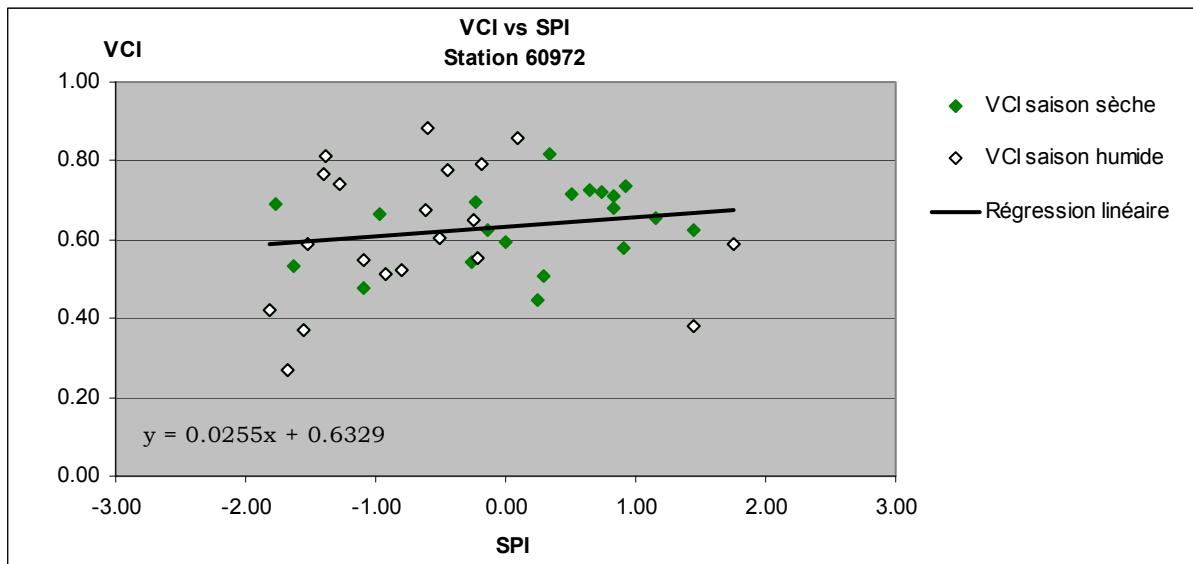


Figure 5.17 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 60972

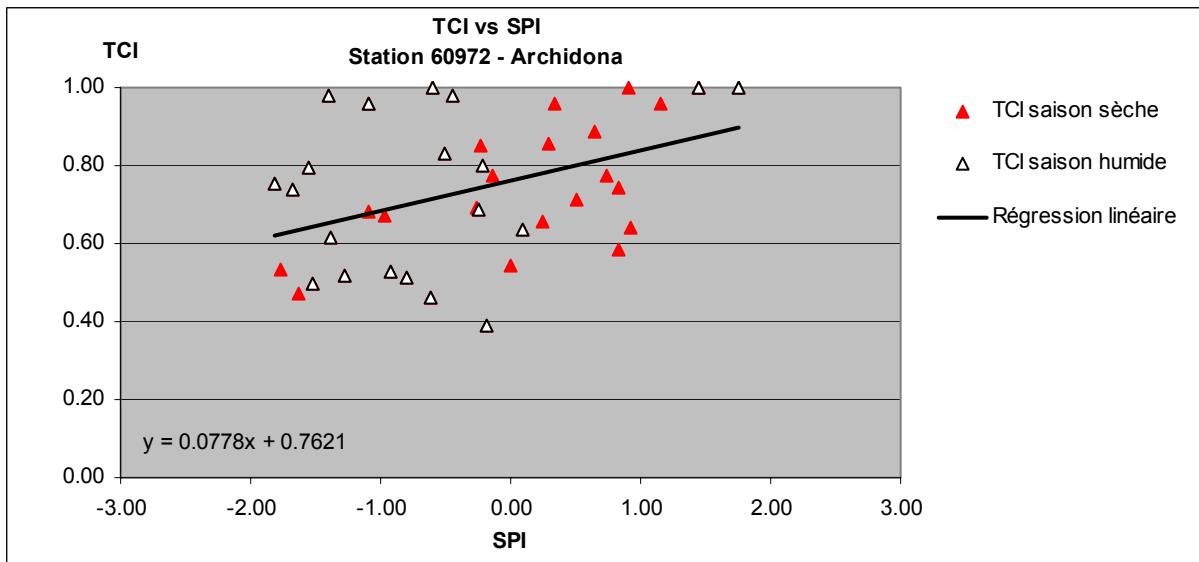


Figure 5.18 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 60972

Laujar Monterrey (6308) (figures 5.19, 5.20) est la dernière des stations faisant partie du groupe à pluviométrie moyenne à élevée dont la corrélation TCI/SPI est plus forte que la corrélation VCI/SPI. Cette station est située dans une zone majoritairement forestière (50 %) des montagnes Bétiques à une altitude de 587 m. (Tableau 5.1). Cependant, les surfaces urbaines et la végétation sclérophylle représentent 13 % et 31 % du territoire autour de cette station respectivement. L'évolution du NDVI (annexe 4) est généralement supérieure à 0,35 mais ne varie pas beaucoup intra-annuellement puisque le couvert forestier, les zones urbaines et la végétation sclérophylle possèdent une réponse relativement stable dans le temps.

Considérant qu'une grande partie ce territoire est couvert de forêts qui sont étroitement liées aux précipitations pour leur approvisionnement en eau, il est surprenant de retrouver une corrélation complète entre le VCI et le SPI aussi faible ($r = 0,16$) (tableau 5.3). Toutefois, l'introduction d'un décalage améliore les corrélations qui atteignent 0,54 après 6 décades. La présence de végétation sclérophylle est largement responsable de ce décalage. Cette végétation, adaptée pour résister aux sécheresses, ne réagit que peu aux changements pluviométriques. La corrélation complète entre le TCI et le SPI est cependant relativement forte à cette station ($r = 0,50$) et atteint même 0,53 lorsque seules les valeurs estivales sont gardées. Les précipitations sont donc responsables de 29 % et 28 % des variations de la condition et de la température des surfaces terrestres.

À cette station, les diagrammes de dispersion (figures 5.19 et 5.20) montrent une distribution éparpillée des données. Encore une fois, les valeurs du SPI indiquent autant des situations de surplus que de déficit hydrique alors que le VCI et le TCI demeurent généralement au-dessus de 0,5. Contrairement aux stations vues précédemment, les valeurs du SPI demeurent plus élevées et au pire n’indiquent qu’une situation modérément sèche (tableau 3.1).

Les quatre dernières stations qui seront discutées font partie des stations qui sont sujettes aux effets des courants d’air provenant de l’océan ou de la mer. Le clivage entre les précipitations mensuelles hivernales et estivales est moins prononcé qu’aux stations précédentes et les corrélations VCI/SPI sont plus élevées qu’entre le TCI et le SPI.

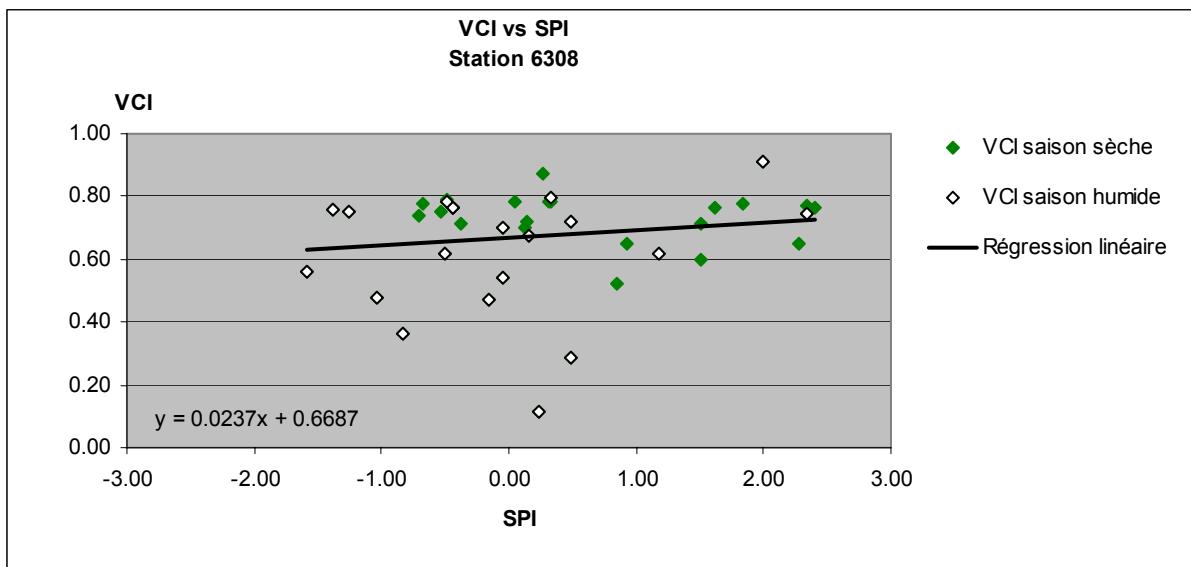


Figure 5.19 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6308

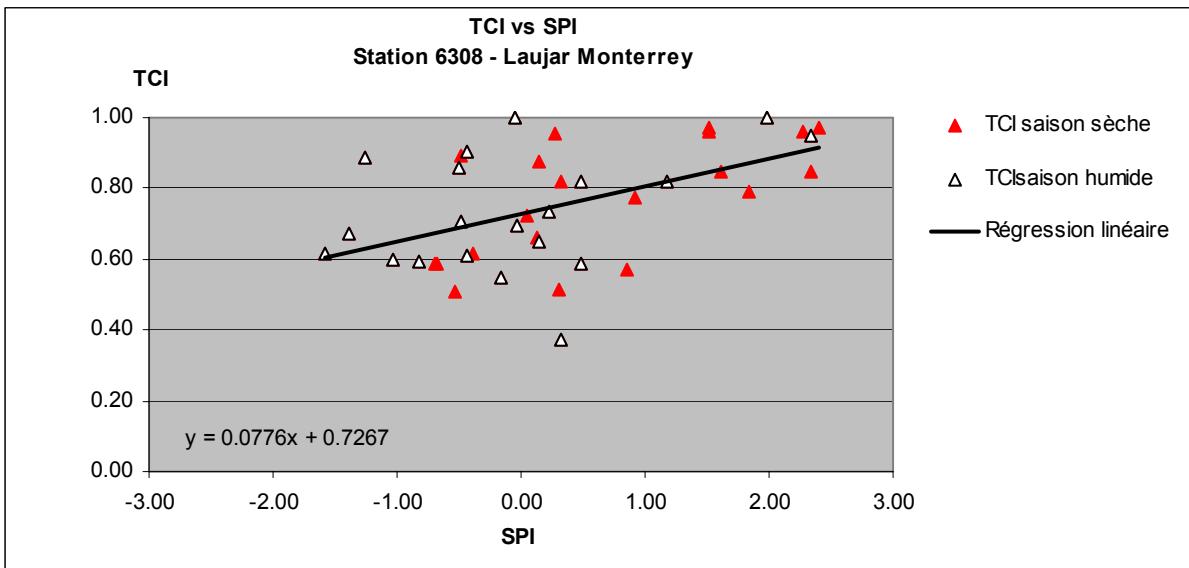


Figure 5.20 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6308

La première station de ce groupe, Sevilla (8391) (figure 5.21 et 5.22) est située dans la zone de pluviométrie intermédiaire (tableau 5.1). Les résultats de corrélation à cette station (tableau 5.3) sont plutôt faibles. La corrélation complète entre le VCI et le SPI est de seulement 0,31 et l'introduction d'un décalage de trois décades améliore les résultats qui passent à 0,73 (tableau 5.3). Cependant, la corrélation maximale VCI/SPI est de 0,78 après 6 décades. La corrélation complète entre le TCI et le SPI est quant à elle de 0,38 mais n'est pas significative lorsque seules les données hivernales ou estivales sont gardées. Le faible nombre de paires de données disponibles pour les corrélations, 19 (9 en hiver et 8 en été) (tableau 5.2), fait en sorte que les corrélations ne sont représentatives que pour la période connue de sécheresse puisque les paires de données sont tirées de mars 1992 à septembre 1993. Cette station a toutefois été retenue à cause de sa position géographique. Ceci permet d'obtenir une meilleure couverture spatiale du territoire andalou.

Outre le nombre réduit de données disponibles, ces faibles résultats de corrélation peuvent être expliqués en grande partie à l'aide de l'utilisation du sol. L'agriculture irriguée, qui occupe un peu plus du tiers du territoire (31 %), masque l'effet des baisses pluviométriques puisque les plantes reçoivent un approvisionnement en eau venant de l'irrigation, et non des précipitations. Cependant, près de 47 % du territoire est occupé par des cultures non irriguées. L'évolution du NDVI (annexe 4) montre des valeurs et une amplitude annuelle généralement faibles où les

valeurs maximales se retrouvent en été (juin-juillet). La station de Cordoba, dont près de 31% du territoire aussi est irrigué, montre un patron similaire mais plus élevé.

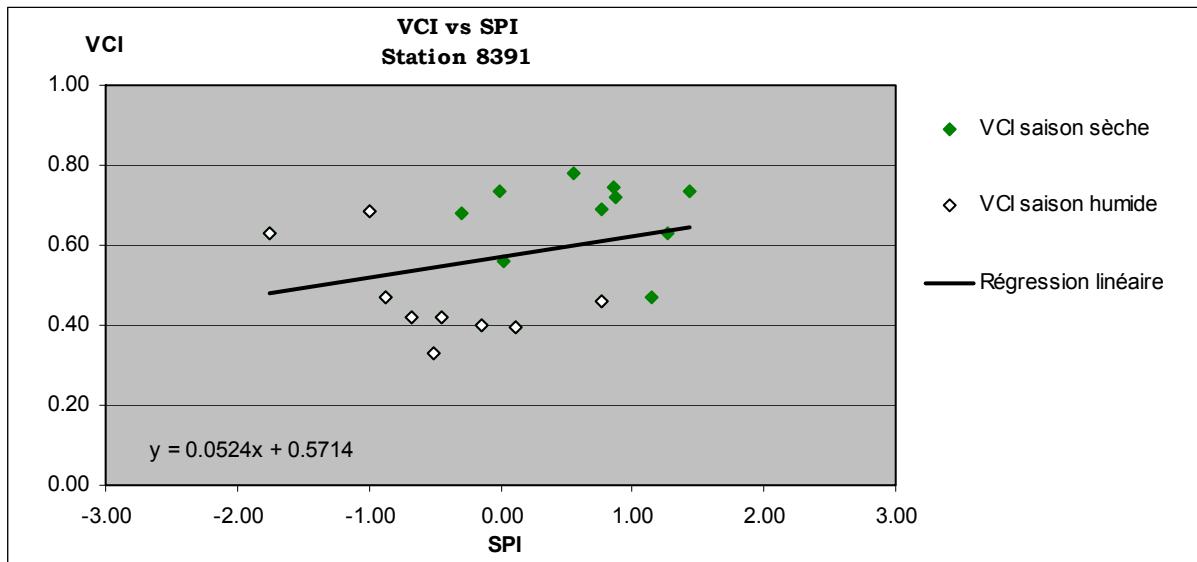


Figure 5.21 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 8391

Sur les diagrammes de dispersion (figures 5.21 et 5.22), il est clair que les valeurs obtenues sont très dispersées et qu'aucune relation linéaire forte ne peut en être tirée. Alors que les valeurs du SPI indiquent des conditions oscillant entre sévèrement sèches à très humides, le VCI et le TCI se maintiennent autour de conditions normales à élevées (0,4 et plus). On peut toutefois remarquer, sur les deux diagrammes de dispersion, une division entre les valeurs hivernales (losanges blancs) et les valeurs estivales (losanges verts). À cette station, en été comme en hiver, la condition de la végétation n'est pas liée au SPI. Alors que le SPI tend vers des conditions favorables (SPI positif), le VCI semble tendre vers le bas (conditions sèches) en hiver et vers le haut en été (conditions humides). Cet inversement des tendances est sûrement dû à l'irrigation puisque celle-ci permet à la végétation de croître même s'il ne pleut pas. Toutefois, dû au nombre restreint de données, ces corrélations ne sont pas significatives et une plus longue série de données serait nécessaire pour en tirer des conclusions. Il est aussi possible que l'irrigation retarde l'effet de la sécheresse en approvisionnant en eau les cultures, ce qui expliquerait le décalage de 6 décades entre les fluctuations du VCI et du SPI. De plus, la réponse des cultures non-irriguées, combinée à la réponse des cultures permanentes est probablement responsable de la deuxième plus forte corrélation, retrouvée à la 3^{ième} décennie

(tableau 5.3). Au mieux les précipitations sont responsables de 61 % des variations du VCI et de 14 % des variations du TCI.

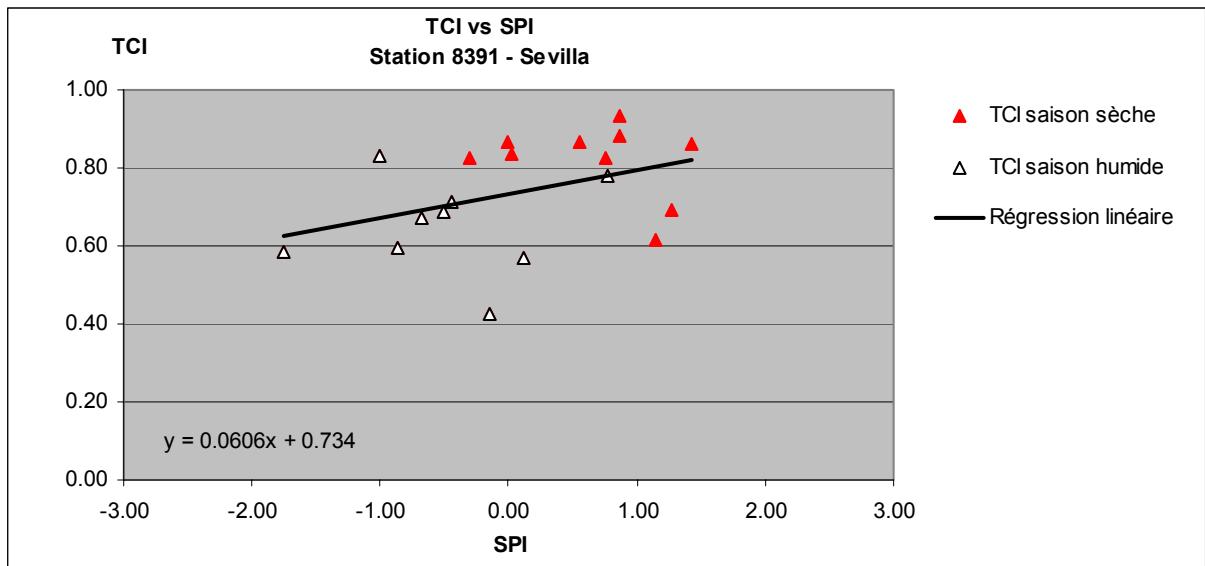


Figure 5.22 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 8391

La station suivante, 6201 (Algorrobo la Mayora) (figures 5.23 et 5.24), fait elle aussi partie des stations à pluviométrie intermédiaire à faible (tableau 5.1). C'est une station de la côte méditerranéenne où la corrélation entre le VCI et le SPI est plus forte qu'entre le TCI et le SPI. Cette station possède une corrélation complète entre le VCI et le TCI plutôt faible ($r = 0,44$) mais tout de même une des meilleures lorsque comparée aux résultats des corrélations complètes des autres stations (tableau 5.3). L'introduction d'un décalage de 4 ou 5 décades augmente la corrélation qui atteint 0,79 lorsque seules les données hivernales sont gardées. Ces résultats demeurent toutefois surprenant si on tient compte du fait qu'une partie non négligeable du territoire (28 %) autour de la station est occupé par des cultures irriguées (tableau 4.2 et annexe 3). Cependant, 63 % du territoire est occupé par des cultures non irriguées qui réagissent aux changements pluviométriques. En observant l'évolution du NDVI en annexe 4, on peut d'ailleurs voir que la courbe à cette station semble montrer deux pics de NDVI, un en hiver (cultures non irriguées) et un au printemps (cultures irriguées).

La corrélation complète entre le TCI et le SPI est moyenne ($r = 0,51$) (tableau 5.3) et cette relation est améliorée lorsque seules les données hivernales sont retenues ($r = 0,61$). Cette tendance de la relation TCI/SPI à s'améliorer en hiver ne se retrouve qu'à une seule autre

station, 6258, située elle aussi près de la côte de la mer Méditerranée. Loin de l'océan Atlantique, le climat de la côte est beaucoup plus stable et la corrélation TCI/SPI hivernale est du même ordre de grandeur que les corrélation estivales à plusieurs autres stations (4515, 4258, 60972). À cette station, les différences pluviométriques expliquent 26 % des variations du TCI mais 55 % des variations de la condition de la végétation (VCI).

Le droite de régression du diagramme de dispersion (figure 5.23) démontre la faible tendance du VCI à augmenter avec le SPI. Alors que le SPI oscille de sévèrement sec à extrêmement humide, le VCI se maintient au-dessus de 0,3 (stress élevé). Les données sont plutôt dispersées autour de la droite de régression et une valeur erronée (février 1991) y apparaît.

Comme pour les autres stations, on remarque aussi sur le diagramme de dispersion du TCI et du SPI (figure 5.24) une faible augmentation du TCI avec une augmentation du SPI. Le TCI se maintient élevé et indique des conditions hydriques positives alors que le SPI varie de situations de sécheresse à situations de surplus hydrique. On peut toutefois observer que le TCI augmente en fonction du SPI en hiver (triangles blancs) alors qu'en été, toutes les valeurs du TCI se maintiennent au-dessus de 0,8.

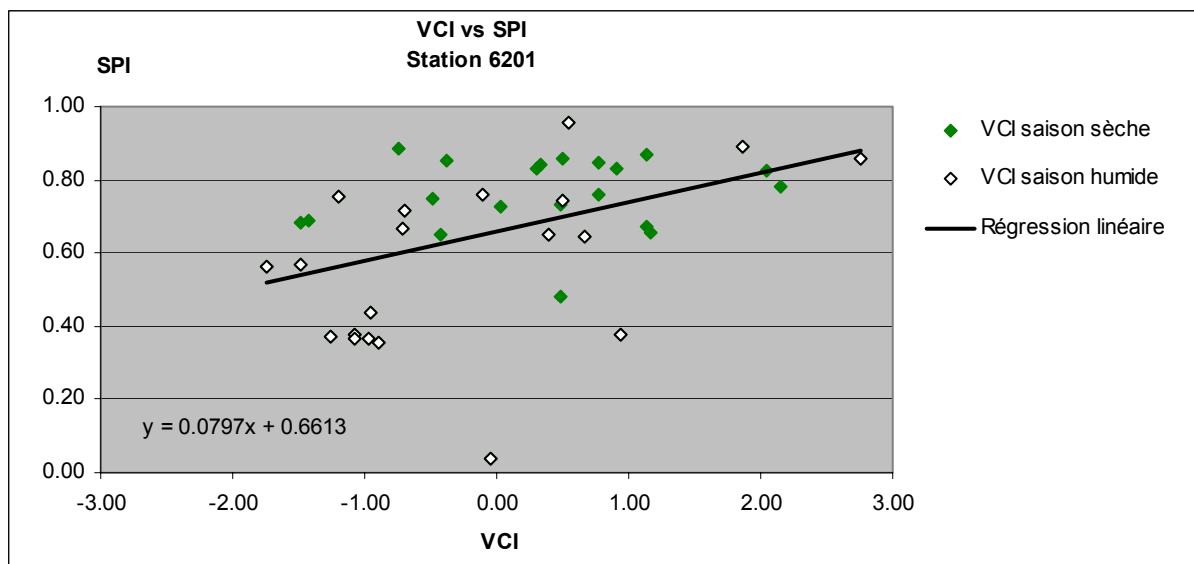


Figure 5.23 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6201

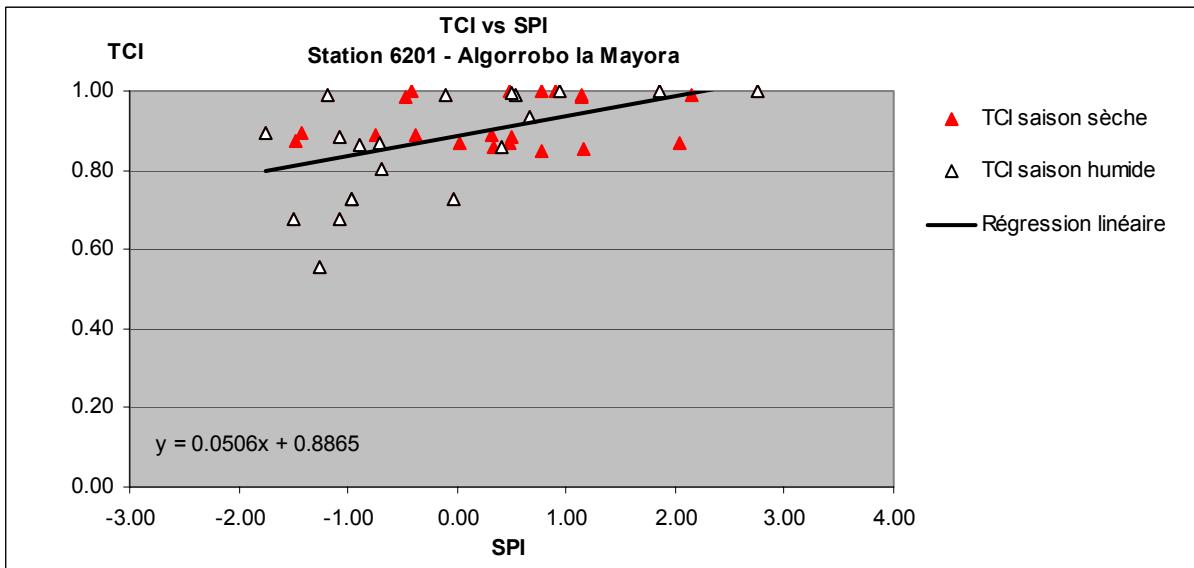


Figure 5.24 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6201

La station de Padul (6249) (figures 5.25 et 5.26) fait partie des stations à pluviométrie moyenne à faible. Située à 753 m d'altitude au sein des montagnes Bétiques, en bordure la côte méditerranéenne, son territoire est principalement occupé par des cultures irriguées (37 %) et par de la végétation sclérophylle.

Le résultat de la corrélation complète entre le VCI et le TCI à cette station a d'abord été faible ($r = 0,22$) (tableau 5.1). En introduisant un décalage de cinq décades, la corrélation augmente à 0,62 et lorsque seules les données hivernales sont gardées avec cinq décades de décalage, celle-ci atteint alors 0,87. À cette station, les fluctuations pluviométriques sont donc responsables à 76 % des changements de la condition de la végétation. Celle-ci, parce qu'elle est irriguée ou adaptée aux sécheresses, réagit peu ou avec un retard appréciable (5 décades).

L'évolution du NDVI à cette station montre des valeurs plutôt faibles (0,24 - 0,38), typiques de végétation clairsemée. L'amplitude intra-annuelle du NDVI correspond bien aux amplitudes observées pour les stations 6201 et 6258, dont l'utilisation du sol est semblable. De plus, les zones urbaines (14 %), qui ne peuvent être caractérisées par le NDVI, peuvent abaisser les valeurs de ce dernier, diminuer l'amplitude du NDVI et donc rendre le VCI plus variable.

La corrélation complète entre le TCI et le SPI à cette station est de 0,45. Comme pour les autres stations, l'utilisation des données estivales plus stables que les températures hivernales, améliore la corrélation qui atteint 0,51. La pluviométrie peut donc expliquer 26 % de la variation des températures de surface (TCI) à cette station.

Comme pour les stations précédentes, on remarque sur les diagrammes de dispersion (figures 5.25 et 5.26) que les valeurs du VCI et du TCI sont généralement élevées alors que celles du SPI indiquent autant des situations de surplus que de déficit en eau. Les données éparpillées autour de la droite de régression à pente faible illustrent bien la faiblesse des corrélations complètes. Toutefois, les données du diagramme de dispersion du TCI vs. SPI (figure 5.26) sont plus concentrées autour de la droite de régression qui montre tout de même une augmentation du TCI avec une augmentation du SPI.

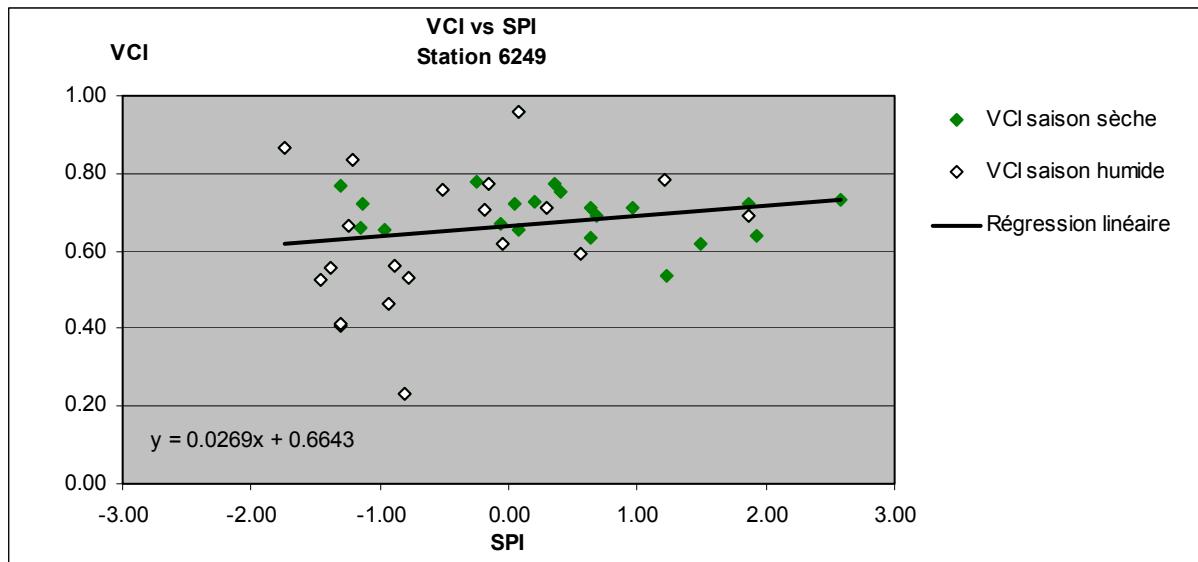


Figure 5.25 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6249

La dernière station (Lanjaron - 6258) (figures 5.27 et 5.28) fait aussi partie des stations à pluviométrie intermédiaire (tableau 5.1). Située en altitude (495 m), cette station est toutefois plus près de la côte méditerranéenne que la précédente. Le territoire autour de cette station est majoritairement occupé par des cultures non irriguées (25 %) de la végétation sclérophylle (30 %) et des cultures permanentes (14 %).

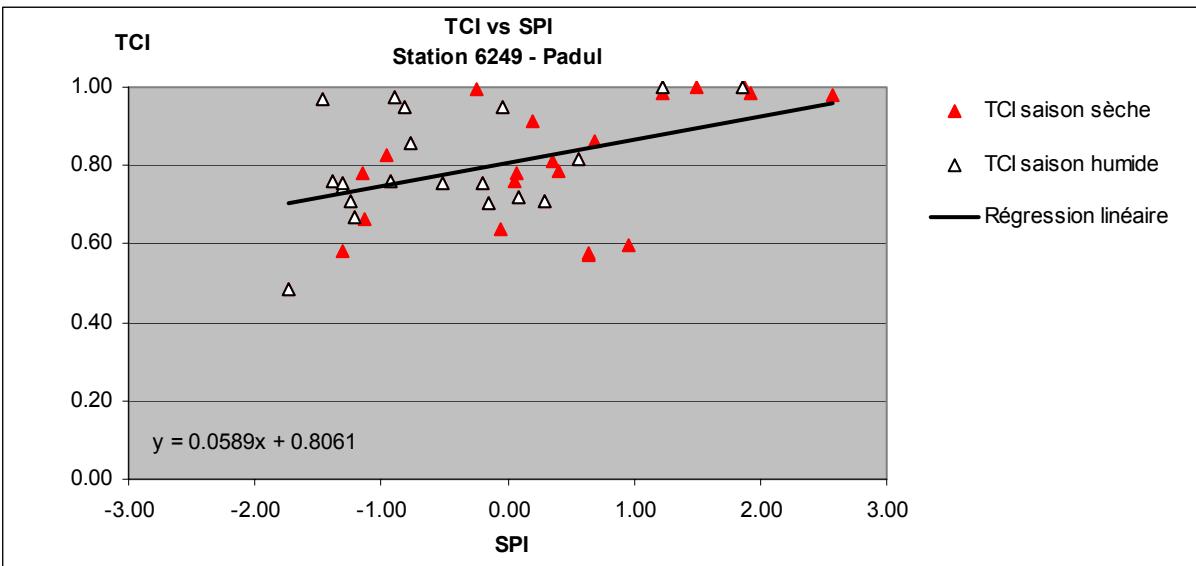


Figure 5.26 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6249

Cette station a obtenu un résultat de corrélation complète entre le VCI et le SPI ($r = 0.49$) supérieur à celui de la station précédente (tableau 5.5) (6249, Padul) malgré le fait que leur régime pluviométrique soit semblable (tableau 5.3). Cette différence est probablement due à l'utilisation du sol qui diffère. Au total, 69 % des terres autour de la station ne sont pas irriguées. L'effet des fluctuations pluviométriques est alors plus tangible. En observant l'évolution du NDVI (annexe 4), on remarque que la tendance du NDVI à cette station ressemble beaucoup, quoique plus basse, à celle de la station d'Aldea de Cuenca où la majorité du territoire est aussi occupée par des cultures non irriguées. Comme pour les autres stations, l'utilisation des données de la saison humide combinée à un décalage de 4 décades a produit les résultats les plus élevés, soit une corrélation de 0,75 (tableau 5.5). C'est l'importante représentation de la végétation sclérophylle qui cause cet important retard entre les fluctuations des pluies et la réponse du VCI. La corrélation complète entre le TCI et le SPI est toutefois plus faible qu'aux autres stations ($r = 0,13$), sauf à Algorrobo la Mayora (6201) qui est occupé majoritairement par des cultures irriguées. Lorsque seules les données estivales sont gardées, la corrélation passe alors à 0,37. Les précipitations expliquent donc, au mieux, 14 % des fluctuations du TCI et 49 % des fluctuations du VCI.

Sur les diagrammes de dispersion (figures 5.27 et 5.28), la même tendance qu'aux autres stations se dessine. Les données dispersées autour de l'axe de régression illustrent bien la

faiblesse des corrélations entre le VCI et le SPI et entre le TCI et le SPI. Comme aux autres stations, le SPI varie de situations de sécheresse à situations de surplus hydriques alors le VCI et le SPI sont généralement élevés. Les valeurs du TCI n'indiquent qu'une seule fois (septembre 1991) des conditions de stress hydrique alors qu'à cette période, les précipitations sont dans les normales. Le VCI est lui aussi généralement élevé mais indique, à l'hiver 1992, une situation de sécheresse. Cette période coïncide avec la période prolongée (décembre 91 à juin 1992) de basses précipitations (figure 5.12) qui faisait partie de la sécheresse de 1991-1993 en Andalousie.

Comme mentionné précédemment, dû à la nature très différente des indicateurs satellitaires (VCI, TCI) et météorologique (SPI), de fortes corrélations n'étaient pas attendues. Toutefois, comme on sait que la végétation verte réagit aux changements des conditions hydriques, il était normal d'espérer une certaine relation entre ceux-ci. En observant la force des corrélations aux 11 stations retenues, il est clair que celles-ci dépendent de plusieurs facteurs, dont l'utilisation du sol et les pratiques culturales sont les plus importantes.

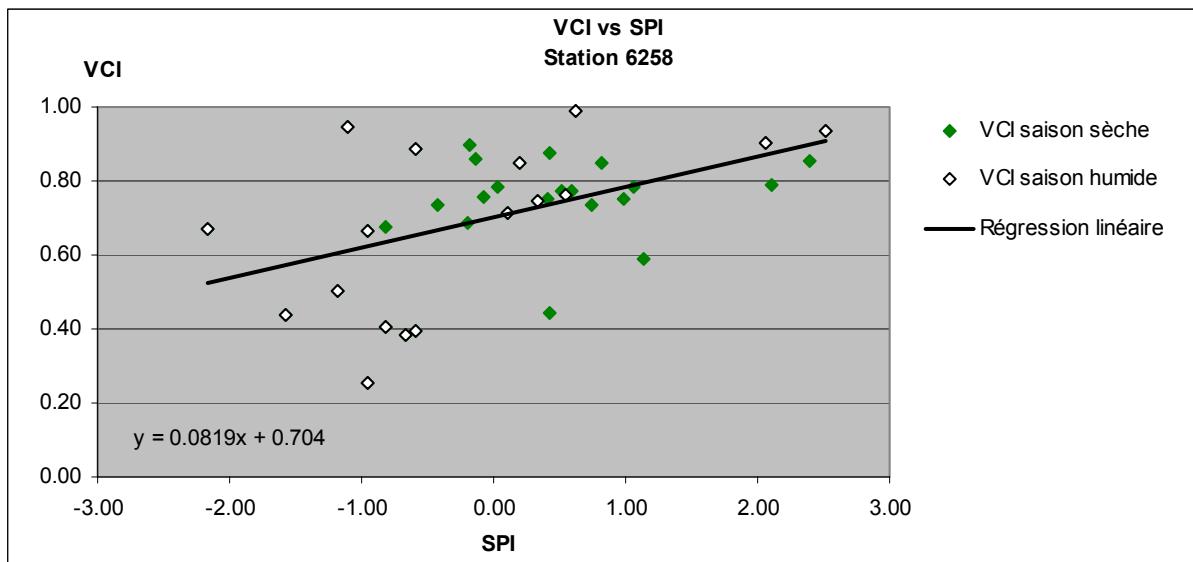


Figure 5.27 - Diagramme de dispersion du VCI vs. SPI, station 6258

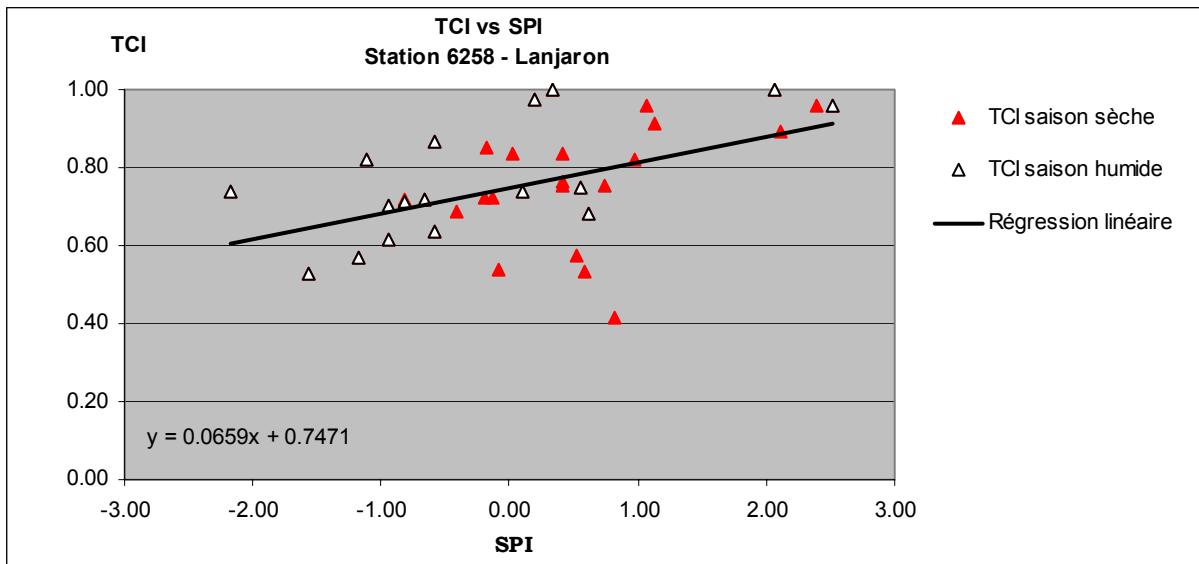


Figure 5.28 - Diagramme de dispersion du TCI vs. SPI, station 6258

D'une part, le type de végétation présente dans la fenêtre de 11 km² (forestière, cultures permanentes, cultures irriguées, végétation sclérophylle, etc.) ainsi que son stade phénologique, étroitement lié au climat régional, détermine en grande partie si la corrélation entre les indicateurs sera forte ou non et si il y aura un décalage entre les fluctuations pluviométriques et le VCI. Certains types de végétaux, comme les herbages, réagiront plus rapidement à une baisse des précipitations que d'autres, comme les plantes sclérophylles qui sont adaptées aux sécheresses. Toutefois, l'irrigation, très répandue en Andalousie, apporte une grande marge d'erreur. Celle-ci peut couvrir à court et moyen terme les baisses pluviométriques et faire en sorte que les corrélations soient nulles, négatives ou simplement décalées. Malheureusement, l'information concernant les cédules d'irrigation n'était pas disponible dans cette étude, l'effet précis de l'irrigation n'a donc pu être vérifié. Le type de sol sur lequel repose la végétation peut aussi avoir un impact important sur la quantité d'eau disponible pour les plantes, même après un certain temps. Certains types de sol retiennent mieux l'humidité et même si les précipitations sont moindres, les réserves d'eau dans le sol sont suffisantes pour fournir l'eau dont les plantes ont besoin. Les situations de déficit pluviométrique sont ainsi dissimulées; le SPI peut être faible alors que le VCI se maintient élevé. Comme pour l'irrigation, ce type d'information n'était pas disponible et il a été impossible de vérifier l'impact du type de sol sur la réponse de la végétation.

Outre ces considérations d'ordre physique, il faut aussi prendre en considération la qualité et la durée de la série temporelle de données. L'étendue des données disponibles, tant pour le calcul du SPI que du VCI ou du TCI est importante afin de bien situer les conditions (pluviométrie ou condition de la végétation) d'une période par rapport à la normale historique de cette période. Il est recommandable, sinon nécessaire, de posséder un historique de données de longue durée. Pour le SPI, une série complète de 30 ans de données est souvent recommandée dans la littérature (Hayes, 1996). Toutefois, le réseau des stations disponibles ne possède que très peu de stations remplissant ce critère et certaines stations ont été choisies afin d'offrir une meilleure couverture spatiale du territoire andalou. Il serait idéal également de posséder le même nombre d'années de données satellitaires afin de comparer les conditions du VCI pour une même période. Ces données n'étaient toutefois disponibles que pour 6 ans, de 1989 à 1994 (tableau 4.4).

La qualité des données, tant météorologiques que satellitaires est aussi très importante afin de mieux cerner les conditions normales. Par exemple, la présence de nuages résiduels sur les images satellitaires du NDVI et du VCI a pu abaisser les valeurs normales du NDVI et fait en sorte que les images du VCI en période de sécheresse apparaissent plutôt normales. De la même manière, si les précipitations journalières ne sont pas bien enregistrées ou s'il y a trop de journées de données manquantes, le SPI ne serait plus représentatif de la réalité. Toutefois, les données n'étant jamais parfaites, il faut tenir compte de cet inconvénient lors de l'analyse des résultats.

Finalement, il faut aussi tenir compte de la manière dont ces indicateurs sont formulés. Le dénominateur du VCI et du TCI est constitué de l'écart entre les valeurs maximales et les valeurs minimales d'une période étudiée et considère toutes les valeurs de cette période dans l'historique. Alors que le TCI utilise la différence de température de surface, le VCI utilise la différence des valeurs du NDVI. Quant au SPI, il possède comme dénominateur l'écart-type des valeurs historiques des précipitations de la période étudiée. Mathématiquement, lorsque le dénominateur des ces indicateurs est petit, une variation des conditions mesurées entraîne une plus grande variation de l'indicateur que lorsque le dénominateur est grand. En régions ou en périodes sèches, les écarts entre les valeurs maximales et minimales sont plus petits et une variation des conditions existantes entraîne une plus grande variation de la valeur de

l'indicateur que la même variation en régions ou périodes humides. Comme exemple, considérons deux stations au régime pluviométrique différent. D'une part, Alméria (station 6327), caractérisée par un régime pluviométrique faible aux écarts de précipitations mensuelles petits. De l'autre, Aroche, où les précipitations mensuelles sont élevées et les écarts plus grands (tableau 5.23). Une déviation des précipitations pour une période, disons de 10 mm, par rapport à la valeur moyenne aura donc un effet plus grand sur la valeur du SPI à Alméria qu'à Aroche puisque l'écart-type (dénominateur du SPI) des précipitations à cette station est plus grand.

On peut aussi penser que le VCI et le TCI réagissent de la même manière que le SPI et que les écarts du NDVI et de la température de surface sont plus petits pour les régions sèches ou les périodes sèches. Pendant la saison sèche, les valeurs du NDVI qui forment le VCI sont généralement faibles puisque la végétation est en état de stress hydrique estival. Les écarts entre les valeurs maximales et minimales du NDVI sont donc plus petits que pendant la saison humide et la variabilité du VCI est donc plus grande. Il est aussi important de considérer la nature du NDVI lors de l'interprétation des corrélations. Cet indicateur a été introduit par Rouse *et al.* (1973) afin de qualifier la condition de la végétation verte. En certains endroits de l'Andalousie, comme au sud-est, la végétation verte est rare, donc le NDVI ainsi que le VCI ne sont sûrement pas indiqués pour ce type de région. De plus, d'autres raisons, outre une baisse pluviométrique peuvent causer la détérioration de la condition végétale. Des précipitations excessives, les inondations et les ravageurs peuvent aussi causer une baisse du NDVI.

Le TCI est quant à lui formé des valeurs de température de surface. Celles-ci varient entre autre selon l'heure de la journée et le temps de l'année. En saison sèche, les températures de surface sont généralement plus élevées qu'en saison humide et les écarts entre les valeurs maximales et minimales sont sûrement plus faibles. La fiabilité du TCI peut donc de la même manière que le VCI être mise en doute puisqu'il est grandement influencé par les conditions climatiques.

Les images de l'annexe 3 illustrent bien la diminution des écarts des valeurs de NDVI et Ts pour les périodes sèches. Cette limitation entraîne une plus grande variabilité des indicateurs pendant la saison sèche et doit être tenue en compte lors de l'interprétation des résultats de

corrélation. Il est donc clair que la valeur des indicateurs sera plus influencée dans les régions ou en périodes où les écarts de la variable analysée sont plus faibles.

5.4 Analyses des images du VCI, TCI et SPI

L'annexe 3 montre les images mensuelles du VCI et du TCI de février 1989 à septembre 1994. Les images mensuelles du SPI, obtenues par krigeage y sont aussi présentées. En comparant les images satellitaires aux images obtenues par interpolation spatiale, il est aisément de percevoir l'avantage de ces premières. La précision des images du SPI dépend grandement du nombre et de la localisation des stations utilisées ainsi que de la validité des valeurs de précipitation recueillies. Les images satellitaires du VCI et du TCI sont toutefois le reflet de la condition de la végétation à chaque pixel et cette condition est influencée par plusieurs facteurs, comme le type de végétation et le type de sol ou le climat. Ainsi, en regardant les images satellitaires, il est aisément de percevoir la physiographie sous-jacente. Prenons en exemple l'image du NDVI et du VCI de la décennie 1990-1991 (figure 5.1). On remarque facilement sur l'image du NDVI et du VCI la zone de la vallée du Guadalquivir qu'on peut voir sur les cartes de la figure 2.3. Même si elles sont moins visibles sur l'image du VCI, l'image du NDVI fait ressortir la végétation de la Sierra Morena, de la Cordillère Bétique ainsi que la Sierra Nevada. L'imagerie satellitaire offre donc une meilleure spatialisation de l'information concernant les sécheresses.

À partir de images mensuelles retrouvées à l'annexe 3, il est relativement aisément de distinguer les périodes de sécheresse connue (hiver 1992-1993) des périodes considérées normales (hiver 1990-1991). En observant les images de janvier à avril 1992, il est facile de voir que la proportion de pixels des images faisant partie de la catégorie des valeurs inférieures à 35 (seuil proposé par Kogan, 1997) est supérieure à la proportion des pixels de cette catégorie en situation de surplus hydrique (septembre à décembre 1989).

Toutefois, la présence de nuages résiduels peut possiblement expliquer la similitude de certaines images tirées de périodes sèches et de périodes humides. Par exemple, l'image de janvier 1990 comporte une forte proportion de pixels ayant des valeurs inférieures au seuil de sécheresse du VCI même si, selon le SPI, l'ensemble du territoire andalou est en situation de surplus hydrique. Ainsi, janvier 1990 (période humide) semble avoir autant de pixels inférieurs à 35 que février 1991 (période normale). Comme mentionné précédemment au

chapitre IV, la série de traitements des images n'est pas parfaite et il reste des pixels où les nuages ne sont pas détectés. Ces nuages font en sorte d'abaisser les valeurs du NDVI et de Ts et conséquemment celles du VCI et du TCI.

Il est cependant aisé de voir certaines zones particulièrement touchées par la sécheresse ressortir des images. En 1993, l'irrigation a du être diminuée, sinon complètement coupée (El Pais, 1993). Ceci se reflète aisément sur les images des mois d'août 1993 à novembre 1993. On peut y apercevoir, autour de Sevilla, une zone très touchée ($VCI < 20$ et $TCI < 30$) où le riz est normalement cultivé. Comme la sécheresse a forcé l'arrêt de l'irrigation (El Pais, 1993), cette zone ressort puisque le NDVI y est plus bas qu'en période normale. Cette zone est également visible en juillet et août 1990. Alors que le SPI indique pour l'Andalousie des conditions sèches à très sèches ($SPI < -1,5$), la zone irriguée ressort fortement puisqu'elle n'est pas en état de stress hydrique.

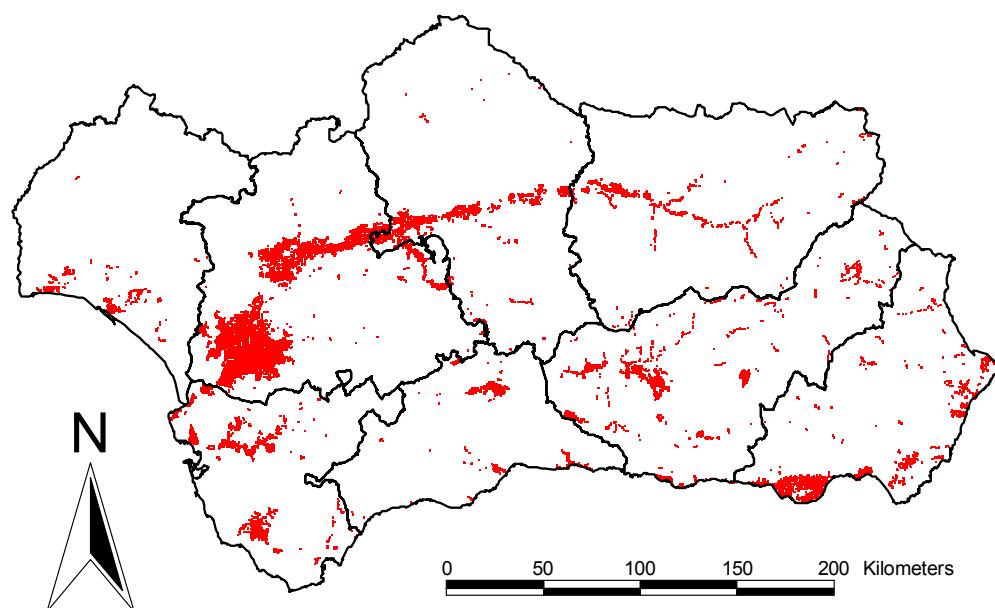


Figure 5.29 - Zone irriguée en Andalousie

Source : Corine CLC90, 2000

La connaissance de l'utilisation du sol offre donc une information cruciale afin d'analyser l'évolution des conditions de sécheresse. Les figures 5.30 et 5.31 illustrent l'évolution temporelle des proportions des 4 classes (0-35;35-50;50-85;85-100) du VCI et du TCI par type de végétation.

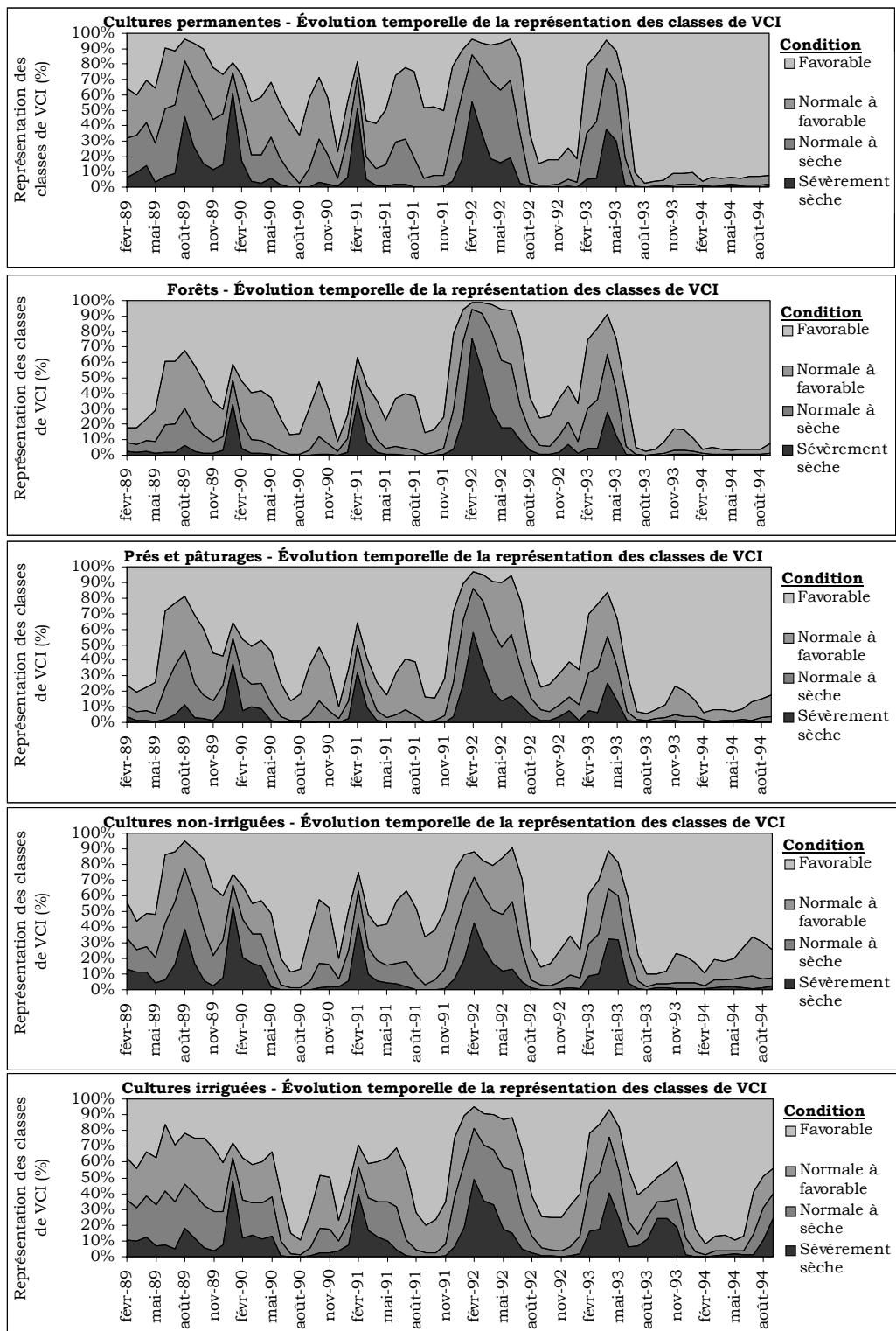


Figure 5.30 - Évolution temporelle des 4 classes de VCI par type de végétation

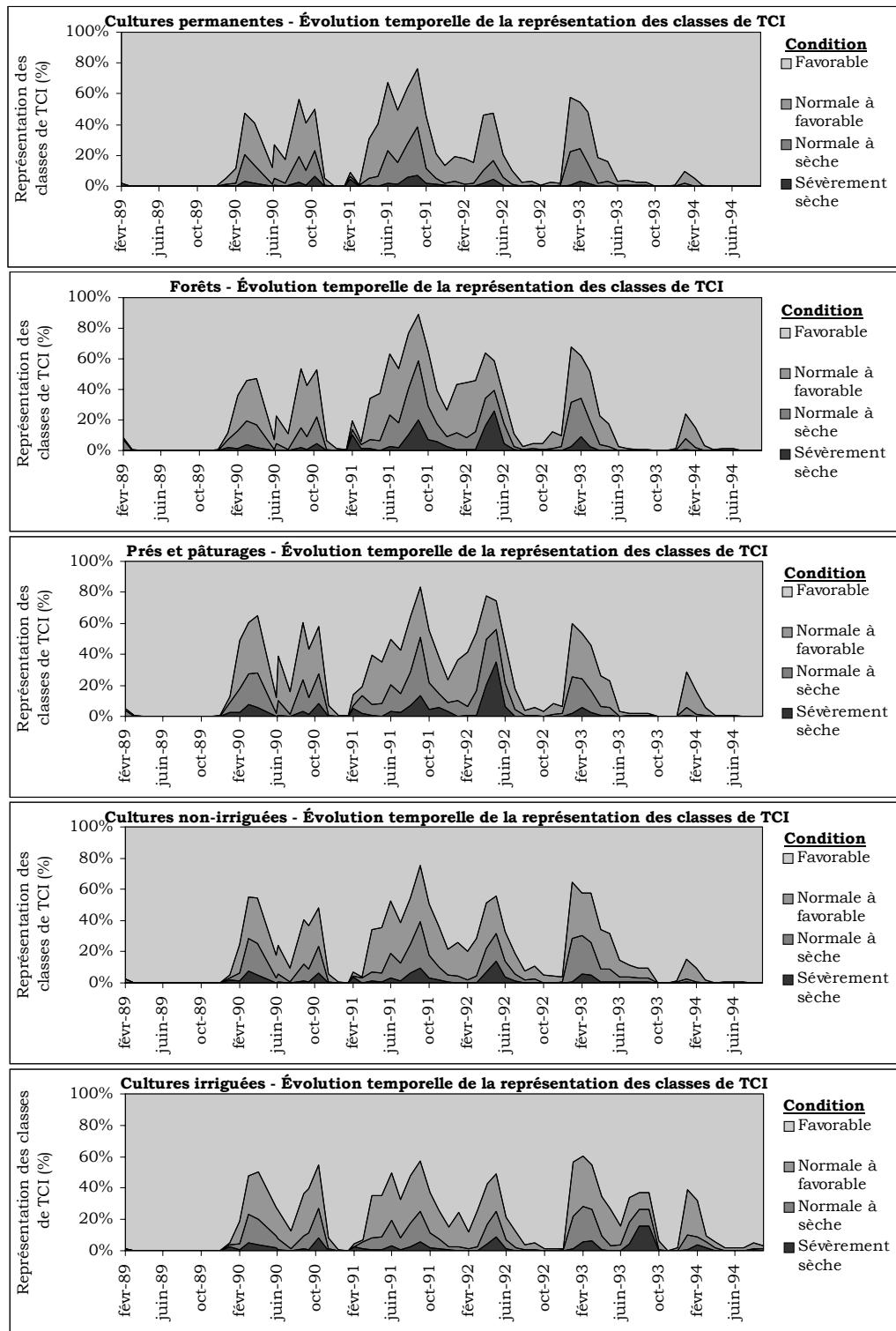


Figure 5.31 - Évolution temporelle des 4 classes de TCI par type de végétation

Sur ces figures, il est encore une fois possible de faire ressortir les périodes de stress de la végétation. En effet, pour chacun des types de végétation, de décembre 1991 à avril 1992, la proportion des pixels ayant un VCI inférieur à 35 est plus élevée que lors des périodes normales (ex. novembre 1990). On peut aussi remarquer que certains types de végétation, comme les forêts et les prés et pâturages réagissent plus au changement des conditions hydriques que les cultures permanentes. La proportions des pixels ayant un VCI inférieur à 35 dans les deux premières catégories atteint plus de 60 % du territoire alors que seulement 50 % du territoire des cultures permanentes semblent avoir souffert d'un fort stress hydrique en février 1992. Les faibles valeurs du TCI ne sont par contre pas aussi répandues. Au pire, environ 35 % de pixels des prés et pâturages montrait des valeurs inférieures à 35.

De plus, on peut aussi noter sur les images du VCI que la proportion des pixels inférieurs à 35 peut aussi être élevée en période humide. Cette proportion est de près de 70 % pour les cultures permanentes en février 1990. Cette information peut signifier principalement deux choses: 1) les surplus hydriques ont engendré une baisse de rendement ou 2) des nuages abaissent les valeurs du NDVI. Ayant en main les images du SPI, la première hypothèse est peu probable. Cette analyse souligne donc encore le besoin d'utiliser plus d'un indice afin d'obtenir un portrait plus précis des situations de sécheresse.

De plus, un autre facteur à tenir compte lors de l'interprétation des images est l'homogénéité de ces dernières. Plusieurs images décadiques présentaient une forte démarcation de part et d'autre de l'image. Cette démarcation est due aux différents angles de vue des pixels qui forment les images décadiques. Comme mentionné au chapitre III, le NDVI et le VCI sont sensibles à la géométrie de captage et il est donc important de connaître ces caractéristiques si l'on désire comparer les valeurs du VCI entre différentes régions, même rapprochées. L'analyse mensuelle à l'aide de la moyenne des images décadiques élimine presque entièrement ce problème.

Il est évident que l'utilisation des images du VCI et du TCI est utile à la caractérisation spatiale des conditions de sécheresse. Toutefois, leur interprétation seule n'est pas recommandable.

5.5 Relation entre le TCI et le TCI station

Le but de cette étude était de voir s'il était possible d'utiliser les données satellitaires, seules ou en complément aux données météorologiques pour le suivi des conditions de sécheresse en région méditerranéenne.

Comme il existe une relation entre la température de surface perçue par le satellite et la température réelle, enregistrée aux stations météorologiques, un des objectifs secondaires de cette étude était de vérifier l'interchangeabilité de la température de surface et de la température réelle dans le calcul du TCI.

L'algorithme utilisé pour transformer la température de brillance en température de surface est celui exposé par Coll *et al.* (1994) et décrit au chapitre III de cet ouvrage. De la même manière que pour les données de température satellitaires, les températures maximales décadiques historiques et les températures minimale (minimum du maximum) historiques ont d'abord été extraites pour les 36 décades de l'année. Par la suite, les températures maximales décadiques ont été utilisées, en combinaison avec valeurs historiques afin de calculer le TCI aux stations (TCI station).

Comme pour les relations VCI/SPI et TCI/SPI, la relation TCI/TCIstation a d'abord été étudiée de manière qualitative à l'aide des courbes d'étalonnage retrouvées aux figures 5.41 à 5.42b. Puis, une analyse de corrélation a aussi été effectuée. De manière générale, on peut aisément percevoir sur ces figures que le TCIstation indique presque toujours des conditions sous les normales (0,5 et moins), sauf à Archidona où le TCI station se maintient au-dessus de 0,5 à l'hiver 90-91 et à partir d'octobre 1991.

On peut aussi voir que le TCI station est plus stable puisque la température aux stations est moins affectée par la présence de nuage ou l'angle solaire. La température de surface réagit également beaucoup plus rapidement aux changements du rayonnement solaire que la température de l'air. De plus, l'étude de Viau et Paquette (1997) sur la régionalisation des températures de l'air à partir de données télédéetectées a démontré que pour la plupart des stations andalouses, dans 80 % des cas, la température de l'air journalière pouvait être prédite avec une erreur absolue de 2 K à partir de Ts. Cette erreur journalière se transmet aussi aux valeurs des températures décadiques ainsi qu'aux valeurs des températures décadiques

historiques. La différence entre la température aux stations et la température de surface a pour effet de générer un TCI satellitaire plus élevé que le TCI station. Une vérification des températures décadiques à chacune des stations a démontré une surestimation des températures de surface par rapport aux températures enregistrées aux stations.

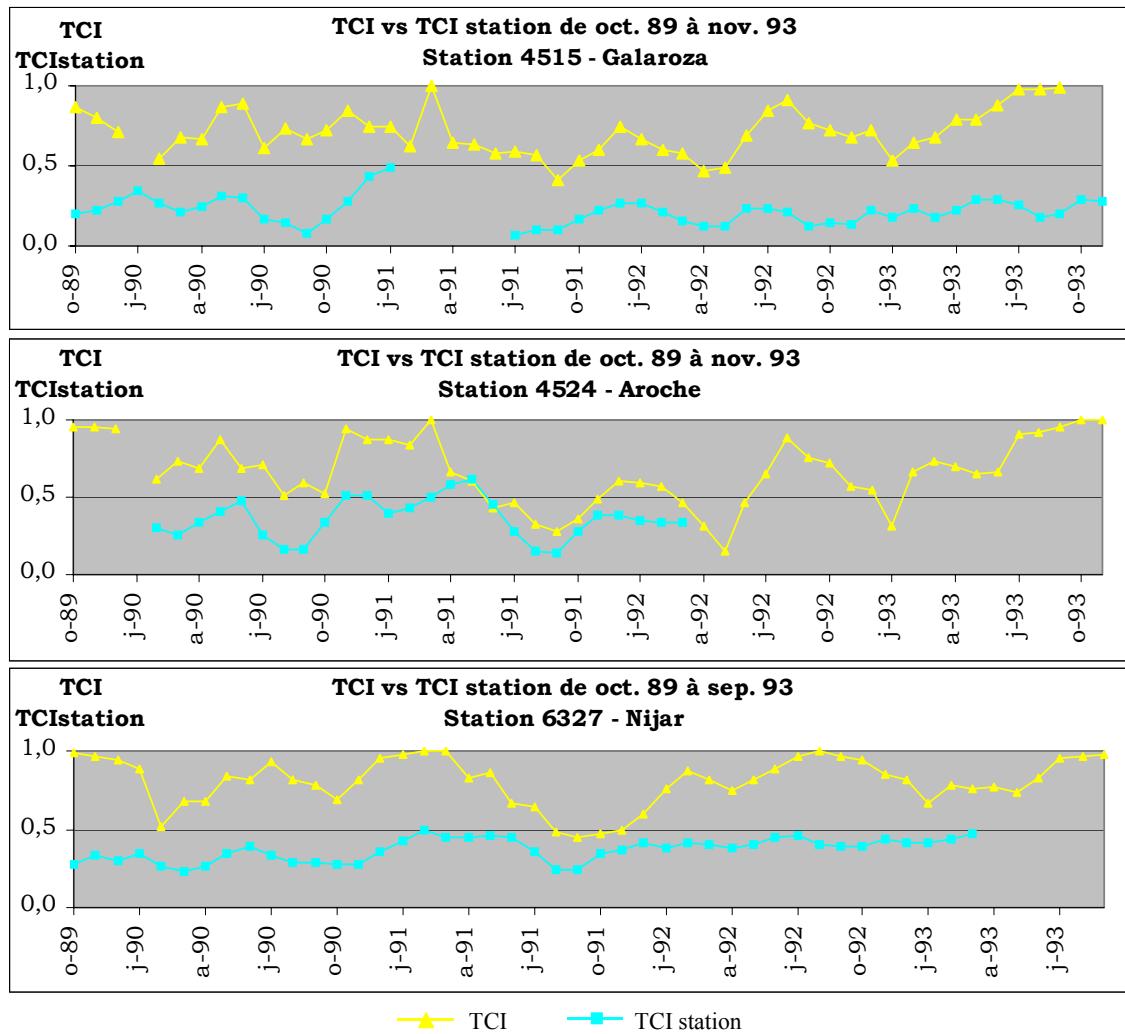


Figure 5.32 - Relation TCI et TCI station des stations A et C

Comme une température de surface plus élevée est signe de stress hydrique, il serait logique que le TCI satellitaire soit plus faible puisque le numérateur du TCI ($T_{\text{max}} \text{ historique} - T_{\text{max}} \text{ décadaire}$) devient plus petit. C'est cependant le contraire que l'on observe aux stations. Ceci veut dire que les valeurs minimales et maximales historiques sont elles aussi différentes des températures décadiques historiques. Logiquement, une surestimation des températures maximales historiques tend à faire augmenter le numérateur du TCI (voir équation 4.4) et donc

à augmenter la valeur de l'indicateur. Comme ce n'est pas le cas, la température minimale historique doit obligatoirement être surestimée plus fortement que la température de surface ou la température maximale historique. Si cette surestimation était du même ordre que la surestimation de la température de la décennie ou de température maximale historique, le TCI satellitaire et le TCI station seraient alors du même ordre. Par exemple, si T_s , $T_{S\max}$ et $T_{S\min}$ étaient tous surestimés de 10°C , le numérateur et le dénominateur seraient les mêmes et la valeur du TCI satellitaire serait la même que la valeur du TCI station. Toutefois, les écarts de température entre T_s et T_a dépendent de plusieurs facteurs physiques (pente, orientation, utilisation du sol) et climatiques (ensoleillement, vent) et il devient difficile de prévoir l'erreur de prédiction de la température de l'air par la température de surface. Il est donc non souhaitable d'essayer d'échanger T_a pour T_s , ou vice-versa, dans la formulation du TCI.

On peut toutefois voir sur les courbes d'étalonnage (figures 5.32 à 5.33b) que les indicateurs TCI et TCI station oscillent dans le même sens, plus particulièrement aux stations d'Aroche (4524) et de Padul (6249). Contrairement aux tendances observées sur les courbes d'étalonnages des indicateurs VCI, TCI et SPI (figures 5.5 à 5.6b), la relation TCI/TCI station ne s'améliore pas lorsque seules les périodes de sécheresse connues sont considérées. Ainsi, les indicateurs ne semblent pas plus osciller dans le même sens à partir de l'hiver 1992, et ce à toutes les stations.

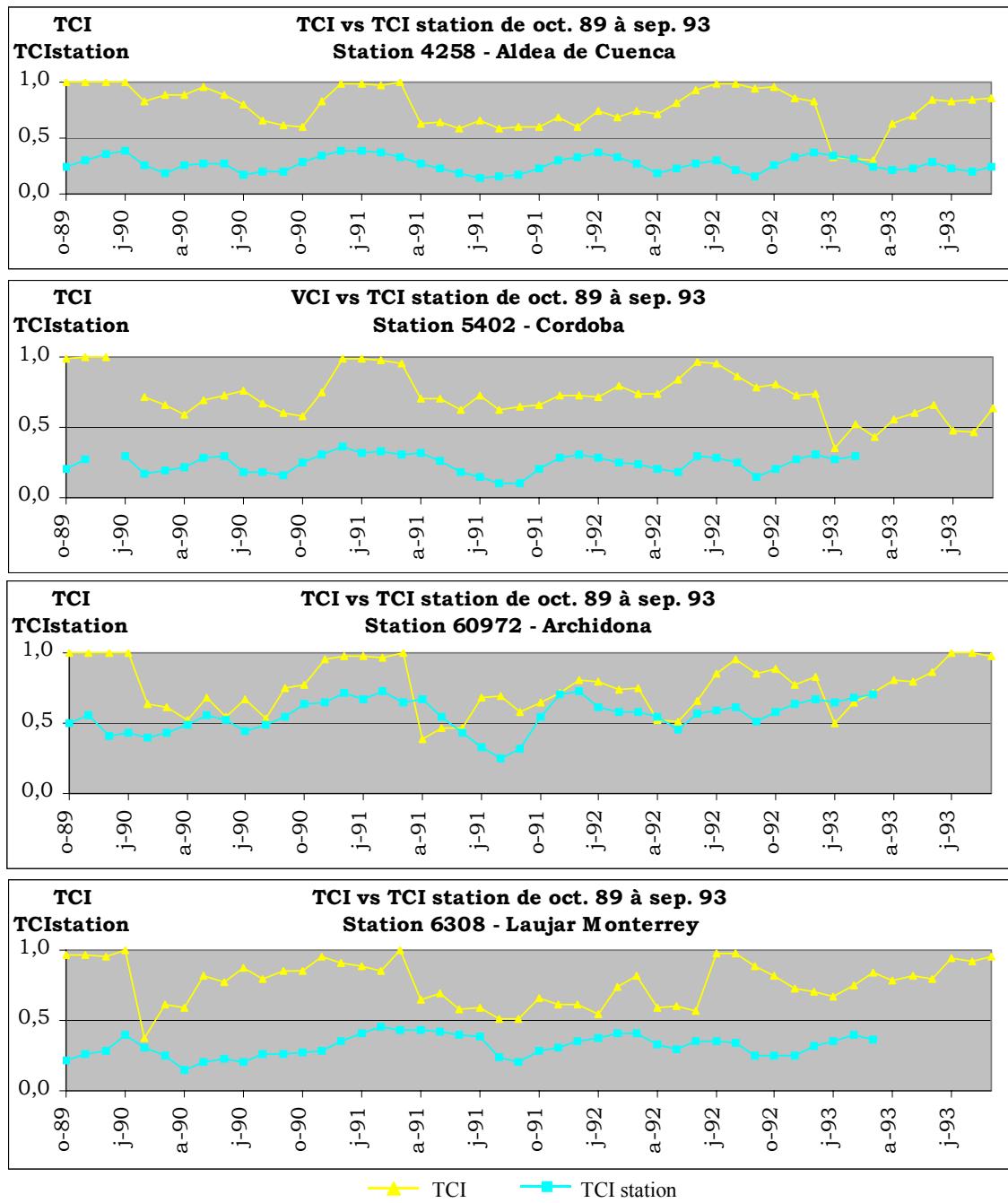


Figure 5.33a - Relation TCI et TCI station des stations B

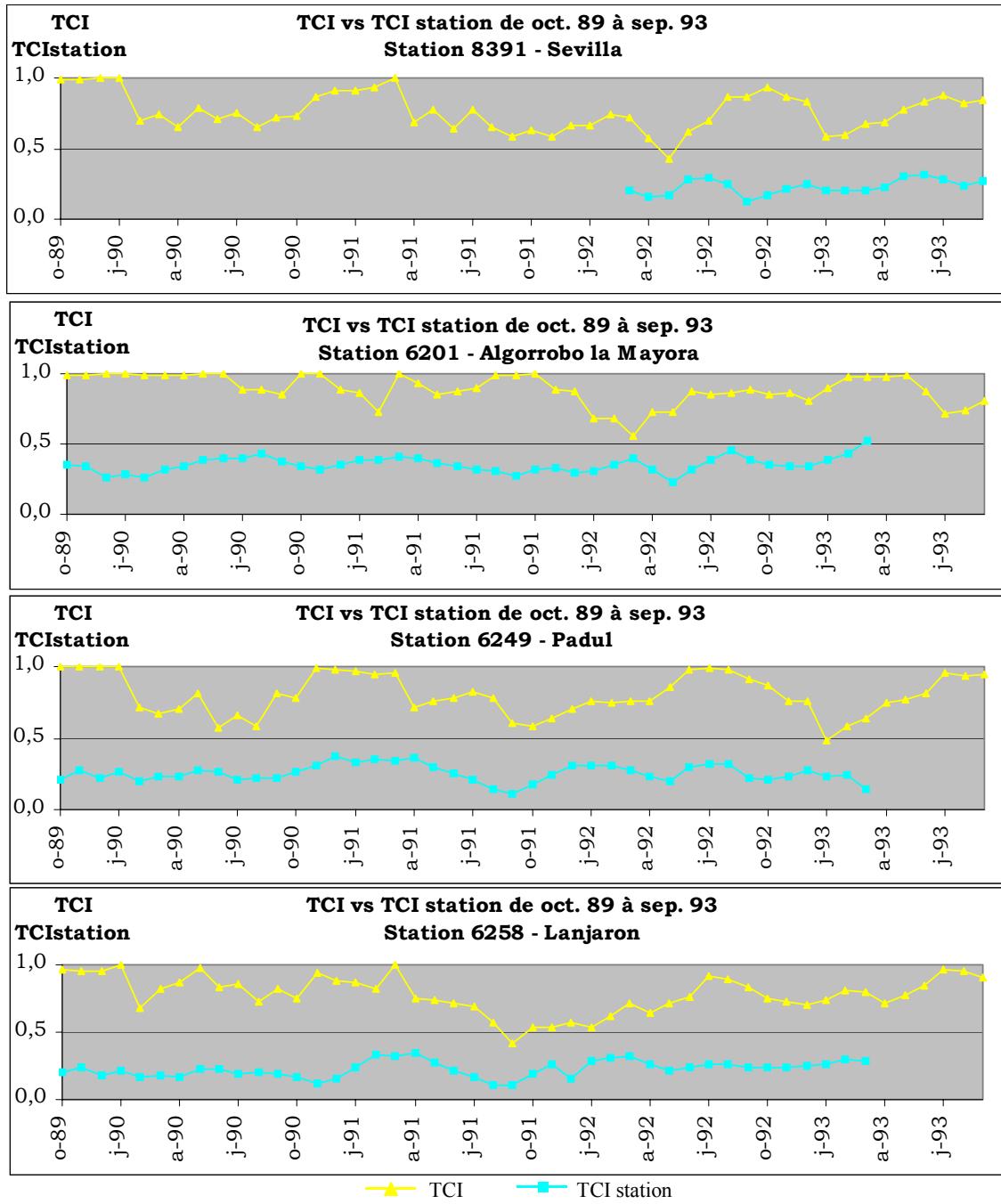


Figure 5.33b - Relation TCI et TCI station des stations B (suite)

5.6 Corrélation TCI/TCI station

Malgré la faible relation entre les indicateurs TCI et TCI station, une courte analyse des corrélations entre ces indicateurs a aussi été effectuée. Le tableau 5.4 illustre le nombre de paires de données qui ont été utilisées dans le calcul des corrélations. Comme précédemment,

les stations pour lesquelles peu de données étaient disponibles ont tout de même été utilisées afin de mieux couvrir spatialement le territoire andalou. Ainsi, les stations de Sevilla (8391) et d'Aroche ont été gardées même si celles-ci possèdent un historique de données de moins de 30 ans. Le tableau 5.5 démontre les résultats des corrélations complètes et saisonnières. L'utilisation de données hivernales (h) ou estivales (e) seulement permet de discerner le caractère saisonnier de la relation entre le TCI calculé à l'aide des données satellitaires et le TCI calculé à l'aide des données météorologiques.

Tableau 5.4 - Nombre de paire de données utilisées dans les corrélations

Station	Série temporelle	(1) TCI vs. TCIs	(2) TCI vs. TCIs
4515	11-90 à 09-93	42	19 (h), 23 (e)
4524	10-89 à 10-91	26	14 (h), 13 (e)
8391	03-92 à 09-93	19	9 (h), 10 (e)
6201	10-89 à 01-93	42	22 (h), 20 (e)
6249	10-89 à 01-93	42	22 (h), 20 (e)
6258	10-89 à 01-93	42	22 (h), 20 (e)
4258	10-89 à 09-93	48	24 (h), 24 (e)
5402	03-90 à 12-92	39	19 (h), 20 (e)
60972	10-89 à 01-93	42	22 (h), 20 (e)
6308	10-89 à 01-93	42	22 (h), 20 (e)
6327	10-89 à 01-93	42	22 (h), 20 (e)

1- Corrélation complète et corrélation complète avec décalage

2- Corrélation hivernale (h) et estivale (e) sans et avec décalage (d)

Tableau 5.5 - Résultats de corrélation TCI/TCIstation

	Complète	Saisonnieré	Complète	Saisonnieré	Complète	Saisonnieré
4524	R	r	4515	r	6327	r
TCI vs TCIs	0,56***	0,26 (h)n.s.	TCI vs TCIs	0,41***	TCI vs TCIs	0,41***
---	0,57 (e)**	--		0,64 (h)***		0,43 (h)***
				0,63 (e)***		0,39 (e)***
4258	R	r	5402	r	60972	r
TCI vs TCIs	0,27**	0,30 (h)*	TCI vs TCIs	0,35**	TCI vs TCIs	0,26***
---	0,43 (e)**	--		0,36 (h)*		0,18 (h)n.s.
				0,46 (e)**		0,44 (e)***
6308	R	r	8391	r	6201	r
TCI vs TCIs	0,06n.s.	0,34 (h)*	TCI vs TCIs	0,23n.s.	TCI vs TCIs	-0,006n.s.
---	-0,20 (e)n.s.	--		0,78 (h)***		0,10 (h)n.s.
				-0,52 (e)n.s.		-0,42 (e)n.s.
6249	R	r	6258	r		
TCI vs TCIs	0,44***	0,43 (h)*	TCI vs TCIs	0,13n.s.		
---	0,55 (e)***	--		-0,11 (h)n.s.		
				0,37 (e)*		

* niveau de signification de 10%

** niveau de signification de 5%
*** niveau de signification de 1%n.s. non significatif
(h) Corrélation hivernale
(e) Corrélation estivale

Les résultats des corrélations reflètent bien la faiblesse de la relation entre le TCI satellitaire et le TCI station. Il est d'ailleurs difficile de voir ressortir une tendance typique à certaines régions, comme il était possible pour les relations VCI/SPI et TCI/SPI. Les corrélations sont parfois plus forte en hiver (stations 6327, 8391, 6308), parfois en été (stations 4524, 4258, 5402, 60972, 6249) mais parfois encore elle sont non significatives (stations 6201) (tableau 5.5). Dans le meilleur des cas, à la station de Sevilla (8391), la corrélation entre le TCI et le TCI station est de 0,78 (tableau 5.5) et 60 % des variations du TCI en hiver peuvent être expliquées par les variations du TCI station, donc de la température de l'air.

Il ne semble donc pas exister une relation forte entre les indicateurs TCI provenant des données météorologiques et le TCI provenant des données satellitaires. Peu importe cependant que le TCI et le TCI station oscillent dans le même sens puisque ces indicateurs n'indiquent la même situation hydrique. Alors que le TCI satellitaire reflète une situation où il n'y a pas de stress hydrique, le TCI station se maintient bas et indique un stress hydrique. Il semble donc qu'il n'est pas possible de remplacer la température enregistrée aux stations dans le calcul du TCI qui a été conçu à partir de données satellitaires.

Chapitre VI – Conclusions et analyse prospective

6.1 Conclusions

Le but de ce travail de maîtrise était de démontrer le potentiel de l'imagerie satellitaire pour le suivi des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen. Les résultats de cette recherche ont permis de valider l'utilisation en Andalousie des indicateurs satellitaires VCI et TCI, mis au point par Kogan (1997) et appliqués aux États-Unis.

Les données satellitaires proviennent du capteur AVHRR de NOAA 11 et ont été traitées par le logiciel SPACE (Millot, 1995). Au total, 903 images s'étalant de 1989 à 1994 ont été utilisées pour dériver les indicateurs NDVI et Ts. Ces indicateurs ont par la suite servi pour le calcul des indicateurs décennaux VCI et TCI. Ces derniers ont ensuite été comparés visuellement et statistiquement à un indicateur météorologique utilisé couramment pour le suivi des conditions de sécheresse, le SPI. Le SPI a été calculé à partir des données de précipitation de 11 stations météorologiques situées sur l'ensemble du territoire andalou.

Les résultats de la présente étude ont fait ressortir la relation qui existe entre les indicateurs satellitaires VCI et TCI et l'indicateur météorologique SPI en les comparant par corrélation mais aussi de manière visuelle en observant leur évolution temporelle. La relation plus marquée entre ces indicateurs en période sécheresse a permis de déterminer le début et la durée des périodes de sécheresse. Les résultats des corrélations VCI/SPI et TCI/SPI ont quantifié la force de cette relation. On peut noter qu'en général, les corrélations entre le VCI et le SPI sont plus forte qu'entre le TCI et le SPI et qu'au mieux, elles oscillent entre $r = 0,34$ et $r = 0,83$ alors que les corrélations TCI/SPI varient de $r = 0,38$ à $r = 0,68$.

La force de la relation entre le VCI et le SPI est influencée par plusieurs facteurs. Les spécificités régionales du climat à l'intérieur de l'Andalousie jouent un rôle important dans la distribution des isohyètes et influence la relation VCI/SPI. On remarque une plus forte corrélation en zone de pluviométrie intermédiaire à forte et la position géographique des stations météorologiques est donc un facteur à tenir en compte lors de l'interprétation des

résultats. On peut aussi percevoir l'influence des précipitations lorsqu'on observe les corrélations saisonnières. La corrélation y est presque toujours plus élevée en hiver, alors que les précipitations sont plus fortes. Cette saison coïncide d'ailleurs avec la saison des cultures, alors que les pluies sont suffisantes pour irriguer les plantes. Le type de culture est un autre facteur important dans la détermination de la force de la corrélation entre le VCI et le SPI. Les forêts, les pâturages ou toutes autres cultures qui dépendent des précipitations pour leur approvisionnement en eau auront de meilleures corrélations que la végétation sclérophylle ou les cultures irriguées. L'irrigation, et plus largement les interventions humaines, peuvent aussi avoir une implication dans la réponse de la végétation face aux fluctuations pluviométriques en masquant les baisses pluviométriques. La relation TCI/SPI est quant à elle meilleure en zone de pluviométrie faible ou en été, alors qu'il y a moins de variations climatiques. Le TCI est alors moins variable et colle mieux au SPI.

De manière générale cependant, les valeurs du VCI comme celles du TCI se maintiennent élevées, et ce même en période connue de sécheresse. Les catégories définies par Kogan (1993) pour les indicateurs VCI et TCI ne semblent donc pas appropriées pour la région méditerranéenne et devraient possiblement être révisées à la hausse pour cette région.

À la lumière des résultats obtenus, nous pouvons donc dire que nous avons atteint les objectifs de la présente étude. Il est possible et même souhaitable d'utiliser les données satellitaires en combinaison ou en remplacement aux données météorologiques afin de caractériser les sécheresses. L'imagerie satellitaire de NOAA AVHRR a permis le développement d'indicateurs (VCI et TCI) basés sur la température de surface et la condition de la végétation afin de caractériser les conditions de sécheresse. L'analyse de la relation entre ces indicateurs et le SPI permet aussi de tirer un critère qui permet de définir le début et la fin des périodes de sécheresses.

6.2 Limitations et recommandations

Cette étude, comme toute autre, comporte toutefois certaines limitations qui pourraient faire l'objet d'amélioration lors de futurs travaux.

Comme mentionné précédemment au chapitre V, la chaîne de traitement des images ne semble pas enlever la couverture nuageuse en totalité. Il reste donc sur les images des nuages qui abaissent les valeurs du NDVI et de Ts. Ceci fait en sorte que le NDVI avec nuages paraît avoir les mêmes valeurs que le NDVI en période de sécheresse. Le VCI en période de sécheresse apparaît alors comme étant plutôt normal et n'atteint pas des valeurs représentatives de stress hydrique chez les plantes. Il serait donc important de revoir la chaîne de traitement des images avant de procéder à ré-évaluer les classes établies des indicateurs satellitaires. L'utilisation d'un indicateur de la condition de la végétation calculé à partir du GEMI, moins sujets aux effets atmosphériques pourraient aussi être testée.

Par la même occasion, l'utilisation d'une série temporelle d'images satellitaires plus longue serait appropriée. Une série de 30 ans, comme pour les données météorologiques, serait idéale afin de comparer les mêmes périodes. Ceci n'est cependant pas possible puisqu'il n'existe pas 30 ans de données NOAA-AVHRR. Toutefois, l'utilisation des images des années 1989 à 2005 serait une amélioration puisqu'elle permettrait une caractérisation des conditions pluviométriques sur une plus longue période, ce qui permettrait de mieux définir les normales et les extrêmes climatiques. Les valeurs du NDVI et Ts de la période étudiée seraient en retour mieux situées par rapport aux valeurs historiques.

La taille de la tache au sol (environ 1 km) du capteur AVHRR de NOAA est une autre limitation. Le capteur perçoit la réponse de plusieurs types de surface et la relation VCI/SPI et TCI/SPI en est donc affectée. Cette difficulté est moins importante dans le Midwest américain où le VCI et le TCI ont été développés et testés. Dans cette région les champs sont très grands alors qu'en Andalousie, l'utilisation du sol varie grandement sur de petites superficies. Toutefois, peu de satellites possèdent un historique de données et une couverture spatiale adéquate pour calculer le VCI et le TCI. Pour un diagnostic plus local, l'information provenant du capteur AVHRR de NOAA pourrait d'abord servir à détecter les zones critiques et ensuite être combinée aux données provenant d'un capteur à résolution spatiale plus fine ou encore à de l'information provenant de capteurs aéroportés.

6.3 Analyse prospective

Les sécheresses sont des phénomènes naturels et récurrents du climat. Les changements climatiques envisagés dans les années à venir prévoient une recrudescence et une intensification des situations de sécheresse. L'Andalousie est depuis longtemps un territoire très sec et l'historique des sécheresses des derniers 60 ans (Pita Lopez, 1987; El Pais, 1994, 1995, 1996, 2004) le démontre bien. L'accroissement de la population andalouse, combinée à une forte croissance de l'industrie dans cette région, exerce une pression accrue sur les ressources environnementales, particulièrement sur les rares ressources hydriques. Selon Schouten (2003), la situation économique du Sud-Est de l'Espagne⁵ s'est nettement améliorée au cours des derniers vingt ans. Alors que le PGB brut de cette région ne représentait que 6 % du PGB national, avec seulement 8 % de la population espagnole vivant dans cette région, le PGB est maintenant de 15 %. Toutefois, ce sont surtout les industries touristiques et agricoles, gourmandes en eau, qui ont évoluées.

Le besoin d'outils de gestion des ressources naturelles du territoire andalou est d'autant plus important aujourd'hui qu'il ne l'était lorsque cette étude a été entreprise. Encore en 2005-2006, l'Andalousie et le territoire espagnol ont été touchés par la sécheresse; la pire depuis 60 ans (Keeley, 2005).

Plusieurs études ont tôt fait de démontrer le potentiel de l'imagerie satellitaire pour la surveillance du territoire. Dès les années '70, des indicateurs simples pour caractériser l'état de la végétation ont fait leur apparition (Bannari *et al.*, 1995). Ces indicateurs, basés sur la différence de rélectance de la végétation entre les régions spectrales du proche infrarouge et du rouge, permettent de caractériser la vigueur de la végétation, de prédire les rendements des cultures ou de détecter le stress hydrique. En 1995, Bannari *et al.* ont recensé près de 40 indicateurs. Ils en existent bien d'autres. Certains font appel aux bandes spectrales rouge et infrarouge alors que d'autres sont tirés des bandes infrarouges thermiques, comme Ts et le TCI ou encore de la bande de l'infrarouge moyen (SWIR). Cette bande spectrale est particulièrement sensible au contenu total en eau des feuilles et est de plus en plus utilisée dans la formulation de nouveaux indices de végétation, comme le NDWI. Chaque

⁵ Les provinces d'Almería, Murcia Alicante.

indicateur est adapté à une situation précise, certains indices de végétation ont été formulés pour atténuer les phénomènes atmosphériques (ex. GEMI), d'autres la réflectance du sol (ex. SAVI) alors que certains sont spécialement conçus pour suivre les situations de sécheresse (VCI, TCI).

L'avantage de ces méthodes comparativement aux méthodes traditionnelles qui se basent sur l'interpolation spatiale des données mesurées ou d'indicateurs calculés aux stations météorologiques est qu'elles offrent une représentation spatiale complète et dynamique du territoire. La couverture des ces indicateurs dépend bien sûr des caractéristiques des capteurs utilisés. Par exemple, le VCI et le TCI ont été conçus à partir des données de NOAA AVHRR (EOS, 1995). Ce satellite météorologique, avec son grand angle de vue, couvre un territoire 2 fois en 24 h et offre donc un vaste historique de données d'une même zone. En situant le NDVI et Ts par rapport aux situations historiques, le VCI et le TCI tirent profit des caractéristiques géométriques et radiométriques de AVHRR. De manière similaire, le NDII de Hardisky (Jackson *et al.*, 2004) était un des premiers indices de végétation à utiliser la bande SWIR de Landsat TM.

Aujourd'hui, une nouvelle génération de capteurs permet d'utiliser les indicateurs existants avec des données plus précises ou encore de générer des nouveaux indicateurs mieux adaptés aux conditions étudiées. Grâce aux avancées technologiques et aux connaissances acquises par le passé, certains des capteurs lancés après 1998 (tableau 6.1) possèdent des caractéristiques avantageuses pour le suivi des sécheresses. Les capteurs présentés au tableau 6.1 ont tous été construits afin de caractériser les surfaces terrestres, que ce soit la végétation, l'utilisation du sol ou l'occupation urbaine. La présence d'une ou plusieurs bandes SWIR est spécialement intéressante pour les applications visant le suivi du stress hydrique.

Tableau 6.1 - Capteurs sélectionnés lancés après 1997

Satellite	SPOT 4	SPOT 5	TERRA	TERRA	RESOURCESAT-1
Capteur	HRVIR et VGT	HRG, VGT et HRS	ASTER	MODIS	LISS3, LISS4 et AWiFS
Lancement	Mars 1998	Mai 2002	Décembre 1999	Décembre 1999	Octobre 2003
Altitude	822 km	830 km	705 km	705 km	817 km
Trace au sol	VGT: 2250 m	VGT: 2250 m	2300 km	2300 km	
Résolution radiométrique (μm)	HRVIR Pan: 0,49-0,69 1: 0,49-0,61 2: 0,61-0,68 3: 0,78-0,89 4: 1,58-1,75 VGT 1: 0,43-0,47 2: 0,61-0,68 3: 0,78-0,89 4: 1,58-1,75 HRS: Pan: 0,49-0,69	HRG: Pan: 0,49-0,69 1: 0,49-0,61 2: 0,61-0,68 3: 0,78-0,89 4: 1,58-1,75 VGT 1: 0,43-0,47 2: 0,61-0,68 3: 0,78-0,89 4: 1,58-1,75 HRS: Pan: 0,49-0,69	1: 0,52-0,60 2: 0,63-0,69 3a: 0,78-0,86 3b: 0,78-0,90 4: 1,60-1,70 5: 2,145-2,185 6: 2,185-2,25 7: 2,235-2,85 8: 2,295-2,365 9: 2,36-2,43 10: 8,125-8,475 11: 8,475-8,925 12: 8,925-9,275 13: 10,25-10,95 14: 10,95-11,65 10: 0,488 (0,01) 11: 0,531 (0,01) 12: 0,551 (0,01) 13: 0,667 (0,01) 14: 0,678 (0,01) 15: 0,748 (0,01) 16: 0,869 (0,015) 17: 0,905 (0,03) 18: 0,936 (0,01) 19: 0,94 (0,05) 20: 3,75 (0,18) 21: 3,959 (0,0594) 22: 3,959 (0,0594) 23: 4,05 (0,0608) 24: 4,465 (0,065) 25: 4,515 (0,067) 26: 1,375 (0,03) 27: 6,715 (0,36) 28: 7,325 (0,3) 29: 8,55 (0,3) 30: 9,73 (0,3) 31: 11,03 (0,5) 32: 12,02 (0,5) 33: 13,335 (0,3) 34: 13,635 (0,3) 35: 13,935 (0,3) 36: 14,235 (0,3)	Longueur d'onde centrale (largeur de la bande) 1: 0,645 (0,05) 2: 0,858 (0,035) 3: 0,469 (0,02) 4: 0,555 (0,02) 5: 1,24 (0,02) 6: 1,64 (0,0246) 7: 2,13 (0,05) 8: 0,412 (0,015) 9: 0,443 (0,01) 10: 0,488 (0,01) 11: 0,531 (0,01) 12: 0,551 (0,01) 13: 0,667 (0,01) 14: 0,678 (0,01) 15: 0,748 (0,01) 16: 0,869 (0,015) 17: 0,905 (0,03) 18: 0,936 (0,01) 19: 0,94 (0,05) 20: 3,75 (0,18) 21: 3,959 (0,0594) 22: 3,959 (0,0594) 23: 4,05 (0,0608) 24: 4,465 (0,065) 25: 4,515 (0,067) 26: 1,375 (0,03) 27: 6,715 (0,36) 28: 7,325 (0,3) 29: 8,55 (0,3) 30: 9,73 (0,3) 31: 11,03 (0,5) 32: 12,02 (0,5) 33: 13,335 (0,3) 34: 13,635 (0,3) 35: 13,935 (0,3) 36: 14,235 (0,3)	LISS3: 1: 0,52-0,59 2: 0,62-0,68 3: 0,77-0,86 4: 1,55-1,70 Pan: 0,5-0,75 LISS4: 1: 0,52-0,59 2: 0,62-0,68 3: 0,77-0,86 AWiFS: 1: 0,52-0,59 2: 0,62-0,68 3: 0,77-0,86 4: 1,55-1,70

Résolution spatiale	HRVIR Pan: 20 m VGT: 1 km 1,1 km centre 1,7 km côté	HRG: Pan:2,5 ou 5 m Bandes 1,2,3: 10 m Bande 4: 20 m VGT: 1 km HRS: 10 m	Bandes 1 à 3b: 15 m Bandes 4 à 9: 30 m Bandes 10 à 14: 90 m	Bandes 1 et 2: 250 m Bandes 3 à 7: 500 m Bandes 8 à 36: 1000 m	LISS3: 24 m Pan: 5,8 x 5,8 m LISS4: 5,8 x 5,8 m AWiFS: 50 m centre 70 m de côté
Fréquence de passage	1 fois par jour	26 jours	16 jours	16 jours	24 jours Pan et LISS4: 5 à 24 jours
Vocation	Végétation, agriculture et océanographie	Occupation du sol, occupation urbaine et physiographie	Végétation et utilisation du sol	Végétation, physiographie, nuages, utilisation du sol, etc.	Occupation du sol, occupation urbaine et physiographie

Tableau adapté de MRN (2005)

Parmi ces capteurs, MODIS semble particulièrement intéressant. Ce capteur, tout comme NOAA, possède une trace au sol et une fréquence de passage qui permettent une couverture journalière d'une zone. Par contre, la résolution radiométrique de MODIS est plus fine. Ce capteur possède 36 bandes spectrales étroites qui permettent une caractérisation plus précise des surfaces. De plus, le nombre important de bandes spectrales permet une utilisation optimale des longueurs d'onde.

Par exemple, alors que certaines bandes réflectives sont bien adaptées pour la caractérisation de la chlorophylle (1, 8, 9, 10, 11), d'autres sont plus appropriées pour la détection de la neige et des nuages (6) ou sensibles aux propriétés des aérosols (15, 16) qui affectent les lectures. En ayant un grand nombre de bandes spectrales, il est possible de mettre en place de meilleurs algorithmes de détection des nuages par exemple. De plus, la résolution spatiale de MODIS (250 - 1000 m) est meilleure que celle de AVHRR.

Toutefois, la création ou l'utilisation d'indicateurs, qu'ils soient basés sur la température de surface, l'infrarouge (NIR ou SWIR) ou le rouge, n'est pas une fin en soi. Chaque indicateur illustre une facette des conditions qui règnent à la surface et il est donc avantageux d'analyser plusieurs indicateurs afin d'obtenir un portrait plus complet.

Les avancées technologiques dans le domaine de l'informatique font en sorte qu'il est de plus en plus aisément de traiter l'information, peu importe la nature de l'information. Les

ordinateurs sont plus puissants, la mémoire RAM plus rapide et les disques durs emmagasinent maintenant une quantité importante de données. Parallèlement, les systèmes d'informations, particulièrement ceux à caractère géospatial, sont de plus en plus présents dans notre société. D'outils presque exclusivement utilisés par les chercheurs, étudiants et gouvernements, on les retrouve maintenant dans presque toutes les municipalités et organismes (ex. les corporations de bassins versants) devant traiter l'information spatiale. Parallèlement à cette escalade de l'utilisation des SIG, est aussi apparue une disponibilité croissante de l'information. Plusieurs sites sur Internet sont maintenant dédiés à la visualisation ou à la distribution d'informations géospatiales. GEOGRATIS (NRC, 2006c) et la Photocartothèque québécoise (MRNF, 2006) sont deux exemples de sites où il est possible de télécharger ou acheter des données géospatiales (topographie, photos aériennes, carte d'utilisation du sol, images satellitaires, etc.).

Les SIG permettent donc d'analyser plusieurs types de données, de sources, de natures et d'échelles spatiales différentes. Les indicateurs de sécheresse forment une partie de l'information qui entrent maintenant dans les SIG pour caractériser les sécheresses. Ces indicateurs peuvent bien sûr être utilisés seuls mais il est généralement reconnu qu'un seul indicateur, satellitaire ou météorologique, ne peut offrir un portrait complet des situations de sécheresse. Il est donc souhaitable de les combiner pour obtenir un portrait plus complet des sécheresses. Par exemple, Han *et al.* (2003) ont utilisé une combinaison de données météorologiques, de résultats de modélisation climatique et de données satellitaires NOAA AVHRR et GOES IMAGER pour calculer les indices forêt-météo canadiens. Alors que les résultats de cette nouvelle approche ne sont pas disponibles en ligne, il est cependant possible de consulter les valeurs de ces indices, calculés de manière traditionnelle, sur Internet. Un SIG en ligne facilite la visualisation (NRC, 2006d). Aux États-Unis, le NDMC catégorise les sécheresses sur son territoire à l'aide d'un indicateur multiple (NDMC, 2005). Cet indicateur est en fait une combinaison du PDSI, des centiles de l'humidité du sol, des centiles des débits hebdomadaires, du SPI et d'un indice de végétation, composé du VCI et du TCI.

Les informations satellitaires peuvent aussi servir à l'intérieur de modèles plus complexes, soit en complément aux intrants nécessités par les modèles, soit en remplacement. L'exemple le plus courant est l'inclusion de l'utilisation du sol dérivée des images satellitaires (SPOT HRV/HRVIR, Landsat TM/ETM; TERRA MODIS) dans les modèles hydrologiques conceptuels comme SWAT (Arnold et Fohrer, 2005) ou VIC-3L (Zhou et al., 2004). Les données peuvent aussi servir avec des modèles empiriques plus simples, comme SEMMED (De Jong, 1994) qui calcule l'érosion en région méditerranéenne. Ce modèle utilise des images acquises à partir d'un capteur aéroporté ou d'un satellite pour établir plusieurs facteurs dont: la carte des sols, un masque de végétation, l'interception de la pluie par la végétation et un facteur de couverture végétale.

Les sources de données utiles au suivi des sécheresses et pouvant être introduites dans des modèles ou combinés à des indices de sécheresse sont multiples. Les radars satellitaires ou aéroportés peuvent servir pour estimer les précipitations ou encore l'humidité du sol (Grecu et Anagnostou, 2004). De nouvelles méthodes, basées sur les réseaux de neurones, sont utilisées pour estimer les températures de surface (Jang *et al.*, 2004). Les niveaux de la nappe phréatique peuvent être calculés à partir des bandes dans le visible et l'infrarouge (Xin Miao *et al.*, 2004). Les modèles climatiques peuvent aussi fournir une estimation des précipitations. La hauteur d'eau des barrages peut procurer une information concernant les réserves en eau des aquifères.

Dans le cadre de la présente étude, le rôle des indicateurs satellitaires VCI et TCI a été évalué par rapport à leur capacité à détecter le stress hydrique de la végétation causé par une baisse pluviométrique de durée moyenne (trois mois). L'utilisation seule des indicateurs VCI et TCI à ces fins est cependant plutôt limitée. Ces indicateurs, même s'ils offrent un portrait spatial des conditions de sécheresse, ne donnent qu'une valeur relative de l'étendue et de l'intensité des sécheresses pour une grande zone. De plus, leur diagnostic arrive souvent *a posteriori*, alors qu'une région est déjà en situation plus ou moins critique de sécheresse. Certes, l'information concernant l'historique des sécheresses qui en est tirée est cruciale mais son intégration à d'autres sources d'information, est souhaitable. En Andalousie, le VCI et le TCI pourraient par exemple être inclus dans un système de prise

de décision, basé non seulement sur des données mesurées par télédétection, aux stations météorologiques et aux réservoirs, mais aussi sur une modélisation prospective des conditions futures. Ensembles, toutes ces informations pourraient donner aux intervenants et décideurs qui font face à un problème environnemental, un outil relativement simple pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources naturelles. Jusqu'à présent l'intégration de toutes les sources d'information utiles au suivi des sécheresses dans un système de décision (SD) n'est pas courante. Les ressources nécessaires pour compiler et traiter les multiples sources de données, pour construire les relations qui unissent les différentes variables du modèle créé, pour calibrer et valider ce modèle sont très demandantes en terme de temps et de coûts.

Les sécheresses sont des phénomènes complexes qui nécessitent une analyse approfondie, souvent qualitative des résultats des différents indices, modèles ou autres informations utilisées pour les caractériser. La présente étude ne s'est attardée qu'à deux indicateurs satellitaires et a démontré leur utilité pour le suivi des sécheresses en région méditerranéenne. Toutefois, il est clair que l'avenir du suivi des sécheresses doit passer l'intégration de données multi-sources. Ces données sont de nature, de format, de résolution spatiale et de résolution temporelle différents. Il existe donc un challenge pour intégrer toutes les informations disponibles et en tirer une information précise et juste. Ce challenge risque de tenir bien des gens occupés pour encore quelques...décennies!?

Bibliographie

- Arnold, J.G. & Fohrer, N, 2005. SWAT2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modelling. **Hydrological Processes**, **19**-3, 563-572.
- ACRES, 2006. Satellites facts. Current status of remote sensing satellites and sensors. Australian Centre for Remote Sensing, Australia. Consulté en ligne: http://www.ga.gov.au/acres/prod_ser/sensor.jsp, 2006.
- Akinremi, O.O, McGinn, S.M. & Barr, A.G., 1996. Evaluation of the Palmer Drought Index on the Canadian Prairies. *Journal of Climate*, **9**, 897-905.
- Alexander, M.E., 1990. Computer Calculation of the Keetch-Byram Drought Index- Programmers Beware! Fire Management Notes, **51**-4, 23-25.
- Alley, W.M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **23**, 1100-1109.
- Andalucia.com, 2006. Flora & Fauna - Natural Parks. Protected natural environments in Hualva province. Coto Doñana National Park. Consulté en ligne: <http://www.andalucia.com/environment/protect/donana.htm>, 2006
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & Huete, A.R., 1995. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, **13**, 95-120.
- Barcelo, A.M., 1995. Five-Year Drought Continues in Spain. Drought Network News. Consulté en ligne: <http://www.drought.unl.edu/pubs/dnn/dnnarchive.htm>.
- Becker, F. & Li, Z.-L., 1990a. Towards a local split window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, **11**-3, 369-393.
- Becker, F. & Li, Z.-L., 1990b. Temperature-Independent Spectral Indices in Thermal Infrared Bands. *Remote Sensing of Environment*, **32**, 17-33.
- Berthelot, B & Dedieu, G., 1997. Correction of atmospheric effects for VEGETATION data. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing. Guyot & Phulpin (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 9173.
- Bosque Maurel, J., Villegas Molina, F., Ortega Alba, F., Sanchez del Arbol, M.A., Ferrer Rodriguez, A., Compan Vazquez, D., Urdiales Viedma, M.E., Quirantes Gonzales, F. & Perez Gonzales, R., 1991. Geografia de Espana, Andalucia/Canarias. Grupo Editorial Planeta, Barcelona, Espana. 591p.
- Boyd, D.S., Phipps, P.C., Foody, G.M. & Walsh, R.P.D., 2002. Exploring the utility of NOAA AVHRR middle infrared reflectance to monitor the impacts of ENSO-induced drought stress on Sabah rainforest. *International Journal of Remote Sensing*, **23**-**23**, 5141-5147.
- Ceccato, P, Flasse, S. & Gregoire, J., 2002b. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. *Remote Sensing of Environment*, **82**, 198-207.
- Ceccato, P, Flasse, S., Pinty, S., tarantola, S., 2002a. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, **82**, **188**-**197**.

- Colaizzi, P.D., Barnes, E.M., Clarke, T.R., Choi, C.Y. & Waller., M., 2003. Estimating soil moisture under low frequency surface irrigation using Crop Water Stress Index. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **129-1**, 27-35.
- Coll, C., Casselles, V., Sobrino, J.A. & Valor, E., 1994. On the Atmospheric Dependence of the Split-Window Equation for Land Surface Temperature. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, 105-122.
- Colorado Climate Center, 2003. Standardized Precipitation Maps. Consulté en ligne: <http://climate.atmos.colostate.edu/standardizedprecipitation.shtml>
- COPA-COGECA, 2003. Assessment of the impact of heat wave and drought on the summer 2003 on agriculture and forestry. Consulté sur le sit internet : http://www.cogeca.be/pdf/pocc_03_78i4_1e.pdf.
- Crago, R.D., 1996. Conservation and variability of the evaporative fraction during daytime. *Journal of Hydrology*, **180**, 173-194.
- De la Rosa, D. & Moreira, J.M., 1987. Evaluacion Ecologica de Recursos Naturales de Andalucia. Junta de Andalucia, Agencia de Medio Ambiente, Servicio de Evaluacion de Recursos Naturales, 191p.
- De Teran, M., Solé Sabaris, L. & Vila Valenti, J., 1988. Geografia Regional de Espana. Talleres Grafico Duplex, S.A., Barcelona, Espana. 556p.
- Domenikitos, C., Spiliotopoulos, M., Tsirios, E. & Dalezios, N.R., 2004. Early cotton assessment in Greece based on a combinationof the drought Vegetation Condition Index (VCI) and the Bhalme and Mooley Drought Index (BMDI). *International Journal of Remote Sensing*, **25-23**, 5373-5388.
- Dracup, J.A., Lee, K.S. & Paulson, E.G.Jr., 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research*, **16-2**, 297-302.
- EEA, 2005. European Environment Agency. Corine Land Cover, CLC90, version 8/2005. Consulté en ligne: <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/metadetails.asp>, 2005.
- EEA, 2000. Corine Land Cover update, I&CLC2000 project, Technical Guidelines. European Environment Agency, 68p.
- El Pais, 28 avril 2006. El Gobierno levantara en junio el decreto de sequia en la Costa del Sol.
- El Pais, 19 avril 2006. La comision de la sequia ordena controlar el uso de pozos y mantiene restricciones al riego.
- El Pais, 18 janvier 1996. El reparto desigual de las lluvias no permite dar por acaba la sequia.
- El Pais, 12 janvier 1996. El agua embalsada esta semana cubre el deficit annual de toda Espana.
- El Pais, 10 janvier 1996. El Tajo recibe en un dia tanta agua como consume Madrid en dos anos.
- El Pais, 3 janvier 1996a. Las restricciones persistiran pese a las intensas lluvias.
- El Pais, 3 janvier 1996b. El sur sigue sin agua suficiente para los regadios.

- El País, 14 novembre 1995. La sequedad de la tierre hizo que la lluvia apenas llegase a los pantanos.
- El País, 13 novembre 1995. Sevilla, con 97 litros por metro, la provincia andaluza mas beneficiada por la lluvia.
- El País, 5 février 1995. La sequia fuerza un cambio de cultivos en la mitad sur.
- El País, 9 janvier 1995. Cinco provincias andaluzas inician o aumentan las restricciones en el suministro de agua.
- El País, 5 janvier 1995. Seis millones de españoles en la mitad sur padecen restricciones en los abastecimientos de agua.
- El País, 29 mai 1994. La sequia causa 200.00 millones de perdidas.
- El País, 2 mai 1994. Sevilla tendra problemas de calidad de agua este verano, segun Obras Publicas.
- El País, 5 décembre 1993. El Sur se mantiene deshidratado y encara el nuevo año con tan solo el 10 % de sus reservas de agua.
- El País, 2 novembre 1993. Las lluvias en Andalucía han aportado solo el 40% del agua necesaria para paliar la sequia.
- El País, 6 septembre 1993. De la pertinaz sequia a la etica del agua.
- El País, 22 août 1993. Media España, al minimo historico de reserva de agua.
- EOS, 1995. Supply of a System for Pre-Processing NOAA-AVHRR Images - Architectural Design Document. Earth Observation Sciences - Document No. EOS-95/136-ADD/SP-00, Joint Research Centre of the European Commission, Ispra , Italy.
- ESRI, 2006. GIS Mapping and Software. Consulté en ligne: www.esri.com, 2006.
- ETC, 1999. Corine Land Cover. A key database for European integrated environment assessment. G.I.M.-Geographic Information Management, NV, Belgium.
- Fives, A.-M., 1994. A Structural Analysis of Water Resources and Demands in Andalusia Using A Geographical Information System. Institute of Remote Sensing Application, Joint Research Center, Ispra, Italie. 53p.
- Florida Agricultural Information Retrieval system, 1998. Florida Agricultural Information Retrieval system. Consulté en ligne: [Http://hammockifas.ufl.edu/txt/fairs/389](http://hammockifas.ufl.edu/txt/fairs/389).
- Gao, B., 1996. NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, **58**, 257– 266.
- Garrido, A. & Gomez-Ramos, A., 2000. Socio-Economic Aspects of Droughts. Dans: J.V. Vogt and F. Somma (eds): *Drought and Drought Mitigation in Europe*, 000-000. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 11p.
- Gesell, G., 1989. An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data. An extension of the APOLLO software package. *Int. J. Remote Sensing*, **10,4&5**, 897- 905.
- Gibbs, W.J. & Maher, J.V., 1967. Rainfall Deciles as Drought Indicators. Director of Meteorology of Melbourne, Australia, 32p.
- Gilbert, N. & Savard, J.G., 1992. Statistiques, 2e édition revue et corrigée. Éditions Études Vivantes, Laval, Qc., Canada. 410 p.

- Gobron, N., Pinty, B., Mélin, F., Taberner, M., Verstraete, M. M., Belward, A., Lavergne, T. & Widlowski, J.-L., 2005. The state of vegetation in Europe following the 2003 drought. *International Journal of Remote Sensing*, **26**, 2013-2020.
- Golden Software inc., 1997. Surfer (win 32) Version 6.04, February 24 1997. Surface mapping Systems, Golden Software, CO, États-Unis.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied Geostatistics Series. Second edition. Oxford University press,
- Goward, S.N., Markham, B., Dye, D.G., Dulaney, W. & Yang, J., 1991. Normalized Difference Vegetation Index Measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of Environment*, **35**, 257-277.
- Grecu, M. & Anagnostou, E.N., 2004. A differential attenuation based algorithm for estimating precipitation from dual-wavelength spaceborne radar. *Canadian Journal of remote Sensing*, **30-5**, 697-705.
- Greenpeace, 2004. Consulté en ligne:
<http://archive.greenpeace.org/climate/ctb/drought.html>.
- Gutman, G.G., 1990. Towards Monitoring Droughts from Space. *Journal of Climate*, **3**, 282-295.
- Gutman, G.G., 1991. Vegetation Indices from AVHRR: An Update and Future Prospects. *Remote Sensing of Environment*, **35**, 121-136.
- Han, K.-S., Viau, A.A. & Anctil, 2003. High-resolution forest fire weather index computations using satellite remote sensing. *Canadian Journal for Remote Sensing*, **33**, 1134-1143.
- Hall, F.G., Huennrich, K.F., Goetz, S.J., Sellers, P.J. & Nickeson, J.E., 1992. Satellite Remote Sensing of Surface Energy balance: Success, Failure, and Unresolved Issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 19 061-19 089.
- Hardisky, M.A., Klemas, V. & Smart, R.M., 1983. The influence of soil salinity, growth forms, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **49**, 77-83.
- Hayes, M., 1996. Drought Indices. National Drought Mitigation Center. Consulté en ligne:
<http://enso.unl.edu/ndmc>.
- Huete, A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote sensing of Environment*, **25**, 295-309.
- Hunt, E.R. & Rock, B.N., 1989. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-infrared Reflectances. *Remote sensing of Environment*, **30**, 43-54.
- Hunt, E.R., Rock, B.N. & Nobel, P.S., 1987. Measurements of Relative Water Content by Infrared Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **22**, 429-435.
- Inoue, Y. & Moran, M.S., 1997. A simplified method for remote sensing of daily canopy transpiration-case study with direct measurements of canopy transpiration in soybean canopies, *International Journal of Remote Sensing*, **18**, 139-152.
- IPCC, 1997. The Regional Impacts of Climate change: An Assessment of Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Jackson, T.J., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Wathall, C., Doriaswamy, P. & Hunt, E.R., 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*, **92-4**, 475-482.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. & Pinter, P.J.Jr., 1981. Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research*, **17-4**, 1133-1138.
- Jang, J.-D., 2004. Evaluation of thermal-water stress of forest in southern Québec from satellite images. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Qc., Canada.
- Jang, J.-D., Viau, A.A., & Anctil, F., 2004a. Comparison of split-window algorithms for the retrieval of surface temperatures from AVHRR data in southern Quebec. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **30-2**, 216.220.
- Jang, J.-D., Viau, A.A., & Anctil, F., 2004. Neural network estimation of air temperature from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **25-21**, 4541-4554.
- JRC, 2005. FAPAR - Fraction of absorbed photosynthetically active radiation. European Commission, Joint Research Centre. Consulté en ligne: <http://fapar.jrc.it/WWW/Home.php>, 2006.
- Junta de Andalucía, 2006. Consejería de Medio Ambiente. Consulté en ligne: <http://www.juntadeandalucia.es/SP/JDA/CDA/Secciones/Consejerias/JDA-Consejerias2/0,22105,13,00.html>, 2006
- Karl, T.R., 1983. Some Spatial characteristics of drought Duration in the United States. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 1356-66.
- Kaufman, Y. J., & Tanré, D., 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **30-2**: 261-70.
- Keeley, G., 2005. The rain in Spain falls mainly on the plain - but not for 60 years. The Times Online. Consulté en ligne: www.timesonline.co.uk, 2006.
- Keetch, J.J. & Byram, G.M., 1968. A Drought Index for Forest Fire Control. US Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper SE-38, 1-32.
- Kerdiles, H., 1997. Software for Processing AVHRR data for the Communities of Europe (SPACE): algorithms used in SPACE version 2 Part 1: calibration, atmospheric correction and cloud detection. Technical note, Space Applications Institute, Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy.
- Kidwell, K.B., 1998. NOAA Polar Orbiter Data User's Guide. (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13 and NOAA-14). November 1998 revision. Consulté en ligne: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/>, 2006.
- Kogan, F.N., 1990. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogenous areas. *International Journal of Remote Sensing*, **11-8**, 1405-1419.
- 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.

- Kogan, F., Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C. & Tsooj, S., 2004. Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. *International Journal of Remote Sensing*, 25-14, 2889-2896.
- Kogan, F. & Sullivan, J., 1993. Development of Global Drought-Watch System Using NOAA/AVHRR Data. *Advances in Space Research*, 13-5, 219-222.
- Kogan, F., Yang, B., Wei, G., Zhiyuan & P., Xianfeng, J., 2005. Modelling corn production in China using AVHRR-based vegetation health indices. *International Journal of Remote Sensing*, 26-11, 2325-2336.
- Kukla, G., 1998. Ancient Droughts and Prehistoric Migrations. Consulté en ligne: <http://www.ncdc.noaa.gov/ogp/papers/kukla.htm>.
- Kustas, W.P., Schmugge, T.J., Humes, K.S., Jackson, T.J., Parry, R., Weltz, M.A. & Morans, M.S., 1993. Relationship between Evaporative Fraction and Remotely Sensed Vegetation Index and Microwave Brightness Temperature for Semi-arid Rangelands. *Journal of Applied Meteorology*, 32, 1781-1790.
- Lacaze, B., Casselles, V., Coll, C., Hill, J., Hoff, C., de Jong, S., Mehl, W., Negendank, J.F.W., Riezebos, H., Rubio, E., Sommer, S., Teixeira Filho, J. & Valor, E., 1996. Integrated Approaches to Desertification Mapping and Monitoring in the Mediterranean Basin. Final Report DeMon-I Project. Joint Research Centre EUR 16448 EN. 165 p.
- Leica Geosystems, 2006. Consulté en ligne: <http://gi.leica-geosystems.com/default.aspx>, 2006.
- Lhomme, J-P. & Katerji, N., 1991. A simple modeling of crop water balance for agrometeorological applications. *Ecological Modeling*, 57, 11-25.
- Linsley, R.K.Jr., Kohler, M.A. & Paulhus, J.C.H., 1975. Hydrology for Engineers, 2nd ed., McGraw-Hill, New-York.
- Mader, S., 1987. Biologie. Évolution, diversité et environnement. Éditions du Trécarré, Les Éditions Reynald Goulet inc., Saint-Laurent, Qc., Canada.
- MARS, date inconnue. Methodology of the MARS crop yield forecasting system. Monitoring Agriculture with Remote Sensing. Consulté en ligne : <http://mars.jrc.it/marsstat/Crop%5FYield%5FForecasting/METAMP/00000003.HTM#>, 2006.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scale. 8th Conference on Applied Climatology, pp.179-184.
- McVicar, T.R. & Jupp, L.B., 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.
- McVicar, T.R. & Bierwirth, P.N., 2001. Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 22-11, 2109-2128.
- Menenti, M., 1993. Understanding Land Surface Evapotranspiration with Satellite Multispectral Measurements. *Advances in Space Research*, 13-5, 89-100.

- Microimages, 2006. Advanced Software for Geospatial Analysis, The TNT Products from MicroImages, Inc. Consulté en ligne: <http://www.microimages.com/index.htm>, 2006.
- Millot, M., 1995. NOAA-AVHRR Pre-Processing, Dans: J.F. Dallemand and P. Vossen (eds.): Agrometeorological Models: Theory and Applications in the MARS Project. (EUR 16008 EN), Luxembourg, 173-179.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. & Vidal, A., 1994. Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, **49**, 246-263.
- Moran, M.S., Rahman, A.F., Washburne, J.C., Goodrich, D.C., Weltz, M.A. & Kustas, W.P., 1996. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **80**, 87-109.
- MRNF, 2005. Caractéristiques de différents satellites d'observation de la Terre. Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec, Québec, Canada. Consulté en ligne: <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/territoire/geomatique/geomatique-teledetection-satellite.jsp>, 2005.
- MRNF, 2006. Photocartothèque québécoise. Consulté en ligne:
http://photocartotheque.mrnfp.gouv.qc.ca/pcq/classes/selection_produit?&direct=oui, 2006.
- Muirhead, K. & Malkawi, O., 1989. Automatic classification of AVHRR images. Proceedings of the 4th AVHRR Data User's Meeting. EUMETSAT, Rothenburg, september 1989, p.137-140
- NDMC, 2005. National Drought Mitigation Center. Consulté en ligne: <http://www.drought.unl.edu/index.htm>, 2006.
- NDMC, 1996. National Drought Mitigation Center. Consulté en ligne: <http://www.drought.unl.edu/enigma/indices.htm>, 1998.
- NOAA, 2000. Technical Documentation. National Climatic Data Center, National Environmental Satellite Data and Information Services, National Oceanic and Atmospheric Administration. Consulté en ligne:
<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/>, 2006.
- NRC, 2006a. Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR). Consulté en ligne: http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/optic/veg/veg2_e.php
- NRC, 2006b. Méthode canadienne de l'indice forêt-météo (IFM). Consulté en ligne: http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/fr/background/bi_FWI_summary_f.php, 2006.
- NRC, 2006c. GEOGRATIS Consulté en ligne: <http://geogratis.cgdi.gc.ca/>, 2006.
- NRC, 2006d. Système canadien d'information sur les feux de végétation. Consulté en ligne: http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/fr/current/cc_fw_f.php, 2006.
- NRCS, 2006. Natural Resources Conservation Service. Consulté en ligne: http://www.ut.nrcs.usda.gov/snow/watersupply/swsi_about.html, 2006.
- Obassi, G.O., 1994. WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, **75-9**, 655-1661.
- ONU, 1997. Organisation des nations unies. Consulté en ligne:

- <http://www.un.org/french/ecosocdev/geninfo/duddev/dpi1870.html>, 1998.
- Ottlé, C., Vidal-Madjar, D. & Girard, G., 1989. Remote Sensing Applications to Hydrological Modeling. *Journal of Hydrology*, **105**, 369-384.
- Palmer, W., 1965. Meteorological Drought. Research Paper NO. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 58p.
- Palmer, W., 1968. Keeping track of the Crop Moisture Conditions, Nationwide: The new crop Moisture Index. *Weatherwise*, **21**, 156-161.
- Paquet, F., Vogt, J. & Viau, A.A., 1997. Régionalisation de la température de l'air en Andalousie. Institut des applications spatiales, Centre commun de recherche, Ispra (VA), Italie, 127p.
- Park, S., Feddema, J.J. & Egbert, S., 2004. Impacts of hydrologic soil properties on drought detection with MODIS thermal data. *Remote Sensing of Environment*, **89**, 53-62.
- Pearson, R.L., & Miller, L.D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grassland, Colorado. Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing and the Environment II, 1355-1379.
- Pinty, B. & Verstraete, M. M., 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, **101**, 15-20.
- Pita Lopez, M.F., 1987. El Riesgo Potencial de Sequia en Andalucía. *Revistas de Estudios Andaluces*, **9**, 11-40.
- Planet, W., 1988. Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA-radiometers. NOAA Technical Memorandum NESS 107, Revision 1, Oct. 1988, 130p.
- Prata, A.J., 1994. Land Surface temperatures derived from the advanced very high radiometer and the along track scanning radiometer 2. Experimental results and validation of AVHRR algorithms. *Journal of Geophysical Research*, **99-D6**, 13025-13058.
- Prata, A.J., 1993. Land Surface Temperatures Derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the Along-Track Scanning Radiometer 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, **98-D9**, 16689-16702.
- Price, J.C., 1984. Land Surface measurements from the Split Window Channels of the NOAA 7 Advanced very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, **89-D5**, 7231-7237.
- Price, J.C., 1983. Estimating Surface Temperature from Satellite Thermal Infrared Data- A Simple formulation for the Atmospheric Effect. *Remote Sensing of Environment*, **13**, 353-361.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. & Sorooshian, S., 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, **48**, 119-126.
- Rahman, H. & Dedieu, G., 1994. SMAC : a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote sensing*, **15-1**, 123-143.
- Rondeaux, G., Steven, M. & Baret, F., 1996. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, **55**, 95-107.

- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I: 309-317.
- Rushton, K.R. & Ward, C., 1979. The estimation of groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, **41**, 345-361.
- Sandholt, I., Rasmussen, K. & Andersen, J., 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, **79**, 213-224.
- Sannier, C.A. D., Taylor, J. C. & Du Plessis, W., 2002. Real-time monitoring of vegetation biomass with NOAA AVHRR in Etosha National Park, Namibia, for fire risk assessment. *International Journal of Remote Sensing*, **23-1**, 71-89.
- Sannier, C.A. D., Taylor, J. C., Du Plessis, W., & Campbell, V., 1998. Real-time vegetation monitoring with NOAA-AVHRR in Southern Africa for wildlife management and food security assessment. *International Journal of Remote Sensing*, **19-4**, 621-639.
- Saunders, R.W., Kriebel, K.T., 1988. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **P(1)**: 123-150
- Schouten, M., 2003. Development in the drought. The incompatibility of the Ebro water transfer with sustainable development in the Southern region of Spain. World Wildlife Foundation, Madrid, Spain. p.30.
- Shafer, B.A. & Dezman, L.E., 1982. Development of a Surface water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas. Proceedings of Western Snow Conference, April 1982, 164-175.
- Singh, R.P., Roy, S. & Kogan, F., 2003. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing*, **24-22**, 4393-4402.
- Strommen, N. & Motha, R.P., 1987. An operational early warning agricultural wather system. Dans: Wilhite, D.A., Easterlings, W.E. & Woods, D.A. (Eds.), Planning for drought: Toward a reduction of societal vulnerability. Westview Press, Boulder, CO. États-Unis.
- Tanaka, S., Sugimura, T. & Mishima, S., 2000. Monitoring of vegetation extent around Kitui pilot forest (afforestation test site) in Kenya with rainfall by satellite data. *Advances in Space Research*, **26-7**, 1039-1042.
- Tanré, D., Deroo, C", Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J & Deschamps, P.Y., 1990. Description of a computer code to simulate satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, **14**, 659-668.
- Tate, E.L. & Gustard, A., 2000. Drought definition: A Hydrological perspective. Drought and Drought Mitigatin in Europe. Jurgen V. Vogt and Francesca Somma (Editors). Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Teillet, P.M. & Holben, B.N., 1994. Towards operational radiometric calibration of NOAA-AVHRR imagery in the visible and near-infrared channels. *Canadian Journal of Remote sensing*, **20-1**, 1-10.

- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, **38**, 55-94.
- Unganai, L.S. & Kogan, F.N., 1998. Drought and Corn Yield Estimation in Southern Africa from AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment*, **63**, 219-232.
- UNCCD, 2004. United Nations Convention to Combat Desertification. Consulté en ligne: <http://www.unccd.int/main.php>, 2004.
- USFS-WFAS, 2006. United States Forest Service - Wildland Fire Assessment System. . Consulté en ligne: <http://www.wfas.us/content/view/32/49/>, 2006.
- Viau, A.A., Audet, R. & Daloz, P., 1994. Un outil de régionalisation et d'optimisation du réseau agrométéorologique québécois. Actes du 62e Congrès de l'ACFAS, Montréal, Canada, p.89.
- Viau, A.A. & Paquet, F., 1996. Régionalisation de la température de l'air en Andalousie. Rapport intermédiaire présenté à l'Institut des applications spatiales, Centre commun de recherche, Ispra (VA), Italie, 60p.
- Viau, A.A. & Paquet, F., 1997. Régionalisation de la température de l'air en Andalousie – Rapport final présenté à l'Institut des applications spatiales, Centre commun de recherche, Ispra (VA), Italie, 131p.
- Viau, A. A., Vogt, J. V. & Beaudin, I, 2000. Comparison of a Satellite-Based and a Precipitation-Based Drought Index. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **26**, 580-583.
- Vogt, J.V., 1993. Extract_v40.C. (Programme en langage C pour créer des images décennales des valeurs maximales de certains indicateurs satellitaires). Institut des Applications Spatiales, Centre commun de recherche de l'Union européenne.
- Vogt, J.V., 1994. MM_V2.C. (Programme en langage C pour créer des images des valeurs minimales et maximales décennales historiques de certains indicateurs). Institut des Applications Spatiales, Centre commun de recherche de l'Union européenne.
- Vogt, J.V., 1996. Land surface temperature retrieval from NOAA AVHRR data. Dans : G. D'Souza., A. Belward & J.P. Malingreau (eds.). Brussels & Luxembourg, 125-151.
- Vogt, J.V., 1995. The use of low resolution satellite data for crop state monitoring. possibilities and limitations (eur 16008 en). Agrometeorological Models: Theory and Applications in the MARS Project, 223-240.
- Vogt, J.V., 1992. Characterizing the Spatio-temporal Variability of Surface Parameters from NOAA AVHRR Data. A case Study for Southern Mali. Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication no. 14637 EN, Brussels/Luxembourg. 263p.
- Vogt, J.V., Viau, A.A. & Paquet, F., 1997. Mapping Regional Air Temperature Fields Using Satellite Derived Surface Skin Temperatures. *International Journal of Climatology*, **17**, 1559-1579.
- Vogt, J.V. & Vossen, P., 1995. Suivi des ressources hydriques de la zone méditerranéenne au nord: Premiers résultats du projet HYDRE. Dans: J.-M. Dubois, M.R. Boussema, F. Boivin & P. Lafrance eds.: Télédétection des ressources en eau. Presse de l'Université du Québec, Ste-Foy, Canada, 193-201.

- Vowles, G., 1992. Space: Software to Preprocess AVHRR Data. The Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, (EUR 14262 EN), Luxembourg. 380p.
- Wang, C., Qi, S., Niu, Z. & Wang, J., 2004. Evaluating soil moisture status in China using the temperature-vegetation dryness index (TVDI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, **30-5**, 671-679.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C. & Moss, R.H., 1997. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1977. Consulté en ligne: <http://www.grida.no/climate/ipcc/>.
- Wilhite, D.A. & Glantz, M.H., 1985. Understanding the Droughts Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, **10**, 111-120.
- Xin mao, P.G., Tate, C., Battaglia, C. & Biging, G.S., 2004. Water tble level in relation to EO-1 ALI and ETM+ data over a mountainous meadow in California. *Canadian Journal of remote sensing*, **30-5**, 691-696.
- Zhou, S., Liang, X., Chen, J. & Gong, P., 2004. An assessment of the VIC-3L hydrological model for the Yangtze river basin based on remote sensing : a case study of the Baohe River basin. *Canadian Journal od Remote Sensing*, **30-5**, 840-853.

Annexe 1 – Synthèse des indicateurs potentiels de sécheresse

APPROCHES TRADITIONNELLES

TESTS STATISTIQUES

Percent of Normal (Pourcentage à la normale)

Acronyme : PN

Définition : Pourcentage de l'écart des précipitations par rapport à la normale historique (ex. moyenne).

Échelle temporelle : Mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Locale, régionale.

Types de données : Précipitation.

Références : Hayes, 1996.

Formule :
$$PN = \left(\frac{P - P_{moyen}}{P_{moyen}} \right) * 100 \quad [\%]$$

où :

P Précipitation moyenne de la période à l'étude (mm).

P moyen Précipitation moyenne historique de la période à l'étude; calculée à partir de l'historique de données (environ 30 ans) (mm).

Remarques (avantages, désavantages et problèmes) :

- Très efficace lorsque utilisé sur une seule région ou une seule saison;
- Facilement compris et mal interprété;
- Choix entre utilisation de la moyenne ou de la médiane (ex: régions semi-arides ou là où la distribution n'est pas normale);
- Problème de comparaison entre différentes régions.

Precipitation Deciles (Déciles de précipitation)

Acronyme : D

Définition: Déciles de la distribution des précipitations.

Échelle temporelle : Mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Locale, régionale, continentale.

Types de données : Précipitation.

Références : Hayes, 1996.

Formule: D = % des fréquences cumulatives /10 [% ou --]

Interprétation :

Valeur de D	Interprétation
Décile 1-2 20% inférieur	Fortement en dessous de la normale
Déciles 3-4 20% inférieur suivant	En dessous de la normale
Déciles 5-6 20% moyen	Près de la normale
Déciles 7-8 20% supérieur suivant	Au-dessus de la normale
Déciles 9-10 20% supérieur	Fortement au-dessus de la normale

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Historique des conditions climatiques de longue durée nécessaire;
- Développé pour palier aux faiblesses du PN;
- Méthode simple qui nécessite moins de données et qui comporte moins de suppositions que les indicateurs; météorologiques ou hydrologiques.

Standardized Precipitation Index (Indice de précipitation standardisé)

Acronyme : SPI

Définition : Indice créé afin de quantifier le déficit des précipitations à plusieurs échelles temporelles.

Échelle temporelle : Mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Locale, régionale.

Types de données : Précipitation.

Références : Hayes, 1996.

Formule : $SPI = \frac{(P - P_m)}{\sigma_p}$ [-]

où :

P Précipitation moyenne de la période à l'étude (mm).

P_m Précipitation moyenne historique de la période à l'étude; calculée à partir de l'historique de données (environ 30 ans) (mm).

σ_P Écart-type historique de la période à l'étude (1, 3, 6, 12, 24, 48 mois et plus); calculée à partir de l'historique de données (environ 30 ans).

Interprétation :

Valeur du SPI	Interprétation
> 2,0	Extrêmement humide
1,5 - 1,99	Sévèrement humide
1,0 - 1,49	Modérément humide
-0,99 - 0,99	Près de la normale
-1,0 - -1,99	Modérément sec
-1,5 - -1,99	Sévèrement sec
< 2,0	Extrêmement sec

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Créé pour tenir compte de l'effet de différentes périodes de temps sur les ressources en eau;
- Distribution normale des données nécessaire; transformation des données parfois nécessaire;
- Normalisation par l'écart type est un avantage, car les climats humides et secs peuvent être présentés de la même façon;
- Différentes régions peuvent être comparées;
- Les périodes humides sont aussi surveillées.

INDICATEURS MÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROLOGIQUES

Keetch Byram Drought Index (Indicateur de sécheresse de Keetch Byram)

Acronyme : KBDI

Définition : Indice de sécheresse, pour les sols et la partie organique des sols, basé sur la capacité en eau de 8 pouces.

Échelle temporelle : Journalière.

Échelle spatiale : Locale.

Types de données : Température maximale journalière; précipitation journalière.

Références : Keetch, & Byram, 1968; Alexander, 1990; USFS-WFAS, 2006.

$$\text{Formule : } KBDI = \frac{[203,2 - Q][0,968 \exp(0,0875T + 1,5552) - 8,3]dt * 10^{-3}}{1 + 10,88 \exp(-0,001736R)} \quad [\text{mm}]$$

où :

Q Déficit en humidité du sol (mm)

T Température maximale journalière ($^{\circ}\text{C}$)

R Précipitation moyenne annuelle (mm)

dt Temps depuis lequel le sol perd son humidité (d)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Estime le déficit cumulatif en humidité pour les humus profonds et les couches supérieures du sol;
- Lié au contrôle des feux en milieux forestiers ou en régions naturelles;
- Basé sur un sol ayant 8 pouces d'eau disponible;
- La moyenne annuelle des précipitations doit être connue pour la région;
- Doit faire le choix de la table à utiliser en fonction des précipitations annuelles;
- Commence un jour où le déficit est 0, doit donc parfois reculer dans l'historique pour trouver ce point de départ;
- Index journalier;
- Développé avec le système de mesures anglaises mais adapté au système international.

Palmer Drought Severity Index (Indice de sévérité des sécheresses de Palmer)

Acronyme : PDSI (PDI).

Définition : Index mesurant le départ de l'approvisionnement en humidité des plantes.

Échelle temporelle : Hebdomadaire, mensuelle.

Échelle spatiale : Régionale.

Types de données : Précipitation, température de l'air, capacité en eau disponible du sol.

Références : Gutman, 1990; Akinremi *et al.*, 1996.

$$\text{Formule : } PDSI = X(i) = 0,897X(i-1) + Z(i)/3 \quad [-]$$

où :

i Mois de l'année

X(i-1) PDSI de la période précédente (-)

Z(i) « Moisture Anomaly Index » ou Indice de l'anomalie en humidité (-)

$Z(i) = K(P - P_c)$ (-)

K Facteur de poids, ajusté régionalement (Alley, 1984; Akinremi, 1996) (-)

P Précipitation mensuelle réelle (mm)

P_c Précipitation mensuelle CAFEC (Climatically Appropriate for Existing Conditions – appropriée aux conditions climatiques existantes) (mm)

$$P_c = \alpha_j PE + \beta_j PR + \gamma_j PRO - \delta_j PL \quad (\text{mm})$$

où :

j: Mois de l'année (-)

PE: Évapotranspiration potentielle (mm)

PR: Recharge du sol potentielle (mm)

PRO: Ruissellement potentiel (mm)

PL: Perte potentielle dans le sol (mm)

$\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j$ Coefficients climatiques mensuels. (Moyennes historiques des ratios des valeurs mensuelles attendues par rapport aux valeurs potentielles) (--) (Alley 1984)

Interprétation :

Valeur du PDSI	Interprétation
> 4,00	Extrêmement humide
3,00 - 3,99	Sévèrement humide
2,00 - 2,99	Modérément humide
1,00 - 1,99	Légèrement humide
0,50 - 0,99	Période humide naissante
0,49 - -0,49	Près de la normale
-0,50 - -0,99	Sécheresse naissante
-1,00 - -1,99	Légèrement sec
-2,00 - -2,99	Modérément sec
-3,00 - -3,99	Sévèrement sec
< -4,00	Extrêmement sec

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Basé sur le concept de réserve et de demande du bilan hydrique;
- Mesure des conditions d'humidité standardisée; permet la comparaison de différentes régions;
- Permet de caractériser le début, la durée et l'intensité d'une sécheresse;
- Début et fin arbitrairement choisis;
- Surveille les périodes sèches et humides à long terme;
- Ne tient pas compte des cours d'eau, lacs, réservoirs, précipitations neigeuses, couverture neigeuse, sols gelés et autres facteurs hydrologiques;
- Les grands changements dans l'utilisation des ressources sont ignorés;
- Fortement influencé par la capacité en eau du sol;
- Indice de seuil; assume qu'il n'y a pas d'écoulement avant que la capacité du sol ne soit atteinte.
- Sensible au contenu en eau d'un type de sol;
- Temps de délai ignoré;
- Évapotranspiration est estimée;
- Représentation du sol est simplifiée.

Crop Moisture Index (Indice d'humidité disponible pour les cultures)

Acronyme : CMI.

Définition : Index météorologique pour la surveillance hebdomadaire des conditions agricoles. Donne le statut de l'humidité disponible par rapport à la demande en humidité.

Échelle temporelle : Hebdomadaire.

Échelle spatiale : Régionale.

Types de données : Température moyenne; précipitation totale.

Références : Gutman, 1990; Wilhite & Glantz, 1985; Palmer, 1968.

Formule : $CMI = EAI + WI$ [--]

où :

WI « Wetness Index » (Recharge du sol (Précipitation) combinée au ruissellement)

(mm)

EAI « Evapotranspiration Anomaly Index »

$$EAI = 0,67Y_{i-1} + 1,8 \frac{ET - ET_c}{\sqrt{\alpha}} \text{ (--)}$$

où : Y_{i-1} CMI de la semaine précédente (--)

ET Évapotranspiration (mm)

Etc Évapotranspiration attendue pour les conditions qui prévalent (mm)

α Coefficient d'évapotranspiration (--)

Interprétation :

Valeur du CMI	Interprétation
> 3,00	Excessivement humide
2,0 - 2,9	Humide
0,9 - 1,9	Anormalement humide
-0,9 - 0,9	Légèrement sec à favorablement humide
-1,0 - -1,9	Anormalement sec
-2,0 - -2,9	Excessivement sec
< -3,00	Sévèrement sec

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Développé par Palmer à partir des procédures du PDSI;
 - Évalue les conditions d'humidité à court terme, n'est pas un bon outil pour la surveillance à long terme;
 - Basé sur les précipitations totales et moyennes pour chaque semaine ainsi que sur le CMI de la semaine précédente;
 - Varie rapidement face aux changements des conditions environnementales;
 - Donne un poids par endroit et par période afin de permettre la comparaison entre différentes régions;
 - Définit les sécheresses en fonction de la magnitude du déficit en évapotranspiration;
 - Débute et finit à 0 pour la période agricole.
-

Surface Water Supply Index (Indice des réserves en eau de surface)**Acronyme :** SWSI**Définition :** Indicateur des conditions hydriques de surface pour les zones dépendantes des eaux de montagnes**Échelle temporelle :** Mensuelle.**Échelle spatiale :** Régionale.**Types de données :** Couverture neigeuse, débits fluviaux, précipitation, emmagasinement du réservoir, température.**Références :** Shafer & Dezman, 1982; NRCS, 2006.

$$\text{Formule : } \text{SWSI} = \frac{[(a * PN_{sp}) + (b * PN_{pcp}) + (c * PN_{rs})] - 50}{12} \quad [--]$$

où :

a, b, c sont les poids associés à chaque composante ($a+b+c=1$) (--)

sp Couverture neigeuse équivalente en eau (mm)

pcp Précipitation (mm)

rs Réservoir (mm)

PN Probabilité de ne pas excéder (%)

Interprétation :

Valeur du SWSI	Interprétation
3,0 - 4,0	Extrêmement humide
2,0 - 2,9	Moyennement humide
0,9 - 1,9	Légèrement humide
-0,9 - 0,9	Près de la normale
-1,0 - -1,9	Légèrement sec
-2,0 - -2,9	Moyennement sec
-3,0 - -4,0	Extrêmement sec

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Complément aux indices de Palmer;
- Incorpore des composantes hydrologiques et climatiques;

- Valeurs standardisées afin de comparer différentes régions;
 - L'addition d'événements en dehors de la série temporelle utilisée entraîne le calcul à nouveau de la distribution des fréquences;
 - Un changement dans la gestion du bassin entraîne le calcul à nouveau de l'algorithme
 - Crée en fonction de régions qui dépendent de la fonte des neiges comme principale source d'eau de surface;
 - Tient compte de la couverture neigeuse, des précipitations montagneuses, des cours d'eau et de l'humidité du sol;
 - Calibré pour régions homogènes.
-

Available water Capacity (Capacité de rétention utile du sol)

Acronyme : AWC

Définition : Volume d'eau qui devrait être disponible pour les plantes si le sol, en incluant les fragments rocheux, était à capacité maximale.

Échelle temporelle : Fixe, saisonnière.

Échelle spatiale : Locale, régionale.

Types de données : Épaisseur de la zone racinaire, densité volumétrique, capacité au champ, Point de flétrissement, densité de l'eau

Références : Alley, 1984; Karl, 1983.

$$\text{Formule : } AWC = \frac{T * (RC - PWP) * BD}{DW * 100} \quad [\text{cm}]$$

où :

T Épaisseur de la zone racinaire (cm)

BD Densité volumétrique du sol (g/cm^3)

FC Capacité au champ (% par poids)

PWP Point de flétrissement en pourcentage (% par poids)

DW Densité de l'eau (g/cm^3)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Difficile à définir car ce paramètre dépend de la texture et de la structure du sol et des caractéristiques de drainage;
 - Mesuré sur le terrain;
 - Estimation possible en laboratoire sur des échantillons de sols mouillés.
-

APPROCHES SATELLITAIRES

INDICES DE VÉGÉTATION

Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation normalisé)

Acronyme : NDVI

Définition : Indice normalisé représentant la condition de la végétation verte.

Échelle temporelle : Mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Régionale, continentale.

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Références : Bannari *et al.*, 1995; Gowards *et al.*, 1991; Gutman, 1990, 1991; Kogan & Sullivan, 1993, Kogan, 1990.

Formule :
$$NDVI = \frac{PIR - Rouge}{PIR + Rouge} \quad [-]$$

où :

PIR Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge (%)

Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Indice normalisé qui permet la comparaison de différentes régions;
- Sensible à la géométrie d'illumination et de vue;
- Saturation en milieu dense;
- Problèmes d'interprétation quand les résultats sont extrapolés à des zones non homogènes;
- Limitations associées à l'acquisition des données satellitaires : nuages, aérosols, couvert non végétatif, géométrie d'illumination et de vue, collecte et agrégation des données, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite.

Soil Adjusted Vegetation Index (Indice de végétation ajusté pour les sols)

Acronyme : SAVI

Définition : NDVI ajusté pour les sols. Représente la condition de la végétation verte en minimisant l'effet des sols.

Échelle temporelle : Mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Régionale, continentale.

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Références : Bannari *et al.*, 1995; Rondeaux *et al.*, 1996; Huete, 1988.

Formule :
$$SAVI = \frac{(PIR - Rouge) * 1,5}{PIR + Rouge + 0,5} \quad [-]$$

où :

PIR Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge (%)

Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Incorpore un ajustement pour le signal provenant du sol;
- Ajustement établi à 0,5 pour correction optimale dans la plupart des milieux;
- Ajustement devrait varier pour différents milieux;
- Affecté par la végétation sénesciente;
- Limitations associées à l'acquisition des données satellitaires : nuages, aérosols, couvert non végétatif, géométrie d'illumination et de vue, collecte et agrégation des données, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite

Modified Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI modifié)

Acronyme : MSAVI

Définition : SAVI ajusté pour minimiser l'effet des sols nus.

Échelle temporelle : Mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Régionale, continentale.

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Références : Bannari *et al.*, 1995; Qi *et al.*, 1994.

$$\text{Formule : } MSAVI = \frac{2PIR + 1 - \sqrt{(2PIR + 1)^2 - 8(PIR - \text{Rouge})}}{2} \quad [-]$$

où :

PIR Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge (%)

Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Minimise l'effet des sols nus;
- Plus grande portée que les autres indices de végétation;
- Saturation en zone de forte densité de végétation;
- Limitations associées à l'acquisition des données satellitaires : nuages, aérosols, couvert non végétatif, géométrie d'illumination et de vue, collecte et agrégation des données, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite.

Vegetation Condition Index (Indice de la condition de la végétation)

Acronyme : VCI

Définition : Mesure du degré de végétation. Sépare le signal climatique à court terme du signal écologique à long terme.

Échelle temporelle : Mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Régionale, continentale.

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Références : Kogan 1997; Kogan & Sullivan 1993; Kogan 1990.

$$\text{Formule : } VCI = \frac{100(NDVI - NDVI_{\min})}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad [-]$$

où :

NDVI NDVI de la période à l'étude (-)

NDVI_{min} NDVI minimum de la période à l'étude, calculé à partir de l'historique de données (-)

NDVI_{max} NDVI maximum de la période à l'étude, calculé à partir de l'historique de données (-)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Transformation du NDVI;
- Reflète la distribution des facteurs climatiques seulement et non la différence due aux facteurs économiques ou environnementaux spécifiques;
- Fait un portrait de la dynamique des précipitations plus précis que le NDVI
- Mieux adapté aux aires hétérogènes;
- Limitations associées à l'acquisition des données satellitaires : nuages, aérosols, couvert non végétatif, géométrie d'illumination et de vue, collecte et agrégation des données, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite;
- Utilisation d'une image composée. Implique l'utilisation de différents jours et de différents angles de vues et d'illumination.

Vegetation Production Index (Indice de la production de la végétation)

Acronyme : VPI

Définition : Estimation la distribution statistique du NDVI pour des zones de NDVI homogène ou des classes d'utilisation du sol.

Échelle temporelle : décadaire, mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Régionale, continentale.

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Références : Sannier *et al.*, 1998.

Formule : $VPI = p[NDVI_u]$ [--]

où :

p Probabilité d'avoir un NDVI plus petit ou égal

$NDVI_u$ NDVI de la période à l'étude pour le groupe homogène de NDVI (u) (--)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Utilise toutes les valeurs de NDVI pour calculer les probabilités;
- Sensible au type de végétation;
- Calculs lourds dans les régions où il existe un grand nombre de classe de végétation;
- Chaque type de végétation possède une distribution différente et doit donc être interprété séparément.

Leaf Water Content Index (Indice du contenu en eau des feuilles)

Acronyme : LWCI

Définition : Index pour l'estimation du contenu relatif en eau d'une feuille ou d'un couvert végétal.

Échelle temporelle : Journalière, hebdomadaire.

Échelle spatiale : Locale.

Types de données : Bandes spectrales du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen.

Références : Hunt & Rock, 1989; Hunt *et al.*, 1987.

Formule : $LWCI = \frac{-\log[1 - (TM_4 - TM_5)]}{-\log[1 - (TM_{ft4} - TM_{ft5})]}$ [--]

où :

TM_4 Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge de Landsat TM (%)

TM_5 Réflectance de la région spectrale de l'infrarouge moyen de Landsat TM (%)

ft Pleine turgescence

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Relations linéaire entre le LWCI et le MSI et le contenu relatif en eau des feuilles;
- Impraticable sur le terrain (Hunt et Rock, 1989).

Moisture Stress Index (Indice du stress en humidité)

Acronyme : MSI

Définition : Index pour l'estimation du contenu relatif en eau d'une feuille ou d'un couvert végétal.

Échelle temporelle : Journalière, hebdomadaire.

Échelle spatiale : Locale.

Types de données : Bandes spectrales du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen.

Références : Hunt & Rock, 1989.

Formule : $MSI = TM_5 / TM_4$ [--]

où :

TM_4 Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge de Landsat TM (%)

TM_5 Réflectance de la région spectrale de l'infrarouge moyen de Landsat TM (%)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Pas très sensible : 50% du contenu en eau doit partir pour que le MSI détecte le changement;
- Hautement corrélé au NDVI.

INDICES DE TEMPÉRATURE

Surface temperature (Température de surface)

Acronyme : Ts

Définition : Température radiative d'une surface terrestre.

Échelle temporelle : Instantanée.

Échelle spatiale : Locale, régionale, continentale.

Types de données : Bandes spectrales de l'Infrarouge thermique.

Références : Coll *et al.*, 1994.

Formule : $T_S = T_4 + A(T_4 - T_5) + B(\varepsilon)$ [K]

où :

T4 et T5 sont les températures de brillance de canaux 4 et 5 (K)

$$A = 1.0 + 0.58(T_4 - T_5) \quad (--)$$

$$B = 0,51 + 40(1 - \varepsilon) - \beta\Delta\varepsilon \quad (--)$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2 \quad (--)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5 \quad (--)$$

où :

β est un coefficient qui diminue selon le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère ε_4 et ε_5
sont les émissivité des canaux 4 et 5 (--)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

Temperature Condition Index (Indice de la condition thermique)

Acronyme : TCI

Définition : Indice déterminant le stress végétatif du à la température pendant les sécheresses.

Échelle temporelle : Mensuelle, saisonnière, annuelle.

Échelle spatiale : Régionale, continentale.

Types de données : Bandes spectrales de l'Infrarouge thermique.

Références : Kogan, 1997.

Formule : $TCI = \frac{100(T_{\max} - T)}{(T_{\max} - T_{\min})}$ [-]

où :

T Température de surface de la période à l'étude (K)

T_{\min} Température de surface minimale de la période à l'étude, calculée à partir de l'historique de données (K)

T_{\max} Température de surface maximale de la période à l'étude, calculée à partir de l'historique de données (K)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Augmente la précision de la surveillance des sécheresses;
 - Aide à expliquer le rôle de la température dans l'analyse des sécheresses;
 - Utile pour la surveillance du stress végétatif dû à la saturation du sol en eau;
 - Utilisation d'une image composée. Implique l'utilisation de différents jours et de différents angles de vues et d'illumination;
 - Limitations associées à l'acquisition des données satellitaires : nuages, aérosols, couvert non végétatif, géométrie d'illumination et de vue, collecte et agrégation des données, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite.
-

APPROCHES COMBINÉES

Water Deficit Index (Indice de déficit en eau)

Acronyme : WDI

Définition : Indice basé sur le trapézoïde entre un indice de végétation et les mesures de températures de surface, afin de déterminer les conditions de déficit hydrique. Le WDI est égal au ratio de la distance entre les conditions à saturation et conditions qui prévalent et sur la distance entre les conditions à saturation et les conditions de stress.

Échelle temporelle : Instantanée, journalière.

Échelle spatiale : Locale, Régionale.

Types de données : Température de surface, température de l'air.

Références : Moran *et al.* 1996; Moran *et al.* 1994; .

$$\text{Formule : } WDI = 1 - \left(ET / ET_p \right) = \frac{[(T_s - T_a)_m - (T_s - T_a)_r]}{[(T_s - T_a)_m - (T_s - T_a)_x]} \quad [-]$$

où:

ET Taux d'évapotranspiration de la surface (mm/h)

ET_p Évapotranspiration potentielle (mm/h)

T_a Température de l'air (°C)

T_s Température de surface (°C)

m Valeur minimum

r Valeur actuelle

x Valeur maximale

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Équivalent au CWSI pour les couverts végétaux de haute densité car Ts = Température du couvert végétal;
- Assume que l'échange énergétique entre les sols et la végétation est couplé. Ceci est une source d'erreurs;
- Surestime le déficit hydrique pour les régions à faible densité de végétation;
- WDI est inversement proportionnel à la couverture végétale dans un ratio influencé par la disponibilité en eau;
- Peut être utilisé pour les régions partiellement ou complètement couvertes de végétation.

Crop Water Stress Index (Indice de stress en eau des cultures)

Acronyme : CWSI

Définition : Fonction du ratio de l'évapotranspiration réelle à l'évapotranspiration potentielle ou fonction du ratio de la résistance interne à la résistance externe.

Échelle temporelle : Instantanée, journalière.

Échelle spatiale : Locale, régionale.

Types de données : Température de brillance de la bande thermique, VPD déficit de la pression de l'air, rayonnement net, résistance aérodynamique.

ou

Température de l'air, température de surface.

Références : Moran *et al.* 1996; Ottlé *et al.* 1989; Moran *et al.* 1994; Menenti 1993; Inoue & Moran 1997, Jackson *et al.* 1981.

$$\text{Formule : } CWSI = 1 - \left(E_r / E_p \right) = \frac{\gamma(1 + r_c / r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad [-]$$

où :

E_r Évapotranspiration réelle (mm)

E_p Évapotranspiration potentielle (mm)

r_a Résistance aérodynamique (s m⁻¹)

r_c Résistance du couvert végétal au transport de la vapeur (s m⁻¹)

Δ Pente de la relation entre la pression de vapeur d'eau à saturation et la température
 $(--)$

γ Constante psychométrique ($\text{Pa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)
et

$$r_c / r_a = \frac{\gamma R_n / (\rho c_p) - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e_a^* - e_a)}{\gamma[(T_c - T_a) - r_a R_n / \rho c_p]} \quad [--]$$

$$\gamma^* = \gamma(1 - (r_{cp} / r_a))$$

où :

e_a^* Pression de vapeur à saturation (Pa)

e_a Pression de vapeur de l'air (Pa)

R_n Rayonnement net (W m^{-2})

c_p Capacité thermique volumétrique de l'air ($\text{J kg}^{-1}^{\circ}\text{C}^{-1}$)

T_c Température de surface ($^{\circ}\text{C}$)

T_a Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

ρ Densité de l'air (kg/m^3)

r_{cp} Résistance du couvert végétal au transport de la vapeur, à l'évapotranspiration potentielle (s m^{-1})

Alternative satellitaire :

$$CWSI = \frac{(T_o - T_a) - (T_o - T_a)^l}{(T_o - T_a)^u - (T_o - T_a)^l}$$

où :

T_o Température de surface ($^{\circ}\text{C}$)

T_a Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

u Limite supérieure

l Limite inférieure

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Outil pour la détection du stress hydrique;
- Quantification de l'humidité des cultures, indicateur des régions en besoin d'irrigation et prédition de la production agricole;
- Intègre des facteurs environnementaux;
- Nécessite des intrants non satellitaires supplémentaires : déficit de pression de vapeur, Rayonnement net, résistance aérodynamique
- Flux d'advection est une source d'erreur;
- Augmente avec une augmentation de la vitesse du vent;
- Influencé par le rapide changement des conditions nuageuses (ensoleillement et ombre);
- Erreurs des données météorologiques est une source d'erreurs;
- Synchronisation des mesures est importante;
- Autres sources d'erreurs : estimation erronée de l'émissivité, non-représentativité de certaines portions du champ de vue;
- Le sol ne doit pas apparaître. Les zones partiellement couvertes de végétation entravent les mesures de température du couvert végétal.

Simple Water Stress Index (Indice de stress en eau)

Acronyme : WSI

Définition : Indice du déficit en eau des cultures.

Échelle temporelle : Journalière.

Échelle spatiale : Locale, régionale.

Types de données : Évapotranspiration, précipitation, coefficient de culture, humidité maximale disponible.

Références : Lhomme & Katerji, 1991.

Formule : $WSI = \sum WD / \sum Etm \quad [--]$

où :

WD Déficit en eau journalier (évapotranspiration maximale - évapotranspiration

actuelle) (mm)

Etm Évapotranspiration maximale (mm)

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Pour la surveillance des cultures;
 - Montée capillaire ignorée. Peut contribuer substantiellement dans les sols profonds ou en période humide;
 - Directement lié à la réduction de la production agricole;
 - Peut être utile pour déterminer les date d'ensemencement optimum;
 - Modèle sensible au contenu maximum en eau; valeur difficile à déterminer.
-

Evaporative fraction (Fraction évaporatoire)

Acronyme : EF

Définition : Fraction de l'énergie disponible utilisée pour l'évapotranspiration.

Échelle temporelle : Instantanée, journalière.

Échelle spatiale : Locale, régionale.

Types de données : Évapotranspiration, flux de chaleur sensible du sol, rayonnement net.

Références : Hall *et al.*, 1992; Kustas *et al.*, 1993; Crago, 1996.

Formule :
$$EF = -\frac{LE}{R_n + G} \quad [-]$$

où :

LE Flux de chaleur latente (W m^{-2})

R_n Rayonnement net (W m^{-2})

G Flux de chaleur du sol (W m^{-2})

Remarques (avantages, désavantages et problèmes):

- Nécessite l'estimation complète du bilan énergétique;
- Incorpore l'énergie disponible et les réserves en eau;
- Peut être calculé en utilisant les données instantanées satellitaires. En supposant la représentativité de ces données, l'évapotranspiration est valide à l'échelle journalière.

Annexe 2 – Utilisation du sol en Andalousie

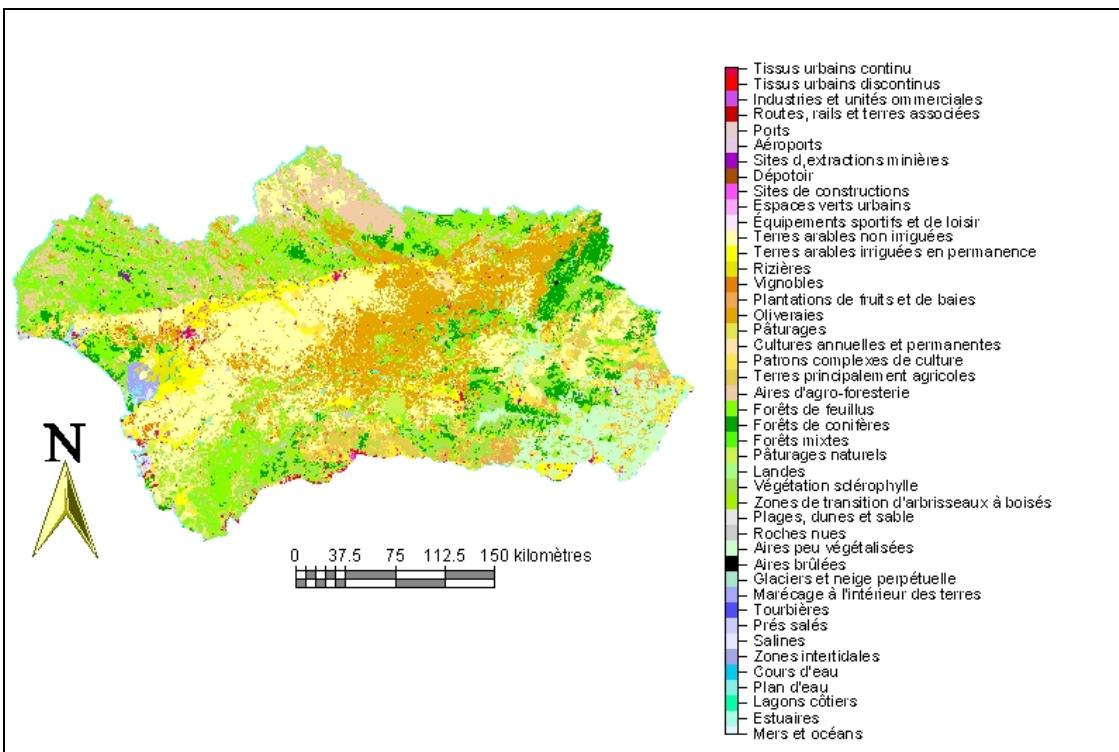


Figure 1 - CORINE 1990 en Andalousie

Tableau 1 - Importance des classes d'utilisation du sol retrouvées en Andalousie

Code Corine	Nouveau code (9 classes)	Importance (%)	Utilisation du sol
1	1	0,60	Tissus urbains continu
2	1	0,31	Tissus urbains discontinu
3	1	0,14	Industries et unités commerciales
4	1	0,00	Routes, rails et terres associées
5	1	0,02	Ports
6	1	0,03	Aéroports
7	2	0,14	Sites d'extraction minière
8	2	0,02	Dépotoir
9	2	0,05	Sites de construction
10	1	0,01	Espaces verts urbains
11	1	0,02	Équipements sportifs et de loisir
12	7	18,62	Terres arables non irriguées
13	8	3,77	Terres arables irriguées en permanence
14	8	0,43	Rizières
15	3	0,34	Vignobles
16	3	1,59	Plantations de fruits et de baies
17	3	13,72	Oliveraies

18	6	0,00	Pâturages
19	3	0,21	Cultures annuelles et permanentes
20	7	5,36	Patrons complexes de culture
21	7	2,92	Terres principalement agricoles
22	5	7,42	Aires d'agro-foresterie
23	5	7,33	Forêts de feuillus
24	5	5,96	Forêts de conifères
25	5	0,80	Forêts mixtes
26	6	2,47	Pâturages naturels
27	6	0,00	Landes
28	9	9,63	Végétation sclérophylle
29	5	10,69	Zones de transition d'arbisseaux à boisés
30	2	0,11	Plages, dunes, sable
31	2	0,14	Roches nues
32	2	5,72	Aires peu végétalisées
33	9	0,06	Aires brûlées
34	9	0,00	Glaciers et neige perpétuelle
35	4	0,42	Marécage à l'intérieur des terres
36	4	0,00	Tourbières
37	4	0,16	Prés salés
38	4	0,16	Salines
39	4	0,01	Zones intertidales
40	4	0,13	Cours d'eau
41	4	0,42	Plan d'eau
42	4	0,00	Lagons côtiers
43	4	0,07	Estuaires
44	44	0,00	Mers et océans

Tableau 2 - Importance des neuf classes dérivées d'utilisation du sol en Andalousie

Nouveau Code	Utilisation du sol	Importance (%)
1	Zones urbaines	1,13
2	Mines, rocs et aires ouvertes	6,24
3	Cultures permanentes	15,85
4	Plans d'eau et zones humides	1,37
5	Forêts	32,21
6	Prés et pâturages	2,47
7	Cultures non-irriguées	26,89
8	Cultures irriguées	4,20
9	Végétation sclérophylle et autres	9,63

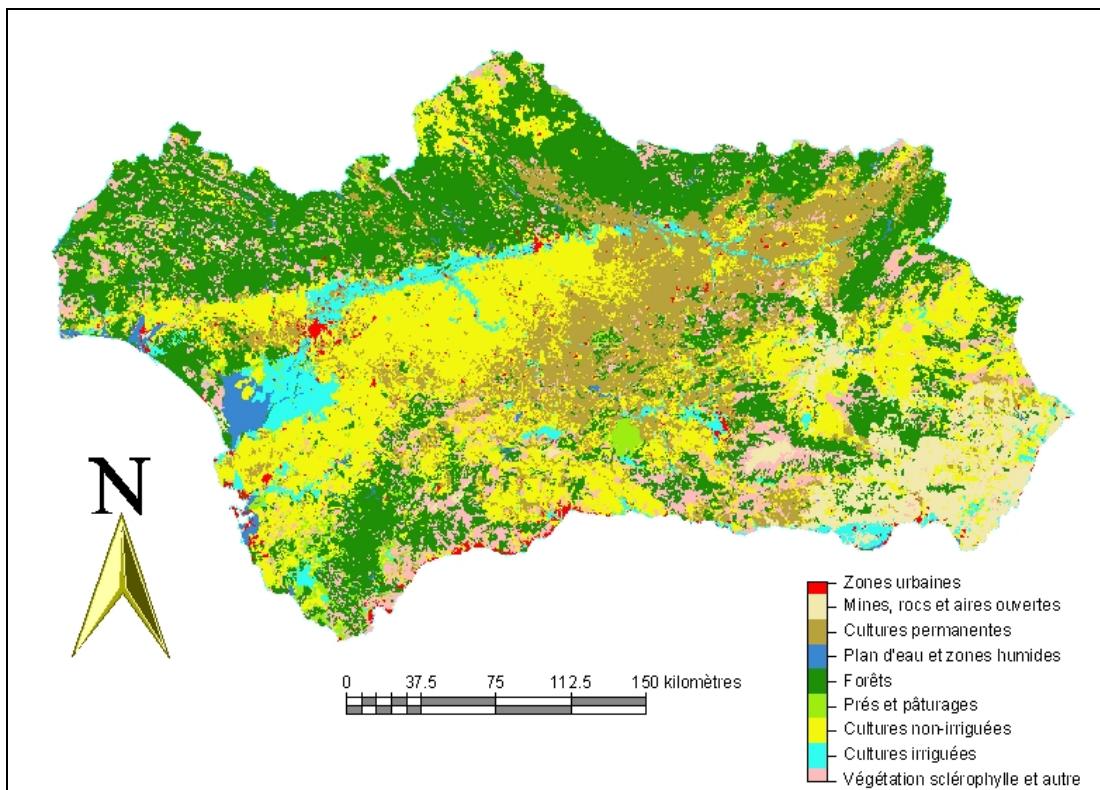


Figure 2 - Re-classification de CORINE 1990 en 9 classes en Andalousie

Tableau 3 - Importance des neuf classes dérivées d'utilisation du sol autour des stations (fenêtres de 3,3 x 3,3 km)

Stations	Nouvelle classification en 8 classes (voir tableau 2 pour nomenclature)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4258	0,00	0,00	0,00	0,00	5,24	0,00	94,76	0,00	0,00
4515	2,55	0,00	3,06	0,00	51,53	0,00	42,86	0,00	0,00
4524	2,55	0,00	54,59	0,00	29,59	0,00	6,63	0,00	6,63
5402	3,57	0,00	0,00	3,06	0,00	0,00	62,24	31,12	0,00
6201	1,14	0,00	5,14	0,00	0,00	0,00	62,86	28,00	2,86
6249	13,74	2,84	0,00	0,00	5,21	4,74	14,22	37,44	21,80
6258	1,53	0,00	13,78	0,00	0,00	0,00	54,59	0,51	29,59
6308	0,51	12,76	4,59	0,00	50,00	0,00	1,53	0,00	30,61
6327	0,00	52,31	0,00	0,00	0,00	0,00	29,74	17,95	0,00
8391	6,63	0,00	15,82	0,00	0,00	0,00	46,94	30,61	0,00
60972	3,57	0,00	39,80	0,00	38,78	2,04	7,65	0,00	8,16

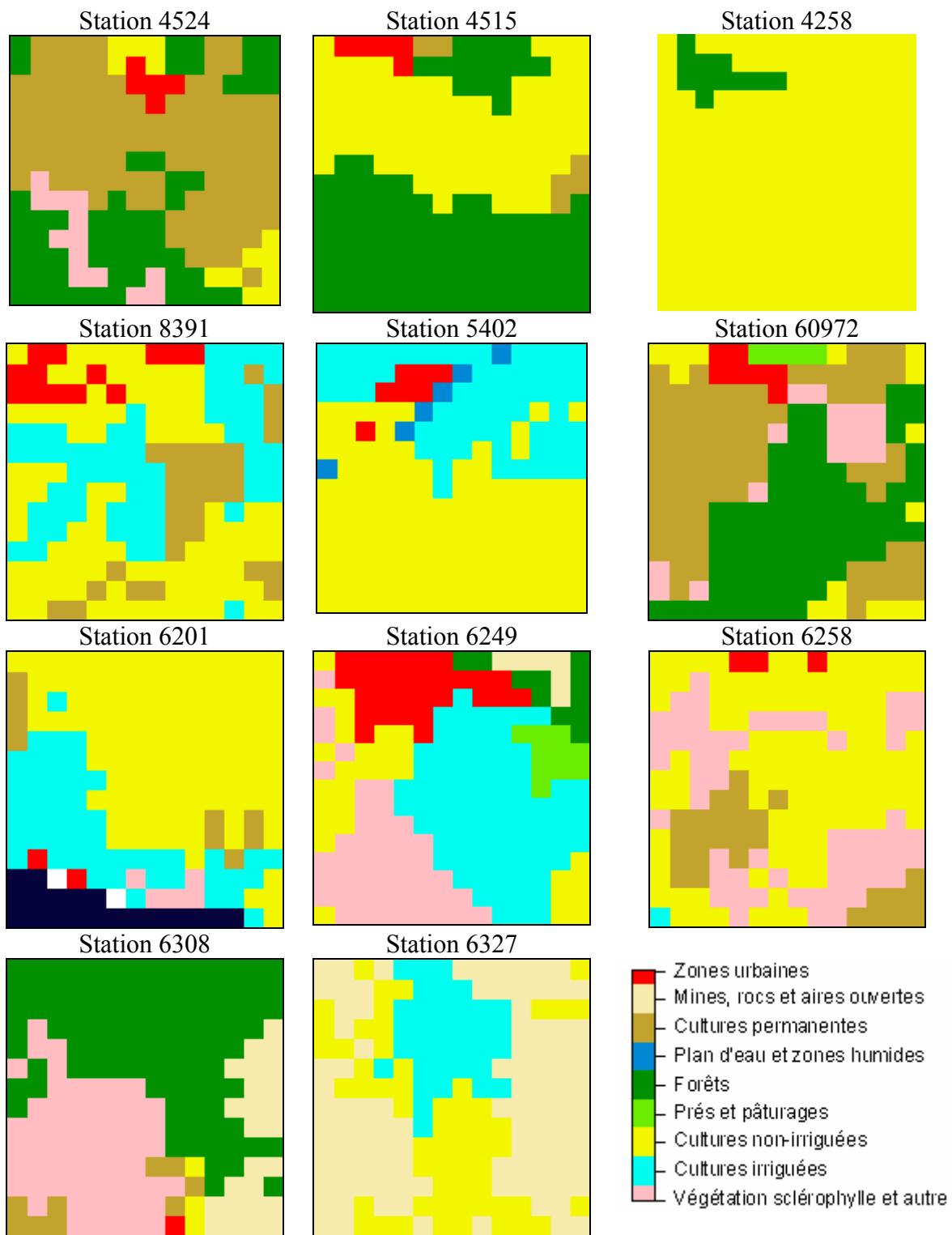
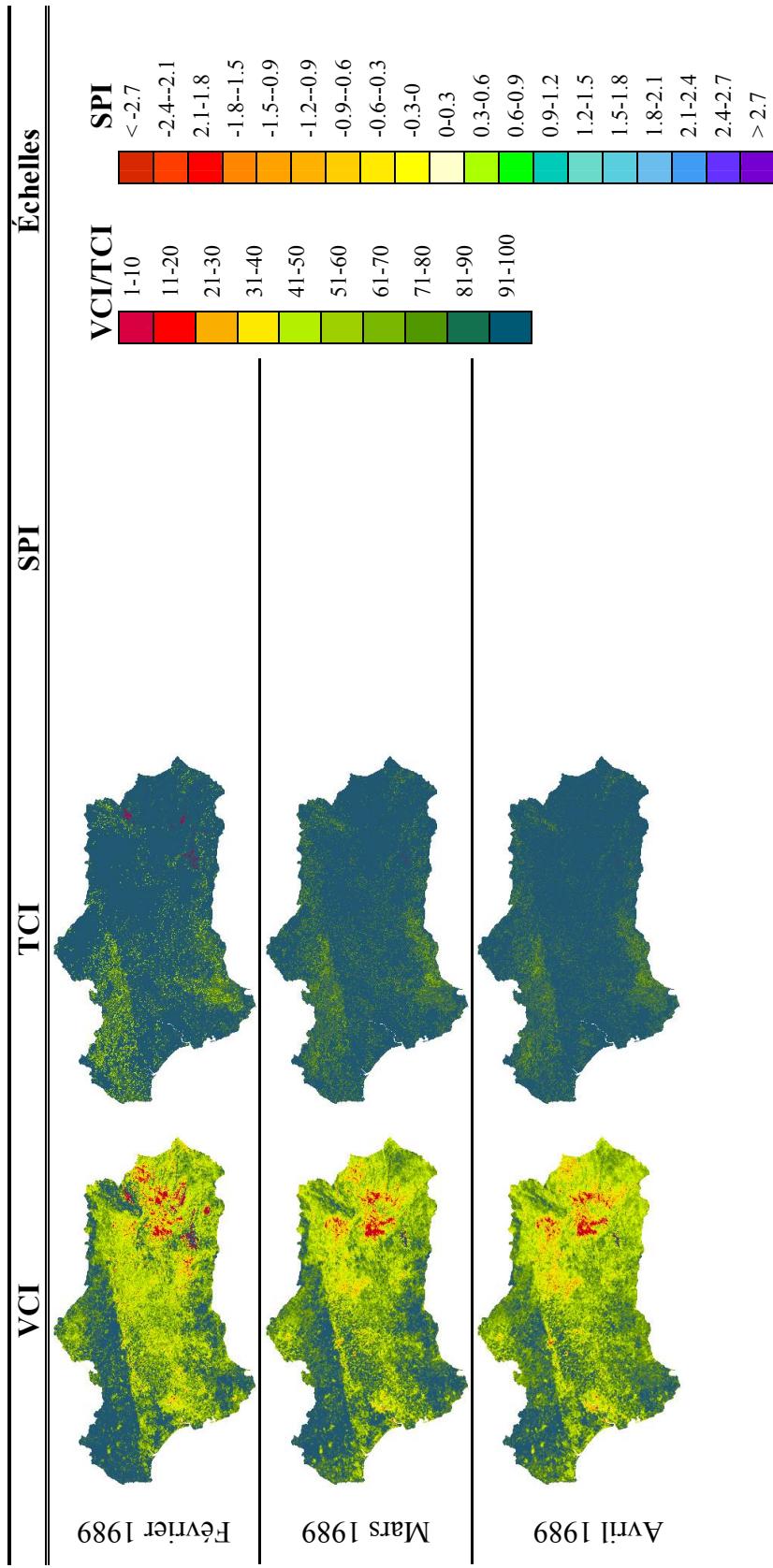
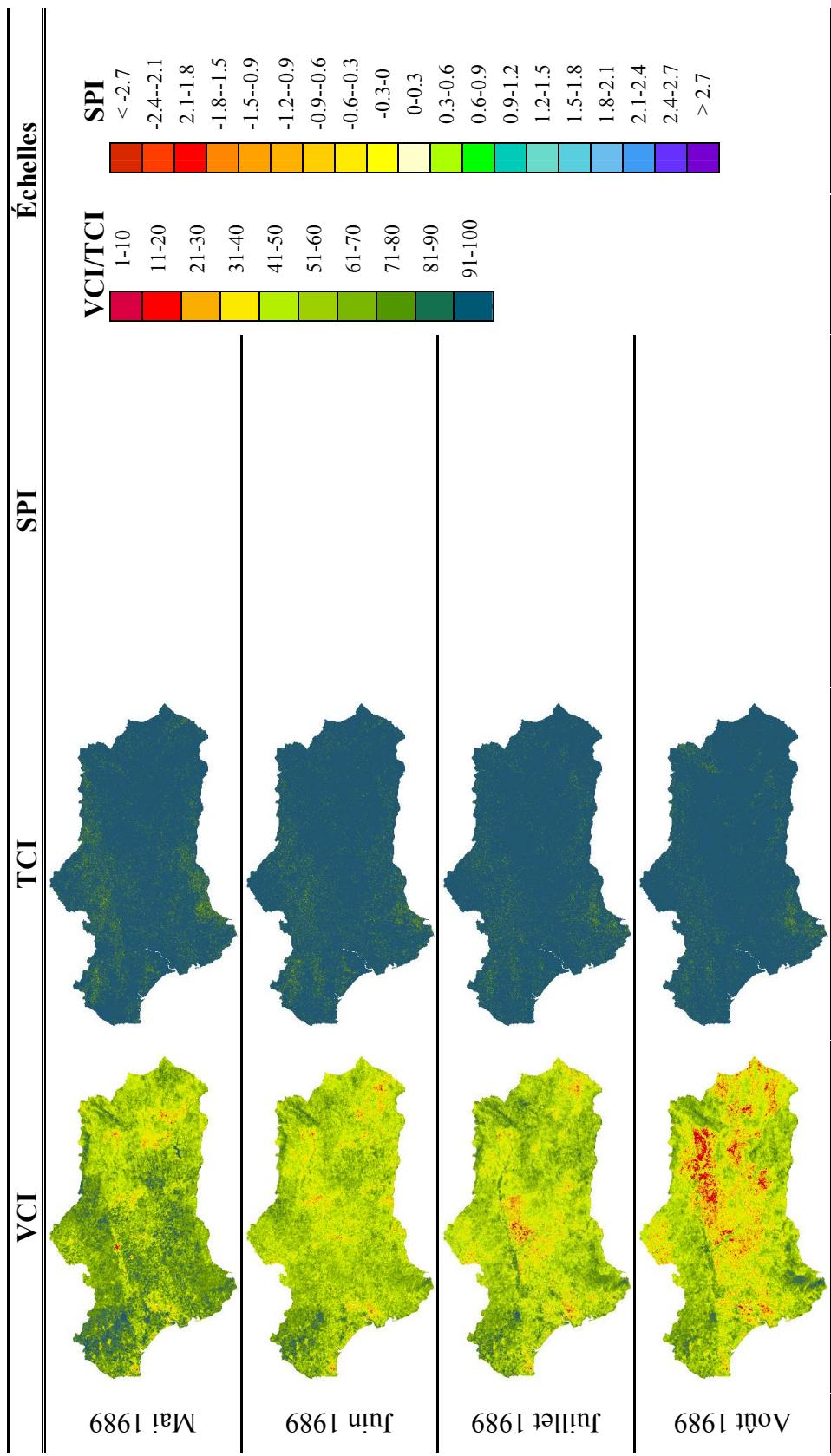


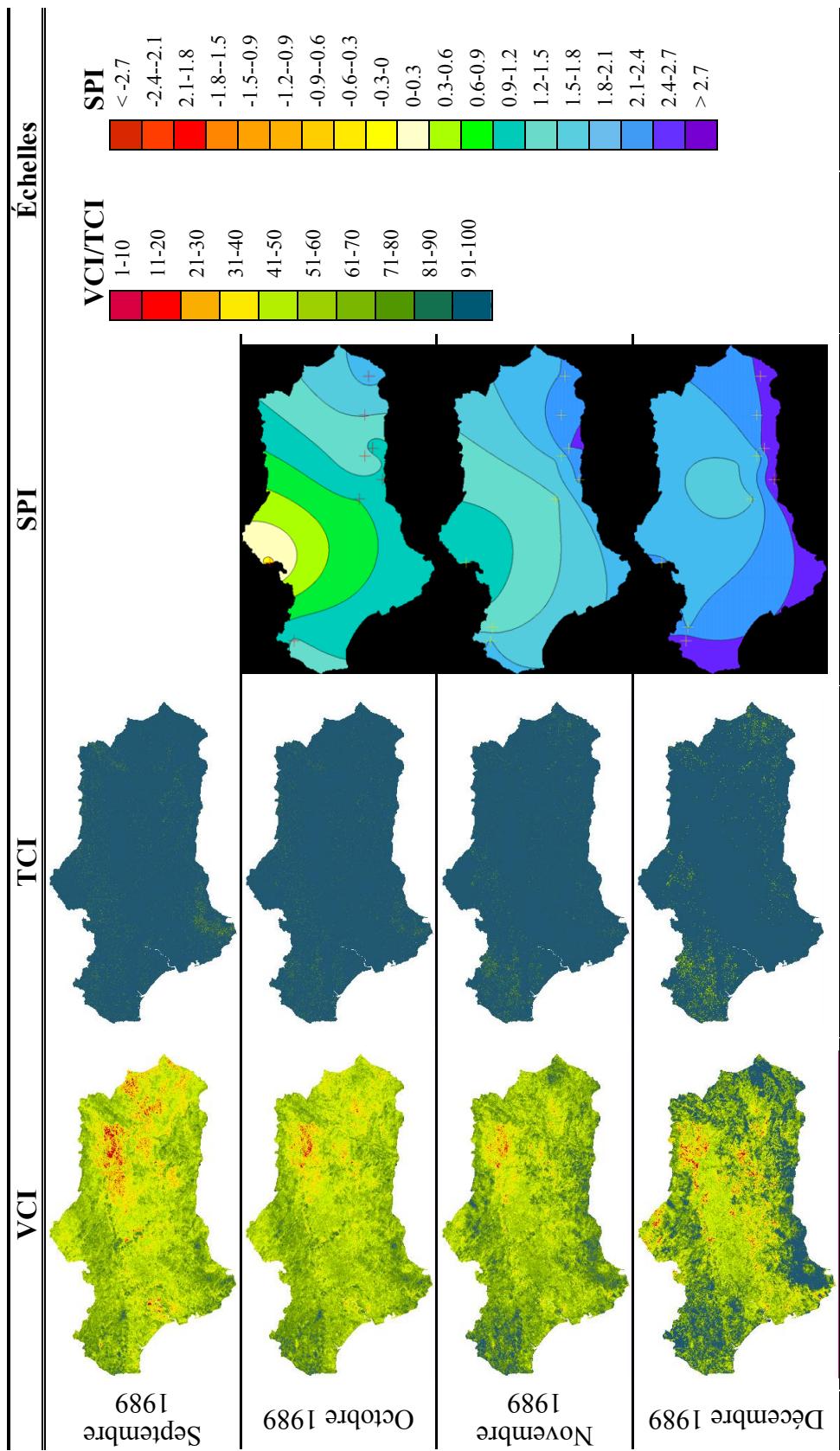
Figure 3 - Utilisation du sol de fenêtres de 3,3 x 3,3 km centrées autour des stations

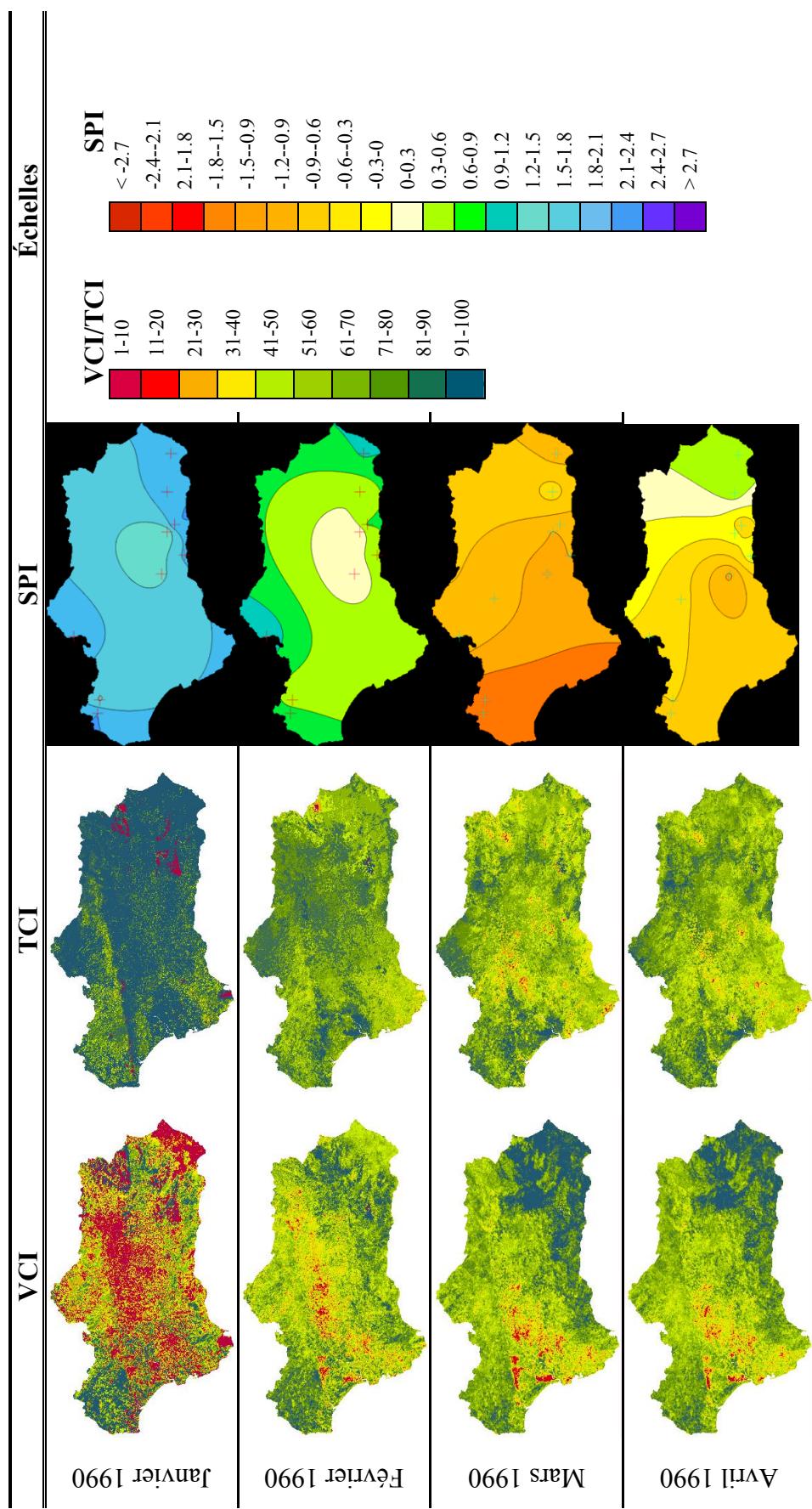
Annexe 3 – Images mensuelles VCI, TCI et SPI

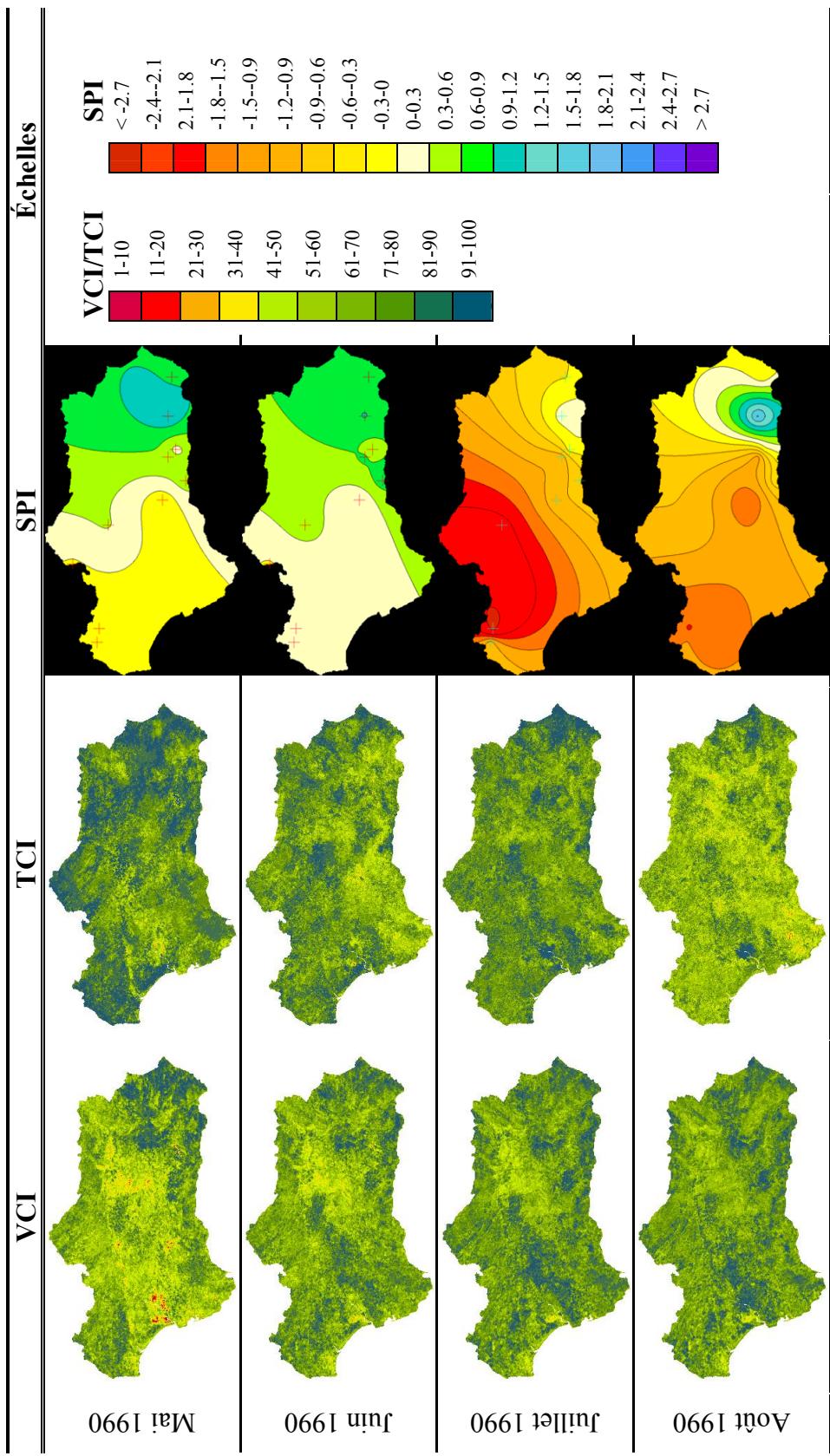


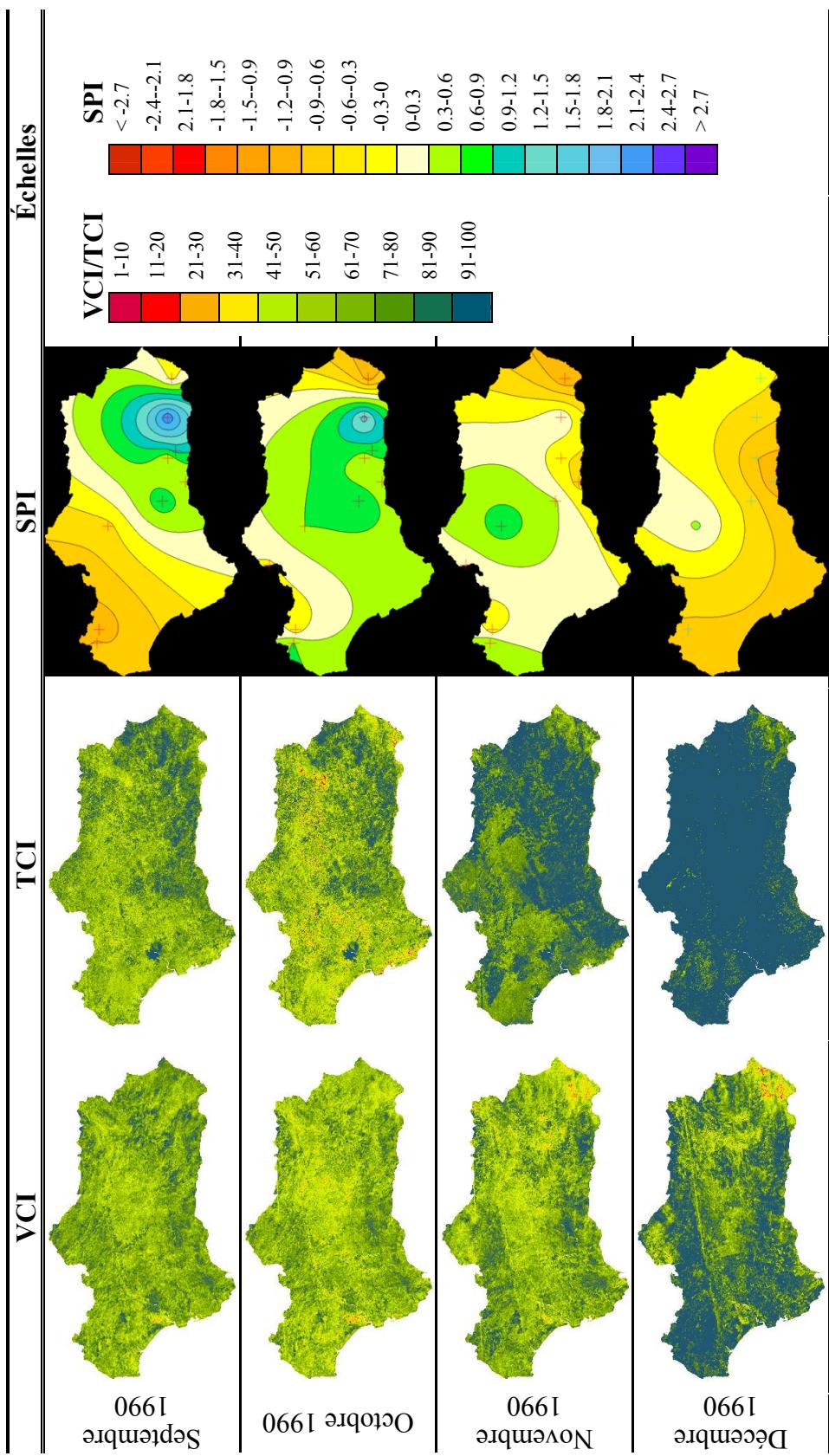
Notes: Les valeurs des indices VCI et TCI (valeurs de 0 à 1) sont dans cette annexe multipliées par 100 et présentées sur une échelle de 0 à 100.

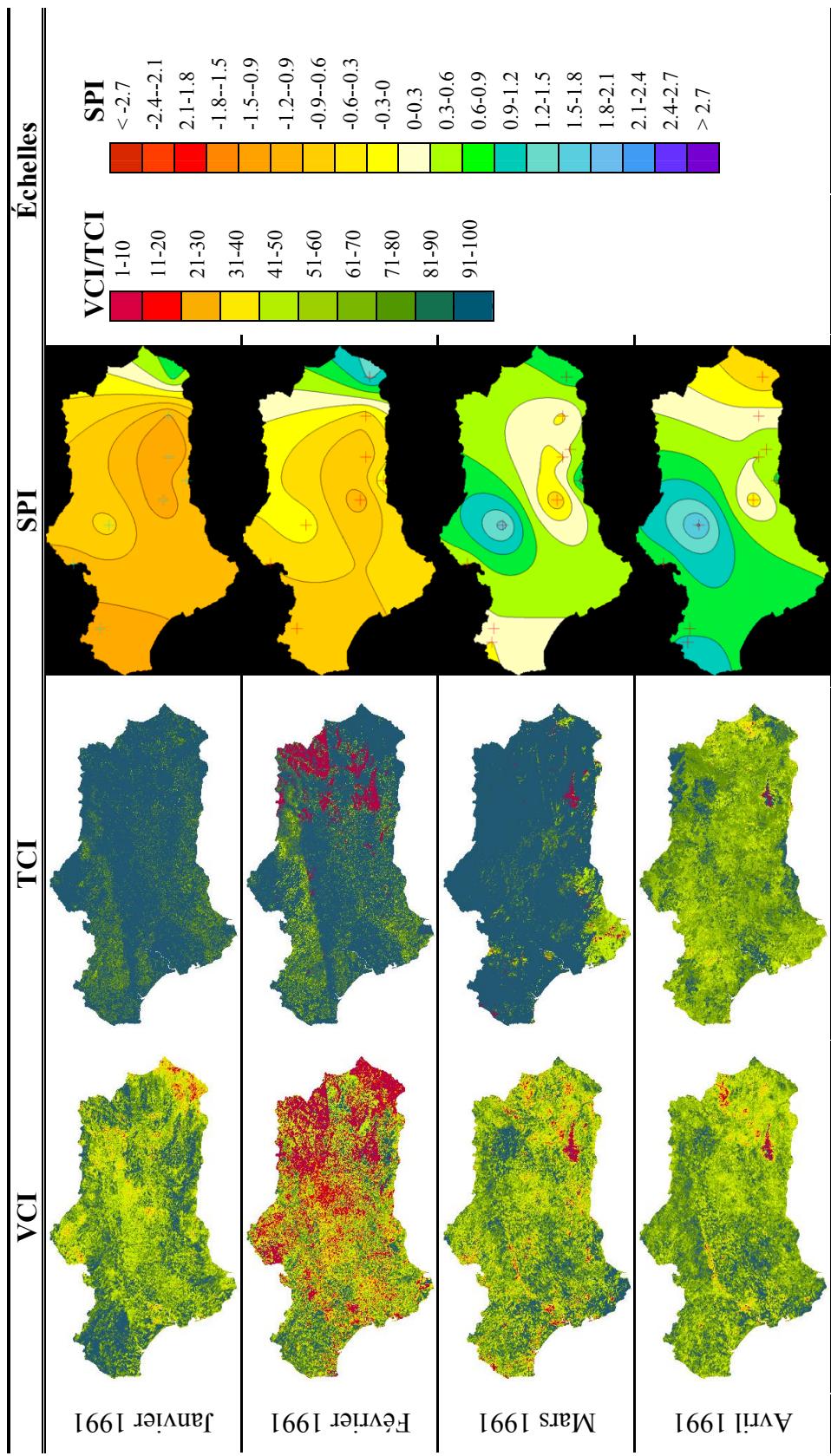


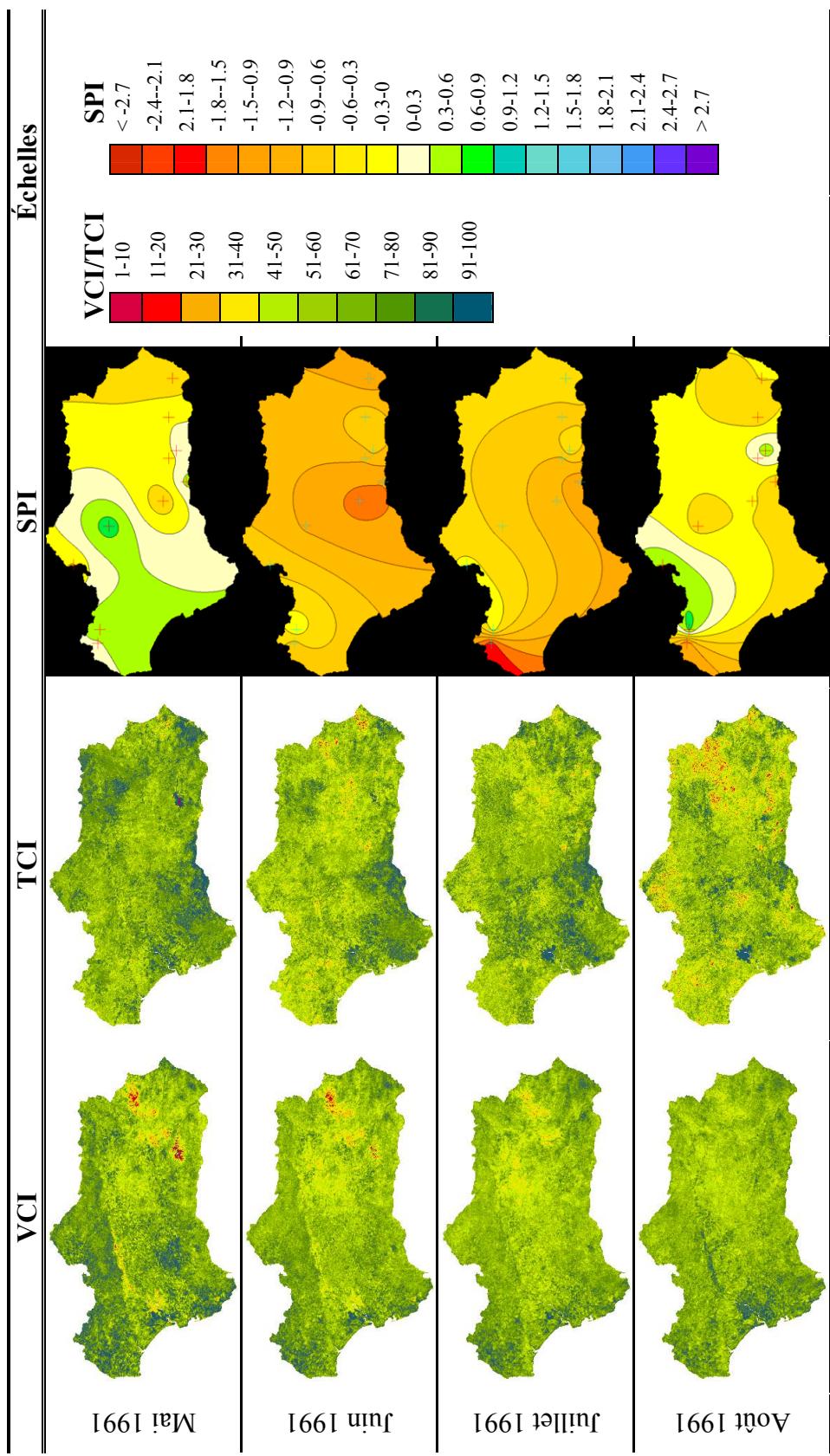


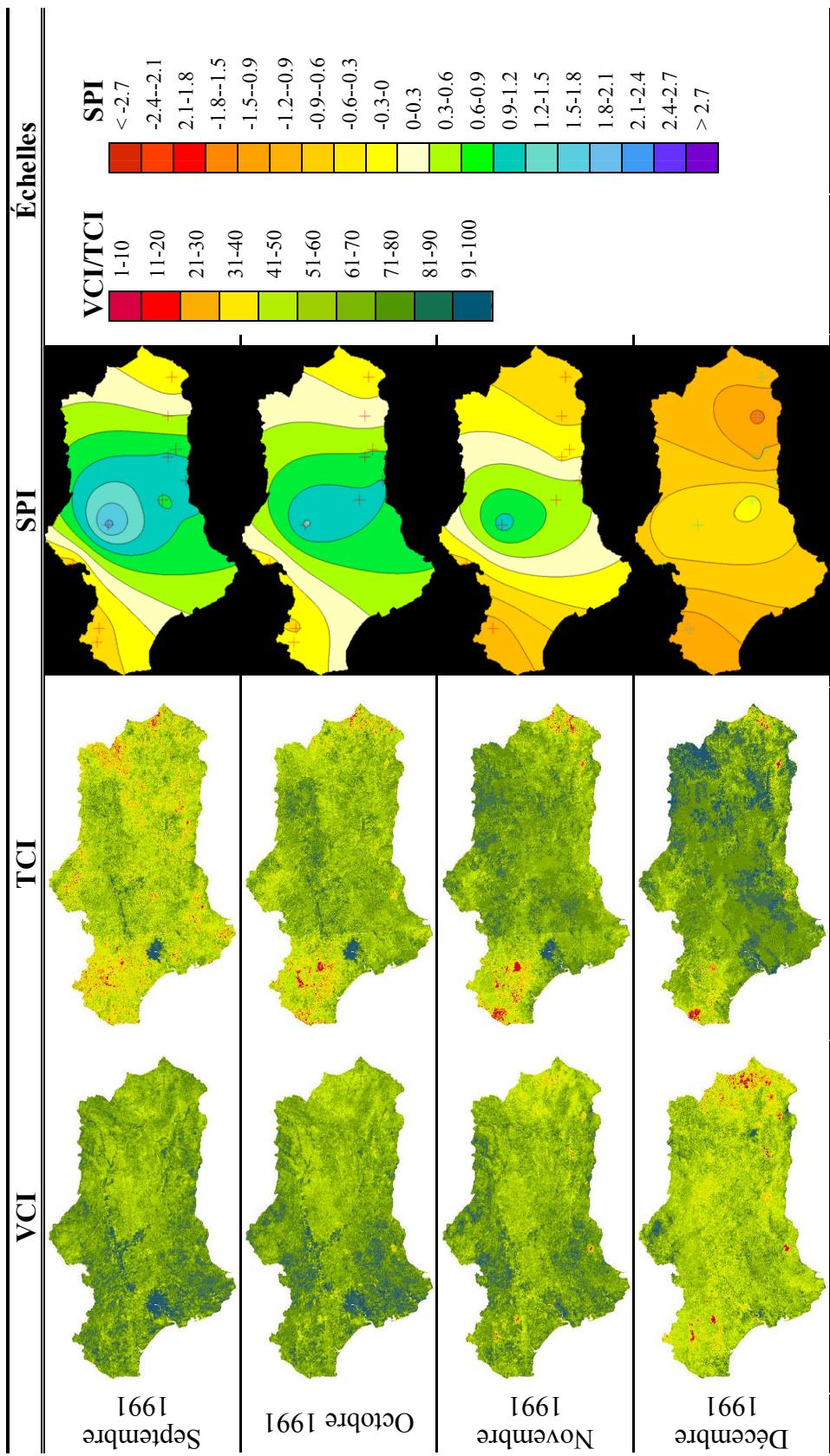


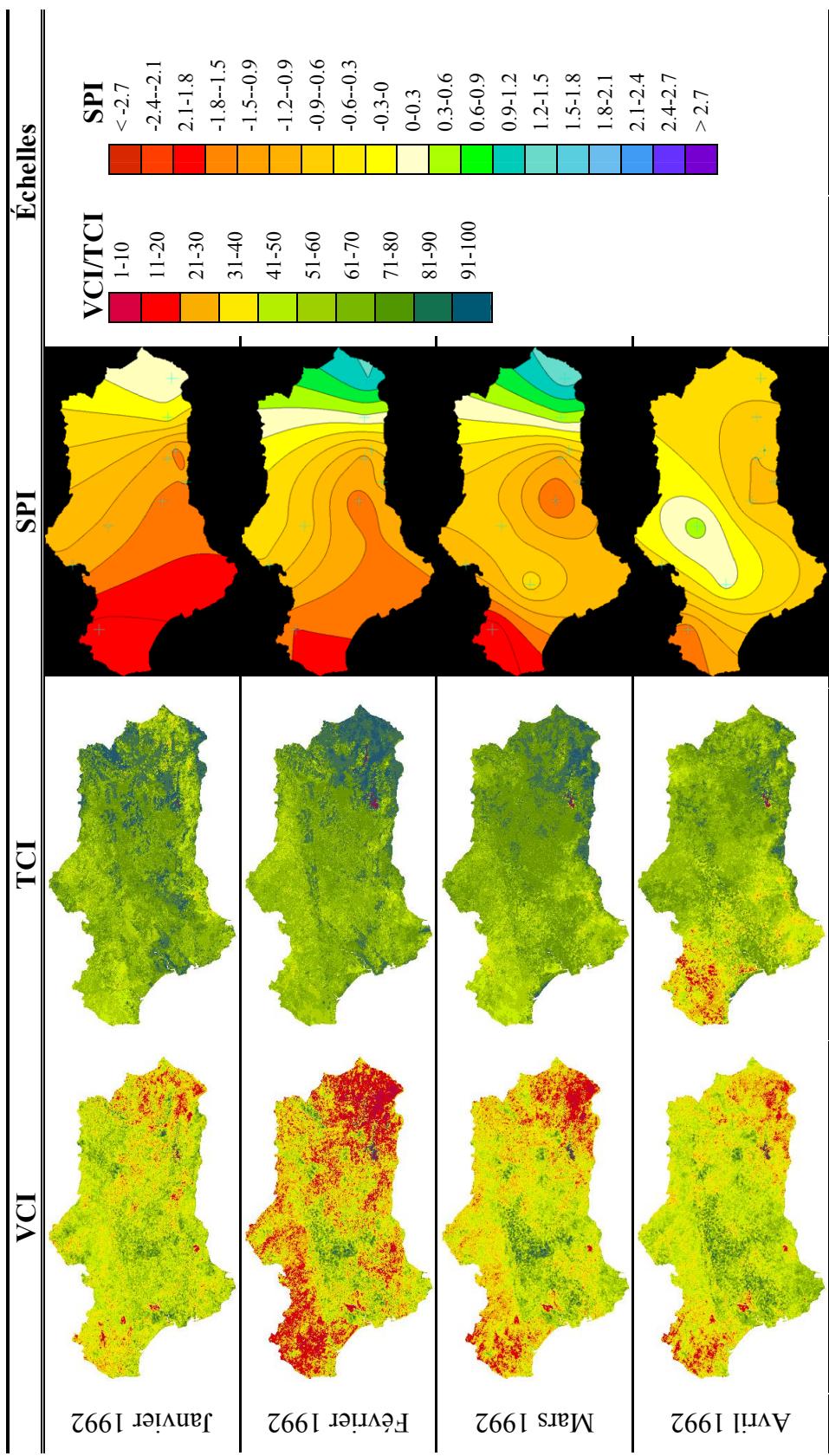


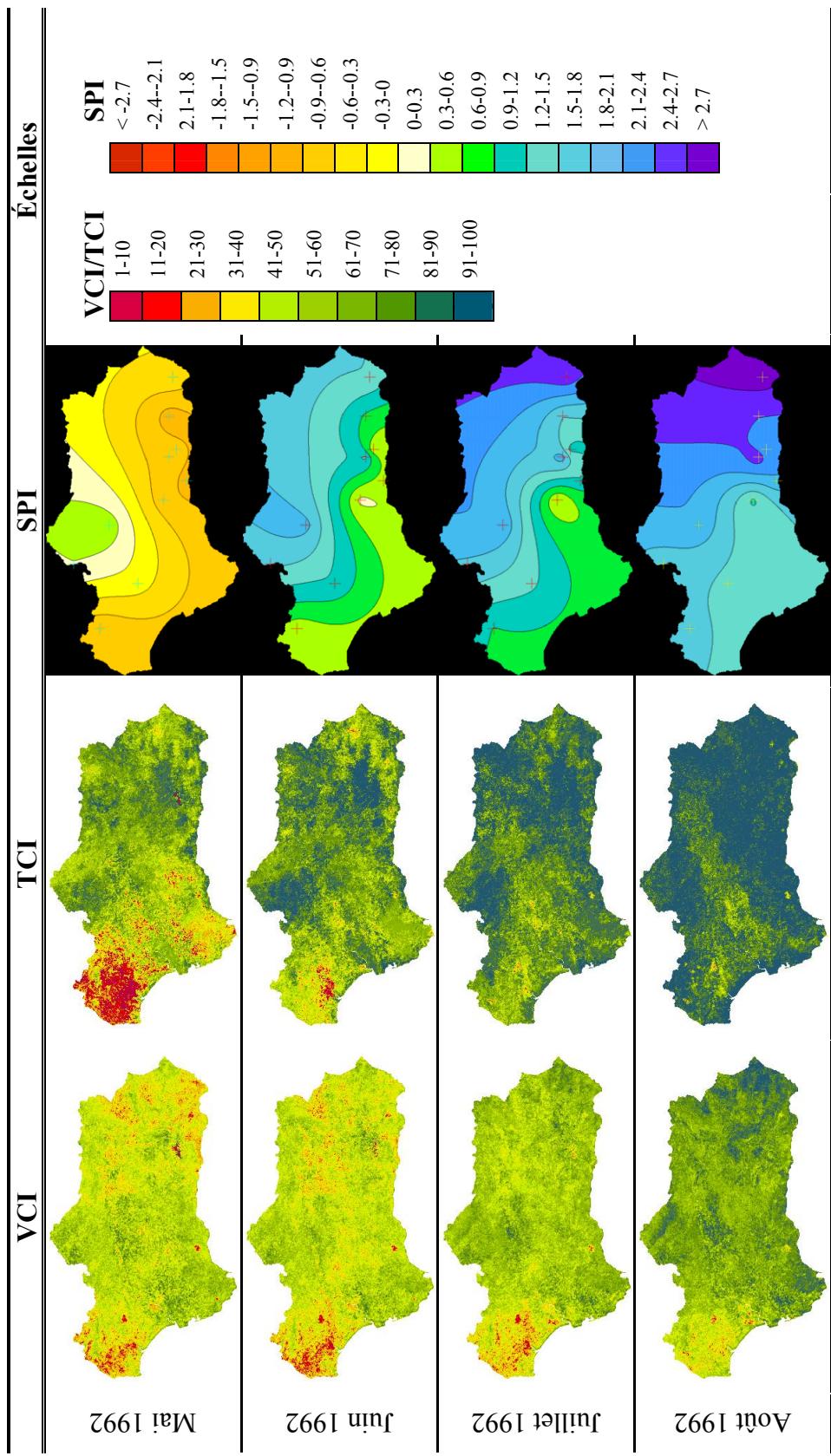


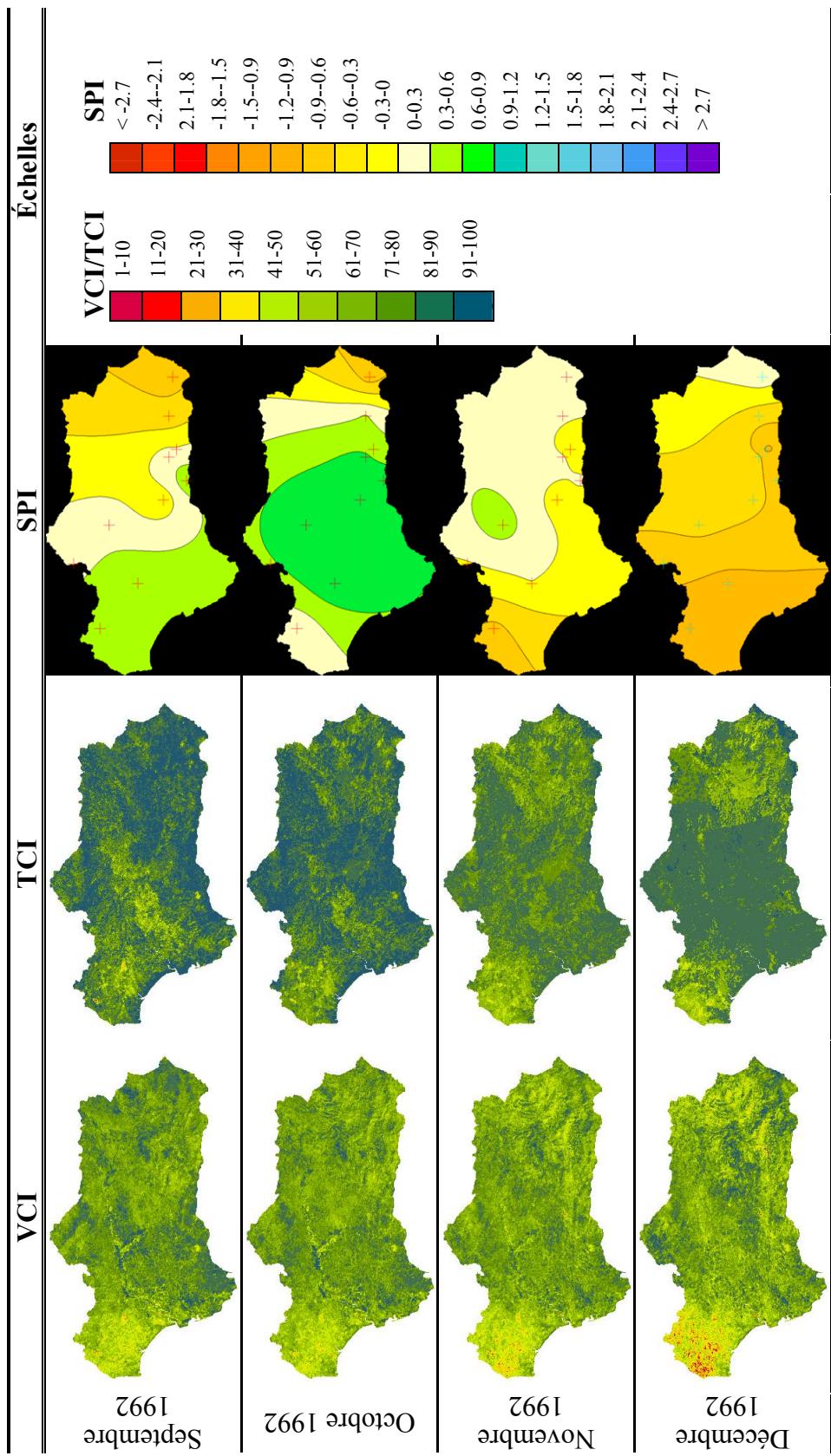


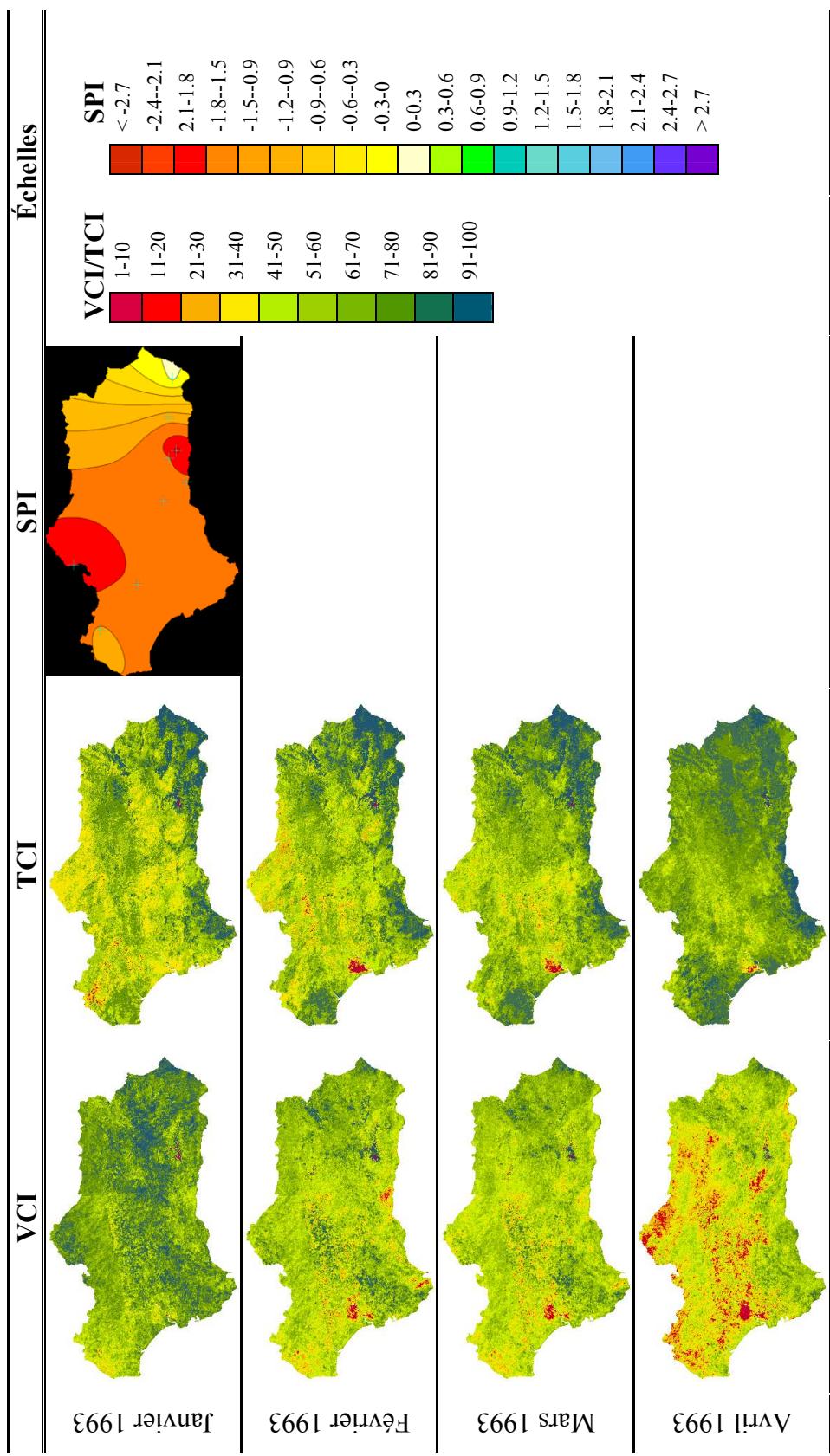


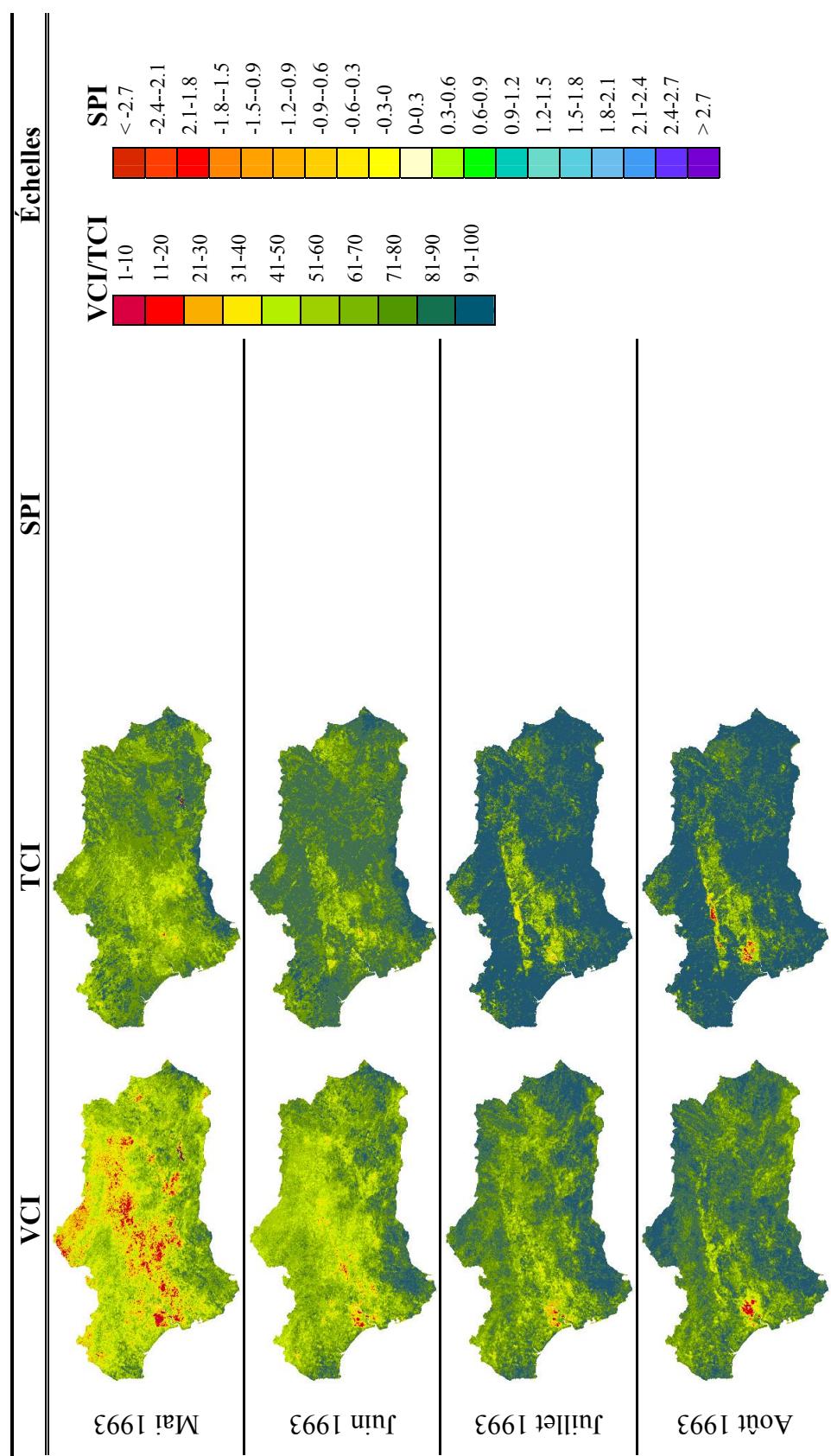


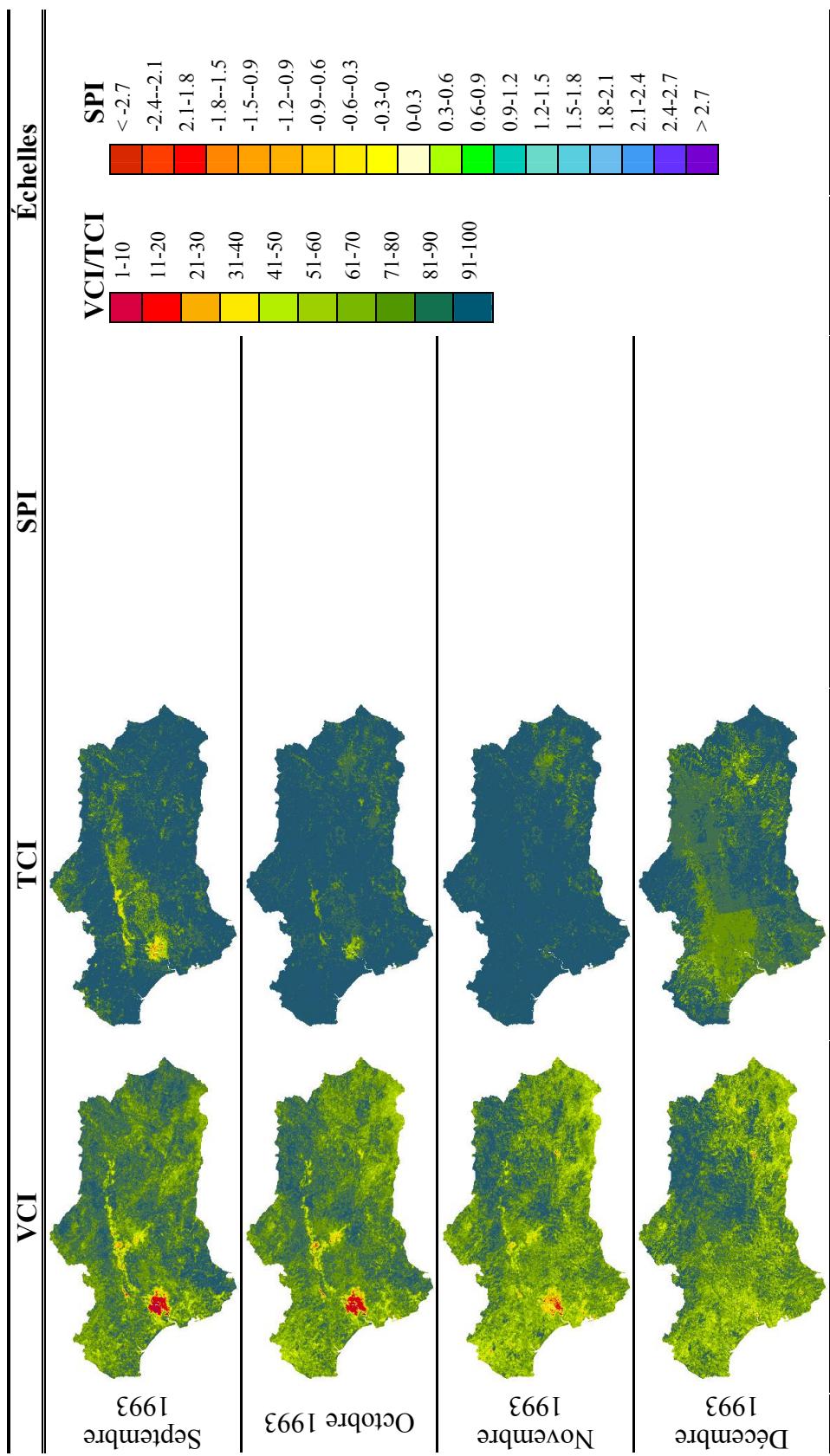


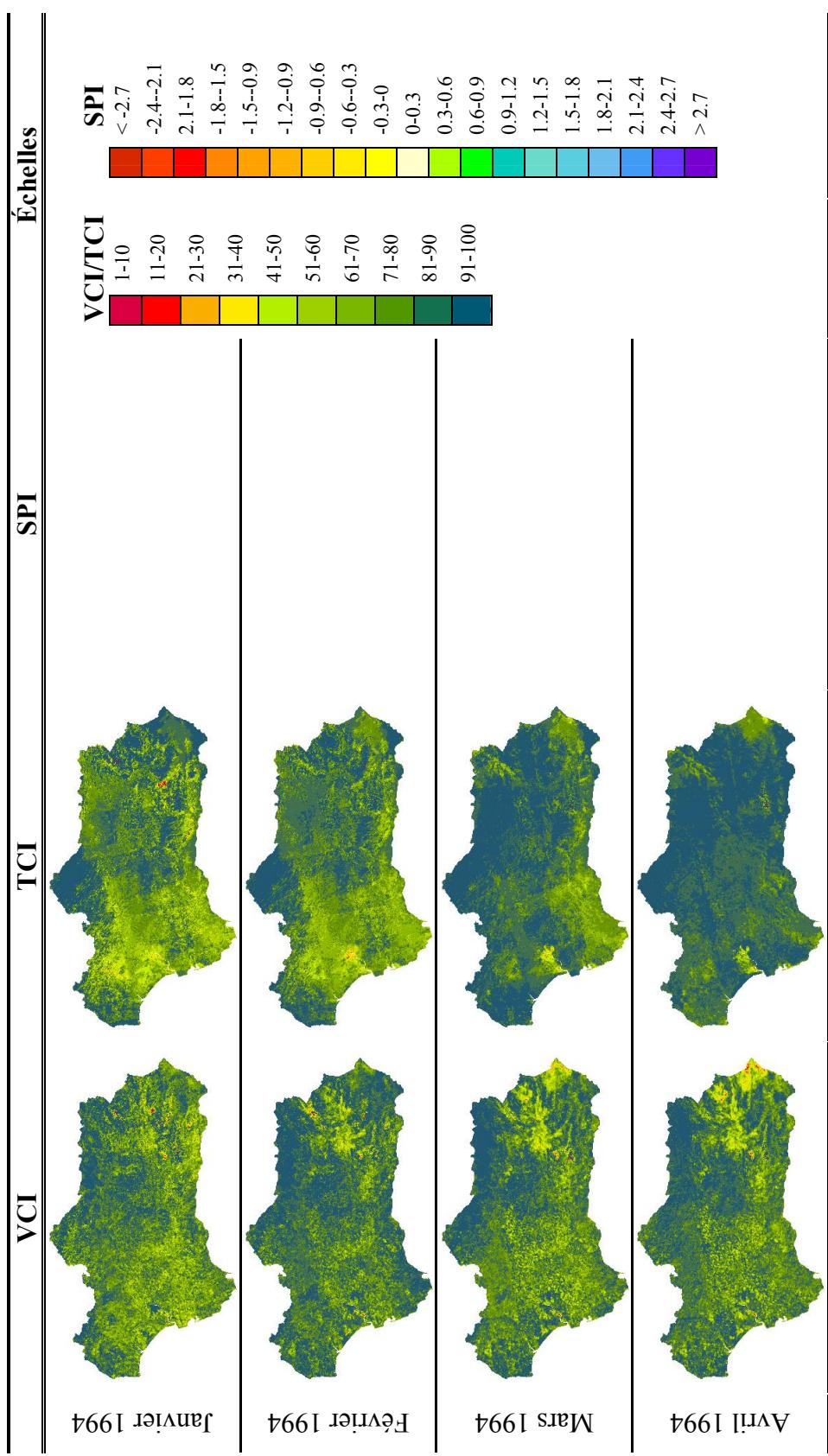


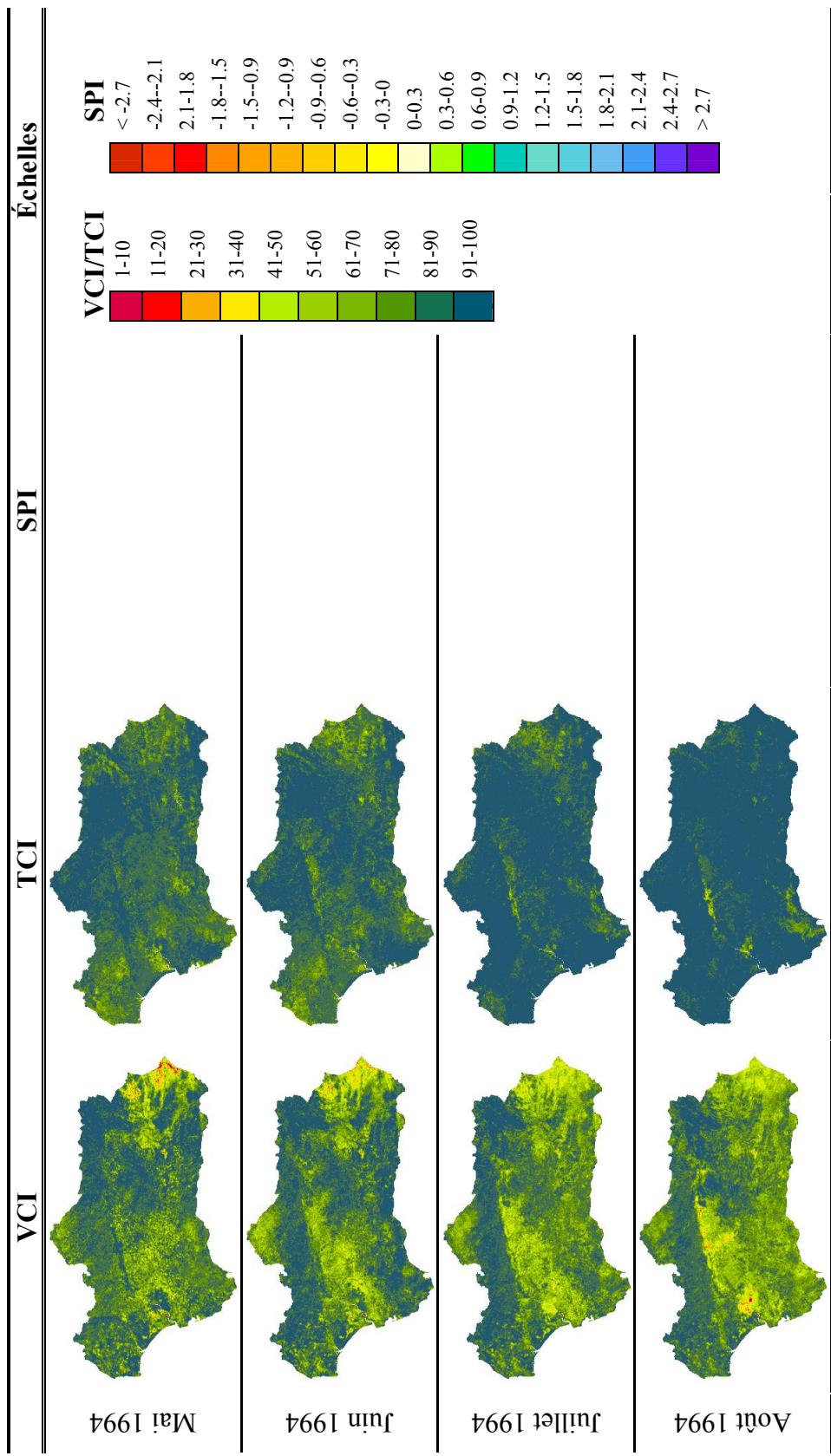


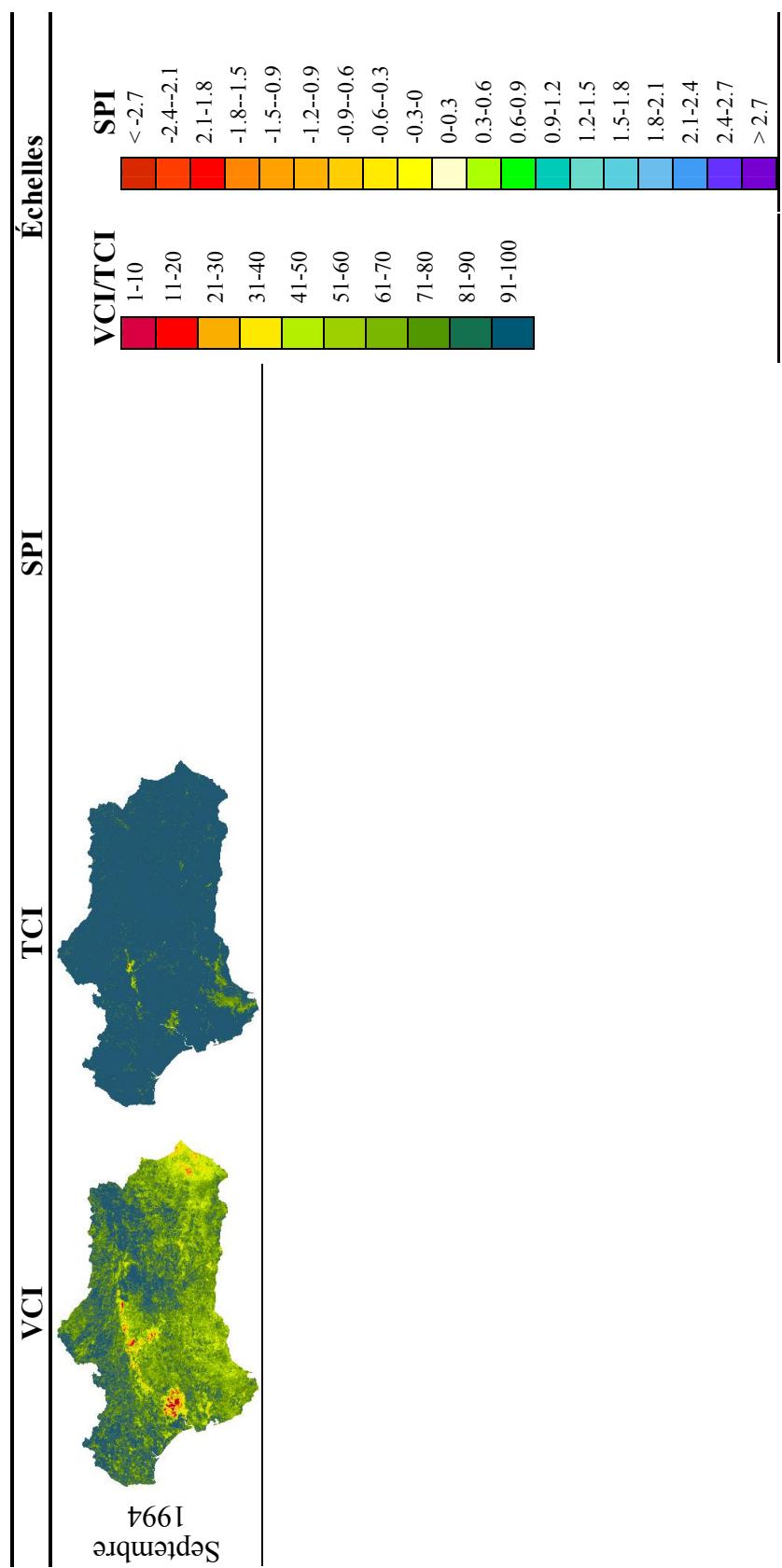












Annexe 4 – Évolution du NDVI et de TS aux 11 stations météorologiques

