

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCE DE LA SOCIÉTÉ TERRITOIRE,
ÉCONOMIE, DROIT**

LABORATOIRE CEDETE

THÈSE présentée par :
Thierry Tarek NASSER

soutenue le : **19 septembre 2019**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Géographie - Aménagement - Environnement

**Evolution et impact de la sécheresse sur une
région agricole.**

Cas de la plaine irriguée de la Beqaa

THÈSE dirigée par :

Laurent TOUCHART

Professeur des Universités, Université d'Orléans

JURY composé de :

Pierre CAMBERLIN

Professeur des Universités, Université de Bourgogne /
rapporteur

Ghaleb FAOUR

Directeur de recherches au centre de télédétection,
CNRS du Liban / rapporteur

Geneviève PIERRE

Professeure des Universités, Université d'Orléans /
examinatrice

Michael DAVIE

Professeur émérite des Universités, Université de
Tours / examinateur

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier mon directeur de thèse Laurent Touchart pour m'avoir permis de travailler sur ce sujet passionnant. Merci Laurent pour tes nombreux conseils avisés qui m'ont guidé au cours de cette thèse. Merci également d'être resté disponible et pour m'avoir donné des conseils toujours pertinents.

Je remercie vivement Ghaleb Faour et Pierre Camberlin d'avoir accepté d'être rapporteur de ma thèse. Mes remerciements vont également à Geneviève Pierre et Michael Davie qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Je tiens également à remercier le CNRS – L, en particulier Ghaleb Faour, actuel directeur de recherches, de m'avoir accueilli au centre de télédétection et pour l'accès aux données.

Je remercie Geneviève Pierre pour son soutien administratif en tant que directrice du laboratoire CEDETE. Je tiens également à remercier Christine Romero, en tant que géographe spécialiste en réalisation d'enquêtes, pour avoir apporté un point de vue différent à ce travail.

Je remercie les agriculteurs et les différents membres présents sur les exploitations notamment Antoine Farah, qui ont accepté de répondre aux enquêtes approfondies, raconté leur vécu et leur analyse...

Je tiens à remercier mes amis (Quentin, Romain, Margaux, Cathy, Alice, Hélène) de m'avoir rappelé qu'il n'y a pas que la thèse dans la vie. Merci à mes amis et mes collègues du service BIATSS (Josiane, Jacques, Marina et François) pour leur soutien et leur aide pendant ces années.

Merci à mes parents et mes beaux-parents d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir soutenu durant cette expérience.

Je remercie également celle qui partage ma vie, mon épouse Nada. Merci pour ton aide et ton soutien dans les quelques moments difficiles. Merci à mon fils, Natanaël d'être une source de motivation pour réaliser cette thèse.

A vous tous... un grand MERCI !

Sommaire

Remerciements

Liste des sigles et acronymes

Sommaire

Introduction générale.....	1
Partie 1 - La sécheresse sous tous ses aspects.....	12
Chapitre 1 : Cadre théorique de l'étude, définition et méthodes de suivi des sécheresses.	13
Chapitre 2 : La plaine de la Beqaa mise en contexte.....	37
Partie 2 - Suivi des sécheresses par télédétection : analyse spatiale et temporelle..	71
Chapitre 3 : Démarche méthodologique en télédétection et SIG : notions élémentaires, capteurs et images satellites, application pour le suivi de la sécheresse dans notre région d'étude.	72
Chapitre 4 : Mise en évidence et suivi des sécheresses observées en plaine de la Beqaa entre 2001 et 2015 : la donnée de végétation	102
Partie 3 - La sécheresse analysée sous son aspect social	134
Chapitre 5 : Un changement d'échelle pour identifier la sécheresse dans un milieu agricole : quel phénomène et quelle perception ?	135
Chapitre 6 : Vers une gestion adaptée de la ressource hydrique par le croisement entre données physiques et sociales	178
Conclusion et perspectives.....	210
Références bibliographiques.....	215
Liste des figures.....	239
Liste des tableaux.....	244
Liste des photographies.....	246
Liste des Annexes.....	247
Table des matières.....	262
Résumé.....	263

Liste des sigles et acronymes

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CEE	Communauté Économique Européenne
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CMI	Crop Moisture Index
CNRS - L	Centre National de la Recherche Scientifique du Liban
CWSI	Crop Water Stress Index
ENVISAT	ENViironmental SATellite (Bilblio)
ETM	EvapoTranspiration Maximale
ETP	EvapoTranspiration Potentielle
ETR	EvapoTranspiration Réelle
EF	Evaporative Fraction
FAO	Food and Agriculture Organization
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
GEMI	Global Environment Monitoring Index (biblio)
HRVIR	Haute résolution visible et infrarouge
IFOV	Instantaneous Field of View
JRC	Joint Research Centre
KBDI	Keetch Byram Drought Index
LWCI	Leaf Water Stress Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSAVI	Modified SAVI
MSI	Moisture Stress Index
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NDMC	North Dakota Mitigation Center
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	US National Oceanographic and Atmospheric Administration
PDI	Palmer Drought Index
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PN	Pourcentage à la normale
RU	Réserve Utile
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SAU	Surface Agricole Utile
SIG	Système d'Information Géographique
SPI	Standardized Precipitation Index
SPOT	Satellite pour l'Observation de la Terre
SWI	Soil Wetness Index
SWIR	Short Wave Infrared
SWSI	Surface Water Supply Index
Ta	Température de l'air
TCI	Temperature Condition Index
TIFF	Tagged Image File Format
Ts	Température de Surface
VCi	Vegetation Condition Index
VGt	Végétation (Capteur de SPOT)
VHI	Vegetation Health Index
VPI	Vegetation Production Index - Indice de productivité de la végétation
WDI	Water Deficit Index

Introduction générale

La sécheresse est l'un des risques naturels les moins compris (Wilhite et Glantz, 1985; Wilhite, 1994 ; Wilhite, 2000; Wilhite *et al.*, 2005). Cela est dû en partie au fait que la sécheresse se développe lentement et de manière imperceptible et peut donc rester longtemps inaperçue (Tallaksen and Van Lanen, 2004). Actuellement quatre milliards de personnes dans le monde connaissent des sécheresses sévères au moins pendant un mois de l'année (). Ces sécheresses se produisent lorsque les besoins deviennent plus grands que les ressources. Aujourd'hui, près de 500 millions de personnes font face à une rareté de l'eau tout le long de l'année (Mekonnen et Arjen Hoekstra, 2016).

Les conséquences régionales des sécheresses

Selon différentes sources, ce sont les variations climatiques, affectant le cycle hydrologique, qui augmentent la fréquence et la gravité des sécheresses dans plusieurs régions du monde (Meehl *et al.*, 2007 ; Bates *et al.*, 2008 ; Dai, 2011 ; Romm, 2011). Cependant, l'incertitude dans les prévisions de développement de la sécheresse est large (Orowsky et Seneviratne, 2013). Les différents scénarios futurs en termes climatiques et les différentes structures des modèles hydrologiques peuvent se traduire par une large diffusion des impacts régionaux (Orlowsky et Seneviratne, 2013 ; Prudhomme *et al.*, 2014). Ces impacts peuvent être directs ou indirects. Les effets directs liés à la sécheresse sont entre autres la perte de récoltes et la réduction de l'approvisionnement en eau potable (Tallaksen and Van Lanen, 2004). La baisse de niveaux d'eau perturbe la navigation fluviale, et l'augmentation de la température de l'eau qui en découle, peut être désastreuse pour les poissons (Wilhite, 2000 ; Tallaksen and Van Lanen, 2004 ; Van Vliet *et al.*, 2012). Parmi les effets indirects, on retient les vagues de chaleur et les incendies de forêt. Bien que la sécheresse ne provoque pas directement des incendies de forêt, ce sont les conditions sèches qui accélèrent les incendies. Les vagues de chaleur et la sécheresse sont liées par des rétroactions, où la baisse de l'humidité du sol joue un rôle important dans leur intensification (Seneviratne *et al.*, 2006 ; Fischer *et al.*, 2007). Dans le cadre de la variation climatique et de l'épuisement des ressources naturelles, l'eau se raréfie de plus en plus, notamment dans les régions où la planification d'une gestion des risques est moins présente, entraînant des périodes de pénuries aiguës. Ainsi, ces pénuries

sont aggravées par d'autres facteurs liés à l'augmentation de l'urbanisation massive et de la demande de produits alimentaires. Cela exige un accroissement en infrastructures hydrauliques pour satisfaire les besoins en alimentation et en énergie pour la production des biens et de services. Il ne faut pas négliger aussi l'agriculture irriguée qui augmente les extractions d'eau et qui entraîne une baisse importante du niveau des nappes phréatiques. Les progrès agricoles accompagnés d'une grande utilisation de pesticides peuvent avoir de graves conséquences sur les ressources d'eau. Les fleuves deviennent pollués et riches en nutriments, ce qui entraîne une formation d'algues. Cette dégradation des écosystèmes met en danger de nombreuses communautés qui dépendent de ces ressources naturelles. Cette pollution biologique et chimique entraîne une limitation des ressources en eau.

Les impacts de la sécheresse sont nombreux et peuvent touchés plusieurs secteurs importants: économiques, sociaux et environnementaux. Parfois, les conséquences et les coûts sont difficiles à estimer en raison de sa présence régionale étendue affectant de nombreux secteurs différents, qui ne peuvent pas tous être considérés en termes économiques (Markandya et al., 2009). Souvent, les données publiées sur les impacts de la sécheresse concernent un secteur, une région et une année (EurAqua, 2004). Les données en Europe de 2000 à 2006 ont montré que 15% de la superficie totale et 17% de la population en UE ont souffert des impacts de la sécheresse (Commission européenne, 2008). Son coût total durant ces 30 dernières années a dépassé les 100 milliards d'euros (Commission européenne, 2007). En 2004-2005, un épisode de sécheresse sur la péninsule ibérique a entraîné une forte diminution de la production céréalière ainsi que la production hydroélectrique en raison du faible débit des cours d'eau (European Environment Agency, 2010). Les Etats Unis ont connu la pire sécheresse en 2012 avec une perte agricole estimée à 18 milliards de dollars. En Australie, les sécheresses sont également un risque régulier où les impacts sur l'agriculture peuvent être catastrophiques (Peake *et al.*, 1979 ; Chapman et al., 1993). Un autre exemple est le fleuve du Sénégal. En effet, la sécheresse a entraîné une chute du débit annuel du fleuve qui n'atteint dans les années 2000 qu'un quart de son niveau des années 50 (GWP, 2000). Selon la même source, les communautés du bassin du Sénégal ne disposent que d'un cinquième des ressources en eau.

En région méditerranéenne, les périodes déficitaires en précipitation ont des conséquences sévères sur les ressources en eau (Margat et Vallée, 1999). La situation est encore plus critique lorsque ce déficit a lieu en hiver, période de recharge de la réserve hydrique (RH) dans les nappes phréatiques. Celui-ci aggrave la sécheresse estivale habituelle et peut entraîner une sécheresse précoce en printemps, période de la saison agricole.

Ces conséquences régionales importantes, affectant la population, expliquent l'intérêt de suivi de sécheresse. Ainsi, les aléas climatiques annoncés par des différents scientifiques du GIEC depuis 1990, fait état d'une augmentation des températures à l'échelle globale et d'une variation des régimes pluviométriques. Cela pourrait empirer la situation dans les régions déjà sensibles au risque de sécheresse et exposer d'autres peu atteintes par ce phénomène à l'heure actuelle. L'importance de l'eau pour la vie, l'économie, l'environnement fait donc de la sécheresse un phénomène climatique important à prendre en considération dans de nombreuses régions.

La sécheresse au Liban et sa problématique

Comme le reste de la région méditerranéenne et une grande partie du monde, le Liban est confronté à un risque accru de sécheresse. Selon plusieurs sources, le pays a connu une augmentation de température moyenne annuelle de 0,3°C par décennie depuis 1970 (Traboulsi, 2010 ; Shaban *et al.*, 2015). Selon le GIEC, on peut facilement discerner ces tendances au réchauffement à long terme et ces variations à court terme. Ainsi, une diminution des précipitations de 40% a été observée cette dernière décennie (Shaban *et al.*, 2004 ; Iglesias *et al.*, 2007 ; Traboulsi, 2010 ; Faour *et al.*, 2015). Par exemple, la quantité de pluie enregistrée en hiver de 2014 est de 431 mm environ, alors que le taux moyen est de 905 mm.

La sécheresse au Liban a amené davantage de personnes à réaliser le danger de ce phénomène. Au cours des décennies précédentes, la conscience et le peuple libanais ont été dominés par la guerre et les conflits politiques. En conséquence, les sécheresses semblaient relativement peu importantes.

Cependant, La sécheresse récente, *sur les dix dernières années*, a attiré l'attention sur ses conséquences sociales, économiques et environnementales.

Le retentissement de la sécheresse sur l'utilisation des eaux souterraines est considérable. La plupart des cultures au Liban nécessitent une irrigation supplémentaire. Cela entraîne une augmentation sur la demande en irrigation, qui est presque entièrement assurée par les eaux souterraines. Derrière la sécheresse se cache souvent les variations climatiques, caractérisées par la hausse des températures et la baisse des précipitations. On n'est plus dans l'optique d'un phénomène subi, mais dans un contexte où la sécheresse, élément physique, devient un élément qui fragilise l'agriculture. Comment l'intensité de la sécheresse varie d'une année à

une autre ? Y a-t-il une période plus sèche et moins sèche ? Comment se comporte la végétation durant une saison sèche ? Y a-t-il une différence du stress hydrique entre les différents types de cultures ? Il est donc essentiel d'étudier l'évolution de l'intensité des sécheresses dans un milieu dominé par l'activité agricole.

Les sécheresses ont des impacts disproportionnés sur les communautés les plus pauvres du Liban, où l'activité agricole est considérée comme le moyen principal de subsistance. Cela est particulièrement vrai dans les gouvernorats les plus pauvres comme la région de Beqaa, où l'agriculture est l'une des principales sources de revenu et d'emploi. Ces agriculteurs ont-ils la capacité de gestion des risques de sécheresse ? Que représente la sécheresse dans une région agricole semi-aride ? Est-ce qu'elle est d'origine physique ou le résultat d'un problème de gestion d'une ressource déjà limitée à partager entre les agriculteurs de la région ? Il faut donc s'intéresser d'une part aux pratiques agricoles utilisées par les agriculteurs et d'autre part aux apports pluviométriques.

La sécheresse peut entraîner des conflits ou un comportement illégal. La saison agricole dans les vastes zones débute en printemps du mars à mai, dépendante des ressources hydriques rechargées en hiver pour assurer l'irrigation. Le débit de ces ressources fluctue en fonction de l'évolution de la couverture neigeuse et des précipitations. Les défaillances printanières ont souvent provoqué des conflits au sein des villages, car la réduction de l'approvisionnement en eau doit faire face à des demandes contradictoires. De même, dans les zones à forte densité de population, où les réseaux d'eau courante et d'eaux usées sont plus importants, les agriculteurs exploitent souvent ces conduites d'eau illégalement. Selon Ghiotti *et al* (2013), près de 60% des eaux agricoles au Liban sont gaspillées par des méthodes d'irrigation peu efficaces et des réseaux d'eau de distribution déficients. Cela peut entraîner des fuites et une chute de la pression d'eau dans les canalisations ce qui provoquerait une pénurie d'eau potable dans certaines villes et villages et pour une longue durée. Face à la sécheresse et à la pénurie d'eau, quelles mesures pour ajuster la demande agricole à l'offre de ressource en eau ?

La gestion à long terme des risques de sécheresse est totalement absente dans le pays. Traditionnellement, une stratégie ponctuelle à des mesures de secours d'urgence est appliquée à court terme pour gérer les sécheresses. Le Liban n'a pas réussi à gérer les risques de sécheresse pour plusieurs raisons :

- Au Liban, la gestion de la sécheresse n'est pas centralisée, alors qu'elle est gérée par des institutions individuelles à travers leurs propres cadres. Il n'y a pas de stratégie nationale directrice pour la gestion de la sécheresse et les efforts ne sont pas coordonnés. À un niveau plus large, le dysfonctionnement du gouvernement et la paralysie politique éternelle du pays rendent difficiles à mettre des stratégies de développement local pour atténuer les risques de sécheresse (Blanc, 2006 ; Ghiotti *et al.*, 2013).

- L'une des limites du système actuel de gestion de la sécheresse est l'absence de mécanisme de surveillance de la sécheresse. Les systèmes de surveillance agissent comme des sources d'information pour déclencher une action. Le réseau météorologique relativement avancé du Liban a été gravement perturbé et dégradé pendant la guerre civile. Ce n'est que récemment que ce réseau a commencé à être reconstruit, de sorte que les données disponibles sont limitées. Cette pénurie de données climatologiques et la nature non centralisée de la gestion des données sur les ressources en eau constituent des obstacles majeurs au suivi de la sécheresse. Les efforts déployés par le Ministère de l'énergie et de l'eau pour mettre en place un centre d'information sur l'eau, chargé de collecter les données et de les diffuser, ne se sont pas encore matérialisés.

- Les faibles services de vulgarisation constituaient un autre problème pour la surveillance des sécheresses au Liban. En effet, les services de vulgarisation gouvernementaux ne disposent pas du personnel nécessaire pour relever et diffuser les différentes données en temps réel. Ce sont les fournisseurs d'intrants agricoles qui remplissent la place de services de vulgarisation du secteur public dans les régions agricoles au Liban. Cependant, le rôle de ces fournisseurs n'est pas clair car ils font souvent la promotion des produits, quelle que soit leur efficacité (MOA et LARI, 2008).

En ce sens, il est donc important de trouver une méthode qui permet le suivi et la communication des informations spatio-temporelles sur la sécheresse pour l'ensemble du territoire libanais. Les indicateurs satellitaires peuvent offrir cette possibilité pour surmonter les limites rencontrées au Liban.

- Etant donné qu'un indice satellitaire offre une image qui représente les conditions de surfaces, il est possible d'utiliser cette information pour caractériser leur état de stress hydrique, et d'en tirer des données permettant un suivi spatio-temporel de la sécheresse.

- Comme le risque de sécheresse au Liban est plus élevé dans les régions agricoles caractérisées par une surface hétérogène, il faut un indice satellitaire polyvalent et adapté pour évaluer les conditions de la sécheresse sur différents types de cultures.

- La végétation réagit aux changements de conditions hydriques. Cette réaction se traduit par la diminution de contenu en eau de la végétation, ce qui provoque une réponse spectrale différente chez la plante. Cette réponse spectrale permet de caractériser son état de stress hydrique. Ainsi, il est possible de détecter la réponse spectrale, réfléchi par la plante, grâce à des indices de végétation satellitaires afin de suivre les situations de sécheresse.

- Il existe un lien entre la température de surface et la période sèche. En effet, en cas de sécheresse, les stomates se ferment à l'intérieur de la plante pour conserver l'humidité. Cette fermeture entraîne une augmentation de la température à l'intérieur de la plante. Cette hausse de température peut être captée grâce à des indices de température. Dans ce cas, la température de surface peut être utilisée afin de suivre l'état de stress hydrique des plantes et donc l'intensité de la sécheresse.

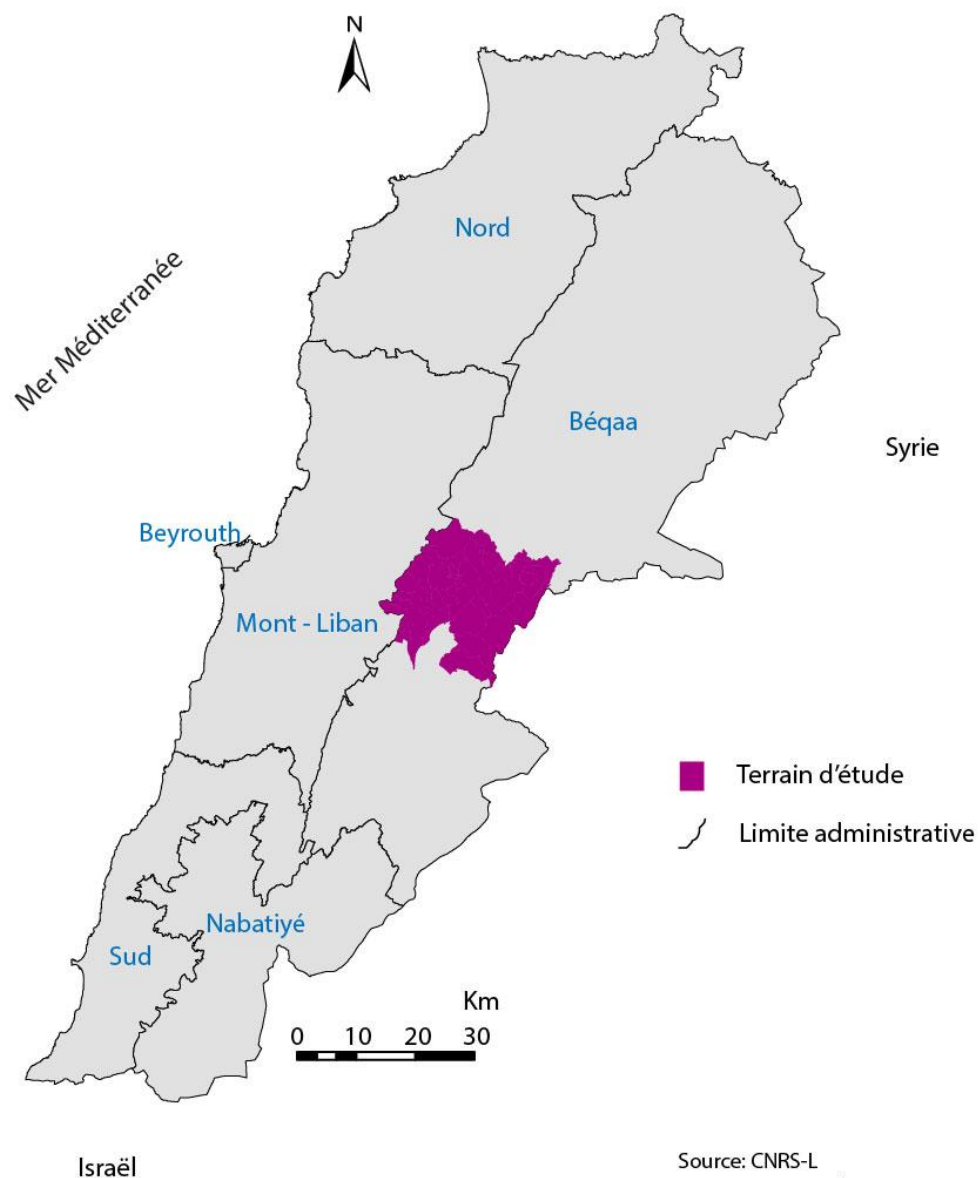
A partir de ces éléments de réflexion, le VHI¹ pourrait être l'indice satellitaire le plus adapté, car il combine deux composants : l'indice de condition de la végétation (VCI) et l'indice de condition thermique (TCI). Le premier composant caractérise les conditions d'humidité, et il est généralement basé sur des informations provenant des bandes, visible et proche-infrarouge, du spectre électromagnétique. Tandis que le deuxième composant repose sur des informations provenant de la bande infrarouge thermique. Le VHI a été largement employé pour surveiller la sécheresse agricole aux Etats-Unis (Kogan *et al.*, 2012), en Europe (Ciais *et al.*, 2005) et en Afrique (Sheffield *et al.*, 2014). En plus, ces études indiquent qu'il est possible de comparer le VHI à d'autres indicateurs de sécheresse, non - satellite, tel que le SPI. Ainsi, en cas de manque de données climatiques, le VHI pourrait être efficace pour évaluer l'intensité des sécheresses, notamment dans les régions agricoles non homogènes, comme

¹ Vegetation Health Index

celles du Liban. Pour cette raison, le VHI a été retenu afin de pouvoir mener à terme une étude de suivi et de caractérisation de la sécheresse.

Enfin il est important de délimiter une zone où l'occurrence des périodes sèches est bien décrite. Cette zone doit être amplement couverte par un jeu de données d'images satellitaires.

Terrain d'étude et cadre méthodologique



Le terrain d'étude choisi pour la présente étude est délimité dans la plaine de la Beqaa. Cette région de marge semi-aride et de sa position par rapport aux deux chaînes montagneuses, de sa grande ouverture au désert syrien et des circulations atmosphériques dominantes, connaît des hivers froids et des étés secs et non arrosés. En termes de pluviométrie, son territoire

reçoit en moyenne annuelle entre 200 et 500 mm de pluie pendant une durée très courte (novembre à février), ce qui place cette région en dessous de la moyenne libanaise. Cela laisse l'image d'une région semi-aride et sèche pendant une longue durée. Cette image qui est ancrée dans l'esprit de la population, rend la sécheresse en Beqaa si intéressante à suivre, définir et à identifier. Le modèle agricole de la Beqaa, basé fortement sur l'irrigation, faisait la part à l'utilisation massive des puits, sans s'inquiéter de l'alimentation en eau sur la période estivale. Cette surexploitation de la ressource en eau, accompagnée par une recharge insuffisante à cause du déficit pluviométrique, pourrait fragiliser le système économique de la région qui est basé essentiellement sur l'agriculture. Si l'activité agricole dans la plaine de la Beqaa reste privilégiée, elle souffre régulièrement des sécheresses répétées à cause du déficit hydrique croissant (Karam et Sarraf, 2010). Il est donc important de suivre la sécheresse dans une région agricole telle que la plaine de la Beqaa, afin d'aller vers une gestion raisonnable et efficace des ressources, axés sur la réduction des risques. La gestion des risques de sécheresse nécessite des interventions à long terme car la nature de ce phénomène est complexe et la vulnérabilité de société peut évoluer avec le temps. Cette stratégie à long terme doit être axée sur une exploitation des ressources qui répond aux besoins du présent sans les épuiser afin de servir les générations futures (Brundtland, 1987). C'est pourquoi, des solutions doivent être mises en place pour économiser l'eau en répondant aux problèmes majeurs de la région : lutter contre le gaspillage des eaux de précipitation et de l'irrigation ; réorienter l'agriculteur vers des pratiques agricoles plus économes en eau ; améliorations de la technologie agricole et le développement d'infrastructures liées à l'eau. Pour contribuer à la gestion des risques, il est nécessaire de comprendre le rôle du climat et de l'homme sur l'évolution de la sécheresse. La compréhension du rôle du climat nécessite des données physiques : climatiques ou satellitaires. Par contre, les facteurs humains demandent une connaissance approfondie du milieu étudié, la perception de la sécheresse, les impacts directs et indirects, le suivi des pratiques agricoles et les stratégies d'atténuation et d'adaptation.

La **méthodologie employée** dans cette thèse se divise en deux parties : analyse satellitaire par la technique de télédétection et analyse de terrain par des enquêtes.

La télédétection et plus précisément l'utilisation du capteur MODIS, permet d'apporter une vision régionale objective pour surveiller la sécheresse agricole, permettant de renforcer d'autres outils d'aide à la décision (Sheffield et Wood, 2011). Ce capteur météorologique permet de percevoir les variations des conditions de surface, comme la température et l'état de

la végétation. Ainsi, à partir de ces données, il est possible de dériver des indicateurs des conditions de sécheresse, adaptés aux régions agricoles, et qui sont facilement utilisables.

En plus, les données et les variables issues de la télédétection peuvent intégrer d'autres ressources d'informations pour évaluer et suivre la sécheresse dans une zone agricole. Ainsi, ces données par satellite peuvent être utilisées d'une façon conjointe avec d'autres, climatiques, dans le temps et l'espace, afin de mieux suivre l'évolution du comportement hydrique du couvert végétal à l'échelle régionale (Jackson *et al.*, 1981 ; Boote *et al.*, 1996; Moulin *et al.*, 1998; Olioso *et al.*, 1999; Guérif *et al.*, 2001; Cardot et Faivre, 2003 ; Jackson *et al.*, 2004 ; Duchemin *et al.*, 2006; Duchemin *et al.*, 2008).

L'observation sur le terrain offre une autre voie de recherche sur l'identification de la sécheresse. Cependant, ce phénomène peut être défini différemment dans un même périmètre. S'interroger sur l'origine de ce phénomène et sa définition d'un point de vue des agriculteurs peut nous aider à mieux cerner cette problématique et compléter les résultats obtenus par la méthodologie physique. Cela veut dire qu'il faudrait identifier des éléments humains et physiques et les croiser au niveau du périmètre de la région d'étude. Pour réaliser ces travaux, il nous semble essentiel de s'intéresser à la relation entre l'agriculteur et la sécheresse de fait de l'étroit lien qui existe entre les deux.

Organisation de la thèse

Cette thèse propose une analyse régionale, à l'échelle de la plaine de la Beqaa, de l'évolution de la sécheresse. Le premier objectif de ce travail est la volonté d'évaluer la sécheresse agricole. On s'intéresse particulièrement au comportement de la végétation afin d'étudier l'intensité de la sécheresse, tout en plaçant l'occupation du sol au cœur du travail. L'occupation du sol nous permet de sélectionner les zones cultivées afin d'évaluer la sécheresse agricole. Cette évaluation sera réalisée sur la base des données satellitaires et climatiques fournies par le CNRS-L et le centre de la télédétection du Liban, ainsi que des données d'occupation du sol d'après les images IKONOS. Cette thèse a un deuxième objectif. Il s'agit de définir cette sécheresse dans la région et son influence sur les ressources en eau et par conséquent sur l'agriculture. La vulnérabilité de l'activité agricole face aux sécheresses justifie l'intérêt de suivre ses impacts dans la région, ceci d'autant plus que l'agriculture occupe une part importante de l'économie de la plaine de la Beqaa. Ainsi, les connaissances

sur les impacts de la sécheresse sur les systèmes agricoles actuels peuvent servir à établir des stratégies d'adaptation.

La thèse est organisée en trois parties. La **première partie** « la sécheresse sous tout ses aspects », composée de deux chapitres, a pour objectif de présenter le contexte de la thèse. Le premier chapitre expose les différents types de sécheresse et sa propagation dans le cycle hydrologique. Il décrit principalement ses impacts régionaux et les différentes méthodes de suivi de la sécheresse et les différents indicateurs utilisés pour mesurer son intensité. Ce chapitre est également l'occasion de présenter les étapes de la planification et de la perception de la sécheresse. Le second chapitre est consacré à la description de la région d'étude. Il expose l'agriculture libanaise et les différentes régions agricoles du pays. Il décrit son climat et sa situation hydrique. Ce chapitre présente également la politique de gestion de la ressource hydrique et les différentes lois sur l'eau ainsi que les institutions impliquées dans la région.

La **seconde partie** « Suivi des sécheresses par télédétection : analyse spatiale et temporelle » se déroule en deux chapitres (3 et 4). Le chapitre 3 traite de la méthodologie technique de cette thèse. Il aborde l'observation spatiale d'un capteur satellite et le prétraitement des images acquises. Il explique le choix de la période d'étude ainsi que le capteur utilisé pour suivre la sécheresse dans la région. On retrouve dans ce chapitre une description de l'indice de sécheresse utilisé pour calculer l'intensité de la sécheresse. Il est aussi l'occasion de présenter le système d'information géographique appliqué pour traiter les images satellitaires acquises.

Le chapitre 4 se focalise sur le suivi de l'intensité de la sécheresse agricole et son évolution spatio-temporelle en se basant principalement sur les données satellitaires. Les années les plus sèches ont été repérées à partir du VHI, Vegetation Health Index, issu du capteur satellitaire MODIS. Il traite également un autre indicateur de sécheresse, celui de l'indice de précipitation standardisé, le SPI, afin d'évaluer la relation entre l'intensité de la sécheresse et la pluviométrie. Une comparaison de l'indice de précipitation avec les observations satellitaires permet d'appréhender et d'analyser les sécheresses.

La **troisième partie** « La sécheresse analysée sous son aspect social », est divisée en deux chapitres (5 et 6). Le chapitre 5 fait le point sur la méthode utilisée pour le recueil d'informations et le traitement des données. Il expose également l'échelle du terrain choisi ainsi qu'une présentation de son paysage agricole, ce qui constitue un point de départ pour l'identification de la sécheresse dans la région. Ce chapitre traite aussi de la perception du

phénomène de la sécheresse par les agriculteurs, ses impacts antécédents et les pratiques agricoles adoptées.

Après avoir appréhendé sa perception par les acteurs agricoles, nous proposons dans le chapitre 6 une gestion adaptée de la ressource hydrique. Nous croisons les données physiques et humaines pour identifier la sécheresse dans la région. Il expose aussi une comparaison entre trois parcelles agricoles caractérisées par un même climat et même culture. L'objectif de cette approche est de percevoir si l'influence de la sécheresse se diffère d'une pratique agricole à une autre. Enfin, ce chapitre permettra d'apporter une vision plus fine des impacts de la sécheresse. Enfin, nous tentons de proposer également des différentes stratégies d'adaptation afin d'atténuer le phénomène de la sécheresse dans la région.

Partie 1 - **La sécheresse sous tous ses aspects**

SOMMAIRE

Chapitre 1 – Cadre théorique de l'étude, définition et méthodes de suivi des sécheresses	11
Chapitre 2 – La plaine de la Beqaa mise en contexte	35

Chapitre 1 : Cadre théorique de l'étude, définition et méthodes de suivi des sécheresses

Même si la notion de la sécheresse n'est pas encore définie universellement (Tate et Gustard, 2000), Nous décrivons dans ce chapitre les différents types de sécheresse : météorologique, agricole, hydrologique et socio-économique et le lien qui existe entre elles ainsi que sa propagation. Cette description permet d'ouvrir des réflexions sur les indicateurs adaptés pour détecter et suivre les conditions de sécheresse et plus particulièrement dans certaines zones arides ou semi-arides, comme la région de la Méditerranée. Il existe une multitude d'outils pour caractériser les situations de sécheresse. Comme la sécheresse est un phénomène complexe et peut avoir plusieurs définitions (NDMC, 2005), les outils qui peuvent être utilisés pour son suivi sont nombreux. C'est pourquoi, ces outils, notamment adaptés pour le suivi des conditions sèches en région méditerranéenne, sont ici présentés en quatre groupes : les approches traditionnelles, satellitaires, combinées et physiques. L'annexe 1 présente une synthèse des principaux avantages et désavantages de ces indicateurs.

Ce chapitre traite aussi des impacts régionaux des sécheresses du fait de son importance dans l'économie régionale et nationale. Ensuite, il expose les causes sous-jacentes de ces impacts et pourquoi ils se sont produits.

1.1 Définition de la sécheresse

La définition générale de la sécheresse utilisée dans cette thèse est la suivante :

« La sécheresse est un événement régional important qui se produit lorsque la disponibilité de l'eau naturelle est inférieure à la moyenne ».

La sécheresse peut être considérée comme une déviation des conditions climatiques à long terme de variables telles que les précipitations, l'humidité du sol, les eaux souterraines et le débit.

Ainsi, il est très important de distinguer la sécheresse de l'aridité et de la désertification (Van Lanen et Peters, 2000 ; Tallaksen et Van Lanen, 2004 ; Schmidt et Benitez-Sanz, 2013). L'aridité est une caractéristique permanente d'un climat sec, alors que la sécheresse est une déviation du climat à long terme. Par contre, la désertification est une dégradation plus ou moins permanente des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches (UNEP, 1994).

La sécheresse peut contribuer à la désertification, en cas de surpâturage, de fréquence accrue des incendies, de déforestation et de surexploitation des eaux souterraines.

D'un autre côté, la sécheresse peut être considérée comme un phénomène multidimensionnel et peut parfois ne pas avoir une définition universelle (Wilhite et Glantz 1985; Heim 2002; Redmond 2002; Boken *et al.*, 2005). En revanche, selon les mêmes études, la sécheresse possède plusieurs définitions qui se concentrent chacune sur un aspect différent. Elles sont soit conceptuelles soit opérationnelles (NDMC, 2006a). Les définitions conceptuelles sont générales comme par exemple le déficit de précipitation et la perte de rendement, souvent utilisées pour établir les politiques de sécheresse, tandis que les opérationnelles sont spécifiques à chaque type de sécheresse et désignent sa durée et sa sévérité.

La sécheresse a été identifiée par quatre définitions primaires (Wilhite et Glantz, 1985): météorologique, agricole, hydrologique et socio-économique.

La **sécheresse météorologique** appelée aussi atmosphérique, est caractérisée par un manque des précipitations, solides ou liquides sur une période déterminée (Palmer, 1965 ; Dracup, 1980 ; Boken, 2005). Cette définition est habituellement différente d'une région à l'autre en raison de la variété des climats.

La **sécheresse agricole** est une combinaison entre les caractéristiques météorologiques d'une sécheresse et les impacts sur la production agricole. En effet, plusieurs facteurs climatiques tels que l'évapotranspiration, l'humidité du sol et le déficit de la réserve hydrique sont pris en

considération pour définir une sécheresse agricole. Ces facteurs entraînent un stress hydrique pour la végétation en place, qu'elle soit naturelle ou cultivée et ainsi des impacts néfastes sur la production agricole (Palmer, 1965 ; Panu et Sharma, 2002 ; Wilhelmi *et al.*, 2002). En général, l'apparition d'une sécheresse agricole est souvent en retard par rapport à une sécheresse météorologique. En Méditerranée, ce type de sécheresse est généralement le résultat des précipitations moins fréquentes mais plus intenses ou d'un cumul de précipitations moindres (Narasimhan et Srinivasan, 2005).

La **sécheresse hydrologique** se produit lorsque les réserves en eau des sols et les cours d'eau tombent en dessous de la moyenne. Elle est définie par la période durant laquelle le débit des cours d'eau est insuffisant pour répondre aux besoins en eau établis par le système de gestion de l'eau local (Linsley *et al.*, 1975). Ainsi, ce type des sécheresses a un impact important sur les différents secteurs tels que : la production agricole, l'irrigation, la production d'énergie hydroélectrique et l'alimentation en eau domestique.

La **sécheresse socio-économique** survient habituellement après les autres types de sécheresse lorsque les réserves en eau diminuent et que la demande augmente.

1.2 Propagation de la sécheresse

La figure 1.1 illustre la relation entre les différents types de sécheresses. En effet, les sécheresses de types agricole, hydrologique ou socio-économique sont décalées dans le temps par rapport à la sécheresse météorologique parce qu'il faut souvent plusieurs semaines avant que l'insuffisance des précipitations se traduise par un déficit d'humidité du sol et que les cultures, les pâturages et les parcours commencent à souffrir. Cette présentation reste théorique parce que les caractéristiques climatiques diffèrent d'un endroit à un autre ainsi que la démographie, la nature des activités humaines et les moyens utilisés pour lutter contre les épisodes secs.

La sécheresse météorologique peut se transformer en sécheresse hydrologique dans certaines conditions climatiques (fig 1.1). Cependant, sa quantification est encore assez inconnue (Wong *et al.*, 2013).

Toute sécheresse météorologique ne devient pas hydrologique d'une façon directe. En effet, la sécheresse hydrologique majeure se produit en réponse à une série de sécheresses météorologiques mineures (Van Loon et Van Lanen, 2012). Outre la dépendance du manque

de précipitations, cette propagation dépend également du climat et des caractéristiques du bassin hydrographique (Peters *et al.*, 2003; Van Loon et Van Lanen, 2012).

Les caractéristiques importantes qui jouent un rôle dans la propagation de la sécheresse sont le type de sol, l'utilisation des terres, les conditions hydrogéologiques, les lacs et le réseau de cours d'eau (Van Lanen *et al.*, 2004; Van Loon et Van Lanen, 2012).

Le principal facteur contrôlant la propagation et l'apparition de la sécheresse est la différence entre les réserves hydrologiques (Tallaksen *et al.*, 2009; Van Lanen *et al.*, 2013).

Les épisodes secs se produisent fréquemment et sur une durée plus courte dans les bassins versants, caractérisés par un comportement hydrologique rapide tels que l'écoulement de surface et des eaux souterraines, que dans les bassins à réaction hydrologique lente (Van Lanen *et al.*, 2013).

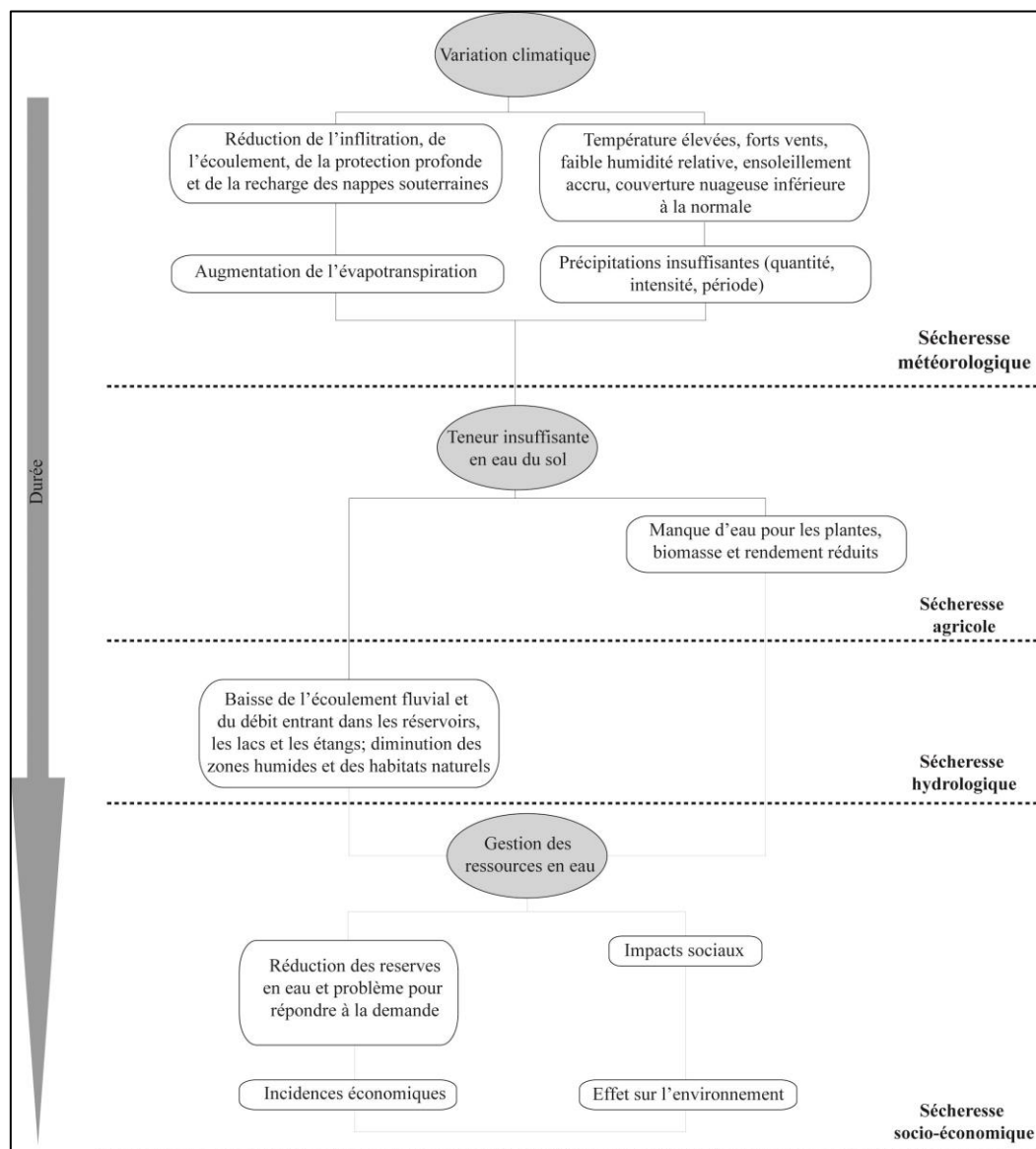


Fig. 1.1 - les différents types de sécheresse et sa propagation dans le cycle hydrologique Source : modifiée du Journal of Hydrology (2015) et Villalobos (2007). Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017

1.3 Suivi de la sécheresse

La littérature scientifique est riche d'études qui ont permis de suivre les sécheresses à partir des différents indicateurs. Ceux-ci permettent d'observer l'évolution des épisodes secs à différentes échelles temporelles et spatiales et sa probabilité de récurrence.

L'indice de Gaussen est le premier modèle qui a été utilisé pour décrire une période sèche. Cette dernière a été étudiée par l'emploi du diagramme ombrothermique établi en fonction des précipitations (P) en millimètres et de la température moyenne (t) en degrés centigrades (figure 1.2). Il permet d'utiliser plusieurs rapports entre précipitations et températures afin de déterminer l'hyper-sécheresse $P < t$, la sécheresse $P < 2t$ et la sub-sécheresse $P < 3t$ (Gaussen, 1957).

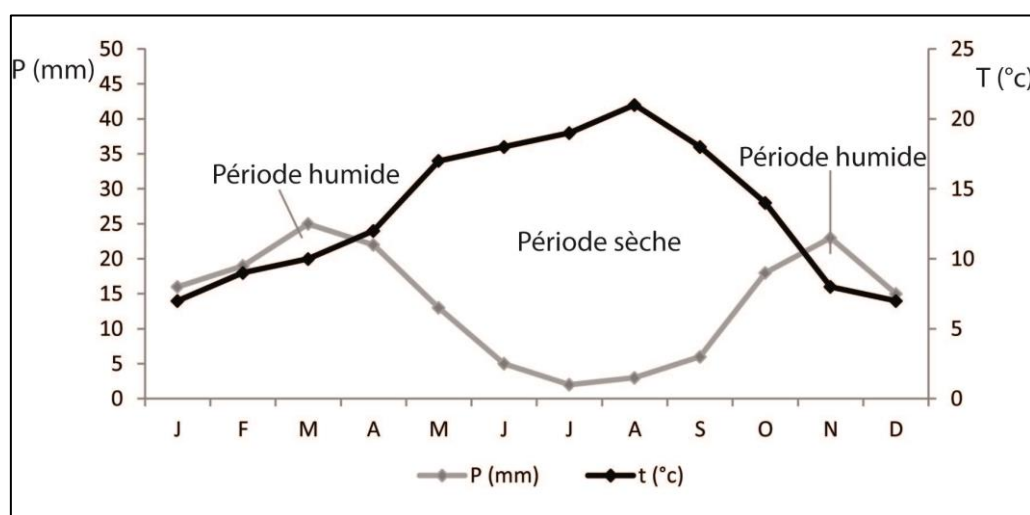


Fig. 1.2 - Modèle théorique d'un diagramme ombro-thermique. Réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2017.

D'autres outils plus récents ont été développés pour surveiller les conditions de sécheresse tels que les indicateurs traditionnels, satellitaires, combinés et physiques. Ces indicateurs présentent les sécheresses sous formes des valeurs spécifiques qui sont placées sur une échelle d'évaluation.

1.3.1 Les indicateurs traditionnels

Ce sont les données issues des stations météorologiques comme la température, la précipitation et le vent.

Le Pourcentage à la Normale (PN) appliqué à une échelle locale ou régionale. Il représente le pourcentage de l'écart des précipitations par rapport à la normale historique d'une même période (NDMC, 1996). Le PN est efficace pour comparer une seule région ou une seule

saison. En revanche, son calcul devient difficile dans les régions à grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

$$PN = (P/P_m) \times 100$$

Où :

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

L'Indice Standardisé de Précipitation (SPI) est couramment utilisé pour la caractérisation des sécheresses locales et régionales (McKee et *al.*, 1993). Il est capable de quantifier l'écart des précipitations sur une période donnée, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques. Cette période de calcul peut varier de 3 mois à 2 ans. Cet indicateur est basé sur un historique de précipitation de longue durée, d'un minimum de trente ans pour obtenir des résultats fiables. Il répond à l'équation suivante :

$$SPI = \frac{(P - P_m)}{\sigma_p}$$

Où :

P Précipitation totale d'une période (mm)
P_m Précipitation moyenne historique d'une période (mm)
σ_p Ecart-type historique des précipitations de la période (mm)

Les ressources en eau tels que les nappes phréatiques, les réservoirs et les dépôts neigeux ne réagissent pas de la même rapidité aux variations pluviométriques (McKee et *al.*, 1993). Pour cette raison, la période de calcul de SPI est nécessaire pour étudier l'effet de cette variation sur les ressources hydriques. En effet, quand la valeur de SPI est négative sur une courte durée, cela représente une situation de stress hydrique temporaire de la végétation et non pas une sécheresse hydrologique. Par contre, s'il s'agit d'une longue durée, cela représente une situation de sécheresse hydrologique qui se traduit par un impact sur les ressources hydriques du sol ou sur les ressources en eau de surface.

La valeur du SPI varie de 0 à 2 pour des périodes humides à très légèrement sèches ; de -1 à -1.99 pour des sécheresses modérées à sévères ; au-delà de -2, le niveau de sécheresse est classé comme extrême (tableau 1.1).

SPI	Classification
2,0 et plus	Extrêmement humide
1,5 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Humide
-0,99 à 0,99	Normal
-1,0 à -1,49	Modérément sec
-1,5 à -1,99	Sévèrement sec
-2,00 et moins	Extrêmement sec

Tableau 1.1 - Classification de SPI. Source : Organisation Météorologique Mondiale, guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitation, 2012.

Cet indicateur est appliqué dans des conditions où la distribution des précipitations est normale. Toute distribution des précipitations pour une période de temps de moins d'un an est considérée anormale. 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 soit 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. Le SPI est inclus dans la formulation du « Drought Monitor » qui combine plusieurs indicateurs pour caractériser les sécheresses agricoles et hydrologiques (NDMC, 2005).

L'indicateur **Déciles de précipitation (D)** est utilisé pour déterminer la fréquence d'un événement (Gibbs et Maher., 1967). Il s'agit de partager la distribution des fréquences des événements en dix parties représentant chacune 10%. Le cinquième décile représente la médiane et le dixième, le volume maximal de précipitation reçu pour une région ou pour une période du temps. Cette méthode peut être appliquée sur une période variée d'un mois à une année. Sa formule est basée uniquement sur la précipitation portant sur une longue période (minimum 30 ans) afin de calculer les déciles de façon précise et significative.

L'indicateur de sécheresse **Palmer Drought Severity Index (PDSI)**, développé par Palmer en 1965, est très utilisé en agriculture aux Etats-Unis. Il est calculé à partir d'un bilan hydrique simplifié en utilisant les différences cumulées entre les précipitations réelles et requises. Ces dernières sont dépendantes de la recharge du sol en eau, de l'évapotranspiration et du ruissellement (Heim, 2002). L'indice de Palmer varie de 0 à -2 pour des périodes humides à très légèrement sèches ; de -2 à -4 pour des sécheresses modérées à sévères ; au-delà de -4, le niveau de sécheresse est classé comme extrême. Toutefois cet indice ne tient 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.

Il répond à l'équation suivante (Thornthwaite, 1948) :

$$PDSI = X(i) = 0.897 X(i-1) + Z(i)/3$$

Où:

X (i-1) PDSI de la période précédente
Z(i) Indice de l'anomalie en humidité
i Mois de l'année

$$Z(i) = K (p - pc)$$

Où :

K Facteur de poids (Alley, 1984)
P Précipitation actuelle en mm
Pc Précipitation CAFEC (Climatically Appropriate for Existing Conditions) en mm ($= \alpha_j PE + \beta_j PR + \gamma_j PRO + \delta_j PL$)
Où α , β , γ , et δ représentent les coefficients climatiques mensuels, j le mois de l'année, PE l'évapotranspiration potentielle, PR la recharge du sol potentiel, PRO le ruissellement potentiel et PL la perte potentielle dans le sol.

Les critiques de cet indicateur sont nombreuses, nous en citons deux:

- Le PDSI est aussi appelé un indicateur de seuil car il ne fonctionne qu'après que la saturation du sol soit atteinte, ce qui ne reflète pas la réalité (Alley, 1984).
- Il a été découvert que les bilans hydriques des indicateurs de seuil donnent des valeurs de 25% plus basses que les bilans hydriques journaliers (Rushton et Ward., 1979).

L'indicateur **Crop Moisture Index (CMI)**, ou indice d'humidité des cultures, est utilisé pour décrire l'état de l'humidité disponible par rapport à la demande réelle d'humidité (Palmer., 1968). Il est caractérisé par la définition des sécheresses en fonction de la magnitude et du déficit en évaporation. Il répond à la formule suivante :

$$CMI = EAI + WI$$

Où

(WI²) représente l'indice de l'humidité en mm (la recharge du sol en précipitation combinée au ruissellement) et EAI³ l'indice d'anomalie de l'évapotranspiration.

Le CMI est efficace pour évaluer les conditions d'humidité à court terme et non pas à long terme (NDMC., 1996). La même étude ajoute que cet indicateur n'est pas applicable sur toute l'année car il ne fonctionne pas en cas d'absence de végétation.

L'indicateur **Surface Water Supply index** (SWSI) ou l'indice des réserves en eau de surface est utilisé pour la caractérisation des sécheresses (Shafer et Dezman., 1982). Il est adapté pour les régions où la fonte des neiges est la principale source d'écoulement des eaux des surfaces. Il intègre la couverture neigeuse, les précipitations, les cours d'eau, le contenu des réservoirs et le contenu en eau du sol. Il répond à la formule suivante :

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

Où a, b et c représentent les poids associés à chaque composante, sp la couverture neigeuse équivalente en eau (mm), pcp la Précipitation (mm), rs le réservoir (mm) et PN la probabilité de ne pas excéder (%).

1.3.2 Les indicateurs satellitaires

Les données issues des capteurs montés à bord des satellites sont utilisées pour apporter des connaissances amples et actualisées sur l'évolution de l'occupation des sols. Ces données sont généralement présentées sous formes d'images satellitaires. Depuis que la végétation est fortement liée au stress hydrique environnemental, l'observation satellitaire a apporté de nouvelles bases pour surveiller la sécheresse agricole (Sheffield et Wood, 2011). Aujourd'hui, les satellites imageurs les plus employés pour surveiller les dynamiques de la végétation et l'évolution des sécheresses à court et à long terme sont MODIS, AVHRR NOAA, SPOT VGT et LANDSAT TM.

En télédétection, la végétation repose habituellement sur la signature spectrale d'une surface qui correspond à la courbe de réflectance de la surface en fonction de longueurs d'onde du spectre électromagnétique. En condition favorable, la chlorophylle présente dans la végétation verte absorbe la portion rouge (R) du spectre électromagnétique alors que dans la

² Wetness Index

³ Evapotranspiration Anomaly Index

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 ; Mc Vicar et Bierwirth, 2001). En cas de stress hydrique, le retour de NIR vers le capteur est faible et le R est plus élevé. Ainsi, la différence NIR-R est donc plus faible en périodes de sécheresse (figure 1.3).

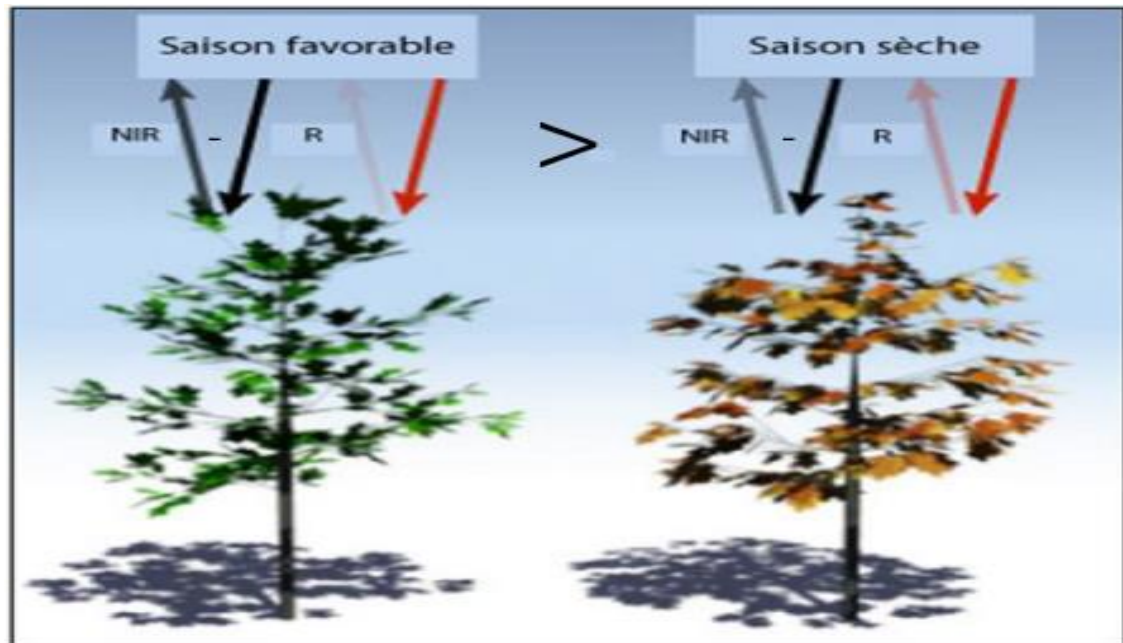


Fig. 1.3 - Modèle théorique de la différence de réflectance entre les deux portions du spectre électromagnétique (NIR-R) dans les deux saisons (sèches et favorables) Réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2017.

Plusieurs indicateurs ont été développés en utilisant une combinaison entre les deux bandes spectrales NIR – R afin de suivre l'état d'une végétation dans une aire d'un territoire (Huete, 1988 ; Pinty et Verstrate, 1992, Qi et *al.*, 1994; Bannari et *al.*, 1995).

L'indicateur **Normalized difference vegetation index** (NDVI), ou l'indice de végétation normalisé, est développé par Rouse *et al.*, 1973 et Bannari et *al.*, 1995. Cet indice est très connu par sa sensibilité à la présence d'une végétation verte et par son efficacité pour le suivi des sécheresses notamment dans les milieux agricoles (Kogan, 1990; Vogt, 1995 ; Unganai et Kogan, 1998; Viau *et al.*, 2000; McVicar et Bierwirth, 2001; Boyd *et al.*, 2002). Il répond à la formule suivante :

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

Où

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

Le NDVI est indice normalisé ce qui permet de diminuer l'effet de la dégradation de la calibration des capteurs et de minimiser l'effet de la topographie (Bannari *et al.*, 1995).

Malgré cette normalisation, son interprétation peut être biaisée dans les régions arides à faible densité de végétation et où la présence du sol est importante (Vogt, 1992; Bannari *et al.*, 1995).

L'indicateur **Soil Adjusted Vegetation Index** (SAVI) a été créé afin d'ajuster le signal vu au satellite influencé par la rétrodiffusion du sol à travers le couvert végétal (Huete, 1988). Il répond à la formule suivante :

$$SAVI = \frac{(PIR - Rouge) * 1.5}{PIR + Rouge + 1.5}$$

Où

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

L'utilisation de cet indicateur reste délicate car l'ajustement de l'effet du sol devrait être adapté pour la région étudiée (Rondeaux *et al.*, 1996).

L'indicateur **Vegetation Condition Index** (VCI) est utilisé pour suivre les conditions des sécheresses en mesurant le degré de végétation verte. Il utilise dans sa formule les valeurs minimales, maximales et courantes de NDVI pour une période de plusieurs années :

$$VCI = \frac{100(NDVI - NDVI_{min})}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

Où

NDVI NDVI de la période étudiée
NDVI_{min} NDVI minimum de la période étudiée
NDVI_{max} NDVI maximum de la période étudiée

Le VCI a montré son efficacité pour étudier l'effet des variations climatiques, tel que la précipitation, sur la condition de la végétation (Kogan, 1990 ; Kogan et Sullivan, 1993).

Le traitement de cet indicateur est fortement lié au nombre et à la qualité de l'image satellitaire et son pixel. Il a été couramment utilisé afin de détecter les sécheresses à grandes échelles, ainsi que les conditions d'humidité excessive (Kogan, 1997; Unganai et Kogan, 1998; Singh *et al.*, 2003; Domenikiotos *et al.*, 2004; Kogan *et al.*, 2004; Kogan *et al.*, 2005).

Un autre indicateur **Temperature Condition Index** (TCI) est utilisé aussi pour détecter le stress de la végétation en cas des conditions climatiques défavorables tel que la sécheresse (Kogan, 1997; Singh *et al.*, 2003; Kogan *et al.*, 2004; Kogan et Sullivan, 1993). Son calcul se sur la température de surface:

$$TCI = \frac{100(T_{max} - T)}{(T_{max} - T_{min})}$$

Où

T température de surface de la période étudiée (K)
T_{max} température de surface maximale de la période étudiée (K)
T_{min} température de surface minimale de la période étudiée (K)

L'indicateur **Vegetation Health Index** (VHI), une combinaison de deux indicateurs VCI et TCI, a montré son efficacité pour le suivi des sécheresses dans des conditions environnementales différentes (Unganai et Kogan, 1998; Seiler *et al.*, 2007). Il est obtenu par la somme « $\alpha VCI + \beta TCI$ », où α et β sont les poids de chacun des indicateurs (Kogan, 1995 ; Unganai et Kogan, 1998; Kogan *et al.*, 2004 ; Kogan *et al.*, 2005). Ces poids sont généralement obtenus par une analyse de corrélation entre le VCI et le TCI et un paramètre physique tel que la précipitation afin de mieux décrire l'état du stress hydrique de la végétation causé par la sécheresse. La formule générale de VHI est obtenue par la somme de la moitié de la valeur des deux indicateurs (Kogan, 1995) :

$$VHI = 0.5VCI + 0.5TCI$$

Le VHI varie de 0 à 1, les valeurs faibles se présentent des conditions de stress de végétation et les valeurs élevées indiquent des conditions optimales ou supérieures à la normale. Les valeurs de VHI sont généralement calculées sur la plateforme ARCGIS-ESRI. Chaque pixel donne la valeur de cet indicateur recherchée sur la période d'étude.

L'indicateur **Vegetation Productivity Index** (VPI) a été utilisé principalement sur le continent africain pour surveiller l'état de sécheresse et d'humidité de la végétation (Sannier *et al.*, 1998 ; Tanaka *et al.*, 2000 ; Sannier *et al.*, 2002). Il permet d'estimer la distribution statistique du NDVI de manière empirique et homogène dans une région donnée. Ainsi, une valeur basse de VPI, indique une faible probabilité de retour de la sécheresse.

L'indicateur **Leaf Water Content Index** (LWCI) utilise les deux bandes spectrales SWIR (onde de l'infrarouge moyen) et NIR (onde proche infrarouge) afin de caractériser la végétation (Hunt *et al.*, 1987; Hunt et Rock, 1989). Il permet d'estimer le contenu relatif en eau des feuilles de manière journalière ou hebdomadaire dans le but de détecter le stress hydrique causé par la sécheresse. Cet indicateur a été testé uniquement en laboratoire et non pas sur le terrain, Il répond à la formule suivante (Hunt *et al.* 1987) :

$$LWCI = \frac{-\text{Log} [1 - (TM4 - TM5)]}{-\text{Log} [1 - (TM_{ft4} - TM_{ft5})]}$$

Où

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

Un autre indicateur utilise les mêmes bandes TM4 et TM5, **Moisture Stress Index** (MSI). Il commence à détecter la variation hydrique que lorsque la plante perd la moitié de son contenu en eau. Sa formule est obtenue par un simple ratio de l'infrarouge moyen (SWIR) sur le proche infrarouge (Hunt et Rock, 1989) :

$$MSI = TM5/TM4$$

Où

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

L'indicateur **Normalized Water Difference Index** (NDWI) a été développé pour détecter le stress hydrique de la végétation causé par une sécheresse (Gao, 1996). Il répond à la formule suivante :

$$NDWI = \frac{RNIR - RSWIR}{RNIR + RSWIR}$$

Où

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

Les indicateurs qui utilisent les deux bandes SWIR et NIR ont été critiqués notamment à cause de leur sensibilité à la masse volumique d'eau contenue dans la végétation (Jackson *et al.*, 2004).

Un autre indice satellitaire, **FPAR** (Fraction du rayonnement photo-synthétiquement actif) illustre la fraction de l'énergie solaire (400 – 700nm) absorbée par les feuilles vertes. Cet indicateur est utilisé pour les études environnementales et peut être employé pour contrôler la productivité de la végétation (JRC, 2005). Pour cela, il est possible d'utiliser le FPAR pour évaluer l'état d'une végétation suite à la sécheresse. Pour cette raison, Gobron *et al.* (2005) ont exploité cet indicateur pour caractériser l'état de la végétation en Europe pendant la sécheresse en 2003.

1.3.3 Les indicateurs combinés

Les indicateurs combinés peuvent être calculés à partir des données satellitaires ou par des données in-situ.

L'indicateur **Crop Water Stress Index** (CWSI) est basé sur la différence entre la température du feuillage et la température de l'air (Jackson *et al.*, 1981 ; Moran *et al.*, 1994). Il peut être appliqué au niveau local ou régional, de manière instantanée ou journalière. Il répond à la formule :

$$CWSI = 1 - (ETR/ETP) = \frac{\gamma \left(1 + \frac{rc}{r_a}\right) - \gamma^*}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{rc}{r_a}\right)}$$

Où

ETR	Evapotranspiration réelle (mm)
ETP	Evapotranspiration 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 ($Pa\ ^\circ C^{-1}$)

$$\gamma^* = \gamma[1 - (rcp / r_a)]$$

Où

$$rc/r_a = \frac{\gamma r_a Rn / (\rho cp) - (Tc - Ta)(\Delta + \gamma) - (e_a^* - e_a)}{\gamma[(Ts - Ta) - \frac{baRn}{\rho cp}]}$$

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_s	Température de surface ($^\circ C$)
T_a	Température de l'air ($^\circ C$)
P	Densité de l'air (Kg/m^3)

Alternative satellitaire :

$$CWSI = \frac{(T_o - T_a) - (T_o - T_a)^1}{(T_o - T_a)^u - (T_o - T_a)^1}$$

Où

T_o	Température de surface ($^\circ C$)
T_a	Température de l'air ($^\circ C$)
u	Limite supérieur de (To-Ta)
1	Limite inférieur de (To-Ta)

$$(T_o - T_a)^1 = \frac{\frac{r_e}{\rho_a C_p} (R_n + G) - 1/\gamma(e^*)}{1 - s/\gamma}$$

$$(T_o - T_a)^u = \frac{r_e}{\rho_a C_p} (R_n + G)$$

Où

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)

La valeur de CWSI peut être estimée efficacement à partir des données satellitaires et des données météorologiques simples (Inoue et Moran, 1997). Cependant, son calcul est sensible à la présence du sol nu à cause de la grande variation de température entre le sol et la végétation, ainsi qu'à l'accroissement de la vitesse du vent (Jackson *et al.*, 1981). Son utilisation est limitée dans les zones agricoles de petites surfaces (Moran *et al.*, 1996 ; Colaizzi *et al.*, 2003).

Un autre indicateur de sécheresse **Water Deficit** (WDI), peut être calculé par les approches combinées. Il est utilisé pour les régions partiellement couvertes de végétation (Moran *et al.*, 1994). Ainsi, il peut être appliqué au niveau local ou régional, de manière instantanée ou journalière. Son équation est un raffinement de celle de CWSI.

$$WDI = 1 - \left(\frac{ETR}{ETP} \right) = \frac{[(Ts - Ta)m - (Ts - Ta)r]}{[(Ts - Ta)m - (Ts - Ta)x]}$$

Où

ETR	Evapotranspiration réelle (mm/h)
ETP	Evapotranspiration potentielle (mm/h)
T _a	Température de l'air (°C)
T _s	Température de surface (°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

1.3.4 Les indicateurs de modélisation physique

Les indicateurs de l'approche physique utilisent l'énergie fournie par le soleil ou la terre pour caractériser les conditions environnementales.

L'indicateur de sécheresse **Water Stress Index** (WSI) est appliqué pour quantifier le manque en eau de culture au niveau local et régional, de manière journalière (Lhomme et Katerji, 1991). Sa formule utilise des données de précipitation, d'humidité et de coefficient cultural (Kc) de la culture étudiée.

$$WSI = \frac{\Sigma WD}{\Sigma ETM}$$

Où

WD	Déficit journalier en eau (différence entre évapotranspiration maximale et actuelle (mm))
ETM	Evapotranspiration maximale ou potentielle (mm).

Un autre indicateur appelé **Evaporative Fraction** (EF) est utilisé dans la caractérisation des sécheresses (Kustas *et al.*, 1993). Son application est basée sur l'humidité des sols qui est influencée par l'évaporation (Crago, 1996). Il répond à la formule suivante :

$$EF = \frac{LE}{Rn + G}$$

Où

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

1.4 Impacts régionaux de la sécheresse

La sécheresse est un danger naturel qui peut être extrêmement coûteux selon son degré d'intensité (figure 1.4). Son analyse diffère d'une région à une autre. Souvent, la sécheresse crée un ensemble complexe d'impacts qui peuvent être directs ou indirects. En effet, la réduction du rendement des cultures est considérée comme impact direct. Par contre l'augmentation des prix des produits qui a été causée par la réduction du rendement est un impact indirect de la sécheresse. Ainsi, il est difficile de calculer le coût précis des pertes financières lorsque l'impact n'est pas attribué directement à la sécheresse (NDMC, 2006d).

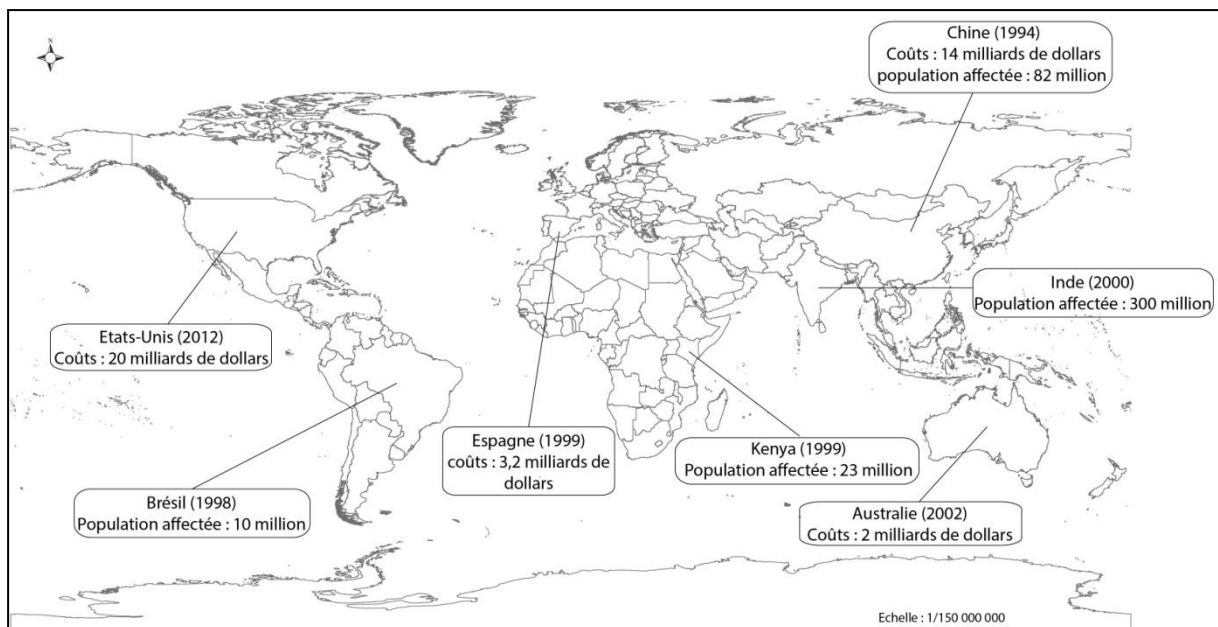


Fig. 1.4 - Exemples de sécheresses très sévères pour la période 1994-2013. Source : The OFDA/CRED International Disaster Database. www.em-dat.net – Université Catholique de Louvain – Bruxelles – Belgique.

Les impacts de la sécheresse sont classés en trois grandes catégories : économiques, sociaux et environnementaux (NDMC, 2006d). Les impacts économiques comprennent les pertes agricoles, la perte de revenus de tourisme et des petites entreprises. Les impacts environnementaux peuvent inclure la perturbation hydrologique d'une zone, la détérioration d'espèces végétales et animales ainsi que l'augmentation des incendies des forêts. Les

impacts sociaux comprennent des problèmes de santé, des conflits sur les ressources d'eau. Il est important de savoir aussi que certaines sécheresses peuvent inclure plusieurs catégories d'impacts en même temps. Parfois la sécheresse peut avoir des impacts positifs. En effet, une demande en eau plus élevée peut conduire à une augmentation des revenus pour les entreprises de distribution d'eau.

Une évaluation des impacts de sécheresse peut aider à déterminer la vulnérabilité des zones à ce phénomène, ainsi que des stratégies d'atténuation (Abraham, 2006). Les principaux facteurs utilisés lors de l'identification d'une sécheresse sont : la variation des précipitations, l'équilibre entre l'offre et la demande en eau, les modèles d'utilisation d'eau et le plan de prévention (Wilhite et *al.*, 2005).

Le NDMC (2006e) a proposé trois étapes essentielles pour déterminer la vulnérabilité d'une région à la sécheresse :

- 1- Identification des impacts et des tendances à la sécheresse au fil du temps.
- 2- Classement les impacts de la sécheresse selon leurs importances.
- 3- Enquêtes sur l'origine et les causes d'impacts de la sécheresse.

Lors de l'identification de la sécheresse, il est important de classe les impacts économiques, sociaux et environnementaux. Il est important d'observer les modèles réalisés de sécheresses historiques. Les meilleurs endroits pour rechercher les effets de la sécheresse sont :

- Les nouveaux articles qui illustrent les impacts de la sécheresse
- les rapports diffusés fréquemment dans les médias
- le site de NDMC qui rapporte et archive des informations sur les impacts de la sécheresse récente et historique (NDMC, 2006e).

Afin d'assurer une meilleure documentation, il est important d'avoir un réseau comprenant des agences privées ou publiques qui communiquent régulièrement leurs observations sur les impacts sur la sécheresse, en particulier pendant les épisodes secs.

Après l'identification de ses impacts, il serait important de les classer en fonction de leur intensité sur un territoire donné. Plusieurs facteurs peuvent aider à classer les impacts de la sécheresse d'une manière appropriée, comme les coûts, l'évolution temporelle et l'opinion publique aux évènements (NDMC, 2006f). Ainsi, plusieurs questions peuvent se poser : quel est le coût économique de cet impact par rapport aux autres ? Quels sont les effets de ces

impacts sur la population de la zone touchée par la sécheresse ? Quelle est l'opinion publique sur ces impacts ? Ces types de questions peuvent aider les décideurs à déterminer les impacts à fort retentissement sur un territoire donné.

Enfin, il est important aussi de déterminer les causes sous-jacentes de ces impacts et pourquoi ils se sont produits. La figure 1.5 présente les raisons possibles de l'apparition d'un impact (figure 1.5).

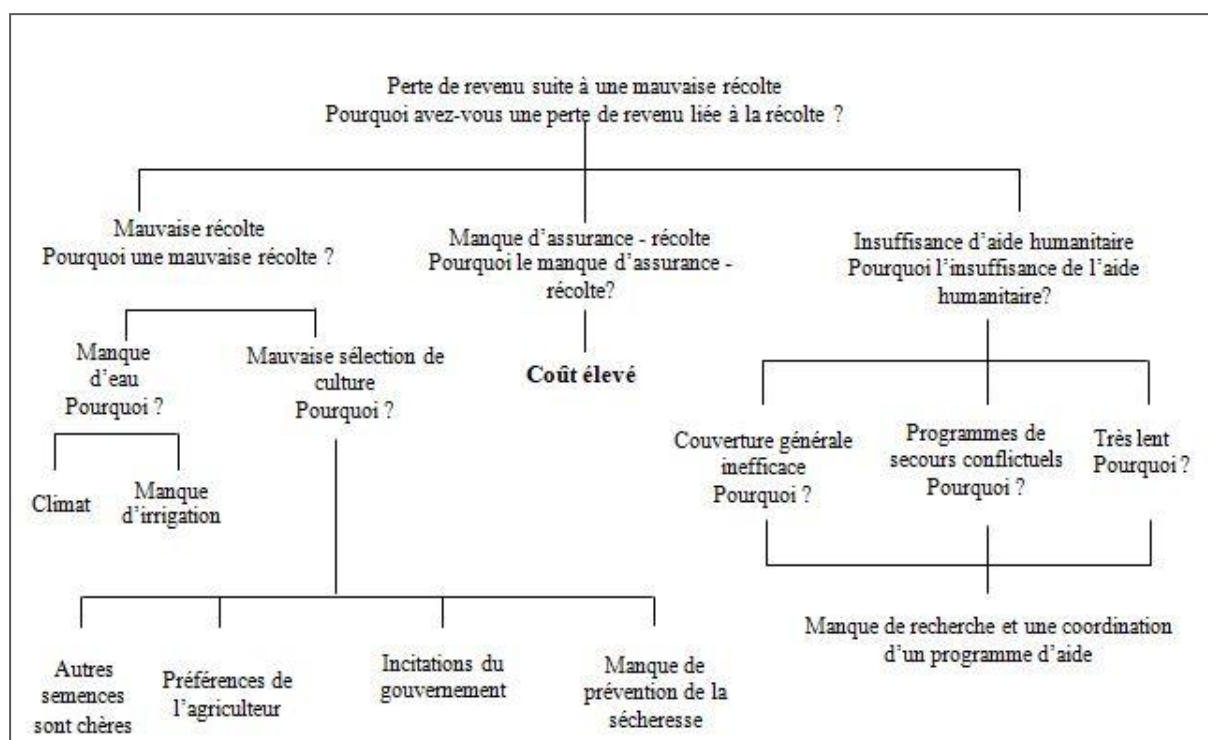


Fig. 1.5 - Diagramme de l'impact agricole. Source : NDMC, 2006g.

Il est complexe de comprendre le temps d'apparition de ces impacts car souvent ils ne se manifestent pas simultanément avec la sécheresse. Par exemple, la plupart des plantes ont tendance à être résistantes aux conditions sèches tant qu'elles reçoivent des précipitations à un certain moment pendant leur cycle de reproduction. Ainsi, des sécheresses sévères peuvent apparaître pendant une période de la saison de croissance, mais si des précipitations suffisantes se produisent à un certain moment, le cycle de reproduction de la plante peut ne pas être grandement impacté par la sécheresse. En revanche, le retentissement est visible sur le rendement agricole si la sécheresse persiste pendant toute la période du cycle reproductif de la plante. Ce décalage entre les conditions de sécheresse et les impacts devraient être pris en compte lors de la planification d'une période sèche.

1.5 Planification de la sécheresse

Afin de planifier une sécheresse, il est important de déterminer la susceptibilité de la région étudiée. Des facteurs essentiels sont utilisés pour déterminer cette susceptibilité comme les précipitations annuelles, le ruissellement et l'évaporation de l'eau des lacs, etc...

La méthode pour gérer une crise devrait passer par des plans de sécheresse plus proactifs en mettant l'accent sur la gestion des risques (Wilhite, 1993; Wilhelmi, 1999; WGA, 2004; Abraham, 2006; NDMC, 2006i). Les dix étapes pour aider les décideurs à développer un plan d'atténuation sont présentées dans le tableau 2 (Wilhite *et al.*, 2005). Ce processus a été conçu pour être utilisé comme prototype pour développer des plans de sécheresse à différentes échelles.

Etape 1	Nommer un groupe d'intervention contre la sécheresse
Etape 2	Enoncer les objectifs du plan de préparation à la sécheresse
Etape 3	Rechercher la participation des parties prenantes et la résolution des conflits
Etape 4	Identifier Les groupes à risques
Etape 5	Rédiger le plan de préparation à la sécheresse
Etape 6	Identifier les recherches manquantes et combler les lacunes institutionnelles
Etape 7	Intégrer la science et la politique
Etape 8	Publier le plan de préparation et sensibiliser le public à la sécheresse
Etape 9	Développer le programme d'éducation
Etape 10	Evaluer et réviser le plan de préparation à la sécheresse

Tableau 1.2 - Processus de la planification de la sécheresse. Source : Wilhite et al. 2005.

Les étapes de 1 à 4 sont conçues pour recueillir les informations et les personnes essentielles au processus de la planification de sécheresse.

L'étape 1 consiste à nommer par un responsable officiel, un groupe d'intervention contre la sécheresse qui serait le seul superviseur du développement du plan. Le rôle de ce groupe serait de proposer des recommandations stratégiques en cas de sécheresse.

L'étape 2 définit le but du plan, qui devrait prendre en considération des éléments tels que l'impact des sécheresses historiques, la vulnérabilité à la sécheresse et les ressources financières qui peuvent être utilisées pour le plan.

Le rôle des parties prenantes dans l'étape 3 est important pour les secteurs affectés par la sécheresse tels que, l'agriculture, les ressources d'eau et la santé publique etc...

L'étape 4 détermine la vulnérabilité des ressources naturelles, biologiques et humaines à la sécheresse. Ainsi, les ressources qui sont plus vulnérables nécessitent plus d'attention que les ressources plus résilientes à la sécheresse. Les ressources inventaires peuvent contribuer à la délimitation des zones à risques élevés lorsque la sécheresse se produire.

L'étape 5 est la plus importante pour le processus de la planification et elle est constituée de trois composants majeurs (Wilhite *et al.*, 2005) :

- Suivi, alerte précoce et prédiction
- Risque et évaluation de l'impact
- Atténuation et réponse

Wilhite *et al.*, 2005 a suggéré une structure organisationnelle du groupe de travail pour développer un plan de sécheresse (figure 1.6). En effet, le groupe de travail est chargé de fournir une politique de direction des comités de suivi et d'évaluation des risques. Le comité de suivi devrait comprendre des climatologues et des hydrologues pour surveiller en permanence le climat et l'approvisionnement en eau. Elle devrait aussi fournir des rapports de situation à la fois au groupe de travail et au comité d'évaluation des risques. Ce dernier pourrait être composé de différents secteurs économiques ou sociaux à risques élevés de sécheresse. Ces représentants pourraient être divisés en plusieurs groupes en fonction de leurs intérêts et expertises afin d'évaluer les impacts possibles à la sécheresse. La troisième composante de l'étape 5, atténuation et réponse, est généralement la responsabilité de la force opérationnelle de sécheresse ou bien un comité séparé qui pourrait entreprendre cette tâche. Ce comité serait chargé de recueillir les informations des comités de suivi et d'évaluation des risques afin d'identifier les mesures d'atténuation et de mener les mesures d'intervention les plus appropriées pour la région étudiée. Après avoir rempli les trois composantes, le plan de sécheresse peut enfin être rédigé.

Les étapes 6 et 7 nécessitent une relation continue entre les scientifiques et les décideurs. L'étape 6 signifie que les lacunes dans la recherche doivent être comblées pour avoir un plan de sécheresse complet et efficace. L'étape 7 est importante parce que souvent la connaissance en politique d'un scientifique est limitée et il en est de même pour les décideurs qui tentent de comprendre la science. Ainsi, une collaboration entre les scientifiques et les gestionnaires pourrait améliorer les réseaux d'observation, suivi, prévision, circulation d'informations et préparation des habitants à la sécheresse (WGA, 2004).

Les étapes 8 et 9 ont pour but de promouvoir et tester le plan avant que la sécheresse n'apparaisse. Elles encouragent à impliquer les habitants dans le plan afin de développer un

programme éducatif et augmenter la sensibilisation aux impacts de la sécheresse sur les différents secteurs.

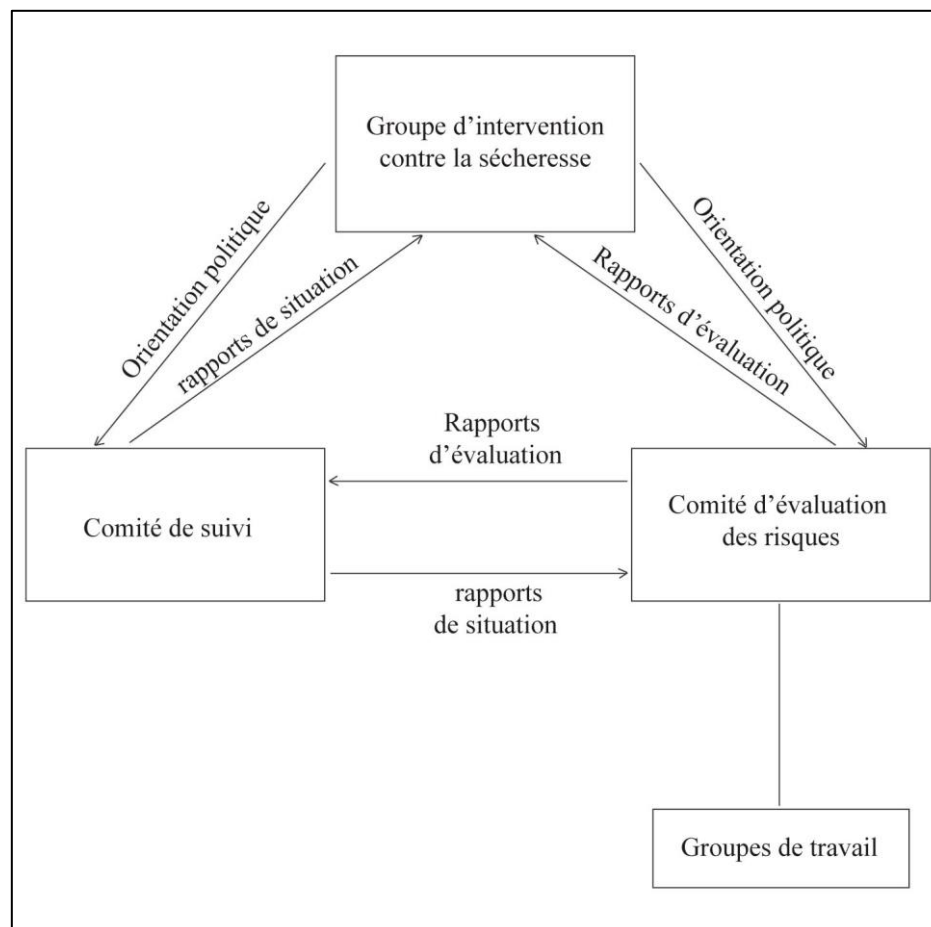


Fig. 1.6 - Structure organisationnelle du plan de sécheresse. Source : Wilhite et al., 2005.

La dernière étape invite à évaluer et réviser le plan régulièrement. En effet, des nouveaux impacts peuvent se réaliser avec le temps, ce qui peut entraîner une modification ou réorganisation d'une portion du plan.

Enfin, une maintenance régulière du plan peut assurer son efficacité en tant qu'outil d'utilisation pour lutter contre les épisodes secs et ses impacts.

1.6 La perception de la sécheresse

La perception de la sécheresse varie largement selon la région et les personnes. Elle est très dépendante de la définition de chaque type de sécheresse. La différence régionale rend la définition de la sécheresse plus compliquée (Redmond, 2002). En effet, la personne qui vit

dans une région à climat humide est plus sensible à la sécheresse qu'un autre vivant dans une région caractérisée par un climat aride.

Une autre complication concernant la perception de la sécheresse existe dans la différence des interprétations pour certaines terminologies et caractéristiques pour décrire la sécheresse. Par exemple, une personne peut considérer qu'une sécheresse sévère est pire qu'une extrême, tandis qu'une autre peut croire que le contraire est vrai. Il n'existe pas de terminologie standard qui puisse être utilisée pour que tout le monde ait la même interprétation de la sécheresse.

De la même manière, les prévisions de la sécheresse sont parfois interprétées de différentes façons, voire mal interprétées. L'exactitude et la fiabilité sur les prévisions relatives à la sécheresse détermine grandement l'assurance du public à ces pronostics (Changnon, 2002; Changnon et Vonnahme, 2003; Artikov et al., 2006;). En effet, si la prévision est incorrecte, l'agriculteur peut rencontrer une perte financière causée par les récoltes endommagées par la sécheresse (Changnon, 2002).

Artikov et al., (2006) et Hu et al., (2006) ont montré les influences des prévisions météorologiques sur les décisions relatives à la planification agricole chez l'agriculteur. La même étude a constaté que 60 à 70% des agriculteurs suivent des informations climatiques pour changer leur planification agricole. Pour cette raison, les informations prévisionnelles relatives au climat doivent être fiables, accessibles et faciles à comprendre pour que l'agriculteur assure une récolte lucrative.

1.7 Influence du changement climatique sur la sécheresse future

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution de la sécheresse (IPCC)⁴ définit le changement climatique comme suit :

« Le changement climatique se réfère à un changement de l'état du climat qui peut être identifié (par exemple, en utilisant des tests statistiques) par un changement ou une variabilité de la moyenne et qui persiste pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels, à des influences externes, ou à des modifications anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation du sol » (IPCC, 2012).

⁴ The Intergovernmental Panel on Climate Change

Contrairement à d'autres définitions, celle-ci prend en compte les processus naturels et les influences anthropiques. Ce changement de climat peut avoir de grandes conséquences sur la sécheresse. Ainsi, les événements de sécheresse devraient augmenter à l'avenir dans plusieurs régions du monde (Seneviratne *et al.*, 2012).

Plusieurs études ont enquêté sur les changements attendus dans l'humidité du sol à l'avenir (Vidal *et al.*, 2012; Dai, 2013; Orlowsky et Seneviratne, 2013). Ces études ont constaté que les sécheresses agricoles en France vont augmenter au 21^{ème} siècle. Ainsi, des conditions de sécheresses sévères sur une grande partie du globe terrestre, en particulier en régions méditerranéenne, l'Afrique du Sud, l'Amérique centrale et la Mexique, ont été déterminées par l'indicateur de précipitation (Dai, 2013 ; Orlowsky et Seneviratne, 2013).

D'autres études ont observé une augmentation de la sécheresse hydrologique, notamment pour les eaux souterraines et les eaux de surface (Hirabayashi *et al.*, 2008 ; Schewe *et al.*, 2014; Haddeland *et al.*, 2014; Prudhomme *et al.*, 2014).

Une augmentation significative de la sécheresse hydrologique a été constatée dans de nombreuses régions du monde. En Europe, une diminution de débits a été observée (Feyen et Dankers, 2009). Ainsi, il a été constaté que la diminution de débit dans de nombreuses rivières devrait devenir plus sévère pendant la saison hors gel (Forzieri *et al.*, 2014). Il a été aussi observée une augmentation spatio-temporelle de la sécheresse notamment aux Caraïbes, en Amérique du Sud, Ouest et Europe centrale, Afrique centrale, Australie, l'océan indien occidental et la Méditerranée (Prudhomme *et al.*, 2014).

La connaissance et l'évaluation des épisodes de sécheresse est nécessaire pour la gestion des ressources en eau et la planification des impacts de la sécheresse à l'avenir.

Chapitre 2 : La plaine de la Beqaa mise en contexte

La plaine de la Beqaa est depuis longtemps un territoire sec. La population grandissante des dernières décennies, couplée à une activité agricole contribuent à augmenter la demande sur la ressource en eau. Ainsi, la demande en eau de l'agriculture de la Beqaa et sa forte dépendance à l'irrigation pose une forte pression sur les réserves hydriques. La majeure partie des ressources en eau, souterraine et superficielle, est utilisée pour l'irrigation des terres agricoles dans la région pendant la saison agricole qui débute le mois de mars. Cette région peut être considérée, du point de vue de la gestion de l'eau, comme un cas d'étude intéressant dans le contexte libanais et cela pour les raisons suivantes :

Le facteur climatique : la contrainte climatique, zone semi-aride, nous permettra de mettre en évidence la problématique de la sécheresse et son évolution dans une région où le risque de pénurie d'eau est omniprésent.

La présence des ressources en eau : l'eau superficielle est caractérisée par le fleuve du Litani qui traverse la région. La surface de son bassin versant couvre 20% de la surface totale du territoire libanais (Comair, 2008). Ainsi, les principaux affluents se trouvent dans la région d'étude comme à Rayak et Zahlé. De plus cette région est riche en eau souterraine et comprend plusieurs aquifères qui alimentent les puits artésiens utilisés par les agriculteurs. Ces ressources constituant une source importante pour l'irrigation des zones agricoles, présentent un cas intéressant pour suivre les méthodes de gestion pratiquée et son rôle sur l'intensité de la sécheresse.

L'agriculture : elle présente une activité importante et essentielle de l'économie dans la plaine de la Beqaa. On y retrouve des exploitations potagères, fruitières et viticoles.

Le facteur gouvernemental : dans la région d'étude, il existe plusieurs lois ainsi que des institutions qui portent sur le sujet de la gestion de l'eau. L'absence des conditions favorables concernant leur application et leur coordination jouent un rôle important dans l'évolution des conditions de sécheresse.

Enfin ce chapitre aborde la situation hydrique dans la région en prenant en compte ces différents facteurs afin d'appréhender le risque et les conséquences reliés aux sécheresses.

2.1 Présentation générale du Liban

Le Liban est une petite nation de 10 452 km² de superficie, s'étendant sur 220 km en bordure de la méditerranée orientale. Il comprend essentiellement une plaine côtière et deux chaînes montagneuses (le Mont-Liban et l'Anti-Liban) encadrant une plaine élevée la plaine de la Beqaa à 950 m d'altitude (figure 2.1).

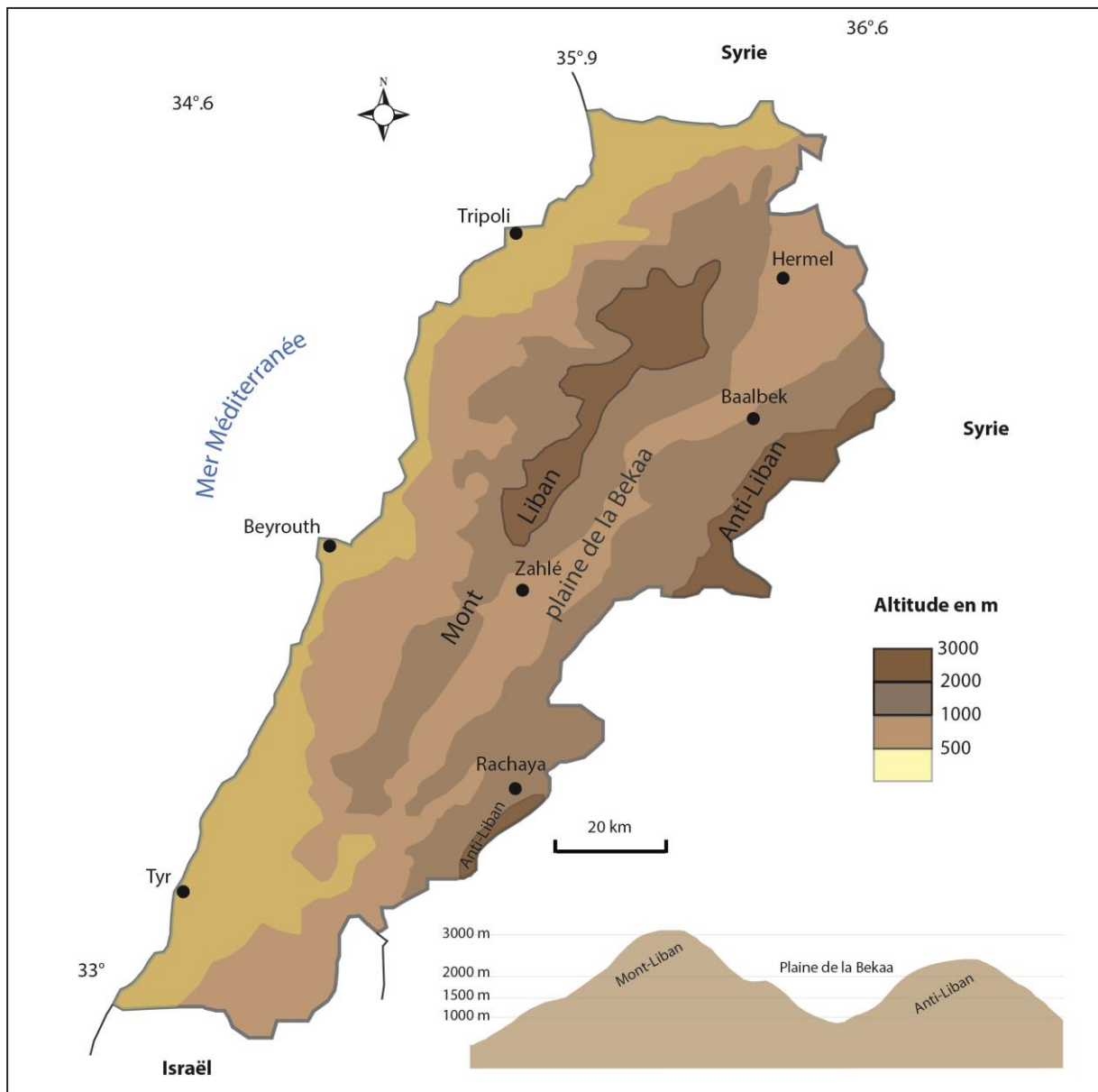


Fig. 2.1 - Carte géographique du Liban : géo-localisation de deux chaînes montagneuses. Source : AMIOT, 2013. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

Les deux chaînes montagneuses provoquent des variétés du climat à l'intérieur du pays (Abou el Enin, 1980 ; Fadlallah, 2001). La majorité du territoire libanais est sous l'influence du

climat méditerranéen, caractérisé par de fortes pluies d'hiver et des étés très secs. On peut distinguer quatre variétés du climat type méditerranéen (Tissot, 1947) :

Un climat à influence maritime sur la côte, avec des pluies abondantes (830 mm/an en moyenne) durant 4 à 5 mois d'hiver. La température moyenne oscille de 13,3°C (janvier) à 26,7°C (août).

Un climat d'altitude tempéré, au-dessus de 1000 m, avec des précipitations abondantes (2 à 4 mois). La température moyenne annuelle est autour de 10°C.

Un climat continental à l'est de la chaîne côtière notamment les parties centrale et sud de la plaine de la Beqaa, avec des pluies tombant durant 4 mois d'hiver (650 mm). La température moyenne oscille de 5,8°C (janvier) à 24°C (août).

Un climat désertique dans le nord de la plaine de la Beqaa à cause de son ouverture au désert syrien. Cette région est caractérisée par sa forte sécheresse de l'air, favorisée par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations qui ne dépassent pas 250 mm. La température moyenne varie de 7°C (janvier) à 31°C (août).



Fig. 2.2 - Mont-Liban et L'Anti-Liban, réservoirs d'eau. Source MODIS, 2016.

Quel que soit le taux de précipitation dans chacune de ces régions, la longue durée de la saison sèche pose un véritable problème d'eau au Liban. Ainsi, la culture n'est possible que si l'on utilise au maximum les ressources en eau du pays. En effet, les hautes montagnes que le Liban possède, jouent un rôle de réservoirs, permettant l'accumulation et l'infiltration des précipitations (pluie et neige) dans les nappes phréatiques qui sont utilisées pour satisfaire aux besoins des agriculteurs pendant la saison sèche notamment en plaine de la Beqaa. La figure 2.2 montre les deux chaînes montagneuses couvertes de neige en hiver, ce qui permet le transit des eaux dans les fleuves suite à la fonte de neige.

2.2 L'agriculture libanaise : exploitations agricoles, types de culture et régions agricoles

Selon le ministère d'agriculture (1999), 195 829 exploitations agricoles sont actives sur le territoire libanais sachant que 75% occupent des parcelles de moins de 1 ha. Ces parcelles

représentent seulement 20% du total des terres agricoles cultivées, alors qu'à peine 2% des exploitations cultivent plus de 10 ha et occupent 30% des terres agricoles. Ces grandes exploitations, qui fonctionnent en économie d'échelle, se localisent généralement dans les zones équipées pour l'irrigation.

Taille d'exploitation agricole	Inférieur à 1 ha (petite exploitation)	Entre 1 ha et 10 ha (moyenne exploitation)	Supérieur à 10 ha (grande exploitation)
Nb d'exploitations	146 872	45 041	3916
Nb d'exploitations en %	75%	23%	2%
Terrain agricole occupé en %	20%	50%	30%

Tableau 2.1 - Répartition des exploitations agricoles au Liban. Source : Ministère de l'agriculture, 1999.

Les cultures maraîchères et légumières (pommes de terre, betteraves et légumes), les céréalières (blé et orge) et les arbres fruitiers (agrumes, vergers, vignes, oliviers, etc..) constituent les cultures principales de ces exploitations (figure 2.3). Les terrains cultivés représentent 400 000 hectares selon le dernier recensement du ministère d'agriculture du Liban en 2005. Les arbres fruitiers occupent la première place du territoire libanais avec 59% d'environ. Cette couverture agricole a connu une augmentation de 18% durant cette dernière décennie notamment en plaine de la Beqaa (CNRS-L et FAO, 2011). Les cultures céréalières occupent la deuxième place et représentent 22% des terrains agricoles. Les cultures maraîchères arrivent en troisième place derrière les céréales et représentent 19% environ.

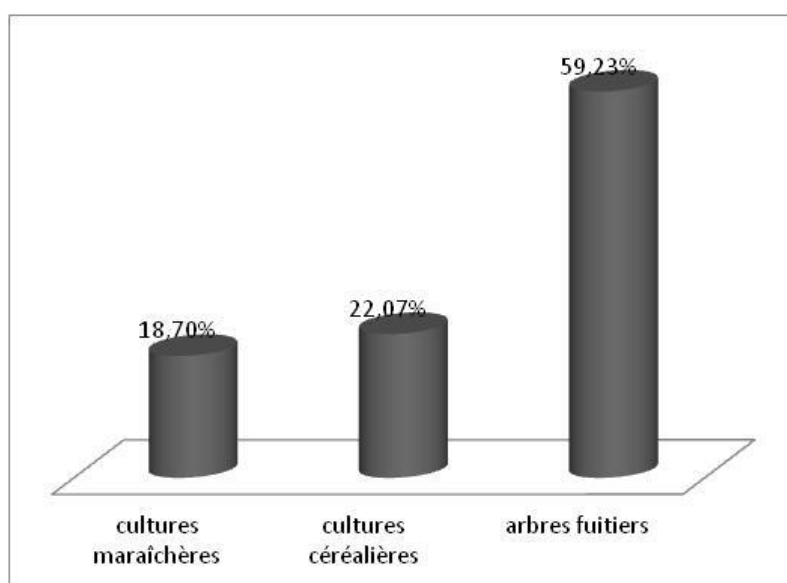


Fig. 2.3 - Répartition des principales cultures au Liban en pourcentage. Source : Ministère de l'agriculture, 2005.

Ces cultures sont réparties sur plusieurs régions agricoles au Liban :

- la zone côtière : ces régions agricoles sont concentrées notamment dans le nord et le sud, au nord, la plaine d'Akkar représentant une superficie agricole de 20 000 ha ; au sud elle s'étend sur 10 000 ha.

Dans ces régions se cultivent principalement les agrumes et les bananiers. Même si historiquement cette région est caractérisée par la plantation des agrumes, la surface cultivée en bananiers a montré une augmentation importante notamment pour sa rentabilité plus élevée. En effet, un hectare de bananier rapporte deux fois plus de bénéfices par rapport à un hectare cultivé en agrumes. En dehors de l'arboriculture, les agriculteurs pratiquent l'assolement sur deux années (maïs – blé ou orge). Une de ces cultures est remplacée par des cultures maraîchères comme l'aubergine et le concombre (Masri et *al.*, 2001).

- La zone montagneuse occidentale (Mont- Liban) : On peut distinguer deux parties selon leur altitude. La première a une altitude moyenne (300 à 1200 m) où se cultivent une série de cultures méditerranéennes en terrasse (oliviers, figuiers, caroubiers, muriers) et de cultures d'Europe (pommiers, poiriers, cerisiers, vigne). La deuxième a une altitude élevée (supérieure à 1200 m) où ne se trouvent que des pâturages de graminées et le vestige des forêts (cèdre, sapin de Cilicie et de chênes à feuilles caduques). Dans cette partie élevée, on peut trouver encore quelques arbres fruitiers tardifs notamment dans les zones bien exposées.

La plaine de la Beqaa : cette région constitue une véritable richesse pour le Liban. Elle est considérée comme la principale source de l'économie agricole du pays. Sur son territoire se situe les deux principales sources d'eau du Liban (l'Oronte et le Litani). Le bassin versant de la plaine de la Bekaa s'étend sur 70 km de long et 10 à 25 km de large (Fayed, 1972). La principale région agricole est située au sud du bassin de Litani, où l'irrigation représente plus de 75% de la consommation d'eau (LARI, 2016). On peut distinguer deux régions agricoles : nord et sud. Dans la partie nord se trouvent des cultures céréalières en majorité (besoin moins d'irrigation). Dans la partie sud se cultivent les arbres fruitiers, les cultures maraîchères et céréalières. Vu son importance dans l'économie agricole du pays, notre zone d'étude a été sélectionnée dans la plaine de la Beqaa afin d'évaluer et de suivre l'impact de la sécheresse sur l'agriculture.

2.3 Présentation de la zone d'étude : un territoire agricole en plaine de la Beqaa

L'unité administrative de la Beqaa couvre près de 40% du territoire libanais. Elle inclut la plaine alluviale, synclinal logé entre les chaînes du Mont-Liban et de l'Anti-Liban, ainsi que les versants secs de ces deux reliefs. Cette plaine méditerranéenne (semi-aride au nord),

constitue depuis l'Antiquité un grenier agricole (Bennafla, 2006). Dans la plaine de la Beqaa, le territoire agricole occupe d'environ 32% de la superficie totale (fig. 2.4). C'est la végétation herbacée (poussée naturellement) qui constitue 44 % de la superficie totale en plaine de la Beqaa (Tableau 2.2). La surface boisée occupe d'environ 15% de la plaine. Concernant la zone urbaine, elle constitue 2 % de la surface totale. La vallée de la Beqaa n'est pas considérée comme une région à taux élevée de population résidente (Administration Centrale des Statistiques, 1997 ; Verdeil *et al.*, 2007).

Types d'occupation Du sol	Surface en eau	Végétation herbacée	Surface boisée	Sol nu	Zone agricole	Zone urbaine
Surface (km ²)	12,94	1885,25	636,19	267,82	1376,38	87,05
Surface (%)	0,30%	44,20%	14,91%	6,28%	32,27%	2,04%

Tableau 2.2 - Répartition de différents types d'occupation du sol en plaine de la Beqaa. Source : CNRS-L, 2011

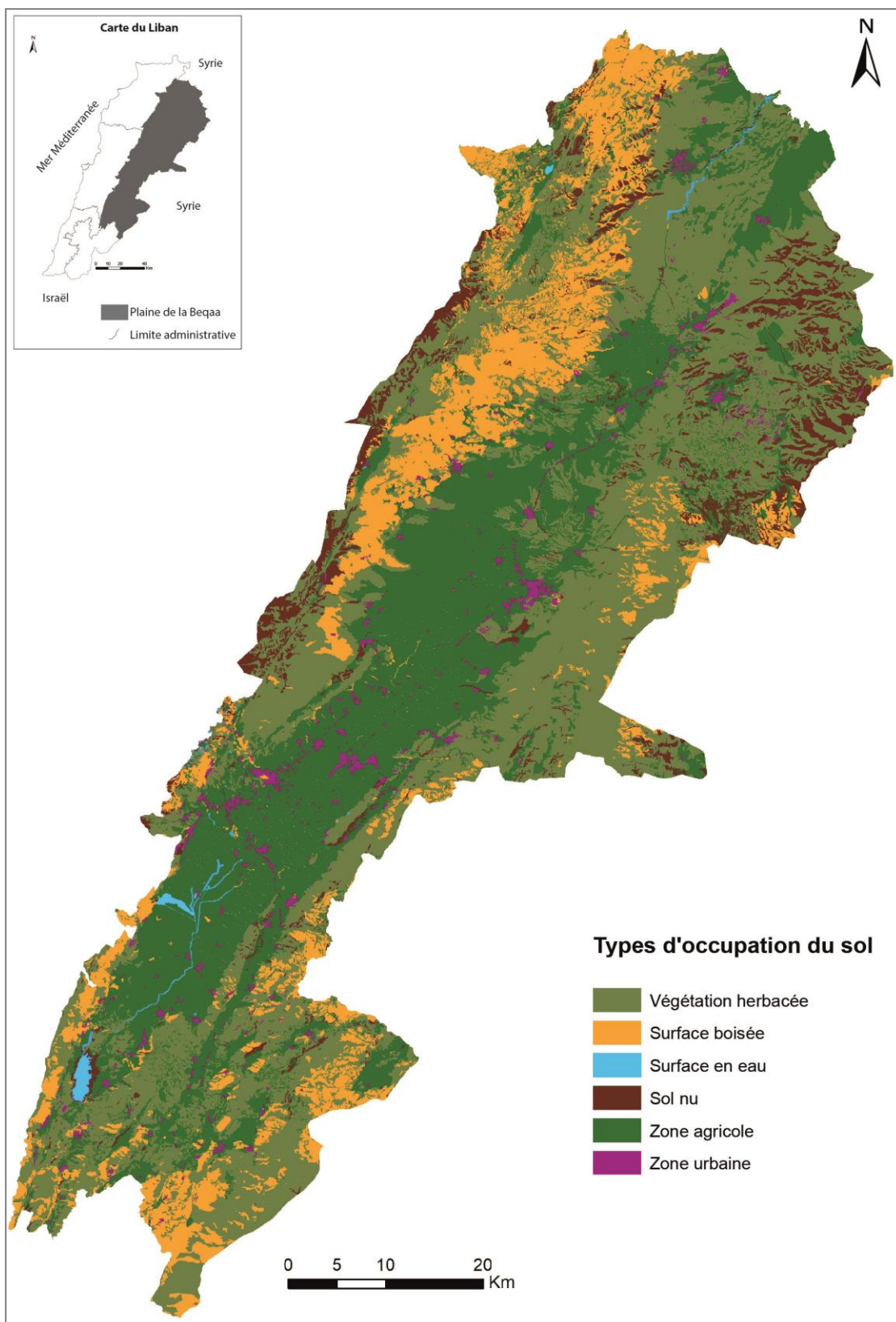


Fig. 2.4 - Répartition spatiale de différents types d'occupation du sol en plaine de la Beqaa. Source : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.

2.3.1 La région d'étude

La partie centrale de la plaine de la Beqaa constitue la zone d'étude principale de ce travail (fig. 2.5). Elle couvre une superficie d'environ 437 km², répartie entre 65 villes qui sont délimitées par les reliefs du Mont-Liban à l'ouest et ceux de l'Anti-Liban à l'est. La superficie des villes varie entre 0,005 km² et 29,9 km² (figure 2.5). La plaine centrale de la Beqaa diffère d'autres régions de la plaine, par son mitage urbain plus concentré, une installation de firmes agro-industrielles modernes et par une présence d'économie de transit (Bennafla, 2006).

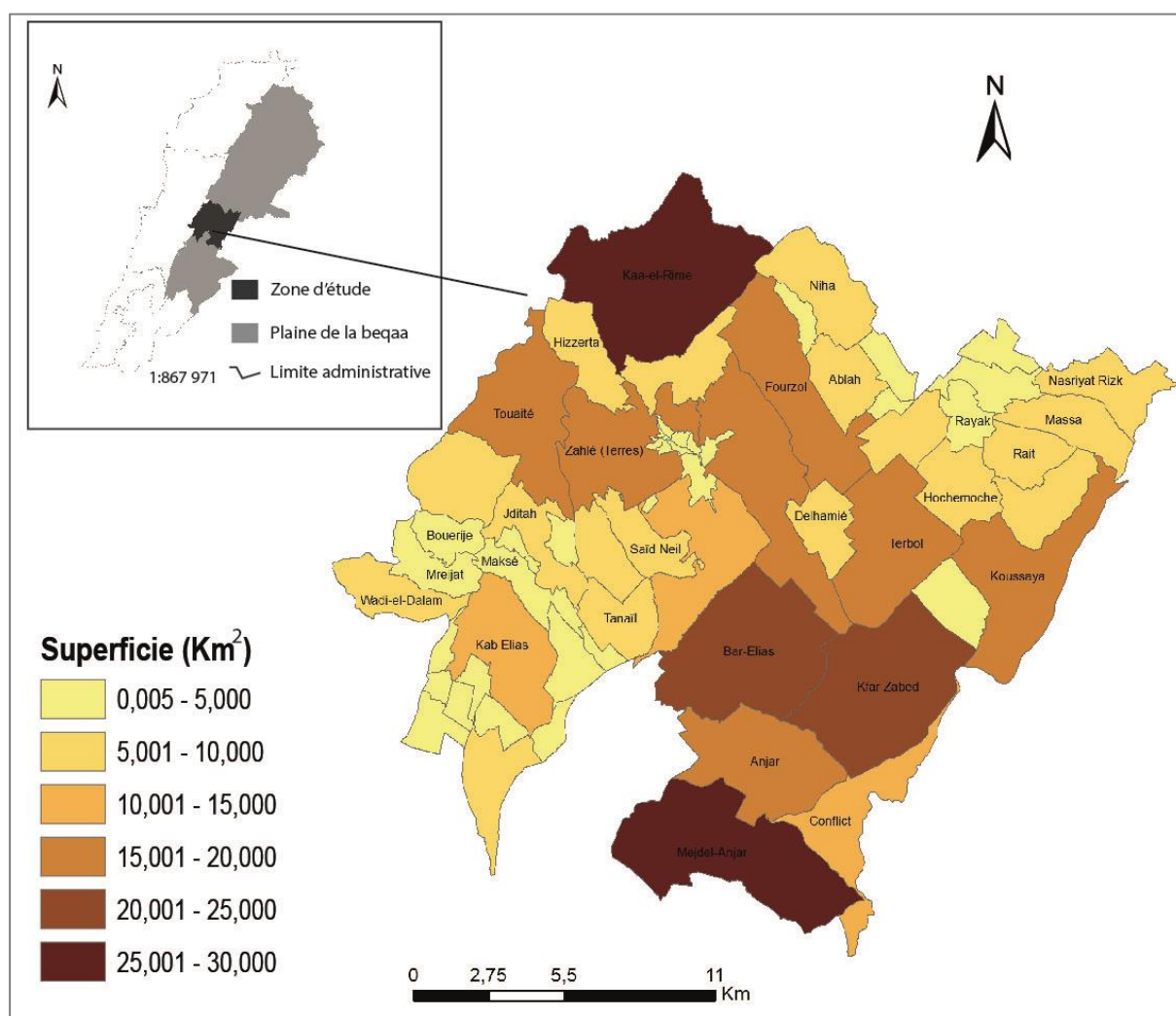


Fig. 2.5 - Délimitation de la région d'étude (Beqaa centrale) au sein de la plaine de la Beqaa. Source de données : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.

En plus, elle est considérée comme la zone la plus active en agriculture dans la plaine de la Beqaa, où son territoire agricole occupe plus 57 % de sa superficie totale (fig. 2.5). La végétation herbacée vient derrière et occupe 27,7% environ (tableau 2.3).

Types d'occupation Du sol	Surface en eau	Végétation herbacée	Surface boisée	Sol nu	Zone agricole	Zone urbaine
Surface (km ²)	0,75	120,9	28,06	11,47	250,64	24,86
Surface (%)	0,17%	27,69%	6,43%	2,63%	57,40%	5,69%

Tableau 2.3 - Répartition de différents types d'occupation du sol en plaine de la Beqaa. Source : CNRS-L, 2011. Calcul de données par SIG: T. NASSER – CEDETE, 2017.

Ainsi, la figure 2.6 représente la répartition spatiale de différents types d'occupation du sol dans notre région d'étude. On remarque que la zone agricole se concentre en majorité au centre de la région d'étude.

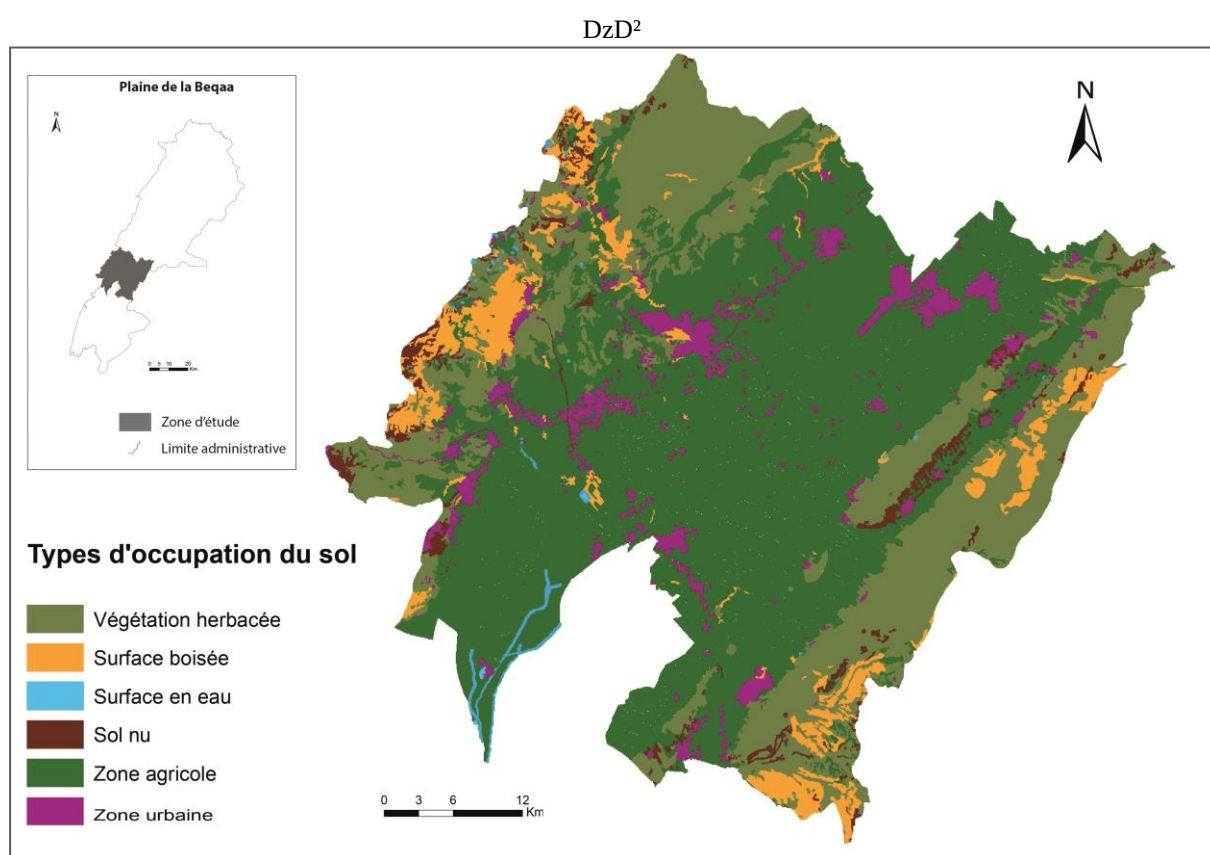


Fig. 2.6 - Répartition spatiale de différents types d'occupation du sol dans la zone d'étude (Beqaa centrale). Source : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.

2.3.2 Le paysage agricole de la région d'étude

Les cultures céréalières, les cultures maraîchères, la vigne et les arbres fruitiers à feuilles caduques sont les cultures dominantes dans la région d'étude (fig. 2.7). La majorité des arbres fruitiers cultivés se situent aux deux extrémités de la plaine. La partie centrale est dominée par

les cultures céréalières et maraîchères (Blé, orge, pomme de terre, légumes), que l'on désignera par les cultures de plein champ (CNRS-L, 2011).

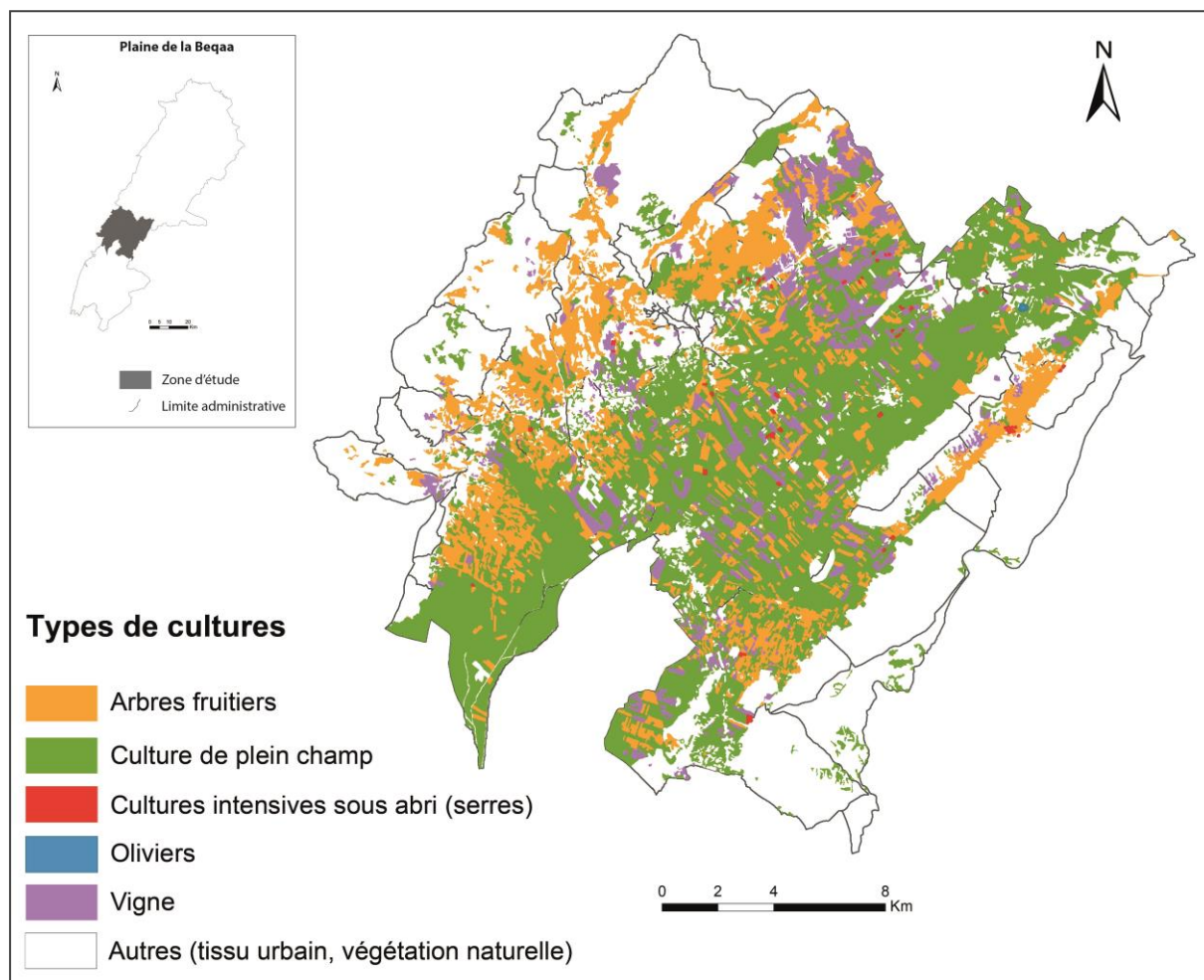


Fig. 2.7 - Répartition spatiale de différents types de cultures dans la zone d'étude (Beqaa centrale). Source : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.

Le tableau ci-dessous révèle la superficie des différents types de cultures selon les données satellitaires fournies par le centre de télédétection du Liban (2011).

Types de cultures	Arbres fruitiers	Cultures de plein champ	Cultures intensives	Oliviers	Vigne	Autres	Totale
Surface (km ²)	68,94	144,90	0,46	0,042	27,8	8,5	250,64
Surface (%)	27,51%	57,81%	0,18%	0,02%	11,09	3,39	100%

Tableau 2.4 - Répartition de différents types de cultures dans la zone d'étude. Source : CNRS-L, 2011. Calcul de données par SIG: T. NASSER – CEDETE, 2017.

En effet, la superficie du territoire agricole couvre une superficie de 250 km² et elle est dominée par les cultures suivantes (tableau 2.4):

Les cultures de plein champ, qui couvrent plus de la moitié de la surface agricole, désignent les cultures céréalières, maraîchères, légumineuses, et fourragères. Cependant, dans notre région d'étude, ce sont les cultures céréalières et maraîchères qui dominent la surface agricole. La superficie exacte de chacune de ces cultures est variable selon la saison agricole. Elle dépend principalement de la disponibilité des ressources en eau et de la demande des marchés. Les cultures maraîchères se répartissent entre tubercules (pomme de terre en majorité, betteraves, oignon, carottes, etc...) et légumineuses (haricots, lentilles, melons, tomates et pastèques). Il faut noter qu'aujourd'hui, les cultures maraîchères, grande consommatrice d'eau, rencontrent des difficultés à cause de la sécheresse (LARI, 2016).



Photographie 2.1 - Culture maraîchère à gauche (laitue) et à droite (pomme de terre) dans la ville d'Ablah (Beqaa centrale). Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017.

Les cultures céréalières se répartissent principalement entre le blé (70%) et l'orge (30%). Le blé a connu une évolution dans la région (Photographie 2.3), notamment depuis que le gouvernement libanais a arrêté le soutien de la culture des betteraves. Cela a permis de cultiver les surfaces anciennement occupées par des betteraves en blé. Aujourd'hui, le blé en Beqaa centrale occupe presque 28% de la surface agricole utile (l'enquête menée auprès du directeur de LARI, 2016).



Photographie 2.2 - La culture du blé dans la ville de Fourzol. Cliché : T. NASSER - CEDETE, 2017

Les arbres fruitiers sont généralement à feuille caduques (Photographie 2.3): les pommiers, poiriers, pêchers, amandiers en sont les principaux composants. Cette culture occupe 69 km² soit 27,5% du territoire agricole de la région d'étude.



Photographie 2.3 - Arbres fruitiers à gauche (abricotiers) et à droite (amandiers) dans la ville de Fourzol (Beqaa centrale). Cliché : T. NASSER - CEDETE, 2017.

Malgré sa place importante dans la surface agricole libanaise (57 000 ha environ), les oliviers ne dépassent pas le 1% dans notre région d'étude. L'olivier constitue la principale culture dans d'autres régions libanaises (nord et sud) où elle joue un rôle primordial dans l'industrie alimentaire notamment la production d'huile et de savon.



Photographie 2.4 - Oliviers dans la ville de Rait (Beqaa centrale). Cliché : T. NASSER - CEDETE, 2017.

La culture de vigne (photographie 2.5) est pratiquée principalement dans la plaine de la Beqaa où on retrouve 67% de la surface totale en vignobles au Liban (Fadlalah, 2001). Cette culture occupe 11% de la zone agricole de notre région d'étude. Et on distingue deux types de production : 75% en raisin de table (75%) exporté majoritairement vers les pays du golf (Montigaud *et al.*, 2004) et 25 % en raisin de cuve (Ministère de l'agriculture libanaise, 2005).



Photographie 2.5 - La culture de vigne dans la ville de Fourzol (Beqaa centrale). Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017

Le parcellaire agricole est très hétérogène. Cette hétérogénéité concerne la superficie des parcelles cultivées, ainsi que leur agencement et organisation spatiale (photographie 2.6). On peut trouver des parcelles agricoles de faible superficie de l'ordre de 500 m² et d'autres ayant

des superficies pouvant parfois atteindre 10 ha. En effet, il existe de gros propriétaires disposant de moyens financiers plus importants que les autres. Ces propriétaires ont souvent une autre activité économique et investissent un capital dans l'agriculture. En ce qui concerne l'irrigation, ces gros propriétaires disposent de forages particuliers ainsi que de techniques modernes (goutte à goutte et aspersion). En revanche, les petits propriétaires disposent d'une capacité d'investissement limitée. Ils irriguent de manière traditionnelle (gravitaire). A l'est et à l'ouest se concentre les cultures annuelles, parfois en sous étages de plantations arborées. La vigne se retrouve en petites parcelles éparpillée notamment dans la partie intérieure de notre région d'étude.



Photographie 2.6 - Mise en évidence de l'hétérogénéité parcellaire de point de vue aménagement et superficie.
Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017.

2.3.3 Le climat

Les données climatiques ont été collectées par le réseau de stations météorologiques (une dizaine de stations expérimentales) qui sont réparties sur l'ensemble du territoire de la plaine de la Beqaa. On rappelle que le réseau de stations a été fortement endommagé entre 1975 – 1990 (période de la guerre civile au Liban). Depuis quelques années, ce réseau a été renforcé dans le but de développer des activités de recherche visant à résoudre les problèmes des agriculteurs (LARI, 2016). Ces données ont été spatialisées sur la plaine par le centre de la télédétection du Liban.

➤ La pluviométrie

La pluviométrie en plaine de la Beqaa varie de moins de 200 mm à plus que 1400 mm (Atlas climatique du Liban, 2016). La période des précipitations se situe généralement entre la deuxième moitié du mois d'octobre et le mois d'avril (Baldy, 1959 ; Fadlallah, 2001). Les précipitations sont particulièrement abondantes du mois de novembre jusqu'au mois de février.

Ainsi, le niveau des précipitations est très contrasté selon les zones dans la Beqaa (figure 2.8). En effet, Il ne dépasse pas les 400 mm dans la zone de l'intérieur du fleuve Assi, et atteint les 800 à 1000 mm sur les côtés méridionales (sud), centrales et septentrionale (nord). Ce taux des précipitations varie entre 500 mm et 1200 mm dans les zones de l'intérieur (Hasbani et Litani), et dépasse souvent les 1400 mm dans les montagnes du Nord.

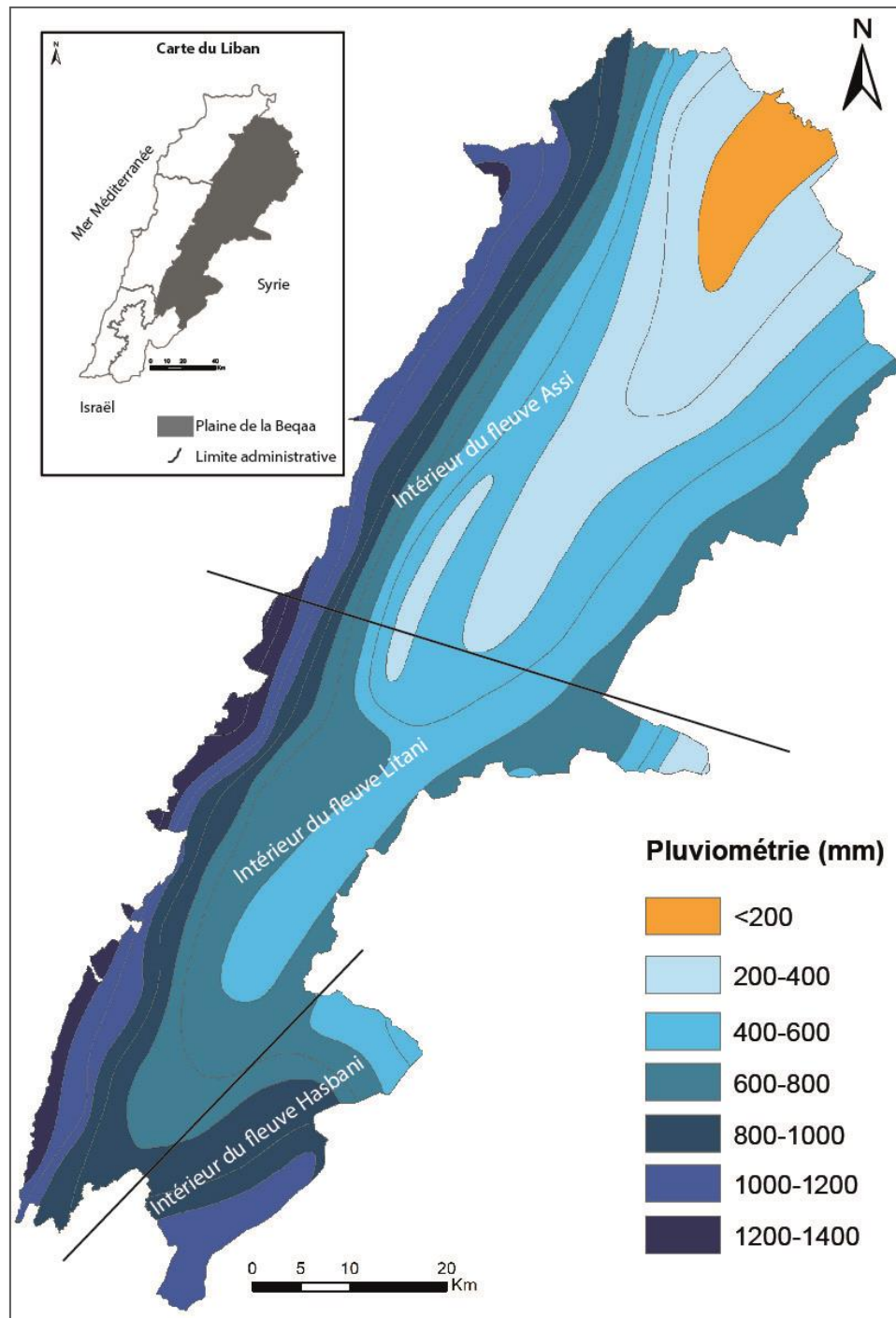


Fig. 2.8 - Répartition spatiale de la pluviométrie en plaine de la Beqaa. Source : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

Le taux des précipitations dans notre région d'étude varie entre 400 mm et 1400 mm (figure 2.9). Ce taux augmente progressivement de l'est vers l'ouest de la région.

Cette variation des précipitations est due principalement à la présence des reliefs. En effet, le Mont-Liban empêche la pénétration des masses d'air humide provenant de la mer méditerranée. Ainsi les versants Ouest du Mont-Liban qui affrontent ces masses d'air reçoivent une quantité de précipitations plus importante que les versants Est (Ministère de l'agriculture, 2005).

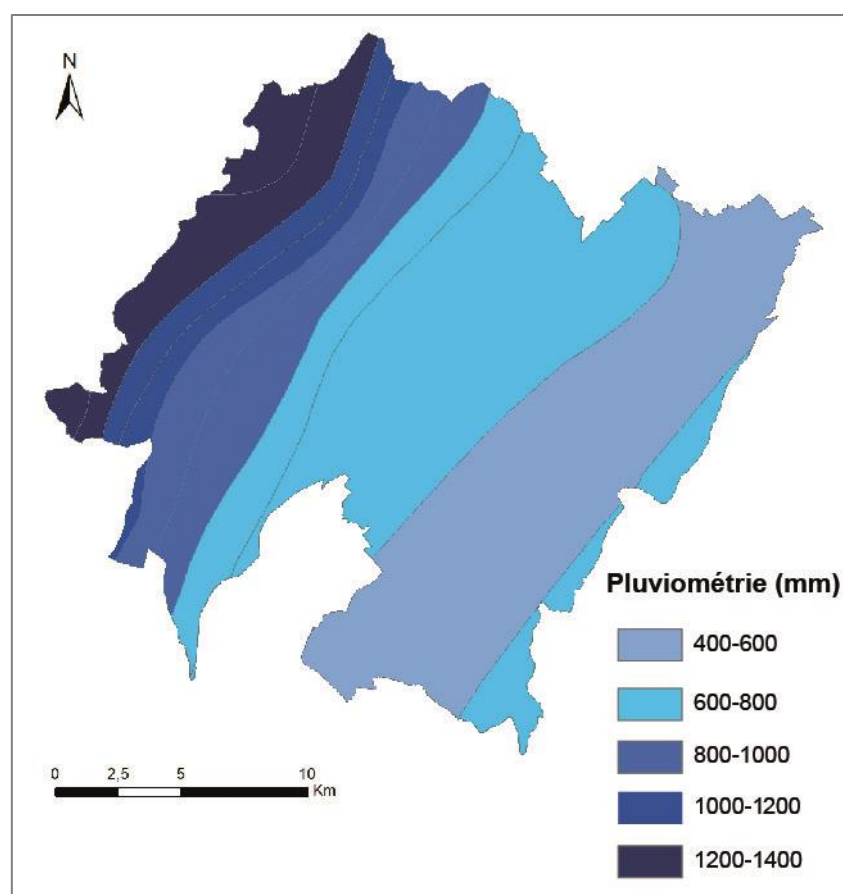


Fig. 2.9 - Répartition spatiale de la pluviométrie en zone d'étude. Source : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

Enfin, la saison sèche, longue et accentuée au Liban, joue défavorablement notamment en Beqaa où les précipitations jouent un rôle primordial dans la recharge de ses nappes souterraines et l'alimentation des rivières (Masri et *al.*, 2001). Cela est indispensable pour l'agriculture, dépendante de ces ressources, dans la Beqaa centrale.

➤ La température

Comme les précipitations, la température en plaine de la Beqaa dépend fortement de l'altitude des deux chaînes montagneuses. La température moyenne en plaine de la Beqaa varie entre 14 et 16°C, à l'exception des régions de haute altitude où la moyenne annuelle est autour de 12°C. Dans notre région d'étude, la température moyenne annuelle est autour de 15,5°C. Le tableau 2.5 montre les différentes températures relevées de deux stations situées dans notre région d'étude.

Station	Tal Amara (Zahlé)	Rayak
Altitude	905	920
Température moyenne annuelle (°C)	16	15
Température minimale (°C)	0,3	0,4
Température maximale (°C)	37	36,5
Fréquence de jours très chauds (T > 35°C)	24	15

Tableau 2.5 - Température mesurée par deux stations météorologiques situées dans la zone d'étude. Source : Atlas climatique du Liban, 2016.

Les deux stations montrent une légère différence dans le degré de température pour les deux villes. Cependant, il existe une différence au niveau de la fréquence des jours très chauds où la température dépasse le seuil de 35°C. La station de Tal Amara enregistre 24 jours tandis celle de Rayak enregistre 15 jours. Cela peut être dû à l'altitude élevée du Mont-Liban qui forme un rude obstacle naturel empêchant la circulation de l'air humide. Depuis 1974, cette fréquence de jours de fortes chaleurs ne cesse d'augmenter (M. Traboulsi, 2010 ; Shaaban *et al.*, 2015). Cela peut accroître l'intensité de la sécheresse et parfois la vulnérabilité à la désertification dans les régions arides et semi-arides, ce qui cause des effets néfastes sur la productivité du sol, le rendement de cultures, la qualité et le niveau des eaux souterraines. La figure 2.10 révèle la répartition de la surface de notre région d'étude selon l'ampleur du risque de la désertification.

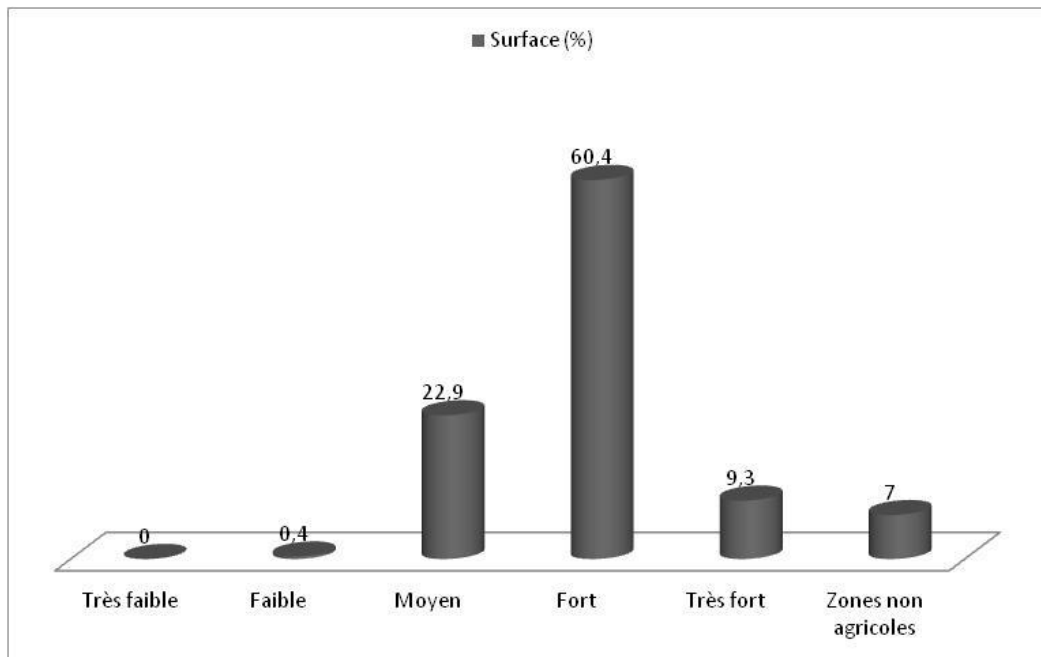


Fig. 2.10 - Répartition de la surface de la région d'étude selon l'ampleur du risque de désertification (%).
Source : Ministère de l'agriculture du Liban, 2016.

La vulnérabilité à la désertification est très élevée dans notre région d'étude : 69% de la surface montre une vulnérabilité supérieure à la moyenne.

2.4 Typologie des sols

La carte de typologie des sols du Liban a été générée à partir des travaux menés en 1956 au sein de Ministère de l'agriculture libanaise par Bernard GEZE (1956). Elle permet la reconnaissance et le classement spatial de différents types de sol (figure 2.11). Dans notre région d'étude, on en retrouve sept :

- Les sols rouges repartissent sur 48% de la surface totale de région. Ce sont des argiles résiduelles de décalcification, rubéfiées ayant une réaction proche de la neutralité (pH 6.7 - 7.3). Les teneurs en éléments assimilables et en matières organiques sont très variables, mais la moyenne demeure favorable à une utilisation agricole.

- Les sols jaunâtres de montagne, analogues des sols rouges, constituent seulement 3,4% de la surface. Ce sont des sols argileux, légèrement acide (pH 6.4 - 7.1). Les teneurs en éléments assimilables et en matières organiques sont très favorables à une utilisation agricole. Leur localisation au niveau des hautes montagnes les prédestine principalement au reboisement.

- Les sols sableux représentent 1% de la surface et sont généralement pauvres en éléments assimilables et matières organiques. Leurs propriétés physiques sont très favorables aux cultures maraîchères et fruitières. Leur vocation est principalement forestière.

- Les sols de mélanges représentent 6% et sont constitués par une succession et une alternance de grès, sables, argiles, marnes, calcaires et basaltes anciens. Ces sols présentent un parfait équilibre entre les divers constituants physiques, et les teneurs consistantes et équilibrées en éléments assimilables. La réaction de ces sols est toujours neutre (pH 6.9 - 7.1). Ils sont convenables à toutes les cultures, et leur discontinuité entrave leur exploitation d'une manière extensive et mécanique. Ils constituent le domaine des plantations fruitières par excellence.

- Les sols noirs ou gris et sols tourbeux (7% environ) sont de teintes très foncées. Leurs propriétés physiques sont souvent équilibrées et varient largement en fonction des conditions locales. La réaction est toujours alcaline (pH 7.2 - 8). Les teneurs en éléments assimilables sont généralement moyennes.

- Les sols steppiques et subdésertiques (17%) qui se localisent particulièrement dans la Beqaa. Ils sont moyennement riches en éléments assimilables et la présence de matières organiques est très faible.

- Les sols sur alluvions (3%) sont éparpillés sur l'ensemble du territoire libanais, sur des surfaces relativement réduites. Ces sols présentent des caractères variables, et ont une réaction alcaline. Leur teneur en éléments assimilables est satisfaisante alors que le taux de matière organique est nettement déficitaire.

Généralement, la géologie du sol libanais y compris celle de la région d'étude (annexe 2), est dominée par un substrat karstique qui favorise l'infiltration de l'eau issue des précipitations, pour atteindre la nappe phréatique (GEZE, 1956; Davis et Deweist, 1996; Bou Kheir, 2002; Riachi, 2012). Cependant, l'eau qui tombe à la surface du sol ne détermine pas automatiquement un transfert en profondeur. Ce processus peut être très lent et peut prendre plusieurs mois pour que l'eau s'infilte jusqu'à la nappe (Beauchamp, 2006). Au Liban, la pluie est forte ce qui ne laisse pas le temps suffisant pour que le sol absorbe toute l'eau tombée. Cela permet d'apparaître du ruissellement qui est défavorable pour la végétation qui favorise plutôt l'infiltration.

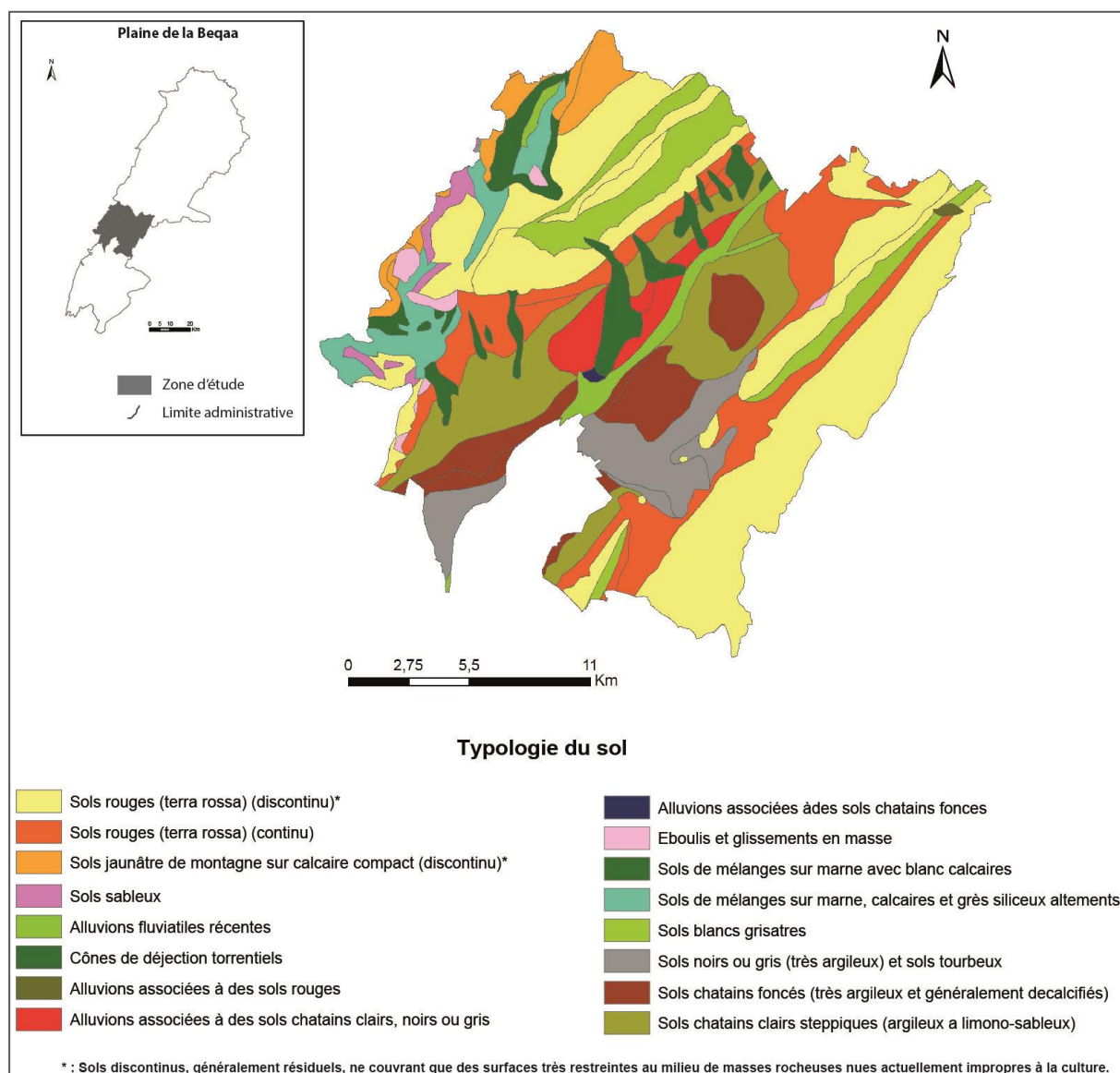


Fig. 2.11 - Répartition des sols dans la Beqaa centrale. Source : GEZE, 1956. Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018.

2.5 Contextualisation de la situation hydrique au Liban

La situation hydrique au Liban est certainement mieux que ses pays voisins. Néanmoins, les ressources en eau ont été mal gérées vu la baisse du débit des rivières et la qualité des eaux de surface et souterraines (Shaban, 2008). On ajoute à cette mauvaise gestion, la variation importante des précipitations saisonnières et interannuelles dans le bassin méditerranéen ces dix dernières années (IPCC, 2007). Au Liban, les précipitations annuelles ont diminuées de 200 mm et la superficie enneigée a été réduite de 500 km² (Shaban, 2009). Dans le même temps, les besoins en eau ne cessent d'augmenter pour répondre à la demande de la

population. Les contraintes climatiques, gestionnaires et démographiques posent des problèmes pour les ressources en eau et le secteur agricole au Liban. Ces problématiques ont été abordées dans cette section

2.5.1 Les contraintes climatiques

Le Liban, par sa position géographique, est caractérisé par un climat méditerranéen qui évolue vers une altération sensible de pluviosité, du couvert végétal et des sols. Le pays est caractérisé par une saison pluvieuse qui s'étale entre octobre et mai. En été, l'influence des hautes pressions subtropicales empêchent toute ascendance d'air et provoquent une sécheresse absolue de juin à septembre (Traboulsi, 2010). Les particularités de la topographie, ainsi que la présence du désert syrien au Nord, ont créé une variante de microclimat à l'intérieur du pays avec des contrastes, dans la distribution des températures et des précipitations. En effet, les totaux pluviométriques annuels, qui sont autour de 800 mm sur le littoral, s'élèvent à plus de 1800 mm sur les sommets du Mont Liban pour tomber jusqu'à 200 mm dans la partie Nord de la plaine de Bekaa. Cette variabilité spatiale est compliquée par une variabilité interannuelle qui croît dans le sens inverse de la distribution de la pluviométrie moyenne, avec des nuances locales liées à la topographie (Traboulsi, 2010). Ce phénomène rend les ressources hydriques en général et le secteur agricole en particulier fortement vulnérables surtout dans les régions où le manque d'eau se fait cruellement sentir.

La sécheresse estivale est renforcée par des températures élevées. En effet, des pics de fortes chaleurs (41,3 °C le 9 juin 2002 à Beyrouth) sont enregistrées non seulement pendant l'été mais aussi en printemps et l'automne (Adjizian et *et al.*, 2013).

Différentes études nous laissent penser que le climat de la Méditerranée tend vers l'aridification. Dans la région méditerranéenne, 60 % de la population est dite « pauvre en eau » (Hallegatte *et al.*, 2008 ; Avitem, 2018). Le Liban est menacé par une augmentation des températures de 1.5° C à 2°C d'ici la fin de ce siècle (Bolle, 2002 ; El Ess, 2012 ; Traboulsi, 2014 ; Shaban *et al.*, 2015) et de 2°C à 5°C selon le nouveau rapport du GIEC (2013). Ainsi, depuis quelques années, le taux de précipitations moyennes a diminué de 200 mm par an (Shaban *et al.*, 2008) et une chute de 24% est estimée à la fin du siècle d'après les modèles globaux du GIEC (scénario A1B). Cette augmentation de température a conduit à une diminution de 25% de la superficie enneigée passant de 2500 km² à moins de 2000 km², (Shaban *et al.*, 2008).

La figure 2.12 révèle l'augmentation de la température moyenne annuelle et les jours de fortes chaleurs sur la période de 1974 à 2010. Cette tendance à l'augmentation est détectée par le test Mann-Kendall⁵ (Sneyers 1990).

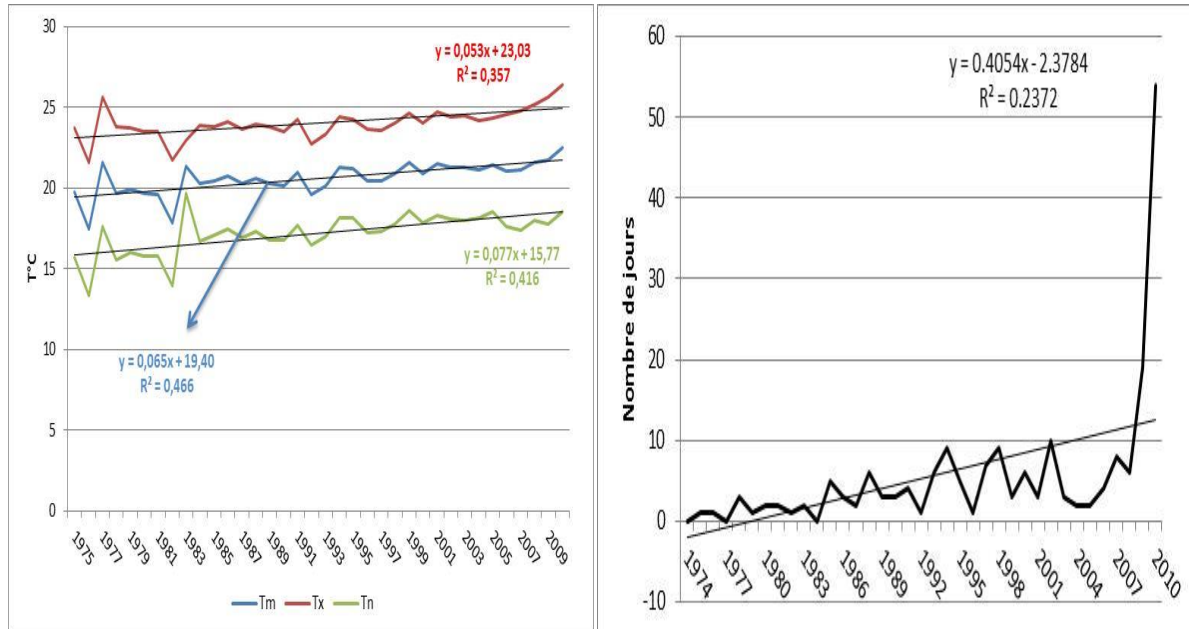


Fig. 2.12 - Tendance à la hausse des températures annuelles moyennes (TM), minimales (Tn) et maximales (Tx) (à gauche) et évolution des jours de fortes chaleurs (à droite) à Beyrouth. Source : Changement climatique au Moyen-Orient, université Saint Joseph (El Ess, 2012).

La figure 2.13 montre la baisse des précipitations annuelles au Liban. Cette baisse est d'environ 30% durant la période 1961-2009 (M. Traboulsi, 2010).

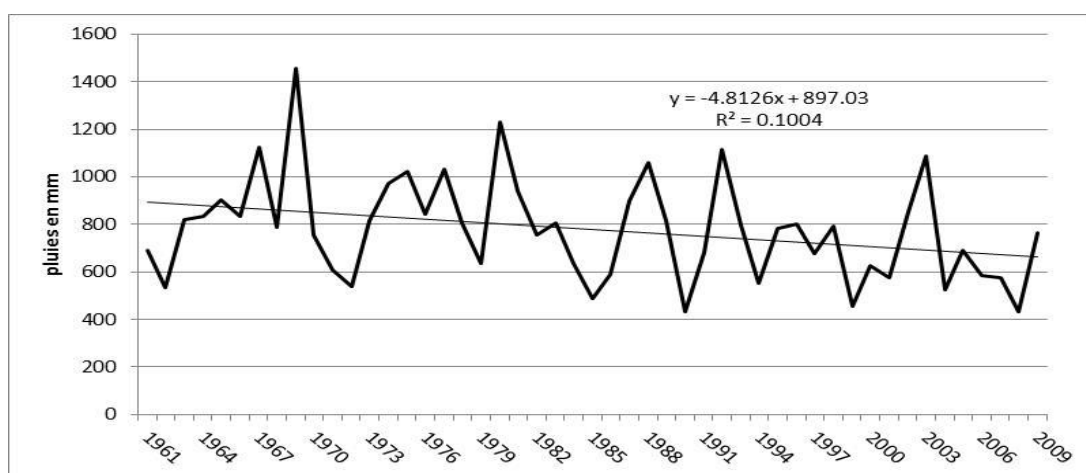


Fig. 2.13 - Evolution des précipitations annuelles au Liban durant la période 1961– 2009.
Source : Aéroport international du Beyrouth, 2010.

⁵ Est un test non paramétrique sur les rangs permettant de détecter la signification d'une tendance.

Ces conditions climatiques évolutives traduites par une hausse des températures, une augmentation du nombre de jours de forte chaleur, un prolongement des saisons sèches et une baisse de précipitations jouent un rôle négatif sur les ressources hydriques et par la suite sur les activités socio-économiques comme l'agriculture. Ainsi ce secteur, élément crucial de l'alimentation et important source de revenu pour de nombreux habitants, est en danger et serait forcément touché par la sécheresse (OLJ, 2014). De plus, les cèdres, symboles du Liban depuis des siècles, sont également menacés par ces contraintes climatiques (AFP, 2018). La sécheresse est devenue une réalité au Liban et tout plan d'aménagement doit prendre en compte ce phénomène.

2.5.2 Une richesse mal investie : deux fleuves libérés

Dans les pays du Nord, la mission hydraulique s'est terminée dans les années 1970 (Allan, 2005 ; Blanc, 2006 ; Molle et Floch, 2008 ; Riachi et Chaaban., 2012), alors qu'au Liban la guerre civile (1990-1975) a retardé le développement des infrastructures hydrauliques notamment la construction des canaux d'amenée d'eau pour l'irrigation. Dépourvu d'infrastructures, sur un total de 9,6 milliards de m³ de précipitations annuelles, seuls 1,3 milliard sont utilisés, le reste s'évaporent ou se perdent dans la mer (Blanc, 2006). Depuis l'indépendance du Liban en 1943, les choix de politiques publiques n'ont pas privilégié la mise en place d'une politique de gestion de l'eau. En effet, deux grands fleuves, libérés et peu investis, prennent source sur le territoire libanais (figure 2.14).

Le premier est le fleuve de l'Oronte (Nahr el Assi) qui prend source au Liban avant de traverser la Syrie puis de déboucher en Méditerranée via la Turquie. Ce fleuve aurait pu participer beaucoup mieux au développement de l'irrigation des zones agricoles grâce à son débit important. En effet, sur un débit de 400 millions de m³/an en moyenne, l'état libanais ne prélève que 80 millions de m³/an (Blanc, 2006 ; Karaa et Karam, 2000). Le deuxième fleuve est le Litani, source de conflit avec Israël, où il a fallu attendre le début des années 1990 pour que le Liban puisse investir cette ressource hydrique à l'intérieur de son territoire. En effet, le Liban a construit un canal d'adduction, nommé canal 900, du fait de son altitude de 900 m. Ce canal, mis en service, irrigue 2000 hectares.

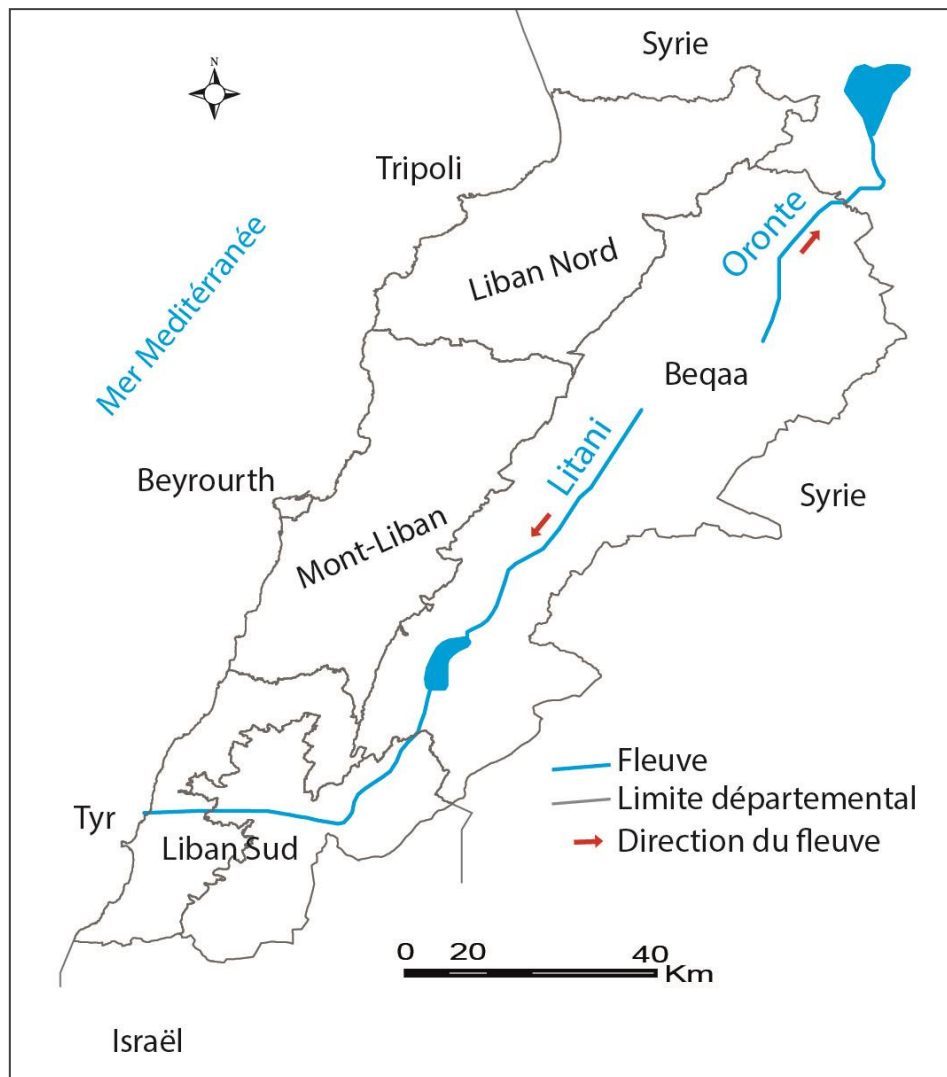


Fig. 2.14 - Circulation des fleuves Oronte et Litani. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.

Le déficit d'infrastructure, qui traduit le manque de politique de gestion d'eau, empêche de procéder à des prélèvements hydriques plus importants sur ces deux fleuves importants.

Cependant, le Liban a connu trois phases dans l'évolution hydraulique (Riachi, 2012) :

- Le début lors du mandat français (1920 – 1943) : constitue la naissance de la mission hydraulique grâce aux ingénieurs locaux qui ont occupé des postes clés dans les institutions de planification et ont appelé à doter le pays d'un réseau d'infrastructure moderne. Parmi ces ingénieurs figure le travail d'Ibrahim Abd el al (1948), figure incontournable de la planification des eaux, particulièrement rapporté dans son ouvrage consacré au bassin de Litani publié en 1948, qui mêle l'hydrologie à l'agriculture et au développement du pays.

- L'apogée post – indépendance (1943 -1975) : durant cette période, les institutions comme le ministère d'agriculture (1955) et le ministère des ressources hydrauliques et

électriques (1966) ont été créés. Ainsi, l'efficacité des institutions de planification de l'eau atteint son apogée dans cette période. Aujourd'hui plus que la moitié du réseau d'eau remonte à cette époque (Corail-ICEA, 2004 ; Fawwaz, 2007). On note particulièrement la première phase du projet Litani (1960 - 1968) qui a été exécutée, en collaboration avec l'EDF, comprenant le barrage de Qaraoun. Ainsi, pour l'irrigation, le projet du canal 900 (nommé pour son altitude de 900 m) a été mis en construction en 1970 afin d'irriguer une partie de la Beqaa sud (2000 hectares). Ce canal a été détruit en 1982 lors de l'invasion israélienne et reconstruit en 1990.

- Une réanimation contemporaine (à partir des années 2000) : cette phase ne constitue pas un changement radical dans l'organisation et la planification des ressources hydriques au Liban. Elle est réanimée en 2000 par la réforme 221/2000 et un programme d'intensification du stockage des ressources hydriques.

Toutefois, il existe deux étapes intermédiaires, l'étape de déclin causée par la guerre (1975-1990) et l'étape de reconstruction qui a débuté en 1990.

En plus à cette stagnation d'évolution en infrastructure, le changement climatique, traduit par une chute de 16% en pluviométrie et un débit de fleuve divisé par deux, alourdit le besoin de gérer les ressources hydriques dans le pays (Shaban, 2009). Aujourd'hui, le besoin en eau dans le pays est souvent compensé par des forages, réduisant sévèrement le capital hydrique souterrain des aquifères (Riachi, 2012). Alors que 647 puits sont publics (5 forages / km²), 80% sont illégaux selon la banque mondiale (2009a) et 50% selon une autre étude faite par le ministère de l'Energie et de l'Eau en 2011.

2.5.3 Politique de gestion de la ressource hydrique non appliquée

Les textes juridiques sont constitués d'un ensemble de lois, de décisions et de décrets. La législation concernant l'eau a montré une stagnation dans l'évolution, compte tenu du petit nombre de lois qui ont été publiées. En effet, depuis 1876, date de la première loi, jusqu'à 2010, seulement 11 lois sur l'eau ont été publiées (tableau 2.6). Cela montre une lacune dans la gestion des ressources d'eau dans la région.

La première loi, publiée en 1886, date de l'époque ottomane et indique la distance à respecter entre les puits. Il s'agit de fixer un rayon de 27 m autour du puits et dans lequel il est interdit d'effectuer un autre forage. Cette loi est appliquée jusqu'à aujourd'hui. Elle a été critiquée par Castany parce qu'elle néglige une notion scientifique de base pour les aquifères : celle du

cône de dépression du puits. En effet, lors du pompage, le puits trace un cône de dépression sur la surface piézométrique qui varie selon le débit du puits et la puissance de la pompe (Castany, 1982). Cet auteur ajoute que le cône tracé peut dépasser le rayon de 27 m en présence d'une pompe puissante, ce qui influence le niveau piézométrique des puits du voisinage.

La loi de 1926 autorise tout puit foré dans des propriétés privées avec un débit inférieur à 100 m³/jour et une profondeur qui ne dépasse pas 150 m à condition que l'eau exploitée n'appartienne pas à une rivière ou une source.

La loi de 1963 annule la loi de 1926 en interdisant le forage de puits dans la région de la Beqaa sauf pour des recherches scientifiques. Cette loi avait pour but de conserver l'eau des terrains qui avaient déjà été irrigués et dont les puits étaient asséchés.

1876	Les lois du journal des dispositions judiciaires de l'Empire
1925	Le tonique 144 concernant les biens publics et ses dispositions
1926	Le tonique 320 et ses modifications concernant la conservation et l'utilisation de l'eau du domaine public
1943	Le décret-loi 340 et ses modifications – le code pénal
1963	La loi 3 concernant l'interdit de forage dans les propriétés privées
1966	Le décret 5469 et ses modifications concernant l'organisation du ministère des ressources en eau
1970	Le décret 14438 et ses modifications concernant l'organisation du forage des puits pour l'eau souterraine et ses utilisations
1972	La loi exécutée par le décret 6650 : la délimitation des propriétés de la direction générale des ressources en eau et de l'électricité
1997	La loi 623 concernant la dureté dans l'application des sanctions en ce qui concerne les crimes d'abus de l'électricité, du téléphone et de l'eau
2000	La loi 221 et ses modifications concernant l'organisation du secteur de l'eau
2010	Le tonique 118 concernant la mécanique de décision des demandes des autorisations par le décret pour la permission de l'exploration et l'utilisation de l'eau souterraine

Tableau 2.6 - Les textes juridiques concernant les lois sur l'eau. Source : Ministère de l'Énergie et de l'Eau, 2011.

La loi de 2000, vient compléter la loi de 1970 et réglementer les puits qui ont des profondeurs supérieures à 150m. Cette loi exige de fournir des informations concernant le lieu du forage,

le type d'activité agricole sur le terrain. Toute demande doit être accompagnée par des cartes administratives et topographiques.

La loi sur la gestion d'eau de 2010 exige de suivre un nouveau processus formé de 9 points afin de permettre aux agriculteurs de forer un puits (Annexe 3).

Malheureusement, le manque de suivi et de contrôle de la part du Ministère de l'Énergie et de l'Eau libanais de ces lois ont encouragé certains agriculteurs, surtout au cours de 10 dernières années à forer des puits illégaux dans les zones agricoles avec une profondeur supérieure à 150 mètres pour assurer leur besoin et lutter contre la pénurie des ressources en eau. Ainsi, certains agriculteurs continuent à forer des puits proches et effectuer des pompages excessifs sans tenir compte des conséquences apportées sur les nappes phréatiques (MoA et LARI, 2008). Le responsable régional ajoute que l'application de ces lois nécessite des compétences techniques de contrôle de forages et une volonté politique sans prendre en considération l'aspect de clientélisme. Le manque des lois précisant la quantité d'eau extraite des puits entraîne une augmentation de l'intensité des périodes sèches. Ainsi, l'inapplication de certaines lois pourrait porter sur l'aspect financier et le manque de matériel.

2.5.4 Les Institutions impliquées dans la gestion de l'eau dans la région

Nous pouvons distinguer plusieurs organismes du secteur privé et public qui sont impliqués dans la gestion de l'eau :

- le secteur privé comme L'USAID⁶, une organisation humanitaire internationale, dont le rôle est de financer la rénovation de certains réseaux d'eau de la région afin d'assurer la gestion de l'eau.

- les associations de la société civile, une organisation nationale, dont le rôle est d'organiser des réunions de conseils sur les pratiques utilisées pour économiser l'eau.

Le rôle de ces deux organisations reste limité dans la région et une partie importante des agriculteurs ne connaissent pas ce type d'organisations.

En ce qui concerne le secteur public, nous distinguons plusieurs institutions importantes (figure 2.15) :

⁶The *United States Agency for International Development* (L'Agence des États-Unis pour le développement international)

- Le Ministère de l’Energie et de l’eau, responsable du domaine de l’eau via la direction générale de l’équipement qui est divisée en trois parties : planification, études techniques et réseaux.
- Le Conseil du Développement et de la Reconstruction (CDR), caractérisé par une autonomie administrative et financière et qui s’occupe des études et de la planification de gestion de l’eau.
- L’office national du Litani responsable de la mise en œuvre des projets d’irrigation.
- L’institution de l’eau de la Beqaa, soumise à la tutelle du MEE en terme technique et administrative et à la tutelle du ministère des Finances en termes financiers.
- Le conseil suprême d’eau, dont le rôle est d’évaluer les programmes de planification d’eau proposés par le MEE.
- Les municipalités de la Beqaa qui établissent le lien entre les habitants (agriculteurs dans notre cas) et les institutions publiques.

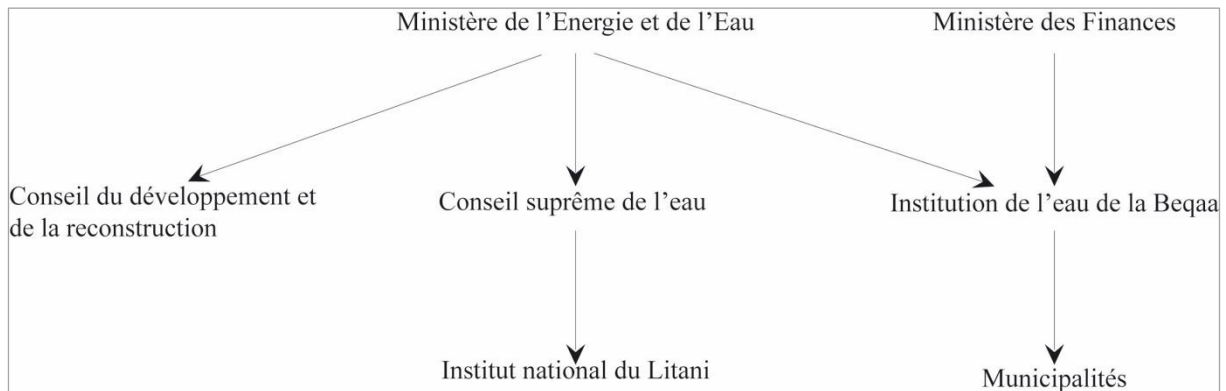


Fig. 2.15 - Hiérarchie de dépendance des institutions de l’eau

La relation conflictuelle, plutôt politique et financière, a ralenti et parfois annuler la mise en place d’une politique d’une gestion de l’eau dans la région. Ainsi, le manque d’études scientifiques sur les eaux souterraines et l’absence des données physiques et humaines ont joué un rôle négatif dans les développements des projets hydriques. Aujourd’hui, des zones agricoles en Beqaa (exemple du village de Qaa) souffrent d’un manque d’eau d’irrigation à cause des puits forés sans études hydrogéologiques préalables (LRA, 2012). Cela montre la nécessité de mettre en évidence un plan gestionnaire pour éviter l’assèchement des ressources hydriques.

2.5.5 L'irrigation face aux besoins : une pression accrue sur les ressources hydriques

Les contraintes climatiques et la mauvaise politique de gestion ont eu un impact négatif sur les ressources en eaux au Liban (Hamzé *et al.*, 2010). Ainsi, la quantité d'eau disponible a diminué, augmentant le stress hydrique notamment dans les régions agricoles. La superficie agricole utile (S.A.U) irriguée des exploitations agricoles au Liban est de 104 000 ha, ce qui représente 42 % de la S.A.U totale (Ministère de l'agriculture, 2005). Selon la même source, la plaine de la Beqaa représente 52% de la S.A.U irriguée, suivie du Liban-Nord avec 25%. Le Sud et le Mont-Liban enregistrent seulement 12% et 10% respectivement. Alors que 48% de ces terrains sont irrigués par des eaux de surface, 52% le sont par des eaux souterraines (Hamzé *et al.*, 2010). La figure 2.16 met en relief, la répartition de la S.A.U selon l'origine de l'eau. On remarque que le recours aux eaux souterraines est prédominant dans la plaine de la Beqaa et au Liban-Sud avec 68% et 70% de la S.A.U irriguée (Ministère de l'agriculture, 2005). Les ressources en eaux souterraines sont généralement extraites de puits individuels et parfois de bassins fluviaux. En outre, 90% de ces agriculteurs utilisent des systèmes d'irrigation sous pression. Parmi eux, 77,6% utilisent des arroseurs, 11,58 % de goutte à goutte et 10,75% des techniques traditionnelles.

En plus, la croissance rapide et incontrôlée de l'irrigation privée en eaux souterraines pose de nombreux problèmes notamment de continuité de l'eau (tableau 2.7). En effet, l'utilisation de motopompe d'une façon privée, pour le captage de l'eau souterraine, a été multipliée par trois ces dix dernières années, passant de 5% à 15% des exploitations (LARI, 2012). L'absorption excessive des eaux souterraines et le manque de recharge des nappes phréatiques peuvent augmenter l'intensité de la sécheresse. En effet, l'approfondissement saisonnier et interannuel du niveau du bassin versant dans la région de la Beqaa, entraînant une grave pénurie d'eau dans les puits pendant les années sèches.

Description	Surface équipée (ha)	Réseau irrigué (ha)	Système gravitaire traditionnel (ha)	Système sous pression (ha)
Schéma d'irrigation	65 600	59 070	53 270	5800
Irrigation privée	24 400	21 960	2196	19 764
Total	90 000	81 030	55 466	25 564

Tableau 2.7 - Surface irriguée au Liban. Source : Institut de recherche agricole libanais, département de l'irrigation et de l'agro-météorologie (LARI), 2012.

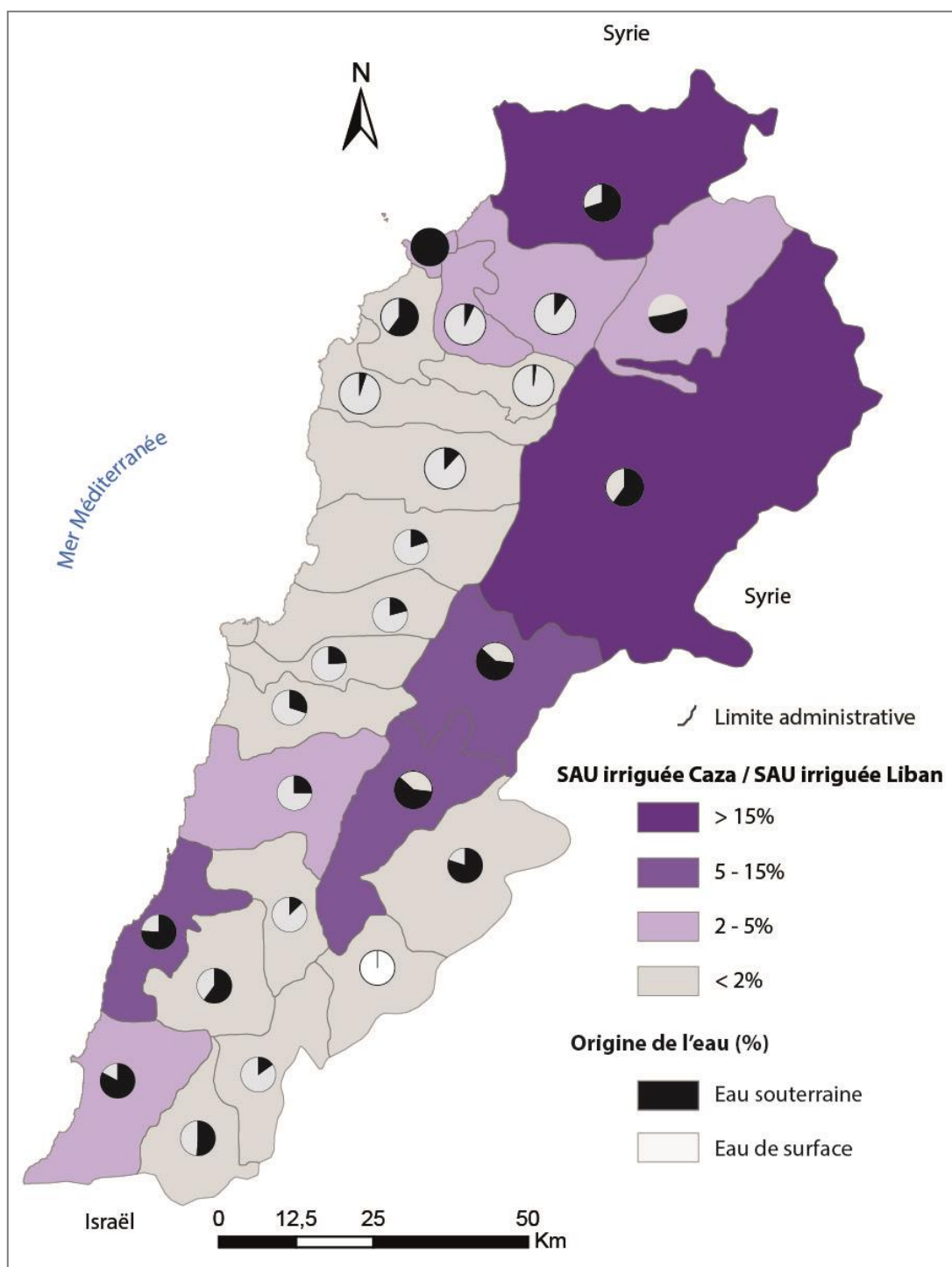


Fig. 2.16 - Répartition de la SAU irriguée selon l'origine de l'eau. Sources : MOA et FAO., 2005. Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018.

Selon l'estimation du département du centre de développement rural au Liban, la superficie irriguée va connaître une évolution importante et elle va passer à 167 000 ha d'ici 2020 (tableau 2.8). Cette évolution de surface irriguée pourrait provoquer une diminution importante dans le niveau des nappes phréatiques avec le réseau actuel d'eau de surface. En effet, la majorité des réseaux de surface au Liban utilisent des canaux ouverts. Cela ne permet pas une utilisation optimale de la ressource hydrique à cause de l'évaporation trop élevée

surtout pendant la saison estivale. Au contraire cette méthode de gestion d'eau de surface entraîne une consommation excessive des réserves hydriques.

Surface agricole irriguée existante (ha)	Surface en irrigation proposée en cours de réalisation (ha)	Total (ha)	Taux d'évolution (ha)
104 000	63 600	167 600	61,15%
62,05%	37,95 %	100%	

Tableau 2.8 - Etat de la surface irriguée au Liban. Source: (LRA - Rural Development Department), 1999 et IRWA project, 2006.

Ainsi, l'efficacité des systèmes d'irrigation a été évaluée à seulement 46% pour l'ensemble du pays (Mal, 2008). En effet, la technique d'irrigation traditionnelle ou gravitaire des terres agricoles reste de loin prédominante (64% de la S.A.U. irriguée). Ce taux est de 28% pour l'aspersion et seulement 8% pour le goutte à goutte (Darwish *et al.*, 2006). La figure 2.17 met en évidence l'utilisation excessive de l'irrigation gravitaire au Liban. Ce seuil atteint son niveau minimal dans la Beqaa Ouest avec 20% de la S.A.U irriguée au profit de l'aspersion qui concerne 75% de la S.A.U irriguée de ce Caza.

Ainsi, malgré une évolution de l'irrigation de goutte à goutte (Hermel et de Rachaya avec 36% pour chacun d'eux) qui a déjà permis d'économiser 25% d'eau par saison, cela reste insuffisant pour résoudre le problème de sécheresse dans les régions agricoles (Nimah, 1983 ; Karam *et al.*, 1991 ; Darwish *et al.*, 2006). En plus, une bonne gestion des eaux pluviales et une utilisation d'un calendrier d'irrigation aurait des répercussions positives non seulement sur le bilan hydrique, mais également sur la productivité des cultures et les revenus des agriculteurs (Hamzé *et al.*, 1991, Shaban et Darwich, 2009).

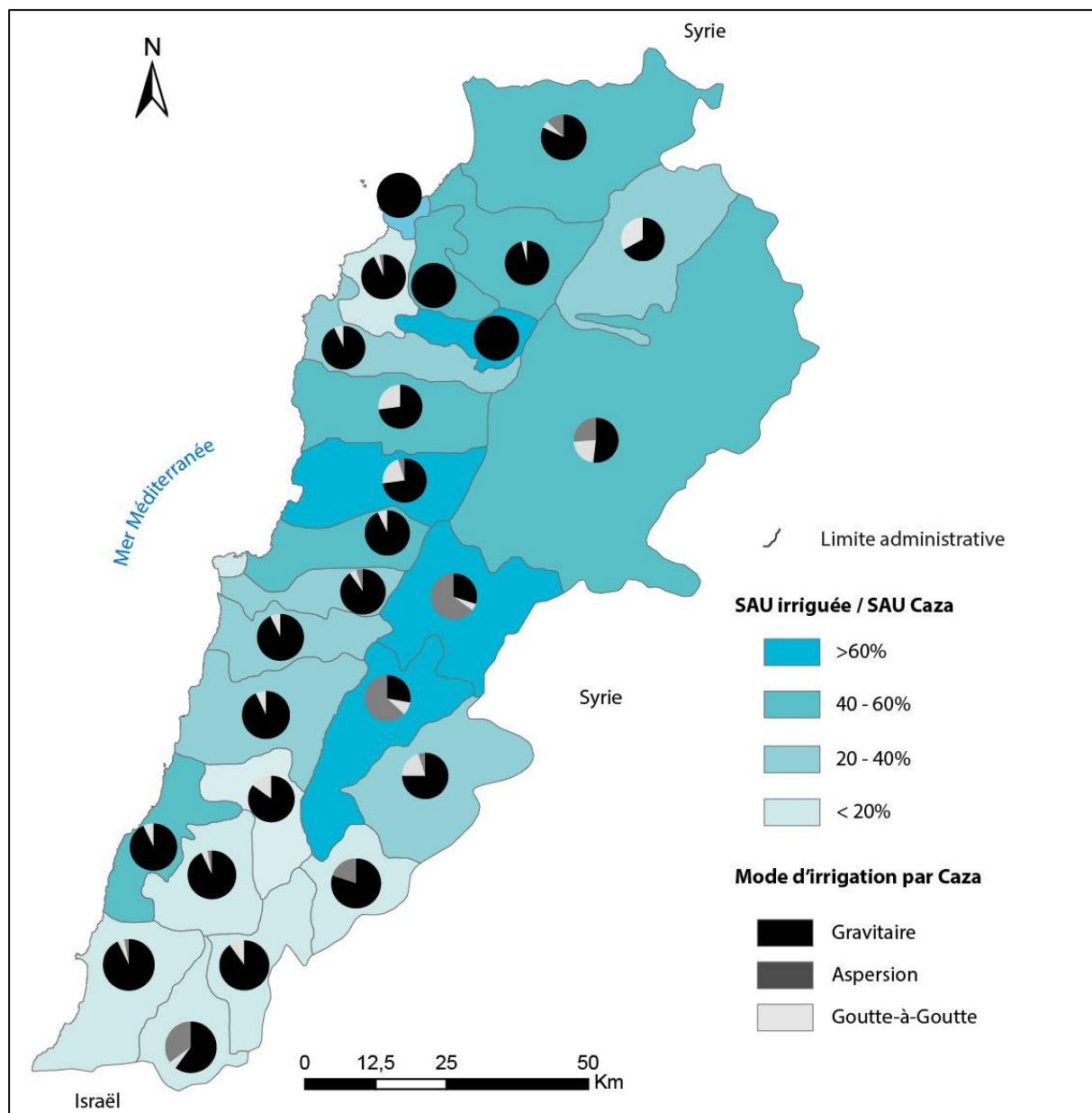


Fig. 2.17 - Répartition de la SAU irriguée selon les modes d'irrigation. Sources : MOA et FAO, 2005.
Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018.

2.6 Les besoins de la plaine de la Beqaa en terme d'outils de détection et de suivi des sécheresses

Pour permettre d'élaborer des stratégies d'adaptation et de gestion de l'eau, il faudrait quantifier et comprendre la sécheresse et ses impacts sur notre milieu. Pour évaluer un phénomène tel que la sécheresse, il est important de se doter d'outils efficaces afin de détecter et faire suivre les conditions de sécheresse.

Il existe déjà des outils traditionnels pour suivre et quantifier les périodes sèches. Ces outils sont basés sur l'utilisation des données climatiques issues des stations météorologiques. Ces

stations fournissent des données ponctuelles sur une période de temps donné. Ainsi, la spatialisation d'un phénomène tel que la sécheresse sur un milieu donné, nécessite la présence d'un nombre important des stations climatiques. Les réseaux de stations météorologiques sont souvent peu représentatifs et n'offrent pas une couverture spatiale suffisante et correcte. Souvent, cela est du à la faible présence de stations ou à la mauvaise position géographique (Vogt et Vossen, 1995). Dans la région d'étude, le réseau de stations météorologiques est peu développé et ne permet pas de suivre l'état de la surface. Il est donc primordial d'utiliser un autre outil qui permet de poursuivre et qualifier les conditions climatiques et environnementales. La télédétection offre la possibilité de caractériser les conditions de sécheresse en utilisant des produits satellitaires (Bastiaanssen et *al.*, 2000; Bastiaanssen et Perry, 2000 ; Bastiaanssen et Makin, 2003 ; Courault *et al.*, 2003 ; Scotford et Miller, 2005 ; Iona-Toroimac, 2006).

Pour atteindre notre objectif, deux hypothèses ont été établies afin d'orienter notre travail :

- Etant donné qu'un capteur satellite offre une image qui permet de représenter l'état d'une surface, il est possible d'utiliser cet outil pour caractériser l'état du stress hydrique d'une surface dominée par la végétation telle que la région d'étude.

- En cas de stress hydrique, les échanges gazeux avec l'atmosphère chez la plante diminuent en raison de la fermeture des stomates des feuilles afin de conserver l'humidité (Mader, 1987). Cette fermeture des stomates entraîne une augmentation de la température de la végétation. Cette température élevée peut être mesurée par un indice thermique. De plus, la végétation réagit aux changements des conditions hydriques. En cas de sécheresse, la baisse du contenu en eau de la végétation entraîne une diminution de la réflectance dans le domaine du proche infrarouge et une augmentation de la réflectance dans la région spectrale rouge (McVicar et Jupp, 1998). Cette réponse spectrale dans le domaine rouge/infrarouge peut être détectée par un indice de végétation.

Il est donc essentiel d'utiliser un produit satellitaire, combinant un indicateur de végétation et de température, afin qu'il soit adapté au suivi de la variation de l'intensité de la sécheresse sur un territoire agricole.

Partie 2 -
Suivi de l'intensité des sécheresses par télédétection :
analyse spatiale et temporelle

SOMMAIRE

Chapitre 3 – Démarche méthodologique en télédétection et SIG : notions élémentaires, capteurs et images satellites, application pour le suivi de la sécheresse dans notre région d'étude. 68

Chapitre 4 – Mise en évidence et suivi des sécheresses observées en plaine de la Beqaa entre 2001 et 2015 : la donnée de végétation 93

Chapitre 3 : Démarche méthodologique en télédétection et SIG : notions élémentaires, capteurs et images satellites, application pour le suivi de la sécheresse dans notre région d'étude.

En tenant compte de la variation climatique, il est important de comprendre la sécheresse et ses impacts sur notre milieu.

Dans ce chapitre, on présente les principaux aspects utiles à la compréhension de télédétection et le principe de sa mesure. Ainsi, on décrit les caractéristiques de principaux capteurs satellitaires et leurs applications pour spatialiser des surfaces. Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser le capteur MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) embarqué à bord du satellite TERRA.

Les SIG permettent d'analyser plusieurs types de données, de sources, de natures et d'échelles spatiales différentes. Les indicateurs de sécheresse, tel que le VHI, forment une partie de l'information qui entrent dans les SIG pour caractériser les sécheresses. Notre indicateur a été utilisé sous ArcGis afin d'offrir des informations sur l'évolution et la mesure de la sécheresse dans la région d'étude.

3.1 Principe de la télédétection pour le suivi des états du couvert végétal

Comme déjà cité dans l'introduction de cette partie, l'objectif de cette étude est de décrire l'état du couvert végétal notamment la surface agricole. Dans ce cadre, nous avons utilisé la télédétection optique comme technique physique pour suivre l'état de la végétation.

Nous rappelons que la télédétection est définie comme un outil technique utilisé pour décrire l'état d'un phénomène et tirer des informations sur l'état du stress hydrique des surfaces par des mesures effectuées à distance. Ces informations sont obtenues par le signal électromagnétique émis par un objet ou une surface dans un domaine de fréquence / longueur d'onde (figure 3.1). Les capteurs satellites ont pour rôle de mesurer ce signal réfléchi par une surface donnée et de le transmettre à des stations au sol.

La télédétection spatiale utilise une partie du spectre électromagnétique. Nous distinguons les domaines : solaire ($\lambda = 0.38$ à $3 \mu\text{m}$), infrarouge thermique ($\lambda = 3 \mu\text{m}$ à 1 mm) et micro – onde ($\lambda = 1 \text{ mm}$ à 30 cm). En effet, le rayonnement est réfléchi par la surface dans le domaine solaire, émis par la surface elle-même dans l'infrarouge thermique. Il est parfois émis ou réfléchi dans le domaine micro – ondes en fonction du caractère passif ou actif du système d'observation.

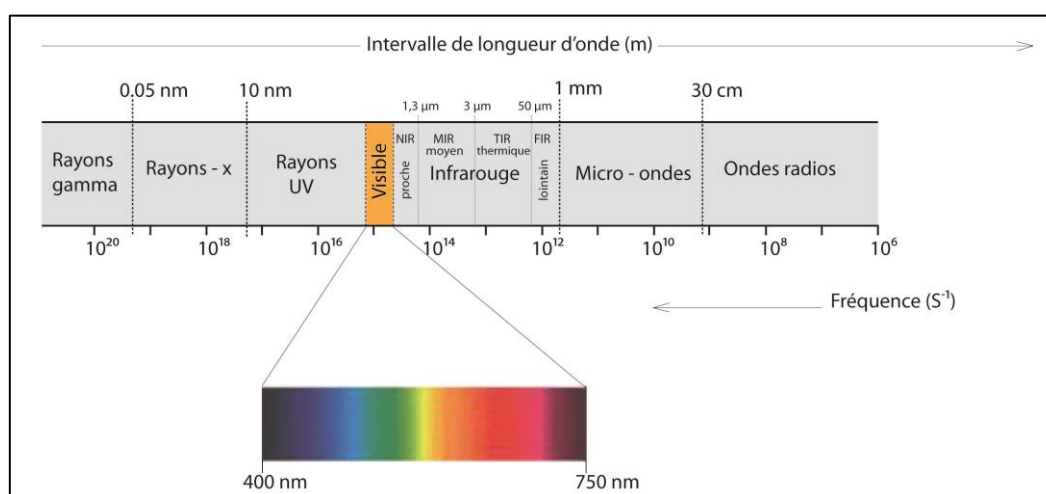


Fig. 3.1 - Spectre du rayonnement. Conception et réalisation : T. NASSER, université d'Orléans, CEDETE, CEDETE, 2017.

Les images satellites permettent de suivre et mesurer l'état du couvert végétal à différentes échelles spatio-temporelles (Bastiaanssen et al. 2000; Bastiaanssen et Perry, 2000 ; Bastiaanssen et Makin, 2003 ; Courault et al., 2003 ; Scotford et Miller, 2005 ; Iona-Toroimac et al., 2006). Cette technique optique, du visible ($0.4 \mu\text{m}$) au thermique ($12.5 \mu\text{m}$), est adaptée pour accéder aux paramètres qui caractérisent la végétation. Les feuilles vertes réfléchissent une faible proportion du rayonnement incident dans la bande rouge et une forte proportion

dans la bande infrarouge (Guyot, 1990). La réflectance d'un couvert sénéscent est souvent plus faible dans le proche infrarouge que celle du même couvert, chlorophyllien (figure 3.2). En effet, le caractère directionnel de la réflectance pour un couvert végétal est fortement lié à l'état physiologique, la structure et l'agencement des différents éléments qui le constituent.

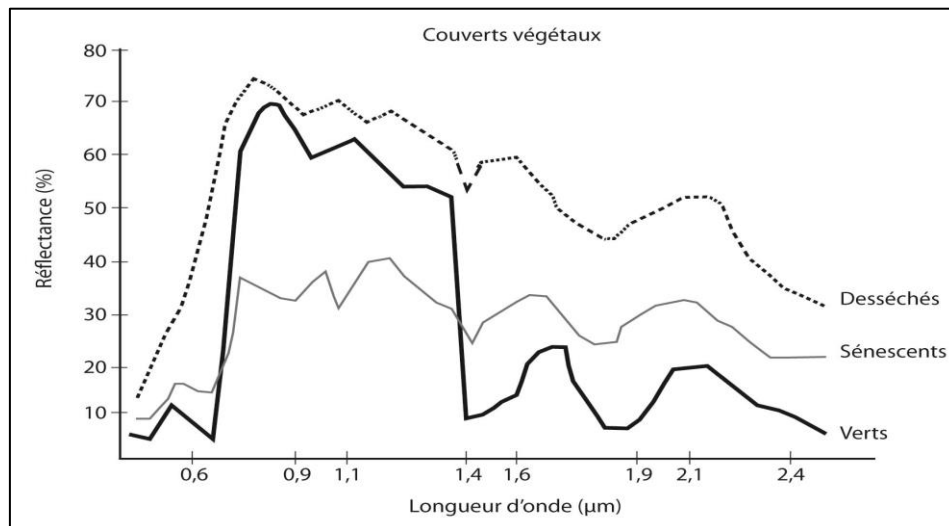


Fig. 3.2 - Réflectance de couverts végétaux dans divers états physiologiques. Source : GIRARD, 1999.
Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans, CEDETE, 2017.

De nombreuses recherches ont utilisés les caractéristiques spectrales de couverts végétaux pour établir des correspondances entre variables biophysiques et observations (Baret et Guyot 1991 ; Hall *et al.*, 1995 ; Carlson et Ripley, 1997 ; Myneni *et al.*, 1997 ; Duchemin *et al.* 1999 ; Gutman, 1999 ; Bastiaanssen, 2000 ; Guérif *et al.*, 2001 ; Scotford et Miller 2005 ; Duchemin *et al.* 2006 ; Zribi *et al.*, 2011). Ainsi, des indices de végétation, utilisant les réflectances rouge et le proche infrarouge, ont été fréquemment employés pour maximiser le contraste entre sol et végétation (Baret *et al.* 1989 ; Richardson, 1992 ; Duchemin *et al.*, 2006). L'avantage de ces indices réside en outre dans la minimisation de certains effets indésirables (variation de la configuration géométrique soleil-cible-capteur, effets atmosphériques ou changement de la couleur du sol ou de l'état de surface).

Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) est parmi les indices le plus utilisé dans le cadre de la télédétection de la végétation (Rouse *et al.*, 1973 ; Rouse *et al.*, 1974). Il est caractérisé par sa sensibilité à la présence de végétation (Sellers, 1985). En effet, le NDVI différencie la végétation des autres surfaces terrestres grâce à sa forte tendance à absorber les longueurs d'onde du rouge de la lumière du soleil.

Il a été utilisé en plusieurs applications régionales et mondiales, dans le suivi des surfaces végétales sur des vastes zones (Deblonde et Cihlar, 1993 ; Myneni *et al.*, 1996 ; Cuomo *et al.*, 2001 ; Propastin et Kappas, 2009).

3.2 Observation spatiale d'un capteur satellite : fonctionnement, caractéristiques spatio-temporelle dans le rayonnement solaire

Le capteur mesure le signal électromagnétique émis par le soleil et réfléchi par un objet quelconque (dans notre cas la végétation agricole) et son environnement. La mesure du signal réfléchi par une surface dépend des angles d'observation zénithaux et azimutaux (figure 3.3). La détermination de ces angles dépend principalement des caractéristiques du capteur, de son altitude et de la géométrie soleil-cible-capteur (Bonn et Rochon, 1992).

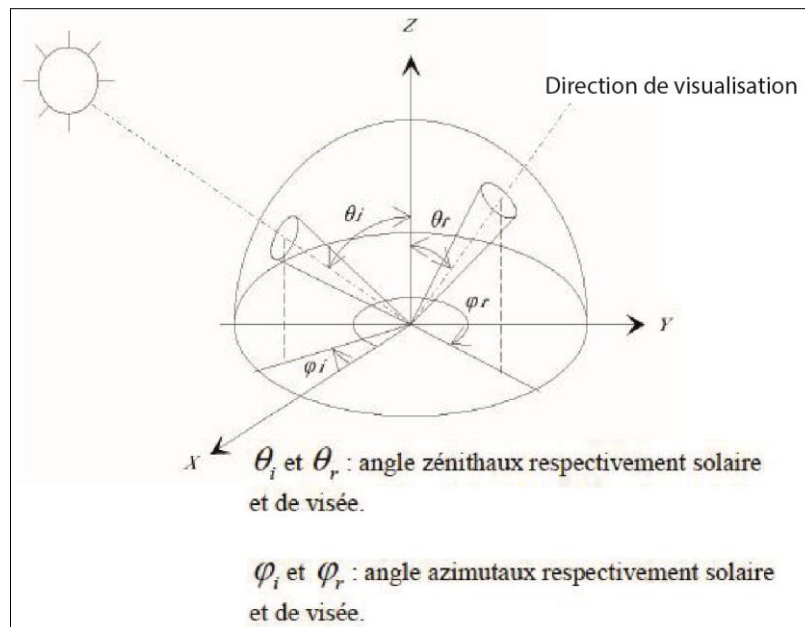


Fig. 3.3 - Géométrie de mesure du signal réfléchi par les éléments de surface (GDТА, 1991)

On distingue quatre systèmes entre la réception et le stockage d'un signal (figure 3.4) :

- Un système de réception comportant un télescope servant d'objectif
- Une source de calibration comprenant différents détecteurs
- Un amplificateur qui permet d'accroître le signal reçu
- Un système d'enregistrement qui permet de transformer le signal reçu en numérique

Il existe deux types de détection qui fonctionnent très différemment. Le premier type concerne ceux qui fonctionnent à balayage comportant un miroir rotatif devant l'optique.

D'un autre côté, il existe ceux à barrettes qui fonctionnent avec des capteurs comportant plusieurs cellules, chacune observant une zone spécifique.

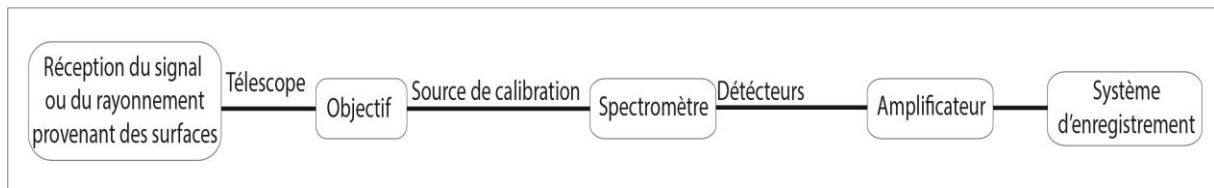


Fig. 3.4 - Schéma du fonctionnement d'un capteur (Girard, 1999)

Le processus d'acquisition d'une image par le capteur se fait selon deux directions (figure 3.5). La première est parallèle à la trace du satellite permettant de définir les lignes de l'image. La deuxième est perpendiculaire à la première, permettant de définir les colonnes de l'image. Le capteur observe la scène sous un angle appelé champ de vue (FOV⁷) permettant de définir la largeur du champ d'observation (GFOV⁸). Autrement dit, le capteur entraîne la formation d'une image à partir de sa fauchée. Cette fauchée permet à l'image acquise d'avoir des caractéristiques spatio-temporelle, directionnelle et spectrale. Ces caractéristiques dépendent des propriétés des capteurs et des conditions d'observations. La majorité des capteurs utilisent des orbites héliosynchrones polaires, c'est-à-dire avec des inclinaisons proches de 90°. L'image formée par ce processus possède des caractéristiques de nature spatiale, temporelle et directionnelle.

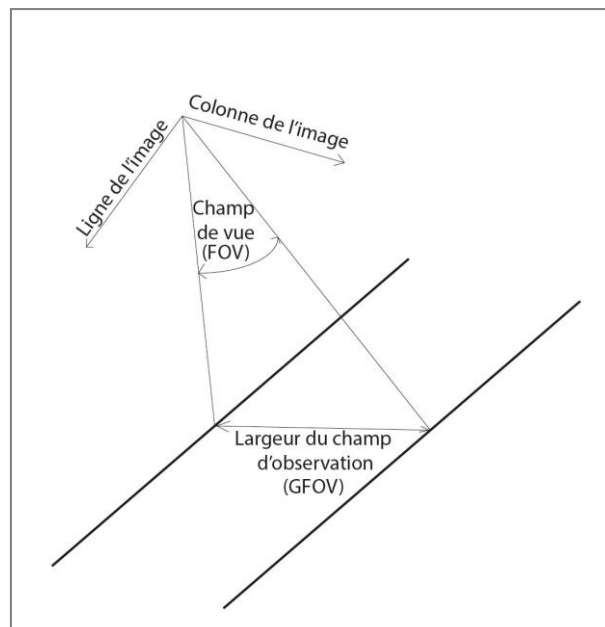


Fig. 3.5 - Fonctionnement d'un capteur pour l'acquisition d'une image. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE-2018.

⁷ Field of View

⁸ Ground Field of View

La résolution spatiale d'un capteur est liée fortement à la taille de l'objet observé sur une surface. Ainsi, la taille d'un objet permet de définir le nombre de pixels, éléments constitutifs d'une image (figure 3.6).

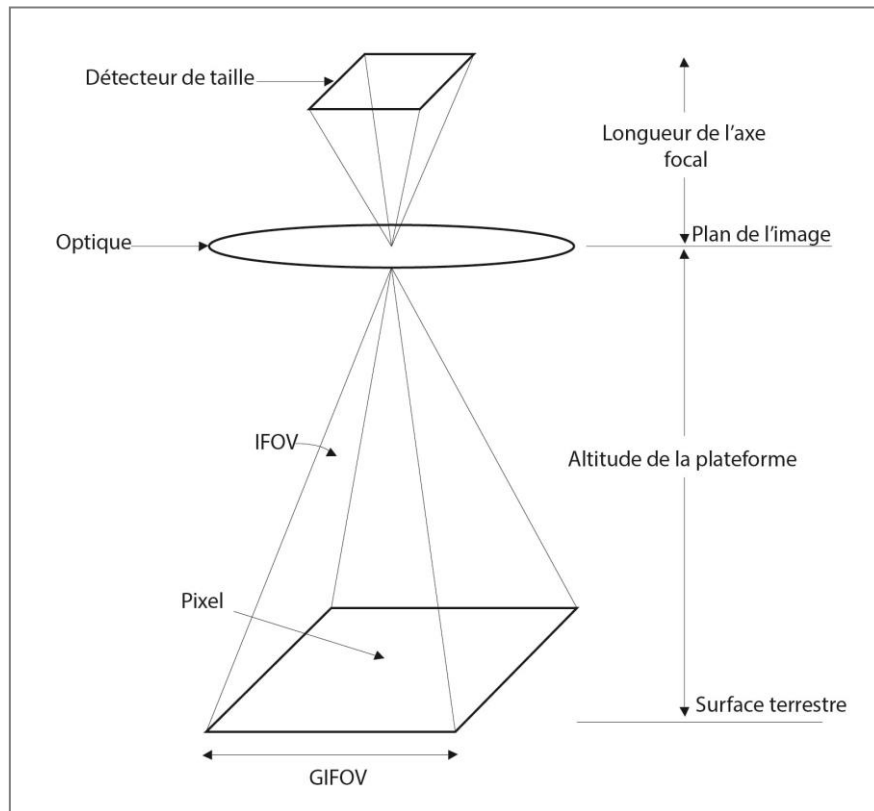


Fig. 3.6 - Mesure de la résolution spatiale par le détecteur. Source : Garrigues, 2004.

La taille d'un pixel de l'image est très différente d'un capteur à un autre, et peut varier de 1m à plusieurs kilomètres. La mesure est effectuée le long de l'axe focal par l'angle IFOV (Instantaneneous Field of View). Sa projection au sol forme un pseudo-carré de taille GIFOV (Ground Instantaneneous Field of View). Dans le cas où le satellite est situé à la verticale (visée au nadir où l'angle zénithal est égal à 0°), la résolution spatiale est obtenue en multipliant le terme IFOV par l'altitude de la plateforme. Par contre, en cas de visée oblique, la résolution spatiale tend à diminuer et des déformations géométriques sont observées.

Ainsi, les observations spatiales issues de la télédétection sont caractérisées par leur résolution temporelle. En effet, la résolution temporelle dépend du cycle orbital d'un capteur. Ce cycle définit la période de répétitivité. Cette période est définit par le temps que met le capteur pour observer une même zone de la surface de la terre dans les mêmes conditions de visée. Cette période varie de 3 jours à un mois tout dépend des caractéristiques du capteur. Par exemple, elle est de 16 jours pour Landsat, 26 jours pour SPOT et 3 jours pour MODIS-TERRA. La largeur de la fauchée joue un rôle important dans la définition de la résolution

temporelle. En effet, les capteurs ont des fauchées de plus de 2000 km comme MODIS, ce qui leur permet la possibilité d'observer la même région plus fréquemment que d'autres capteurs comme Landsat et SPOT. Cette période de répétitivité effective des observations spatiale dépend des conditions atmosphériques de la surface observée.

Enfin, il existe une relation directe entre la résolution spatiale et la répétition des observations spatiales et également entre la largeur de fauchée et la résolution spatiale. La figure 3.7 illustre cette relation : plus la résolution spatiale est importante, plus la période de revisite est courte. La répétitivité des observations pour les capteurs possédant une fauchée inférieure à 200 km, est de l'ordre de 15 à 30 jours. La période pour les capteurs comme MODIS, possédant une fauchée supérieure à 2000 km, varie entre 1 et 3 jours. La répétitivité temporelle du capteur MODIS est donc adaptée au suivi du comportement des cultures durant une saison agricole en plaine de la Beqaa. Ainsi, sa résolution spatiale est suffisante pour travailler à l'échelle de la parcelle.

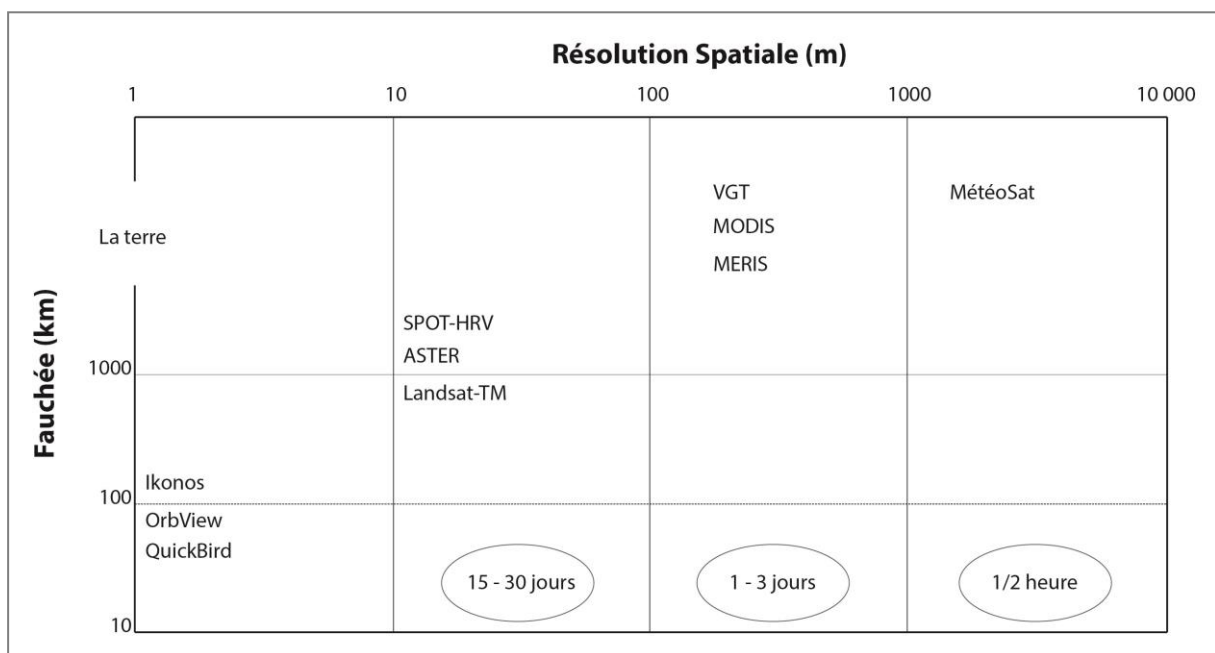


Fig. 3.7 - Relation entre résolution spatiale, largeur de fauchée et le cycle de répétitivité. Source : site de NASA. Réalisation : T. NASSER, CEDETE-2018.

3.3 Prétraitement des images acquises par les capteurs satellitaires

L'image satellite issue du capteur ne peut être directement exploitée et utilisée à cause des erreurs liées à plusieurs facteurs :

- La sensibilité des capteurs ;

- La géométrie d'observation ;
- les effets de réflectance de l'atmosphère sur l'image ;

C'est pourquoi ces images doivent être prétraitées par des corrections géométriques et radiométriques afin d'être utilisées rapidement.

3.3.1 Correction géométrique

Les erreurs géométriques sont liées à l'oscillation du capteur, de la rotation de la plateforme et de la terre, ainsi qu'à la topographie du terrain observé (relief et courbure de la terre). Les corrections géométriques sont appliquées pour faciliter le traitement et la présentation des données satellitaires, issues de l'image, dans un système de projection cartographique. Certaines erreurs sont prévisibles, où on peut appliquer une modélisation précise de la configuration géométrique entre l'objet observé et le capteur. D'autres erreurs ne sont pas envisageables, ne peuvent pas être modélisées, et une relation géométrique doit être effectuée entre les pixels de l'image et les points de coordonnées connus.

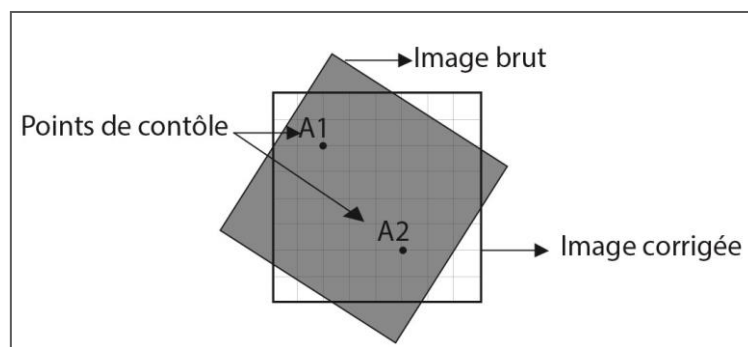


Fig. 3.8 - Exemple de la correction géométrique d'une image. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

L'opération de la correction géométrique porte sur l'identification des coordonnées de l'image à partir des points de contrôle au sol (figure 3.8). Cette correction consiste à mettre les points à leur véritable position en coordonnées au sol. Le nombre de points de contrôle dépend du volume des distorsions de l'image à corriger et le modèle de transformation utilisé. Le modèle de transformation polynomiale est le plus appliqué. La figure 3.9 illustre une transformation des coordonnées (x' et y') à partir des anciennes (x et y) en utilisant deux équations affines (deux polynômes) du premier degré possédant chacun trois paramètres.

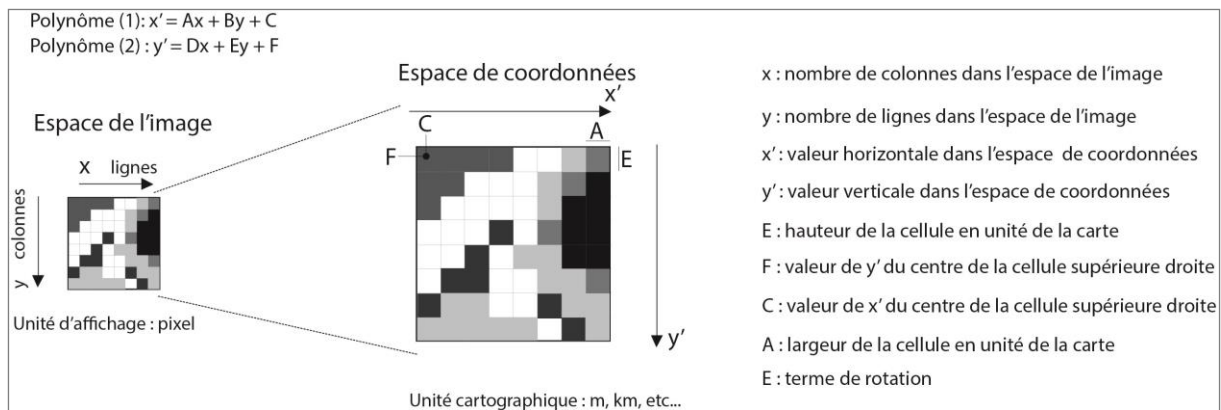


Fig. 3.9 - Exemple de transformation polynomiale à partir de deux polynômes pour la correction géométrique.
 Source : esri.com. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

Dans notre étude, la correction géométrique a été appliquée sur les images satellitaires obtenues afin de limiter les données erronées.

3.3.2 Corrections radiométriques

Ce processus vise à corriger les effets de réflectance de l'atmosphère sur l'image. En effet, l'énergie reçue par un capteur est altérée par l'atmosphère lors de son double trajet, incident (soleil-cible) et réfléchi (cible-capteur). On peut distinguer les phénomènes d'absorption et de diffusion qui entraînent des effets sur l'image. L'absorption atmosphérique est définie par les différents types de gaz qui absorbent l'énergie dans certaines longueurs d'ondes appelées bandes d'absorption. La diffusion atmosphérique est la réflexion de l'énergie par des particules de l'atmosphère. Par exemple, la diffusion de molécules atmosphériques ou de la poussière. Ces diffusions affectent l'ensemble du domaine visible du spectre électromagnétique.

Des modèles mathématiques sont utilisés pour corriger ces effets de réflectance de l'atmosphère sur l'image (Rahman et Dedieu 1994 ; Vermote *et al.*, 2002). Ces modèles révèlent les interactions du signal avec l'atmosphère. L'application de ces modèles nécessite des bonnes connaissances sur la composition de l'atmosphère notamment sur son contenu en aérosols.

Pour notre étude, la correction radiométrique a été appliquée par les ingénieurs du centre de télédétection du Liban afin de pouvoir exploiter les données d'utilisation du sol.

3.4 Caractéristiques des capteurs satellites

On distingue deux types de capteurs : Ceux qui fournissent des images à haute résolution spatiale comme Landsat, SPOT HRVIR⁹ et FORMOSAT et ceux qui fournissent des images à basse résolution spatiale comme VEGETATION et MODIS. Les caractéristiques respectives de ces capteurs sont rappelées dans cette section afin de pouvoir expliquer notre choix pour cette étude.

3.4.1 Capteurs à haute résolution spatiale

Landsat est le premier satellite civil lancé pour une observation spatiale qui a été lancé en 1972 (landsat.gsfc.nasa.gov). Les trois premières missions de Landsat étaient équipées par des capteurs à résolution hectométrique (Multi-Spectral Sensor). A partir de 1982, les missions effectuées par Landsat 4, était équipée par des capteurs TM (Thematic Mapper) qui utilisent sept bandes spectrales dont six dans le visible et le proche et moyen infrarouge. La dernière mission a été effectuée par Landsat 7, équipée d'un capteur ETM (Enhanced Thematic Mapper) possédant une bande panchromatique complémentaire à la résolution de 15 m.

Le capteur SPOT¹⁰ est caractérisé par son système d'imagerie optique spatiale à haute résolution. Il a été lancé en 1986 et a effectué cinq missions dont trois sont toujours opérationnelles (SPOT 2, 3 et 4). Il possède une orbite quasi-polaire héliosynchrone à une altitude d'environ 830 km (www.cnes.fr). Le champ de vue de ce capteur est de 60 km. La résolution spatiale se diffère entre SPOT 4 (20 m) et SPOT 5 (10 m). Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 3.1.

Le satellite FORMOSAT 2 a été lancé en 2004 par l'agence spatiale Taïwanaise (www.nspo.org.tw). Il permet d'obtenir des images quotidiennes à haute résolution spatiale (8 m au nadir) en utilisant quatre bandes spectrales allant du bleu au proche infrarouge (tableau 3.4). Ainsi, il effectue une observation spatiale en utilisant le même angle de prise, ce qui lui permet de limiter les effets directionnels. Les images issues de ce satellite sont distribuées par la société SPOTIMAGE France.

⁹ Haute Résolution dans le Visible et l'InfraRouge

¹⁰ Satellite Pour l'Observation de la Terre

	Landsat 7	SPOT 4	FORMASAT 2
Lancement	1999	1998	2004
Altitude	705 km	830 km	891 km
Orbite	Quasi-polaire héliosynchrone	Quasi-polaire héliosynchrone	Quasi-polaire héliosynchrone
Heure de passage à l'équateur	9h 35	10h 30	9h 30
Champ de vue	185 km	60 km	24 km
Résolution spatiale	30 m en multispectral 15 m panchromatique	20 m	8 m en spectral 2 m panchromatique
Période de revisite	15 jours	26 jours	+/- 1 jour

Tableau 3.1 - Caractéristiques des capteurs Landsat 7 ETM (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>), HRVIR-SPOT 4 (<http://www.cnes.fr/>), FORMOSAT-2 (<http://www.nspo.org.tw/>).

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Bleu	0.45-0.52 μm	30 m
2	Vert	0.53-0.61 μm	30 m
3	Rouge	0.62-0.69 μm	30 m
4	Proche Infrarouge	0.78-0.91 μm	30 m
5	Moyen Infrarouge	1.57-1.78 μm	30 m
6	Infrarouge Thermique	10.4-12.6 μm	30 m
7	Moyen Infrarouge	2.10-2.35 μm	30 m
8	Panchromatique	0.50-0.90 μm	30 m

Tableau 3.2 - Bandes spectrales du capteur Landsat 7 ETM+. Source : <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>.

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Vert	0.50-0.59 μm	20 m
2	Rouge	0.61-0.68 μm	20 m
3	Proche Infrarouge	0.79-0.89 μm	20 m
4	Moyen Infrarouge	1.58-1.75 μm	20 m
5	Panchromatique	0.5-0.89 μm	2.5 m

Tableau 3.3 - Bandes spectrales du capteur HRVIR-SPOT 4. Source : www.cnes.fr.

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Bleu	0.40-0.52 μm	8 m
2	Vert	0.52-0.60 μm	8 m
3	Rouge	0.63-0.69 μm	8 m
4	Proche Infrarouge	0.76-0.90 μm	8 m
5	Panchromatique	0.45-0.90 μm	2 m

Tableau 3.4 - Bandes spectrales de FORMOSAT-2. Source : <http://www.nspo.org.tw/>.

3.4.2 Capteurs à basse résolution spatiale

Les capteurs VEGETATION et MODIS ont été lancés respectivement en 1998 et 1999, à large champ embarqués sur les missions d'observations SPOT 4 (Arnaud et Leroy 1991 ; Justice et *al.*, 1998 ; Justice et Townshend, 2002). Ils utilisent des orbites quasi-polaires héliosynchrones et possèdent une fauchée de plus de 2200 km (tableau 3.5). Leur période de revisite varie de un à deux jours. Leur unité de mesure d'une surface est le pixel qui peut avoir des configurations géométriques rythmées selon le cycle orbital du satellite (une image tous les 16 jours pour TERRA et 26 jours pour SPOT).

Le capteur VEGETATION utilise un système à barrettes ce qui permet à l'optique de compenser une partie de la perte de résolution spatiale. D'un autre côté, le capteur MODIS utilise le système de miroir à balayage double-face qui fonctionnent d'une façon continue (Xiong et *al.*, 2005). Cette différence explique la haute qualité géométrique des images VEGETATION. Par contre la résolution de MODIS au nadir est beaucoup plus importante à celle de VEGETATION (1 km contre 250 m pour les bandes rouge et proche infrarouge. De plus, l'observation spatiale par MODIS se fait dans 36 bandes spectrales (tableau 3.6), tandis que celle de VEGETATION se fait dans quatre bandes (tableau 3.7).

	MODIS -TERRA	VEGETATION
Lancement	1999	1998
Altitude	705 km	830 km
Orbite	Héliosynchrone	polaire héliosynchrone
Heure de passage à l'équateur	10h 30	10h 30
Champ de vue (fauchée)	2330 km	2250 km
Résolution spatiale	250 m (bandes 1 à 2) 500 m (bandes 3 à 7) 1 km (bandes 8 à 36)	1.15 km
Période de revisite	+/- 2 jours	1 jour

Tableau 3.5 - Caractéristiques des capteurs MODIS-TERRA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>), VEGETATION (<http://vegetation.cnes.fr/>).

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Rouge	0.62-0.67 μm	250 m
2	Infrarouge	0.84-0.87 μm	250 m
3	Bleu	0.45-0.47 μm	500 m
4	Vert/Jaune	0.54-0.56 μm	500 m
5	Infrarouge	1.23-1.25 μm	500 m
6	Infrarouge	1.62-1.65 μm	500 m
7	Infrarouge	2.10-2.15 μm	500 m

Tableau 3.6 - Les 7 premières bandes spectrales de MODIS-TERRA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Bleu	0.43-0.47 μm	1000 m
2	Rouge	0.61-0.68 μm	1000 m
3	Proche Infrarouge	0.78-0.89 μm	1000 m
4	Moyen Infrarouge	1.58-1.75 μm	1000 m

Tableau 3.7 - Bandes spectrales du capteur SPOT VEGETATION (<http://vegetation.cnes.fr/>).

3.5 Choix et caractérisations du capteur MODIS –TERRA et ses produits satellitaires

Nous avons effectué dans la partie précédente une étude théorique citant les caractéristiques des différents capteurs satellites ainsi que les avantages et les inconvénients des indicateurs de végétation, utilisés pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresses. Ces différents capteurs et indicateurs sont adaptés à certaines caractéristiques de terrain.

Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser les images satellites issues du capteur MODIS-TERRA. Ce dernier offre des images avec une résolution qui varie de 1 km à 250 m. Cette résolution est à la fois assez large pour étudier l'ensemble de la plaine de la Beqaa et suffisamment fine pour travailler à l'échelle de la parcelle. Le capteur MODIS -TERRA a été lancé par la NASA en décembre 1999 pour assurer la continuité de la base de données historique du capteur AVHRR (Bédard *et al.*, 2006). Il évolue à 705 km d'altitude sur une orbite héliosynchrone et possède une fauchée de 2330 km qui lui permet d'observer chaque point de la terre tous les uns à deux jours dans 36 bandes spectrales (IOCCG, 2000)¹¹.

Les produits de MODIS, résumés par les indices de végétation, ont été largement employés pour surveiller les dynamiques de la végétation à l'échelle spatio-temporelle et l'évolution des sécheresses à court et à long terme (Swain *et al.*, 2011). De plus, ces produits sont gratuits, facilement téléchargeables, et pris de manière continue depuis 2000. Leur répétitivité temporelle est donc adaptée à une étude concernant la saison végétative.

Plusieurs indices de végétation ont montré leur efficacité pour suivre les conditions de la sécheresse comme par exemple les deux indicateurs SAVI et MSAVI. Cependant, le SAVI n'est pas adapté pour notre région parce que son ajustement est inversement proportionnel à la densité du couvert végétal (Rondeaux *et al.*, 1996). Autrement dit, la valeur de cet indice est affectée par la présence de sol nu. Le MSAVI est plus sensible au couvert végétal que le SAVI mais il sature quand il s'agit d'une forte densité de végétation verte.

De plus, comme la plaine de la Beqaa est caractérisée par une surface hétérogène où se retrouvent des zones boisées, agricoles et semi-désertiques, il faut un indice de végétation polyvalent. De tous les indices de végétation, le VHI est celui qui était le mieux adapté, car il combine un indice de végétation VCI et un autre de température TCI. Le VHI a montré son efficacité dans le suivi et de l'évaluation de la sécheresse sur différents types de cultures (Kogan, 1997). Il décrit l'état de la végétation d'une période par rapport aux conditions historiques notamment dans des aires hétérogènes (Kogan, 1990 ; Kogan et Sullivan, 1993). Il a été aussi démontré que les deux indicateurs, TCI et VCI, ensemble permettent de mieux

¹¹ <http://www.ioccg.org/sensors/terra.html>

caractériser les sécheresses agricoles dans les zones non homogènes comme la plaine de la Beqaa (Unganai et Kogan, 1998 ; Kogan et al., 2004; Kogan et al., 2005). Pour cette raison, ces deux indicateurs ont été retenus afin de calculer le VHI.

3.5.1 Sélection de la période d'étude et acquisition des données satellites

La meilleure période pour suivre et étudier la dynamique de la végétation est certainement la saison végétative. C'est pendant cette courte période que la végétation verte produit le plus de la biomasse indiquant une activité végétale. Dans la plaine de la Beqaa, la saison de végétation s'étale de mars (débourrement) à mai (entrée dans la phase de sénescence). Cette période couvre l'activité agricole dans la région. Alors que les images satellites pendant la période estivale dans la plaine de la Beqaa sont disponibles mais l'activité agricole est limitée. Cela ne permet pas d'étudier les situations de sécheresse et l'analyse des résultats seront donc biaisés. Alors que les images sont moins nombreuses pendant la période hivernale, il arrive que pour certains mois il n'y ait aucune image. Cela est dû à la couverture nuageuse en hiver, lors de la saison plus humide (novembre à janvier).

En partant de ce point, nous avons téléchargé les images satellitaires couvrant la période de végétation (mars à mai) pour assurer une série continue d'images afin d'étudier l'intensité de la sécheresse sur le territoire agricole. Ces images ont été téléchargées du site de la NASA (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>).

La figure 3.10 explique notre chaîne de traitement des images satellitaires pour le suivi de la sécheresse dans notre région d'étude.

La première étape consiste à utiliser les produits MOD11A2 et MOD13Q1 dans le but de créer des images historiques des valeurs minimales et maximales du NDVI et de la température de surface (Ts). Chacun de ces deux produits fournit une image tous les 16 jours avec une résolution spatiale de 250 m quadrillé dans la projection sinusoidale. Nous avons donc acquis deux images par mois, de Mars à Mai sur une période s'étalant de 2001 à 2015. Ce qui fait, une série de 6 images par année soit 90 images par indicateur pour la période étudiée ayant les bandes : NDVI minimum, NDVI maximum, différence de NDVI, Ts minimum, Ts maximum et différence de Ts. Les valeurs minimales et maximales du NDVI ont été utilisées pour le calcul du VCI et celles de la température de surface pour le calcul du TCI.

Les valeurs du VCI et TCI varient entre 0 et 1 et sont sauvegardées de 0 à 100 en 8 bits. Les valeurs basses représentent des conditions de stress de végétation alors que les valeurs élevées représentent des conditions optimales ou supérieures à la normale.

Ensuite les valeurs de VCI et TCI ont été utilisées pour le calcul de VHI. Ses valeurs varient aussi entre 0 et 1. les conditions de sécheresse sont en place lorsque les valeurs de TCI et VCI sont inférieures à 0,4 (Kogan, 1997; Kogan 1995; Ungani et Kogan, 1998 ; Kogan et al., 2004).

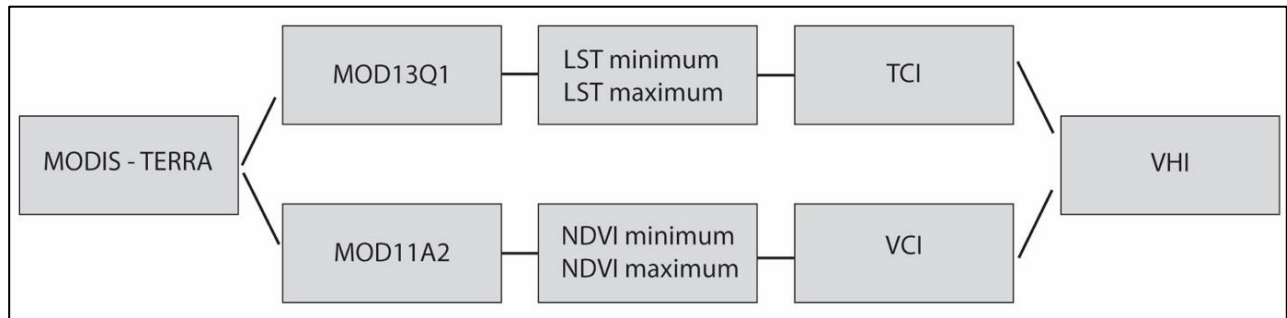


Fig. 3.10 - Chaîne de traitement de données satellitaires à partir du capteur MODIS-TERRA (sources : MODIS, NASA. Réalisation : T. Nasser, 2017).

Dans la deuxième étape, ces données ont été apportées en format image (img) en utilisant le logiciel ERDAS Imagine. Les images ont été projetées à la projection standard UTM en utilisant la zone 36. Les images ont ensuite été classifiées sur la plateforme ARCGIS-ESRI en cinq intervalles de VHI (Kogan 1997; Kogan 1995). Les conditions de sécheresse sont en place lorsque le VHI est inférieur à 0,4.

3.6 Traitement des données satellitaires

Le traitement des données satellitaires a été effectué en deux parties dans le but de suivre l'évolution de VHI à l'intérieur de la zone agricole.

La première consiste à réaliser une nouvelle classification de données d'occupation du sol afin de faciliter le suivi de la sécheresse dans la région d'étude.

La deuxième porte sur le traitement des images satellitaires de VHI, issues du capteur MODIS, afin de mesurer et spatialiser l'intensité de la sécheresse.

Ce traitement a été effectué en utilisant différents outils de système d'information géographique du logiciel ARCGIS-ESRI.

3.6.1 Classification de données d'utilisation du sol

Le centre de télédétection du Liban a mis à notre disposition les données d'occupation du sol de la plaine de la Beqaa. Cette base de données a été créée en 2005 grâce à l'analyse des images satellitaires IKONOS multi-spectrales de 80 cm de résolution (Faour *et al.*, 2015).

Le tableau 3.8 révèle l'utilisation du sol dans la région selon le classement dans lequel les images ont été générées.

Le niveau 1 distingue le territoire agricole en une seule entité et ne distingue pas les types de cultures.

Le niveau 2 détaille le territoire agricole en distinguant 4 classes : les cultures de plein champ, culture intensive, les vergers et les cultures hétérogènes.

Le niveau 3 détaille le territoire agricole en 9 classes : les arbres fruitiers, les cultures de plein champ en grande surface, les cultures de plein champ en petite surface, les cultures intensives en plein champ, les cultures intensives sous serres, le mitage urbain, les oliviers, les vergers et enfin les vignobles.

Le niveau 4 distingue 13 classes qui détaillent les trois niveaux cités précédemment.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Territoire agricole	-Culture de plein champ -Culture intensive -Vergers -Cultures hétérogènes	-Arbres fruitiers -Culture de plein champ en grande surface -Culture de plein champ en petite surface -Cultures intensives en plein champ -Cultures intensives sous serres -Mitage urbain -Oliviers -Vergers -Vignobles.	-Arbres fruitiers -Arbres fruitiers associés à des cultures de plein champ -Arbres fruitiers associés à des vignes -Culture de plein champ associé à des vignes -Culture de plein champ en grande surface -Culture de plein champ en petite surface -Cultures intensives en plein champ -cultures intensives sous serres -mitage urbain -Oliviers -Vergers -Vignobles associés à des cultures de plein champ -Vignobles associés à des arbres fruitiers.

Tableau 3.8 - Classification d'utilisation du sol en Beqaa centrale selon les images satellitaires IKONOS.
Source : CNRS-L, 2011.

Afin de faciliter l'analyse des résultats, ces classes ont été regroupées et présentées dans le tableau 3.9 Il indique comment ces classes ont été regroupées alors que la figure 3.11 illustre l'utilisation du sol en Beqaa centrale selon les classes retenues. Trois classes d'utilisations du sol se distinguent facilement : ce sont les cultures de plein champ, la viticulture et les arbres fruitiers qui occupent principalement la Beqaa centrale.

Classe 1 Culture de plein champ	Classe 2 Arbres fruitiers	Classe 3 Viticulture	Classe 4 non retenue
Culture de plein champ en grande surface	Vergers	Vignobles	Mitage urbain
Culture de plein champ en petite surface	Arbres fruitiers		Oliviers
Cultures intensives en plein champ			Cultures intensives sous serres
			Vignobles associés à des cultures de plein champ
			Vignobles associés à des arbres fruitiers
			Arbres fruitiers associés à des cultures de plein champ
			Arbres fruitiers associés à des vignes
			Culture de plein champ associé à des vignes

Tableau 3.9 - Regroupement d'utilisation du sol en Beqaa centrale. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans-CEDETE, 2018. Source : CNRS-L, 2011

La classe 4 indique les surfaces non retenues pour suivre l'évolution de la sécheresse. En effet, il était normal que la zone urbaine soit exclue. La surface cultivée en oliviers représente moins de 0,5 % de la surface agricole utilisée et sa détection était difficile d'où vient son élimination de l'étude. Les cultures associées rendent l'évaluation de la sécheresse difficile et les résultats peuvent être biaisées vu la difficulté de distinguer la proportionnalité de chaque type de culture. Les surfaces retenues représentent 79,7 % de la superficie totale de la région d'étude.

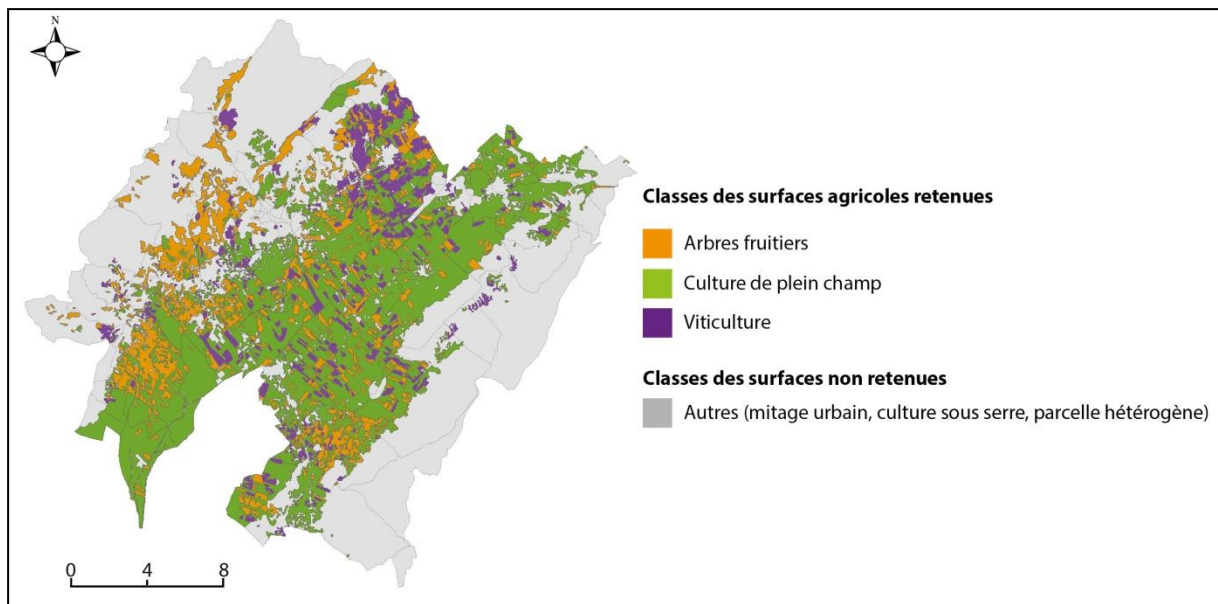


Fig. 3.11 - Utilisation du sol en Beqaa centrale selon le nouveau regroupement. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans, CEDETE, 2018.

Les images ont été extraites par classe pour étudier l'évolution de l'indice satellitaire au niveau de chaque type du couvert végétal agricole.

3.6.2 Traitement des images de VHI sous ARcGis d'Esri

Ce traitement consiste à extraire l'évolution spatio-temporelle de la proportion des pixels de chacune des cinq catégories de VHI préconisées par Kogan (1995, 1997). Ce traitement a été effectué à partir des images mensuelles du VHI, pour chacun des types d'utilisation du sol selon notre nouvelle classification.

Le processus par ordre d'utilisation est présenté dans la figure 3.12. Elle est effectuée à partir de cinq outils de SIG sur la plateforme d'ARCGIS: découper une entité, extraction par masque, calculatrice raster, raster vers polygones, raster vers points.

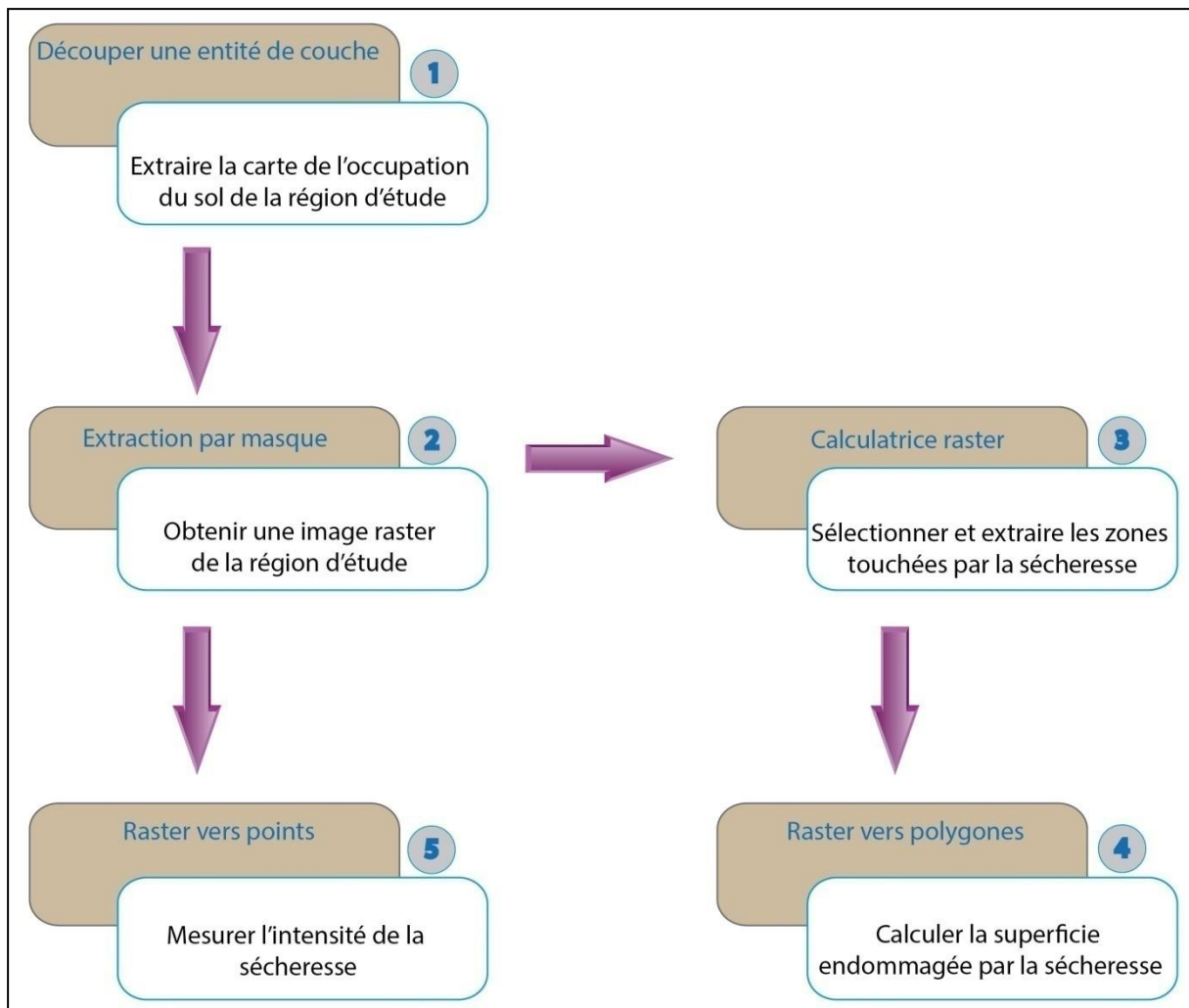


Fig. 3.12 - Structure de la démarche méthodologique de SIG utilisée pour le traitement des images MODIS.
Réalisation : T. NASSER, Université d'Orléans, CEDETE, 2018.

Notre méthodologie de traitement ainsi que le fonctionnement de chaque outil sont détaillés par ordre ci-dessous.

➤ **Découper une entité de couche**

La première étape consiste à extraire l'image satellite de l'occupation du sol de la région d'étude. Ces données d'occupation du sol sont fournies sous forme d'entités pour toute la plaine de la Beqaa. Pour cette raison, nous avons utilisé l'outil « découper » afin d'extraire les entités en entrées superposées (plaine de la Beqaa en entier) en entités de découpage (région d'étude). En effet, cet outil permet de découper une partie d'une classe d'entités en utilisant une ou plusieurs entités d'une autre classe d'entités comme emporte-pièce. Il est particulièrement utile pour la création d'une nouvelle classe d'entités, également nommée zone

d'étude ou zone d'intérêt, contenant un sous-ensemble géographique qu'on considère important pour réaliser notre étude (figure 3.13).

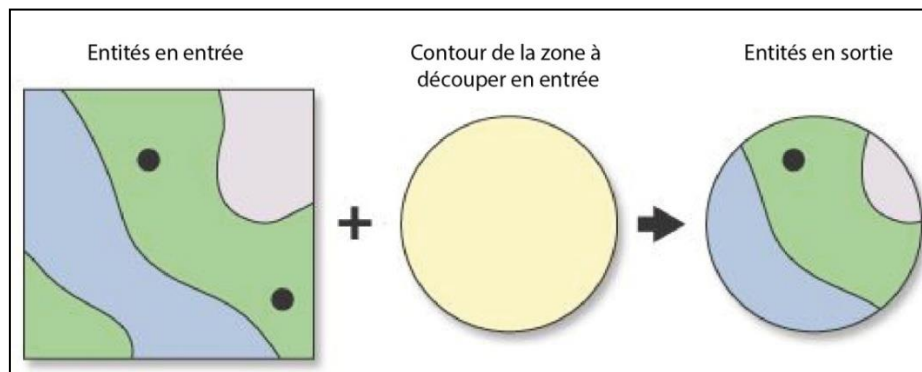


Fig. 3.13 - Illustration de traitement par l'outil de découpage. Source : ArcMap, 10.5. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

Les entités de découpage peuvent être des points, des lignes et des polygones selon le type des entités en entrée.

La figure 3.14 explicite notre traitement, les entités en entrée sont sous forme de polygones (**A**). Cela aboutit à des entités en sortie sous forme des polygones (**C**). Les valeurs attributaires des classes d'entités en entrée sont copiées vers la classe d'entités en sortie. Le contour de la région d'étude (**B**) a été aussi utilisé en entrée afin de superposer et extraire les polygones de l'entité en sortie.

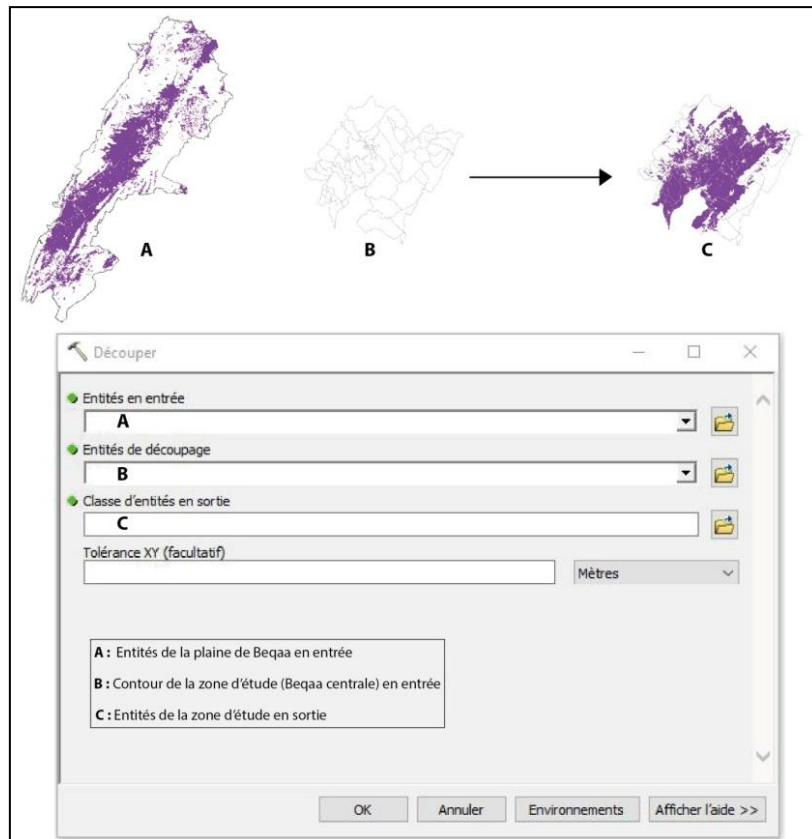


Fig. 3.14 - Fenêtre de l'outil « Découper une entité » utilisé pour extraire l'entité de notre région d'étude.
Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

➤ Extraction par masque

Cet outil permet d'effectuer une analyse spatiale de l'intensité de la sécheresse. Son utilisation permet d'extraire les cellules d'un raster qui correspondent aux zones définies par un masque (figure 3.15). Cet outil a pour but de visualiser l'intensité de la sécheresse dans la zone définie qui est le territoire agricole de la Beqaa centrale.

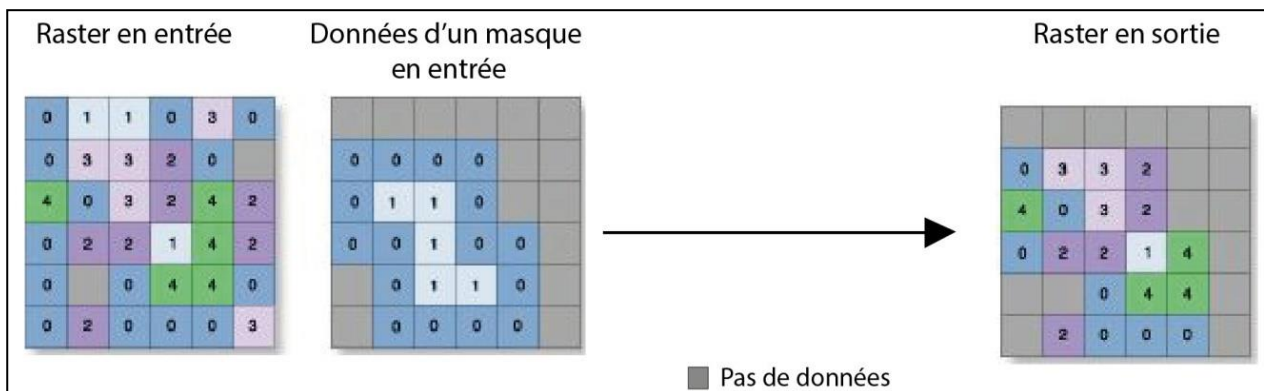


Fig. 3.15 - Traitement par l'outil d'extraction par masque. Source : ArcMap, 10.5. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

Deux types de données en entrée sont utilisés pour obtenir une image raster de la zone agricole : vectorielle et raster.

En effet, le résultat s'apparente à celui de la configuration de l'environnement. Autrement dit, il découpe la forme du masque en entrée (zone agricole en format vectoriel) en gardant uniquement les valeurs de cellule extraites du raster en entrée. Ce traitement est illustré dans la figure 3.16.

Lorsqu'un raster multi-canal est spécifié comme entrée (**A**), un nouveau raster multi-canal est créé comme sortie (**B**). Chaque canal individuel dans le raster multi-canal est analysé en conséquence. Si l'entrée est une couche créée à partir d'un raster multi-canal comportant plus de trois canaux, l'opération d'extraction considère uniquement les canaux qui ont été symbolisés par la couche. En conséquence, le raster multi-canal en sortie peut avoir uniquement trois canaux, qui correspondent à ceux utilisés dans l'affichage de la couche en entrée. Cet outil a été aussi utilisé ultérieurement pour extraire les images raster de chaque culture. Cette étape a été répétée pour chaque année de la période 2001 à 2015 afin de suivre l'évolution spatiale de la sécheresse.

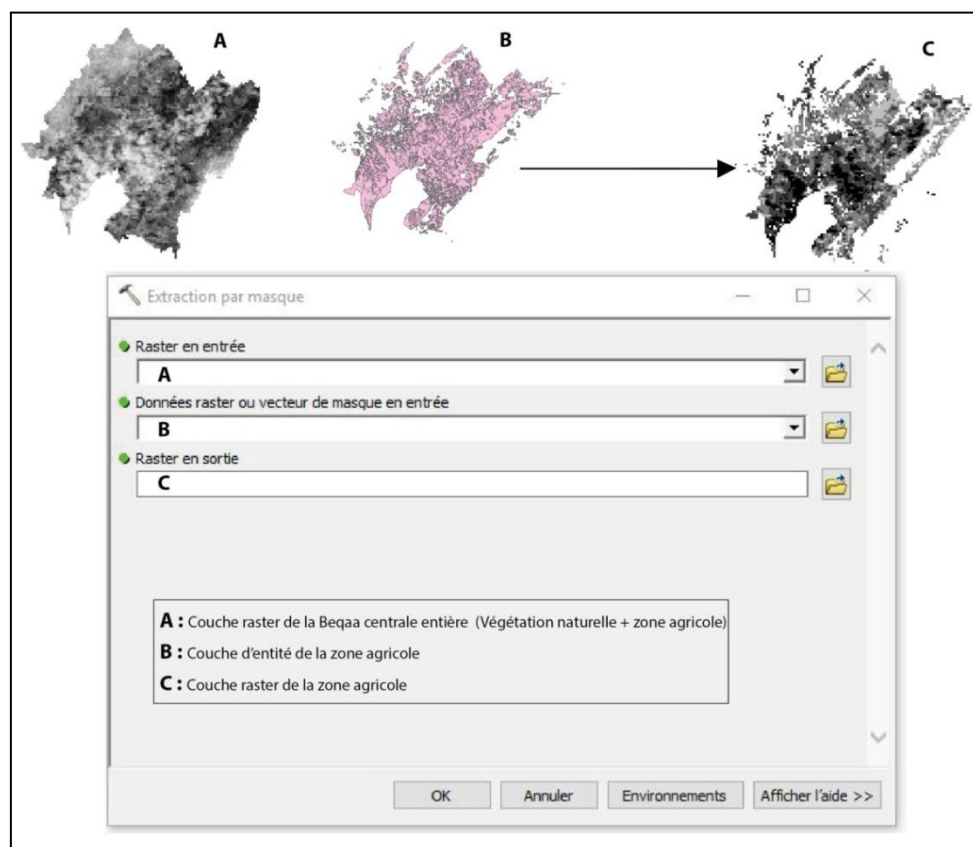


Fig. 3.16 - Fenêtre de l'outil « Extraction par masque » utilisé pour créer une couche raster de la zone agricole de notre région d'étude. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

➤ Calculatrice raster

Cet outil est une étape essentielle dans notre démarche méthodologique. Elle consiste à séparer et classer la sécheresse selon son intensité. En effet, l'outil « calculatrice raster » permet de créer et d'exécuter une expression d'algèbre spatiale qui génère un raster en sortie. Dans notre cas, il nous a permis de sélectionner les zones selon l'intervalle de l'intensité de la sécheresse (classification de Kogan). Nous avons utilisé la liste « Couches et variables » pour sélectionner les jeux de données et les variables à utiliser dans l'expression. Des valeurs numériques et des opérateurs mathématiques peuvent être ajoutés à l'expression en cliquant sur les boutons correspondant dans la boîte de dialogue de l'outil. Une liste d'outils conditionnels et mathématiques courants est fournie, qu'il est facile d'ajouter à l'expression. En effet, on a introduit l'expression « $vhi \leq 40$ », afin de distinguer les zones agricoles sèches des autres non sèches (fig. 3.17).

Cet outil a été aussi utilisé pour extraire les différents types d'intensités de sécheresse. Par exemple, nous avons introduit l'intervalle « $20 \leq VHI \leq 40$ » afin d'extraire les zones agricoles endommagées par une sécheresse modérée et légère. Ainsi, nous avons employé l'expression « $0 \leq VHI \leq 20$ » pour sélectionner la sécheresse sévère et extrême.

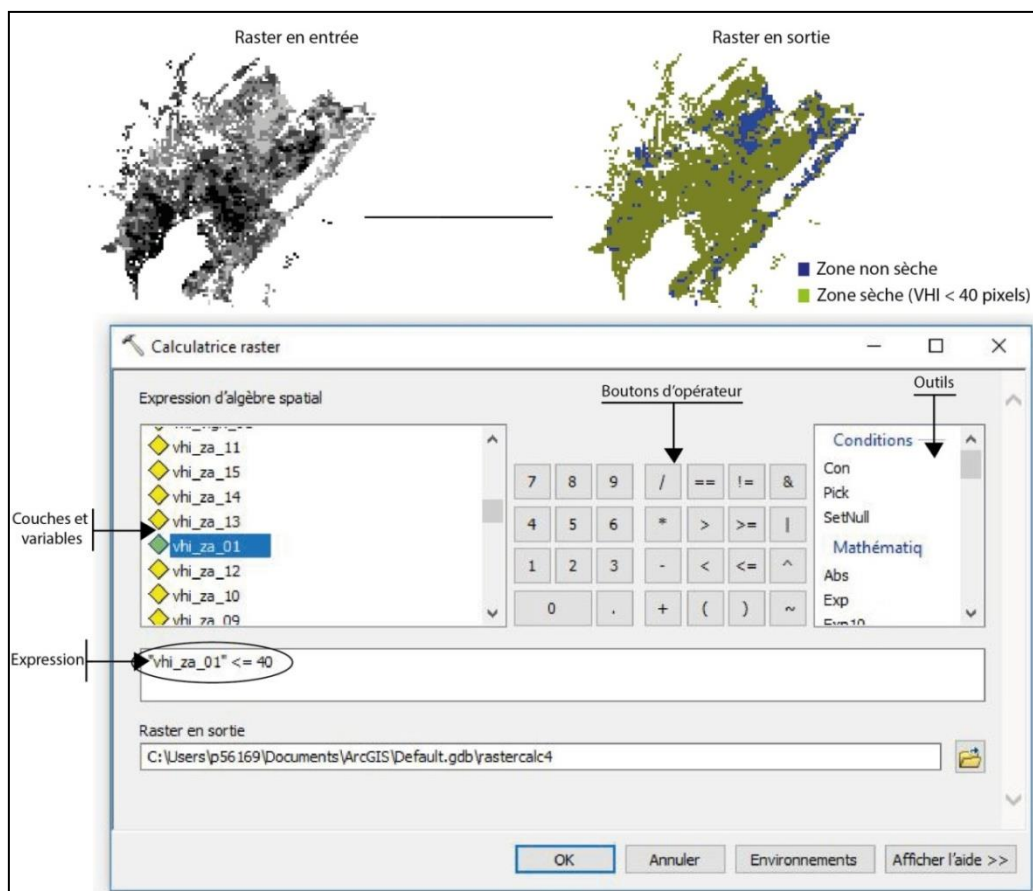


Fig. 3.17 - Fenêtre de l'outil « calculatrice raster » utilisé pour extraire les zones agricoles touchées par la sécheresse. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

➤ Raster vers polygones

Il permet de calculer la surface agricole endommagée par la sécheresse, extraite par l'outil précédent « calculatrice raster ». Il convertit le jeu de données raster en entités surfaciques sous formes de polygones (figure 3.18).

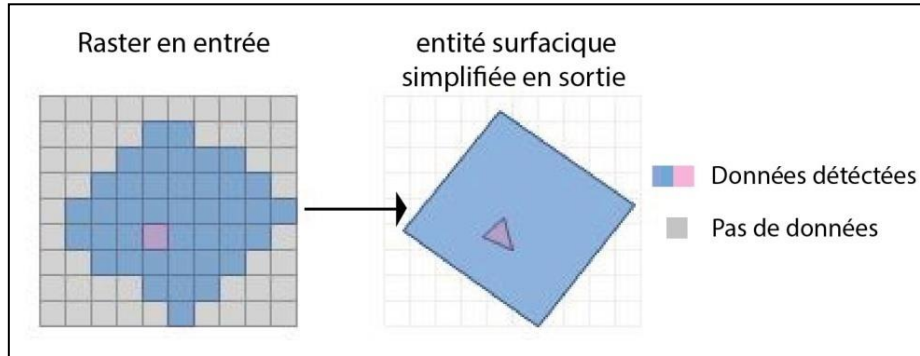


Fig. 3.18 - Traitement par l'outil « Raster vers polygones ». Source : ArcMap, 10.5. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

La première étape de ce traitement comporte la transformation (vectorisation) du raster en entrée afin de la convertir en entité surfacique en sortie (fig. 3.19). Pour cela, le raster en entrée doit correspondre à un jeu de données de raster de type entier valide (obtenir par l'outil de calculatrice raster).

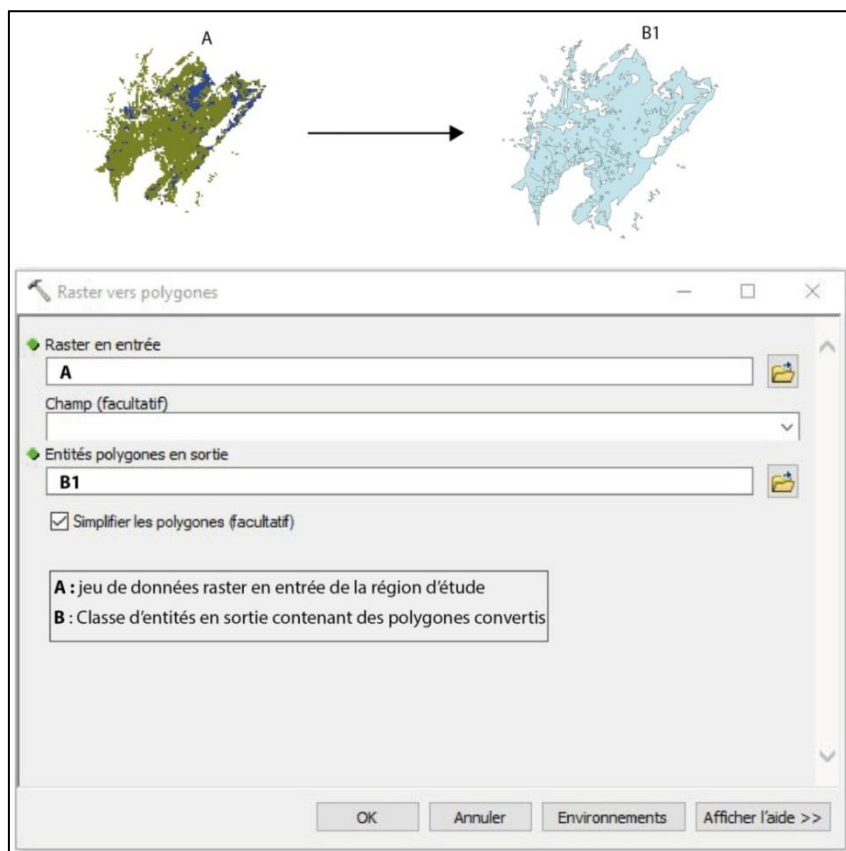


Fig. 3.19 - Transformation le raster (entrée) en entité surfacique sous forme polygonal (sortie). Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.

La deuxième étape consiste à choisir quel champ attributaire du jeu de données raster (en entrée) deviendra un attribut de la classe d'entités en sortie. Si aucun champ n'est spécifié, les valeurs de cellules du raster en entrée (le champ VALUE) deviennent une colonne avec l'entête « Gridcode » dans la table attributaire de la classe d'entités en sortie.

Les valeurs dans la colonne de « Gridcode » sont présentées par deux codes : 0 et 1 (fig. 3.20). Le code 0 représente la surface non endommagée par la sécheresse. Le code « 1 » représente la surface touchée par la sécheresse. Cette valeur a été sélectionnée afin de calculer la surface sèche uniquement.

Après l'extraction de ces polygones, nous avons créé une nouvelle colonne avec l'entête « Shape area » dans la table attributaire. Ensuite, nous avons choisi l'option « calculer la géométrie » dans la table attributaire de la couche afin de choisir l'unité de calcul (ha, Km², m², etc...)

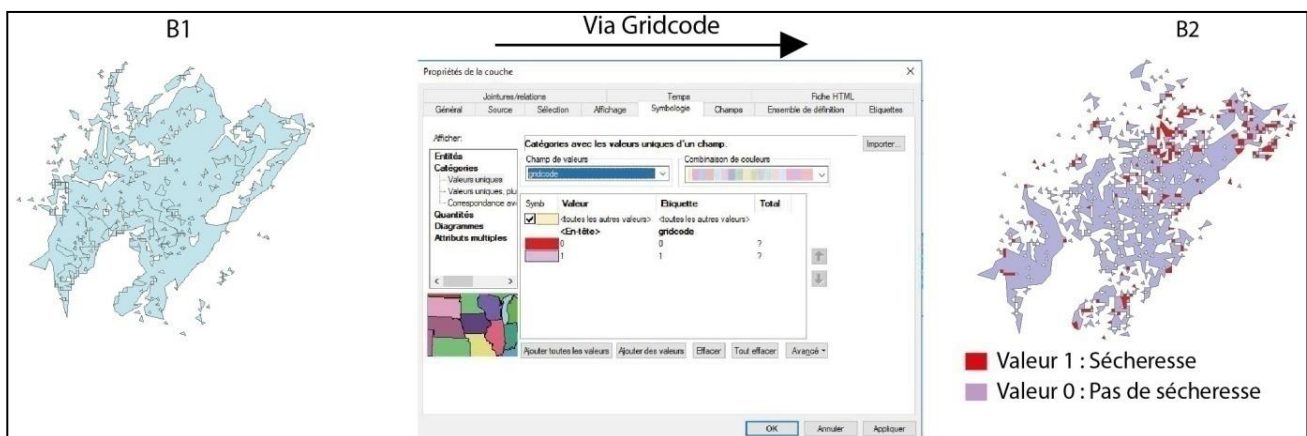


Fig. 3.20 - : Sélectionner les polygones de la sécheresse via Gridcode. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.

➤ Raster vers points

Cet outil est la dernière étape de notre traitement sur la plateforme d'ARCGIS. Il consiste à calculer la valeur de VHI à partir des images raster obtenues en sortie lors de l'outil « extraction par masque ». En effet, il permet de convertir un jeu de données raster en entités ponctuelles (figure 3.22).

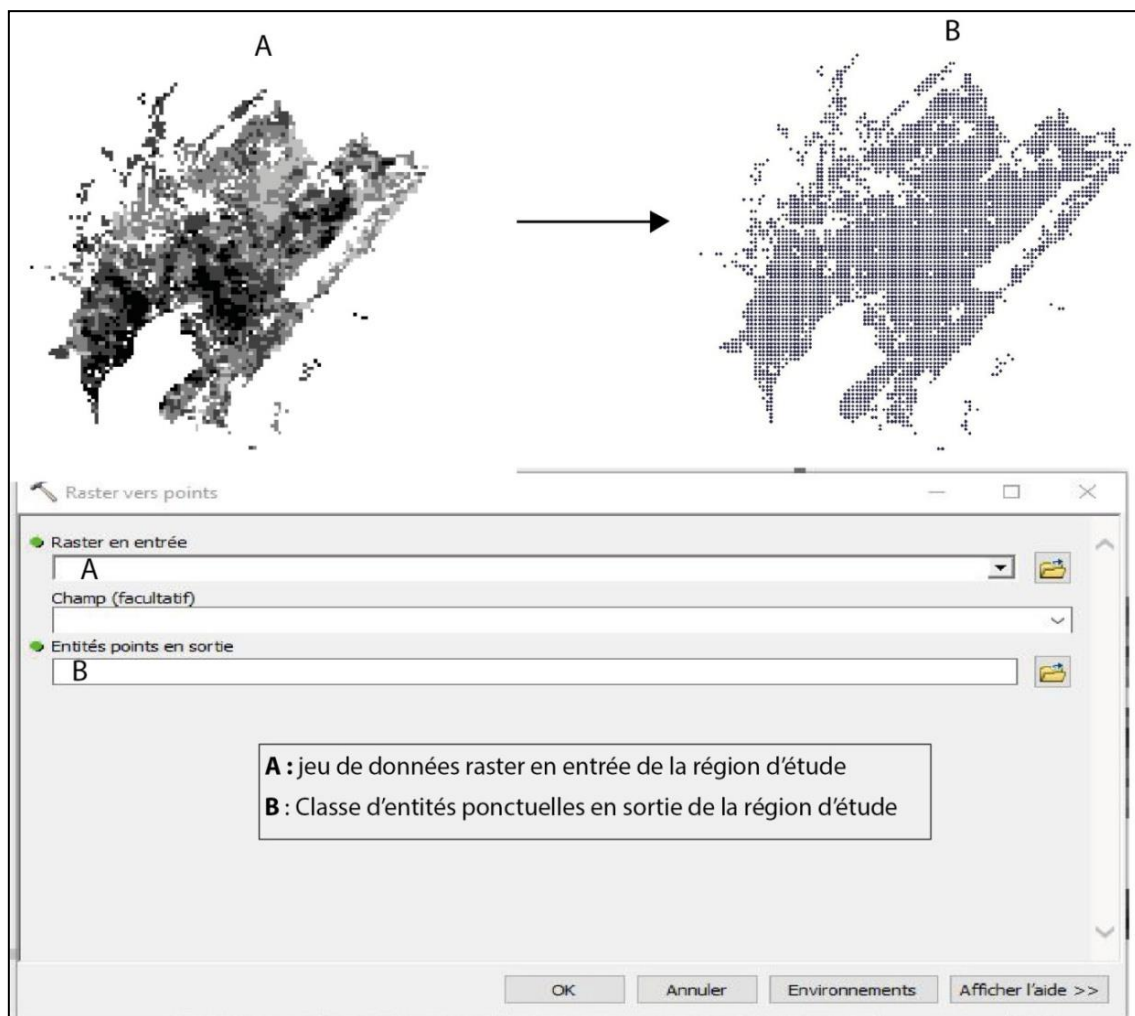


Fig. 3.21 - Transformation d'un raster en un point (image raster en entrée à gauche et image avec des points en sortie à droite). Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.

Pour chaque cellule du jeu de données raster en entrée, un point est créé dans la classe d'entités en sortie. Ces points sont positionnés aux centres des cellules qu'ils représentent. Chaque point représente une valeur de VHI permettant de classer l'intensité de la sécheresse en cinq intervalles entre 0 et 100 (0-0,1 ; 0,1-0,2 ; 0,2-0,3 ; 0,3-0,4 ; 0,4-1).

La valeur de chaque point a été calculée par cet outil ainsi que la moyenne de VHI. Cette opération a été répétée pour chaque intervalle et pour toute la période d'étude. La figure 3.23 est un modèle qui montre l'introduction de l'expression pour calculer les valeurs des points dans l'intervalle de la sécheresse légère ($0,3 < \text{VHI} < 0,4$).

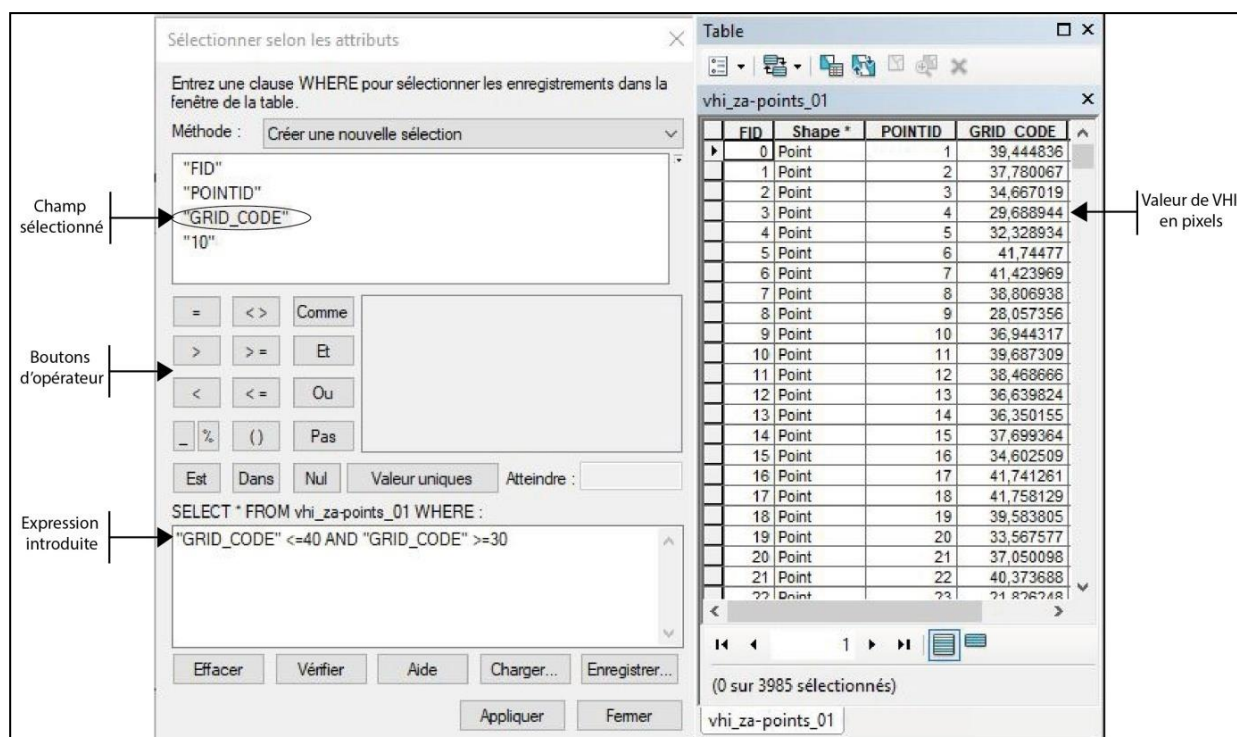


Fig. 3.22 - Calcul de la valeur moyenne de VHI entre 0,3 et 0,4 représentant la sécheresse légère. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.

3.7 Comparaison du VHI à un autre indicateur de sécheresse le SPI

La relation entre la végétation et la disponibilité de l'humidité a été clarifiée en analysant la co-variation du VHI et les séries temporelles de SPI. Il existe très peu de données climatiques dans notre région d'étude et elles sont difficiles d'accès. En effet, la plupart des stations de la région ont cessé de fonctionner pendant la guerre civile pour la période de 1975 à 1990. Pour cette raison, il fallait un indicateur de sécheresse qui soit simple à utiliser et qui pouvait s'adapter au cas de la plaine de Beqaa.

Le SPI est capable de quantifier l'écart des précipitations sur une période donnée, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques (McKee *et al.*, 1993). Il répond à l'équation suivante: $SPI = (P - P_m) / \sigma_p$ où P correspond à la précipitation totale d'une période (mm) ; P_m , la précipitation moyenne historique d'une période (mm) et, l'écart-type est historique des précipitations de la période (mm).

Ainsi, il a été choisi parce qu'il est simple à calculer puisqu'il se base uniquement sur des données de précipitations (McKee *et al.* 1993; McKee *et al.* 1995). Cette simplicité donne un avantage au SPI par rapport aux autres indicateurs de sécheresse météorologique. A titre d'exemple le PDSI. La procédure de calcul de PDSI est plus complexe parce qu'il tient

compte de 68 termes (Soulé, 1992). Ainsi, le SPI a été utilisé pour compléter les informations issues d'autres indicateurs de sécheresse comme le SWSI (Shafer et Dezman, 1982).

Le SPI est aussi polyvalent parce qu'il peut être calculé sur n'importe quelle échelle de temps, de 3 mois à deux ans, ce qui lui donne la capacité de surveiller les conditions importantes comme la sécheresse pour les applications agricoles et hydrologiques (Hayes, 1996 ; Peters *et al.*, 2002). En effet, il permet de surveiller l'approvisionnement en eau à court terme, comme l'humidité du sol qui est important pour la production agricole, et à long terme les ressources en eau telles que les réserves d'eau souterraine, le débit et les niveaux des lacs et des réservoirs. Ainsi, cette polyvalence est également essentielle pour la surveillance de la dynamique temporelle d'une sécheresse, y compris son développement et son déclin, qui ont toujours été difficile à suivre avec d'autres indices. Il a été fréquemment utilisé pour le suivi des sécheresses en Nebraska, Mexique, Costa Rico, Argentine, Brésil, Turquie, et l'Afrique de Sud.

3.8 Facteurs limitatifs liés aux données utilisées

Plusieurs facteurs peuvent influencer et limiter la portée des résultats et leur interprétation. Ces facteurs peuvent être liés aux indicateurs satellitaires, météorologiques ou à l'application de la méthodologie.

Il existe néanmoins des limites dans notre étude dont il faut tenir compte pour l'interprétation des résultats. L'utilisation d'images satellites sur une série temporelle plus longue (30 ans) serait appropriée pour calculer la moyenne de l'indice de végétation VHI. Dans notre étude, nous disposons de série de données de 15 ans parce que le capteur MODIS avait été lancé en 1999 et les images de l'année 2000 étaient inexploitable pour des raisons du calibrage d'après le centre de télédétection libanais.

L'utilisation de l'indice VHI, décrivant l'état de la végétation, dépend largement des valeurs d'autres indices, que sont VCI et TCI. Ceux-ci, calculés à partir de LST et NDVI, peuvent, s'ils ont eux-mêmes connu un problème de pixel, modifier en conséquence les résultats de VHI.

En outre, les données géo-spatiales de l'utilisation du sol ne sont pas toujours à jour et peuvent être modifiées suite à un changement de culture ou à une cessation d'activité agricole.

La chaîne de traitement des images satellitaires laisse parfois certaines erreurs. Par exemple, une anomalie des valeurs des indicateurs satellitaires apparaît lors du traitement des images comme pour l'année 2000 qui n'a pas été retenue malgré les corrections effectuées au niveau du calibrage.

Les couvertures nuageuses légères, les fortes périodes d'ensoleillement et le vent pourraient empêcher une bonne détection au niveau du capteur et influencer les températures de surface qui constituent le TCI (Vogt, 1992 ; Viau et Paquette, 1997).

La position géographique de la station météorologique est aussi un facteur dont il faut tenir compte lors de l'interprétation des résultats du SPI.

Le type de culture est un facteur important dans la détection de l'intensité de la sécheresse. En effet, le suivi de l'intensité des sécheresses peut être faussé dans le cas des cultures irriguées, ce qui masque les conditions climatiques défavorables et peut par conséquent influencer le résultat du VHI.

Chapitre 4 : Mise en évidence et suivi des sécheresses observées en plaine de la Beqaa entre 2001 et 2015 : la donnée de végétation

Dans le cadre de cette étude, les résultats sur la sécheresse, provenant du traitement des images satellitaires, sont présentés dans ce chapitre. On suit ainsi les sécheresses depuis 2001 jusqu'à 2015 pour la saison agricole. Les épisodes secs sont analysés au regard de l'état de la végétation dans la région d'étude. Le VHI moyen est calculé pour chaque année à partir des indicateurs TCI et VCI (annexe 4 et 5). Le VHI permet une première approche sur l'intensité des sécheresses, sur le plan spatial et temporel, et leur répartition à l'échelle de la région d'étude.

Dans un deuxième temps, ce chapitre propose une approche différente du suivi de la sécheresse et ses caractéristiques. Un autre indice le SPI, couramment utilisé et basé sur la précipitation a été utilisé, pour mesurer l'intensité de la sécheresse. On analyse le lien entre le VHI et le SPI pour mieux caractériser l'origine de la sécheresse. Réaliser cette comparaison a donc pour objectif de s'assurer de la complémentarité de ces indices, de voir s'ils proposent les mêmes évolutions pour la période d'étude.

4.1 Suivi de l'intensité de la sécheresse selon la condition de la végétation en plaine de la Beqaa

Le tableau 4.1 illustre la valeur moyenne annuelle du VHI pour la période 2001 - 2015. Plus la valeur est basse, plus le couvert végétal est détérioré, ce qui signifie une intensité de sécheresse plus ou moins importante. Le VHI varie entre 0.23 et 0.34 selon la période d'étude, ce qui reste en dessous de la normale ($VHI < 0,4$). Ces résultats témoignent d'une condition de sécheresse plus ou moins importante mais permanente pour la période de 2001 à 2015. La valeur la plus élevée de l'indice VHI est retrouvée en 2002, montrant une intensité de sécheresse faible en majorité. L'année 2008 semble avoir été la plus impactée par la sécheresse avec un VHI calculé à 0.23.

Année	VHI
2001	0.29
2002	0.34
2003	0.27
2004	0.28
2005	0.28
2006	0.32
2007	0.32
2008	0.23
2009	0.33
2010	0.32
2011	0.30
2012	0.26
2013	0.34
2014	0.29
2015	0.32
Moyenne	0.30

Tableau 4.1 - Valeur moyenne de VHI de 2001 à 2015 Sources : *MODIS, NASA*, calculs de l'auteur, 2017).

A partir de ces résultats, la répartition spatiale des différents niveaux de sécheresse a été évaluée selon la condition de la végétation en plaine de Beqaa. En effet, le VHI a été regroupé selon les intervalles de Kogan afin de visualiser spatialement le degré de la sécheresse. Ce regroupement consiste à classer la condition du couvert végétal en cinq niveaux : extrême, sévère, modéré, légère et pas de sécheresse.

Ensuite, les cartes de VHI ont été générées en donnant une couleur spécifique à chaque intervalle correspondant aux valeurs de VHI. Ces intervalles ont été classés pour représenter les différentes intensités de sécheresse.

L'évolution spatio-temporelle de l'indice de sécheresse VHI de 2001 à 2015 montre un état de végétation vulnérable à la sécheresse, variable selon les années. En effet, les valeurs moyennes du VHI sont très basses, varient entre 0,23 à 0,34 (tableau 4.1), alors que la présentation cartographique spatiale montre qu'il approche de 0,5 uniquement dans les zones montagneuses (fig. 4.1). On constate que c'est l'indice TCI (annexe 5), extrêmement bas, et un des deux composants du VHI, qui est en cause. De fait, il s'est peut-être produit un mélange des pixels lors du traitement de l'image du TCI. Cependant, nous avons traité toutes les images raster de TCI, obtenues par le centre de télédétection au Liban, de la même manière, et en appliquant la même méthodologie. Ainsi, l'éventuel problème de valeur, en absolu, ne remet pas en cause la portée des résultats de notre étude parce qu'il s'agit d'examiner les variations relatives d'une année à l'autre.

La partie intérieure de la plaine de la Beqaa semble plus impactée que le reste de la région. Nous observons aussi que l'intensité de la sécheresse augmente du sud vers le nord de la région.

Il est clairement visible que l'année 2008 est la plus impactée par la sécheresse. En effet, le couvert végétal a été fortement impacté par une sécheresse extrême notamment dans la partie nord-est de la plaine. Notons que cette partie de la plaine n'est pas considérée comme une zone privilégiée en irrigation (LARI, 2016).

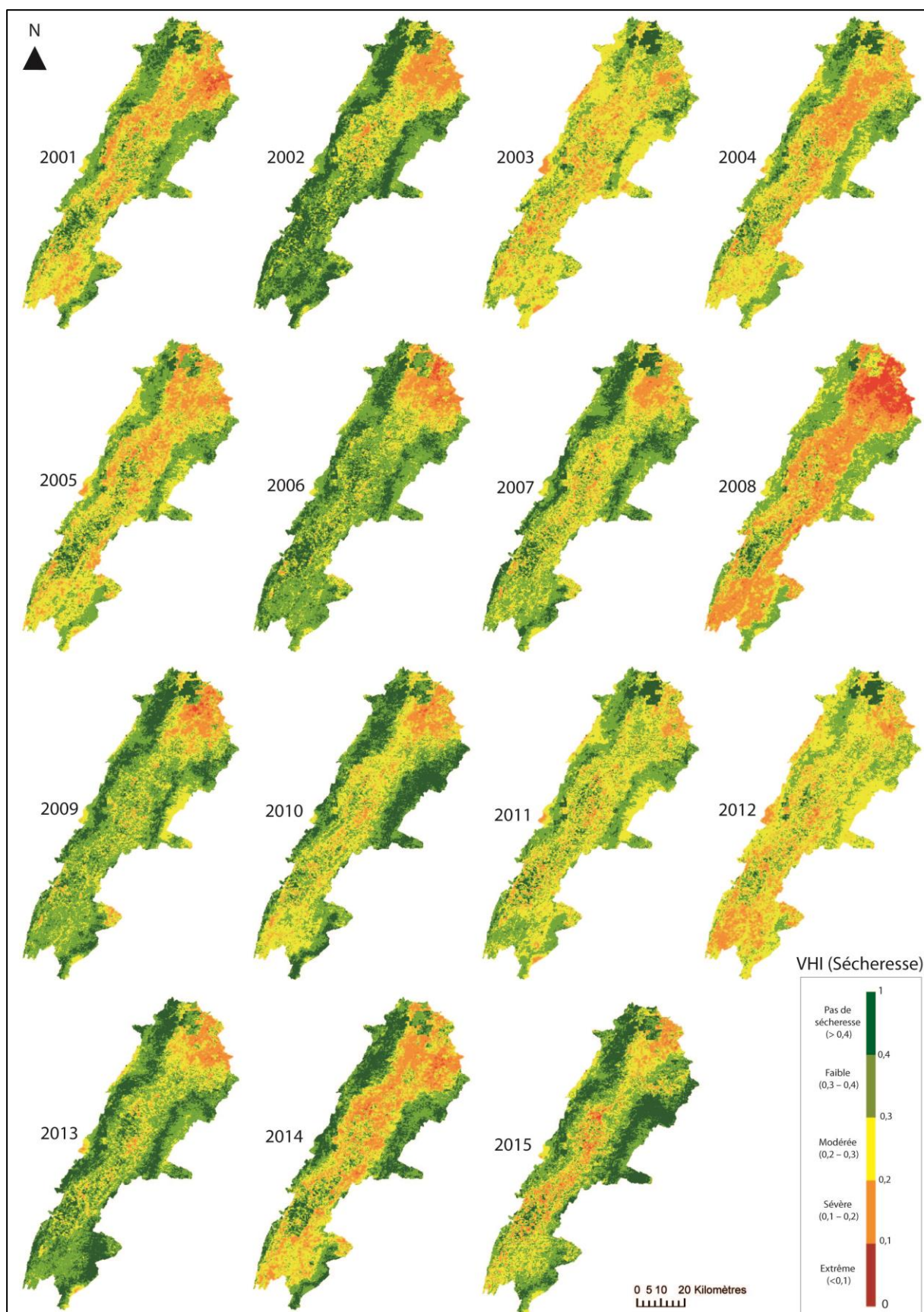


Fig. 4.1 - Répartition de l'intensité de la sécheresse mesurée par VHI sur une zone agricole de la Beqaa, pour la période agricole 2001-2015 (sources : MODIS, NASA. Réalisation : T. Nasser, 2017).

Afin de mieux suivre l'évolution de la sécheresse, nous avons classé l'intensité de la sécheresse en deux niveaux :

-Sécheresse forte ($0,1 < VHI < 0,2$), représentant une intensité sévère à extrême.

-Sécheresse faible ($0,2 < VHI < 0,4$), représentant une intensité légère à modérée.

➤ Suivi temporel de la sécheresse de forte intensité ($0 < VHI < 0,2$)

La figure 4.2 révèle l'évolution de la sécheresse de forte intensité. Les valeurs de VHI montrent une diminution de 2001 à 2015, ce qui indique une augmentation de l'intensité de la sécheresse sévère et extrême. La valeur de VHI la plus faible (0,13) est en 2008. La valeur la plus élevée (0,17) est en 2003.

On observe que le VHI moyen varie entre 0,1 et 0,2 et qu'il n'a jamais atteint une valeur inférieure à 0,1. Cela indique que le niveau de sécheresse dans cet intervalle est en majorité de type sévère (selon la classification de Kogan) dans la plaine de Beqaa.

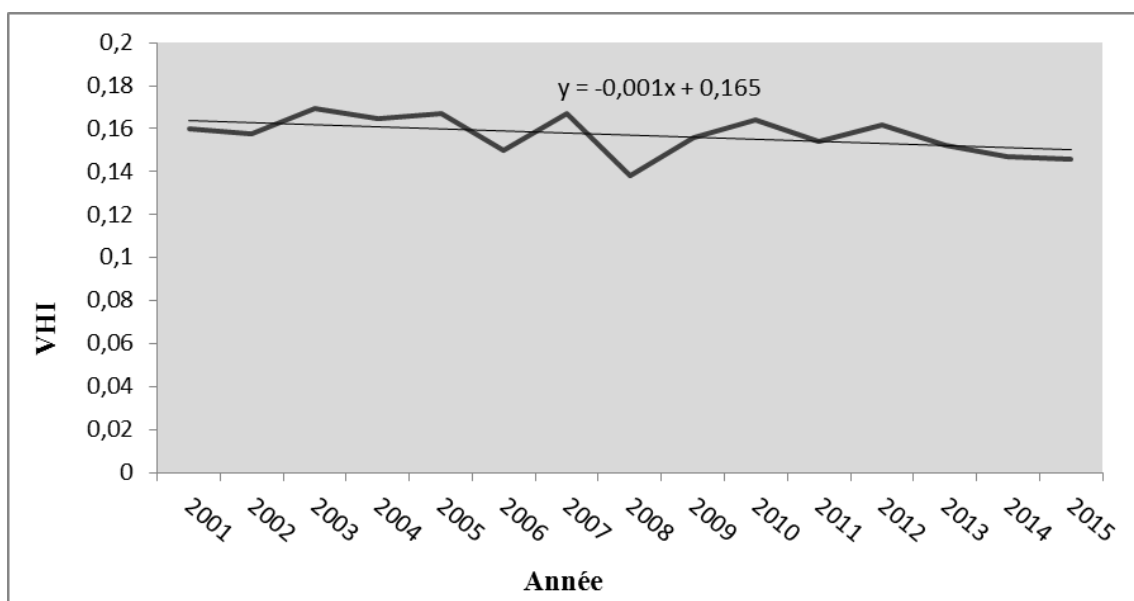


Fig. 4.2 - Evolution de VHI de l'intervalle 0 à 0.2 correspondant à la sécheresse de forte intensité pour la période de 2001 à 2015.

La surface végétale touchée par une sécheresse forte est présentée dans le graphique de la figure 4.3. Cette surface était moins impactée par ce type de sécheresse en 2011 (7%). Par contre, l'état du couvert végétal a été fortement impacté en 2008 avec plus de 42% de la surface qui était touchée par une sécheresse sévère à extrême.

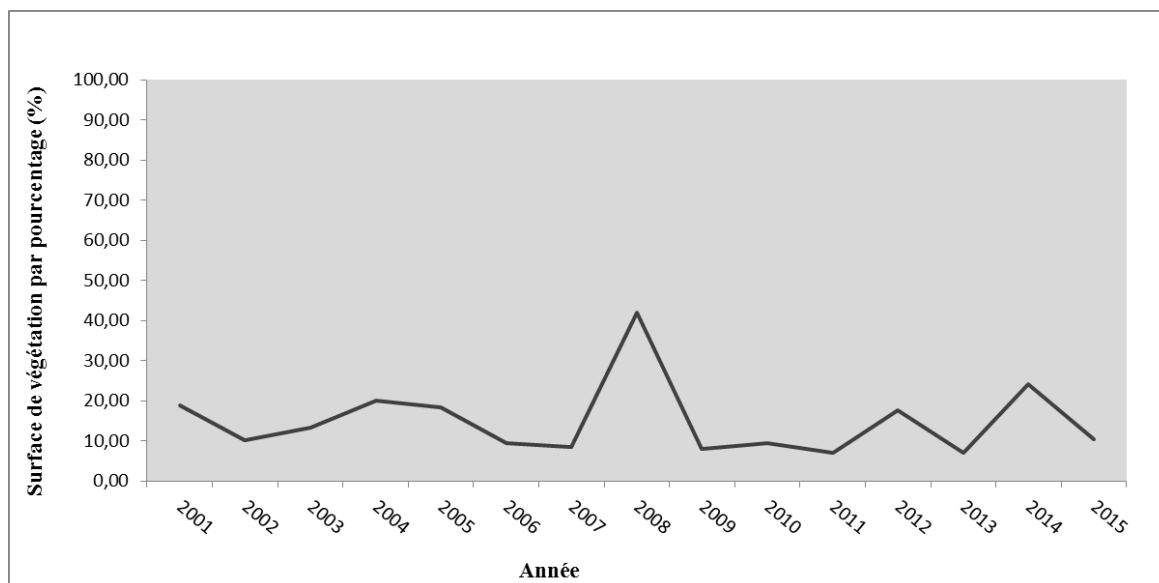


Fig. 4.3 - Evolution de la surface touchée par une sécheresse de forte intensité selon les valeurs de VHI pour la période 2001 - 2015.

➤ Suivi temporel de la sécheresse de faible intensité ($0,2 < \text{VHI} < 0,4$)

La figure 4.4 illustre l'évolution de la sécheresse de faible intensité, représentée par l'intervalle « $0,2 < \text{VHI} < 0,4$ ».

Une légère augmentation de VHI a été observée de la période allant de 2001 à 2015. La valeur la plus faible est en 2012 (0,27) et la plus élevée est en 2006 (0,33). Selon le classement de Kogan, on remarque que la sécheresse de type légère¹² s'est produite seulement 4 fois au cours de la période étudiée (2002, 2006, 2009 et 2013). Cela indique une dominance de la sécheresse de type modérée dans la plaine.

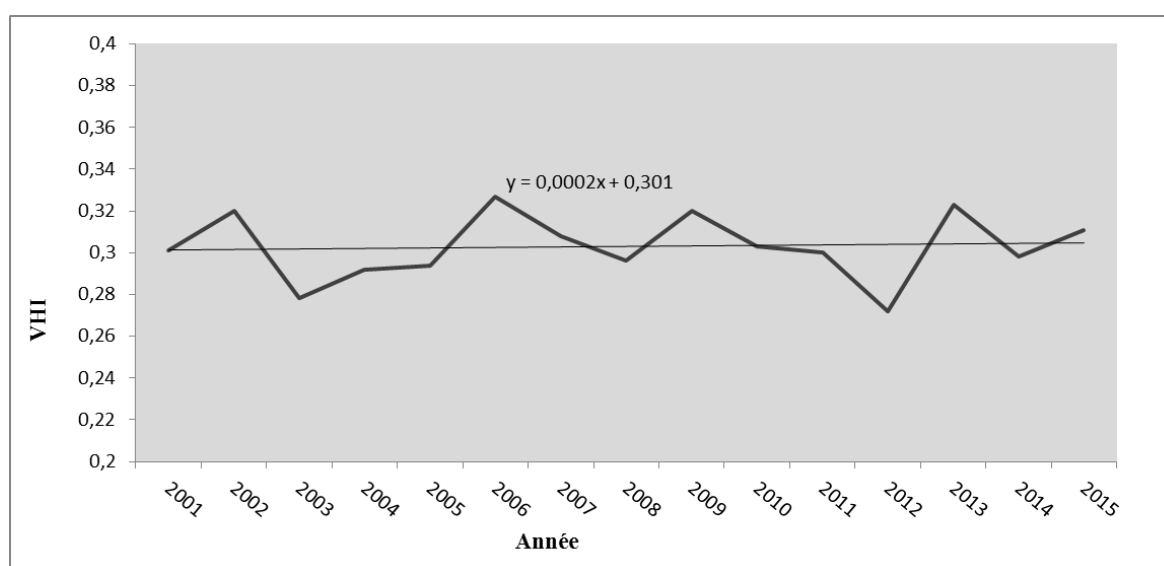


Fig. 4.4 - Evolution de VHI de l'intervalle 0,2 à 0,4 correspondant à la sécheresse de faible intensité

¹² ($0,3 < \text{VHI} < 0,4$)

La surface végétale touchée par une sécheresse faible est présentée dans la figure 4.5. Cette surface varie grandement d'une année à une autre. Près de 82% du couvert végétal était touché par ce type de sécheresse en 2011, représentant la valeur la plus élevée. En 2008, la surface est peu impactée par la sécheresse faible car elle est en majorité touchée par une sécheresse sévère comme indiqué précédemment.



Fig. 4.5 - Evolution de la surface touchée par une faible intensité de sécheresse de 2001 à 2015.

➤ Suivi spatial de l'intensité de la sécheresse selon la condition de la végétation

Sur la plateforme d'ARCGIS, en utilisant l'outil « Raster vers points », nous avons détecté 62 265 points au total, représentant la superficie totale de la végétation en plaine de la Beqaa (fig. 4.6) Chaque point correspond à une valeur de VHI. Pour comprendre l'évolution de l'intensité de la sécheresse, nous avons étudié la répartition des valeurs de VHI représentées par les points détectés. Selon ces valeurs, plus le nombre de points détectés est important dans un intervalle donné, plus la sécheresse correspondante est envahissante.

Le tableau 4.2 illustre la répartition des points détectés dans chaque intervalle de VHI pour la période de 2001 à 2015.

Plus de 70% des points (valeur des cellules raster) ont été repérés dans l'intervalle qui correspond à la sécheresse de faible intensité. Près de 15% des points ont été détectés dans l'intervalle qui correspond à la sécheresse de forte intensité.

Intervalle de VHI	0 <VHI< 0.2 (Sécheresse de forte intensité)	0.2 <VHI< 0.4 (sécheresse de faible intensité)	VHI> 0.4 (pas de sécheresse)
Points détectés en %	15%	70,75%	14,25%

Tableau 4.2 - Répartition des points, correspondant aux valeurs des cellules raster, selon les différents intervalles de classification de VHI pendant toute la période d'étude. Calcul de l'auteur, 2017.

Près de 14% des points ont été trouvés dans l'intervalle, désignant une condition optimale ou non du stress hydrique ($VHI > 0,4$).

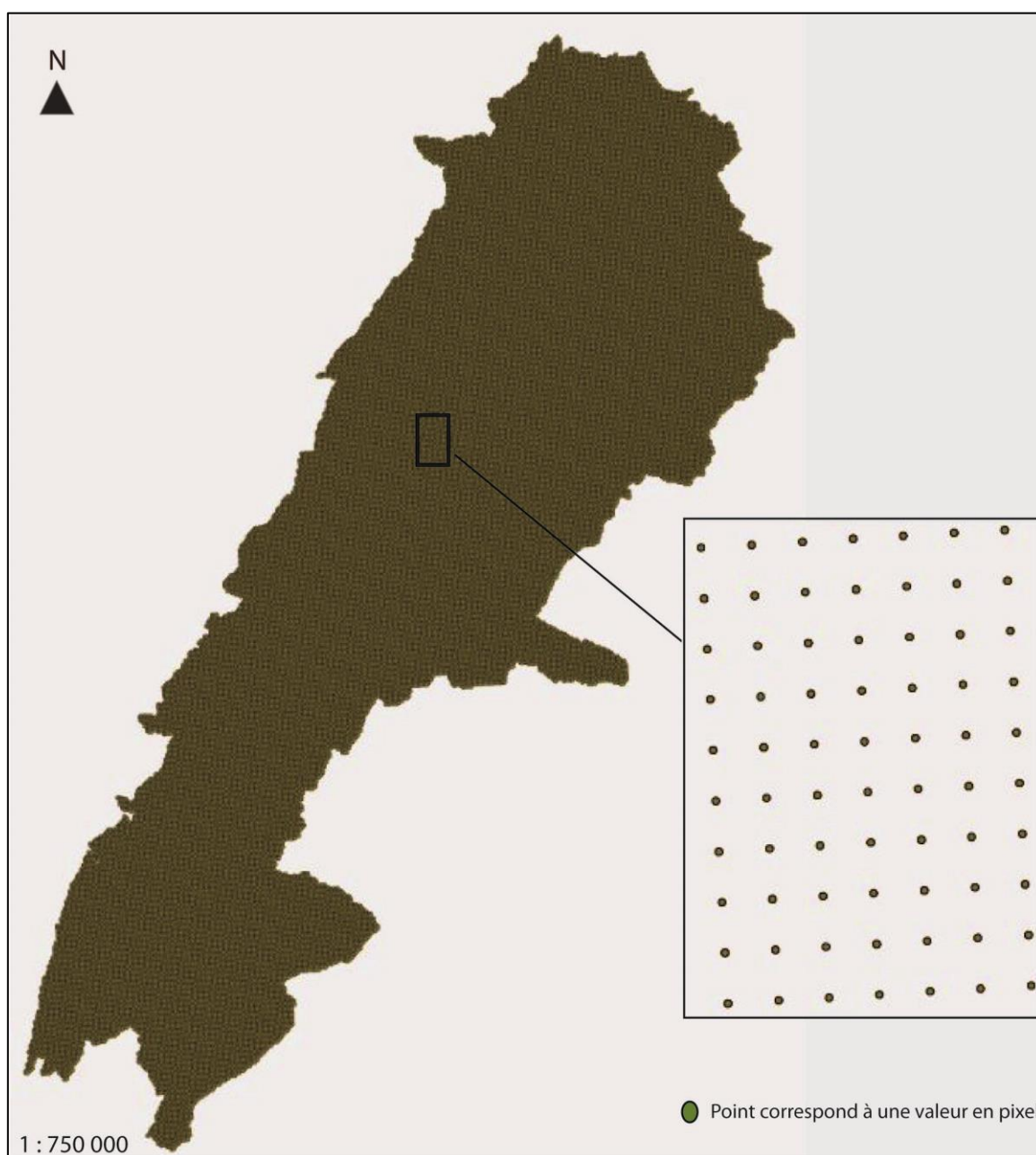


Fig. 4.6 - Points détectés dans la plaine de la Beqaa, correspondant à des valeurs. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018

La figure 4.7 illustre la répartition des valeurs de VHI pour la période allant de 2001 à 2015. Le VHI, compris entre 0,2 et 0,4, est majoritaire pendant toute la période d'étude. En effet, le nombre de points varie entre 38 000 (61,2%) et 59 000 (95,2%). Il atteint son maximum en 2011 et son minimum en 2008.

Le VHI, compris entre 0 et 0,2, varie grandement d'une année à l'autre. Le nombre varie entre 4 700 points (7,6%) et 30 000 (48,4%). Il atteint son maximum en 2008 et son minimum en 2011.

Le VHI, ayant une valeur supérieure à 0,4, est assez variable selon l'année. Ainsi, il est le moins important par rapport aux deux autres intervalles, car il n'a jamais dépassé le seuil de 10% à l'exception de l'année 2002 où il atteint son maximum (33% du nombre total des points détectés).

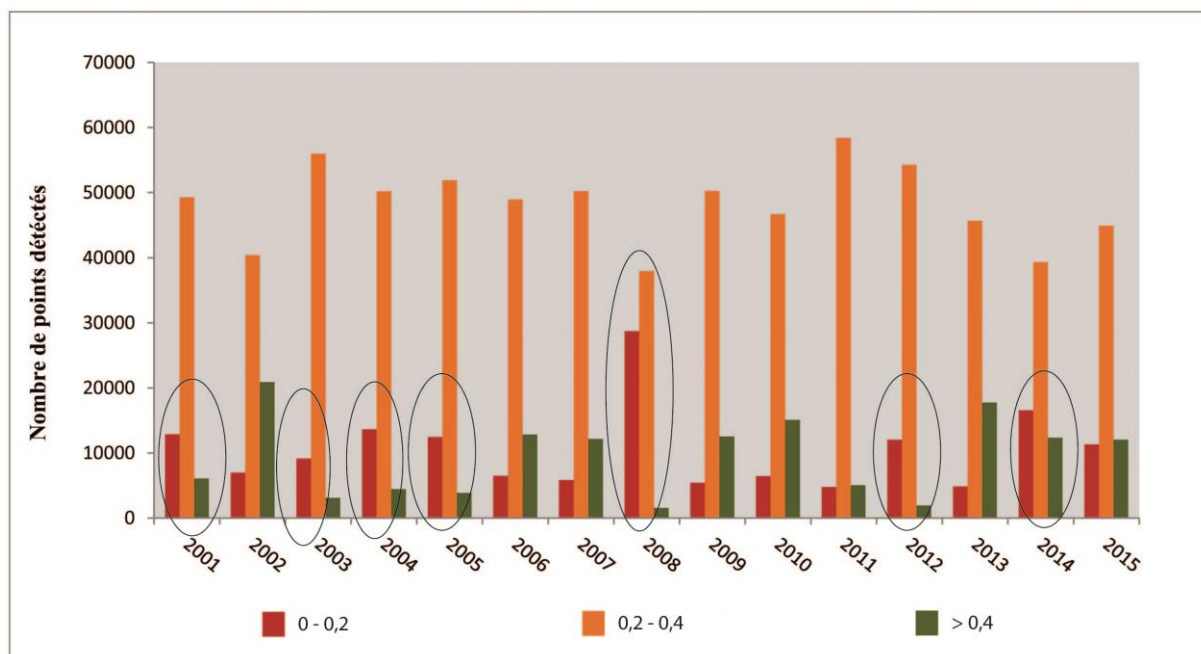


Fig. 4.7 - Répartition du nombre de points dans les différents intervalles de classification de sécheresse.
Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018

La répartition des points dans les trois intervalles pour l'année de 2008 est notamment remarquable. Le nombre de points qui désigne une condition de végétation normale est très bas (3% du nombre total de points détectés). Cela indique que la sécheresse s'est produite dans la quasi-totalité de la superficie verte y compris les zones irriguées.

D'un autre côté, une forte diminution du nombre des points, représentant une faible sécheresse ($0,2 < \text{VHI} < 0,4$), a été observée par rapport à la moyenne annuelle. En parallèle, une forte augmentation du nombre des points dans l'intervalle de forte sécheresse, a été nettement remarquée.

En revanche, la situation en 2011 est complètement différente de celle en 2008. Le nombre de points dans l'intervalle de faible sécheresse atteint son maximum (près de 90% du nombre total des points). Le nombre de points dans l'intervalle de forte sécheresse atteint son minimum par rapport à la moyenne annuelle. Les points dans l'intervalle, représentant une condition normale de la végétation, ne témoignent pas d'une évolution remarquable par rapport aux autres années.

Cette comparaison entre les deux années nous montre que le recul du nombre de points dans l'intervalle de faible sécheresse se fait souvent en faveur de l'intervalle de forte sécheresse. Autrement dit, ce sont les zones touchées par une sécheresse modérée qui sont vulnérables à la sécheresse sévère. La figure 4.8 illustre une comparaison spatiale de VHI entre l'année 2008 (la plus sèche) et la moyenne (2001-2015).

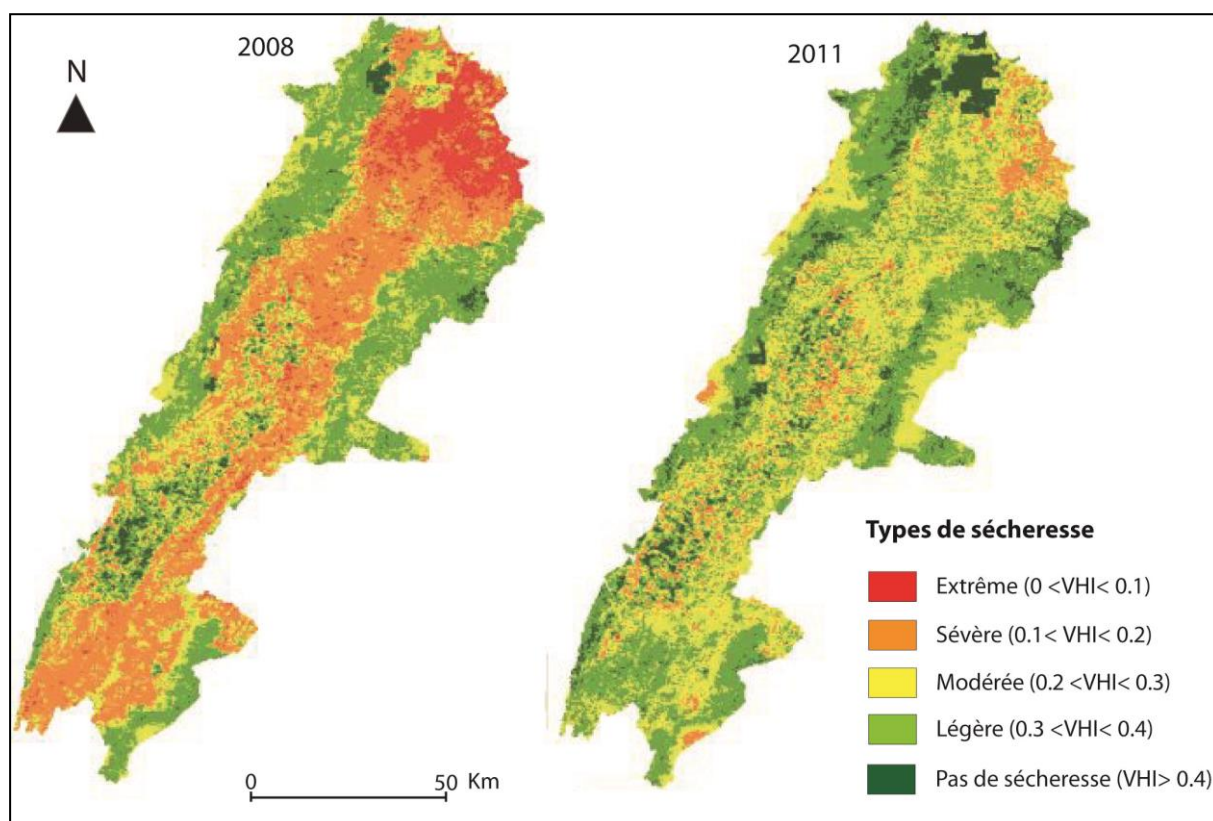


Fig. 4.8 - Répartition spatiale de différentes intensités de sécheresse pour l'année 2008 et la moyenne (2001 – 2015). Source : MODIS, NASA Réalisation : T. NASSER, 2018.

On remarque qu'une variation spatiale importante s'est produite dans la partie intérieure de la région. Ainsi, dans le cas d'une augmentation d'intensité, la surface touchée par une sécheresse modérée (couleur jaune) se transforme en sévère et extrême (rouge et orange). En effet, on observe qu'une intensité de sécheresse de type sévère est apparue sur la quasi-totalité

de la partie intérieure de la plaine. En revanche, la carte de la sécheresse moyenne témoigne une apparition majoritaire de la sécheresse de type modérée sur l'ensemble du territoire.

Il est clairement visible que les valeurs de VHI varient dans l'intervalle 0,1 et 0,3. Cela veut dire que lorsque les conditions drastiques s'aggravent, le VHI, compris entre 0,2 et 0,3 connaît une évolution rapide et passe dans l'intervalle de forte intensité notamment sévère ($0,1 < \text{VHI} < 0,2$).

En cas d'année sèche, l'évolution de l'intensité de la sécheresse se produit en majorité dans l'intervalle de VHI qui est compris entre 0,1 et 0,3 (modérée à sévère). Le tableau révèle la répartition de l'intensité de la sécheresse selon la superficie végétale.

Type de sécheresse	2008	Moyenne
Extrême ($0 < \text{VHI} < 0,1$)	6.3 %	0.9 %
Sévère ($0,1 < \text{VHI} < 0,2$)	35.8 %	6.1 %
Total ($0 < \text{VHI} < 0,2$)	42.1 %	7 %
Modérée ($0,2 < \text{VHI} < 0,3$)	39.2 %	63.8 %
Légère ($0,3 < \text{VHI} < 0,4$)	16.4 %	21.8 %
Total ($0,2 < \text{VHI} < 0,4$)	55.6 %	85.6 %
Pas de sécheresse ($> 0,4$)	2.3 %	7.4 %

Tableau 4.3 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse dans la plaine de la Beqaa en 2008, 2011. (Source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).

Près de 42% du couvert végétal était endommagé par une sécheresse de forte intensité et plus de 55% par une faible intensité en 2008. Par contre, plus de 85% de la surface verte était touchée par une sécheresse de faible intensité contre 7% par une forte intensité.

Nous remarquons que la baisse du VHI moyen est combinée à une augmentation du nombre ayant un VHI en dessous de 0,2, représentant les sécheresses sévères et extrêmes. Ainsi, la variation de la sécheresse s'est produite dans l'intervalle 0,1 et 0,3.

4.2 Suivi de la sécheresse sur un territoire agricole : Cas de la Beqaa centrale

Dans cette section, nous nous intéressons à une partie de la plaine qui est la Beqaa centrale. Les explications sur le choix de cette zone sont données dans la partie précédente de ce travail. Le calcul du tableau 4.4 illustre l'évolution de la sécheresse agricole selon deux critères : le critère d'intensité par le VHI moyen, et le critère d'intensité selon le nombre en dessous du seuil de 0,2. L'intensité de sécheresse la plus élevée a été observée en 2015 (VHI = 0,24), tandis que, l'année 2002 représente des conditions drastiques moins importantes (VHI = 0,38). Nous constatons aussi que la baisse du VHI moyen est combinée à une augmentation du nombre ayant un VHI en dessous de 0,2. Cela indique une augmentation de la sévérité de la sécheresse agricole.

Année	VHI	% nb pixel VHI<0.2
2001	0,29	17%
2002	0,38	2%
2003	0,26	21%
2004	0,28	11%
2005	0,30	6%
2006	0,35	3%
2007	0,31	8%
2008	0,27	19%
2009	0,33	6%
2010	0,29	8%
2011	0,29	6%
2012	0,26	10%
2013	0,33	5%
2014	0,28	12%
2015	0,24	23%
Moyenne	0,29	10,5%

Tableau 4.4 - Valeur moyenne de VHI de 2001 à 2015 pour la zone agricole en Beqaa centrale. Sources : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).

La figure 4.9 illustre l'évolution spatiale de l'indicateur de végétation VHI de 2001 à 2015. Elle montre un état de végétation vulnérable à la sécheresse, variable selon les années. Les années 2003, 2008 et 2015 révèlent une couverture spatiale de la sécheresse de forte intensité

plus importante que les autres années. Cette couverture occupe presque un quart de la surface agricole de notre région d'étude.

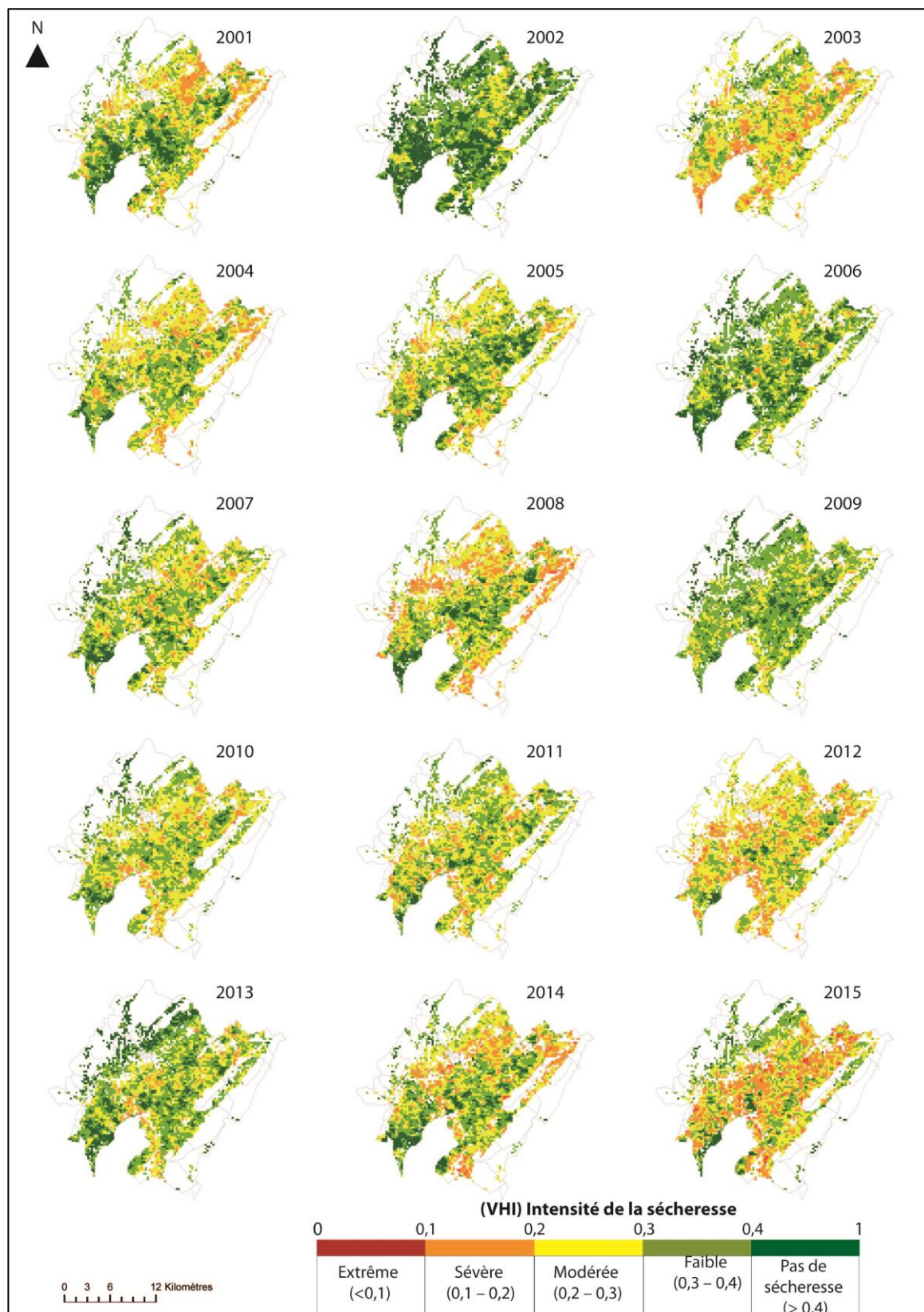


Fig. 4.9 - Evolution de VHI pour la zone agricole pour la période agricole 2001-2015. Sources : MODIS, NASA.
Réalisation : T. Nasser, 2017.

Le tableau 4.5 représente l'occurrence de la sécheresse durant la période d'étude.

VHI par rapport à la moyenne	Nombre d'années	Taux en %
Inférieur	6	40%
Supérieur	9	60%

Tableau 4.5 - Situation de VHI par rapport à la moyenne pour la période d'étude. (Réalisation : T. NASSER- université d'Orléans- CEDETE, 2018).

➤ Suivi temporel de la sécheresse de forte intensité ($0 < \text{VHI} < 0,2$)

La figure 4.10 révèle l'évolution de la sécheresse de forte intensité dans le territoire agricole de la Beqaa centrale. L'évolution des valeurs du VHI montre une tendance à la diminution donc une augmentation de l'intensité de la sécheresse, sachant que la période la plus sèche est en 2015 ($\text{VHI} = 0,12$) et la moins sèche est en 2002 ($0,38$).

En effet, on distingue quatre périodes qui témoignent d'une augmentation successive de l'intensité de la sécheresse :

- de 2001 à 2003 où les valeurs de VHI varient entre 0,19 et 0,17.
- de 2004 à 2008 où les valeurs de VHI varient entre 0,17 et 0,16.
- de 2009 à 2011 où les valeurs de VHI varient entre 0,16 et 0,15.
- de 2012 à 2015 où les valeurs de VHI varient entre 0,15 et 0,13.

On constate aussi que le VHI varie uniquement dans l'intervalle de 0,1 - 0,2 (sécheresse de niveau sévère). Aucune valeur n'est inférieure à 0,1 mais l'année 2015 s'en est approchée.

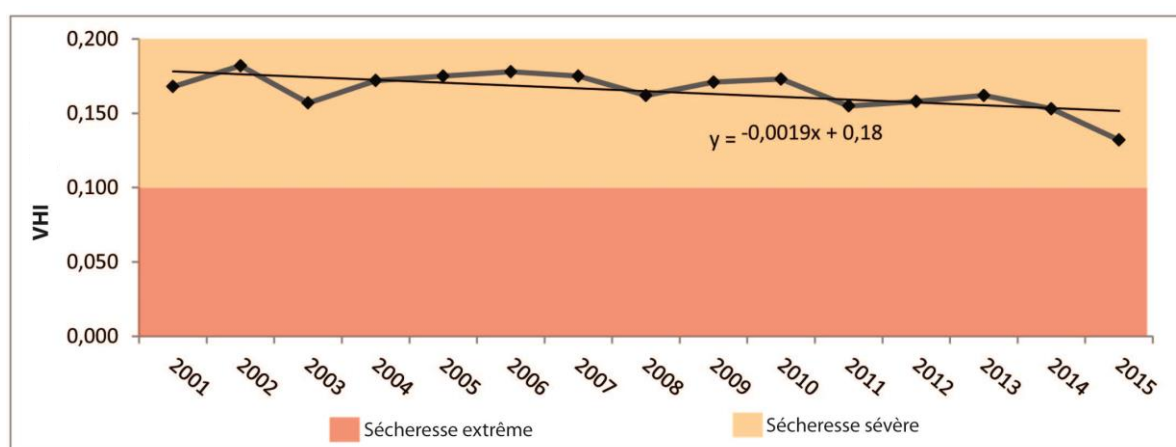


Fig. 4.10 - Evolution de VHI dans l'intervalle 0 - 0,2 dans le territoire de la région d'étude pour la période de 2001 à 2015.

Une augmentation de la surface agricole impactée par une sécheresse de forte intensité est observée selon le graphique (fig. 4.11). Cependant cette augmentation n'est pas linéaire

avec le temps. Elle est fortement variable d'une année à l'autre. Elle varie entre 1 % (2002) et 30 % (2015).

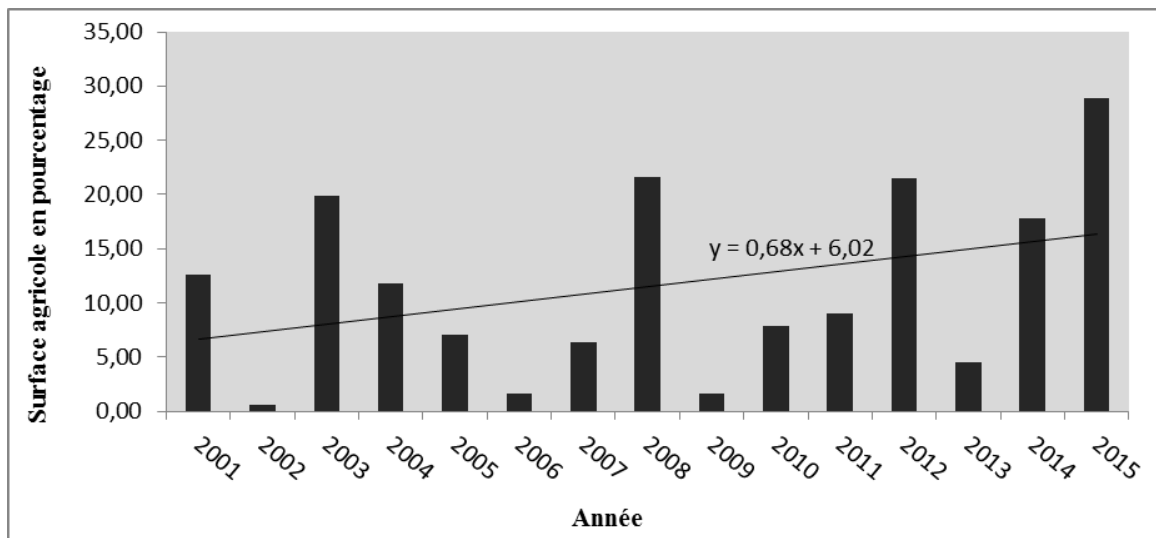


Fig. 4.11 - Evolution de la surface touchée par une sécheresse de forte intensité dans la zone agricole en Beqaa centrale de 2001 à 2015.

➤ Suivi temporel de la sécheresse de faible intensité ($0,2 < \text{VHI} < 0,4$)

L'indice VHI dans cet intervalle révèle une tendance à la diminution. Les valeurs varient grandement durant la période d'étude. Cette valeur est plus faible en 2012 (0,27) et plus élevée en 2002 (0,34).

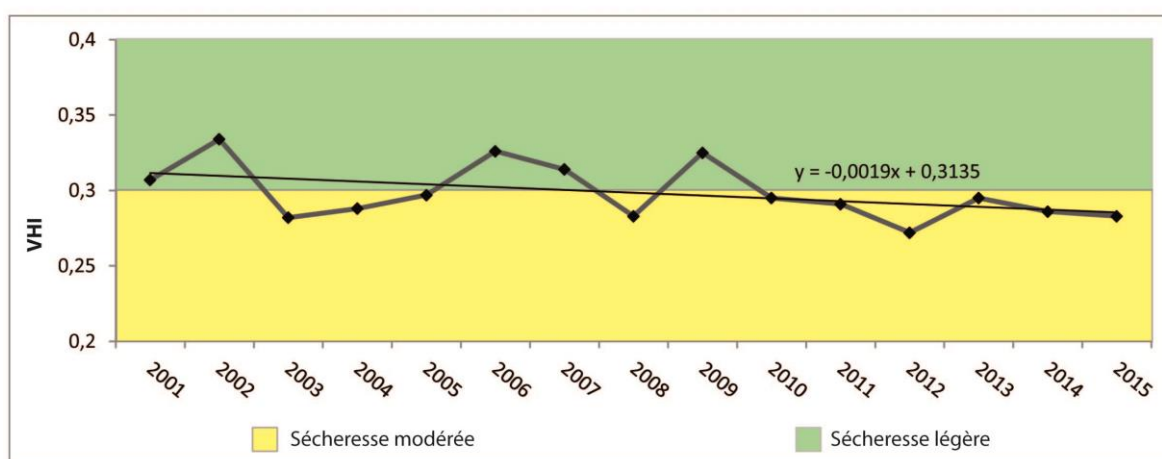


Fig. 4.12 - Evolution de VHI dans l'intervalle 0,2 - 0,4 dans le territoire de la région d'étude pour la période de 2001 à 2015.

On constate selon la figure 4.12 que la sécheresse légère s'est produite cinq fois durant de la période étudiée ($\text{VHI} > 0,3$), alors que la fréquence d'apparition de la sécheresse modérée est le double (10 fois).

Il est évident aussi que l'année 2010 représente une période de transition de niveau de la sécheresse. En effet, à partir de cette année, le VHI n'a plus dépassé le seuil de 0,3. Cela témoigne d'une présence de la sécheresse modérée en majorité dans le territoire agricole. On peut alors constater une augmentation des conditions drastiques dans notre région d'étude.

Un recul successif de la surface agricole touchée par ce niveau de sécheresse a été observé pendant les cinq dernières années (fig. 4.13), ce qui témoigne d'une évolution d'intensité, alors que plus de 90% de cette surface était touchée par ce type de sécheresse en 2007.

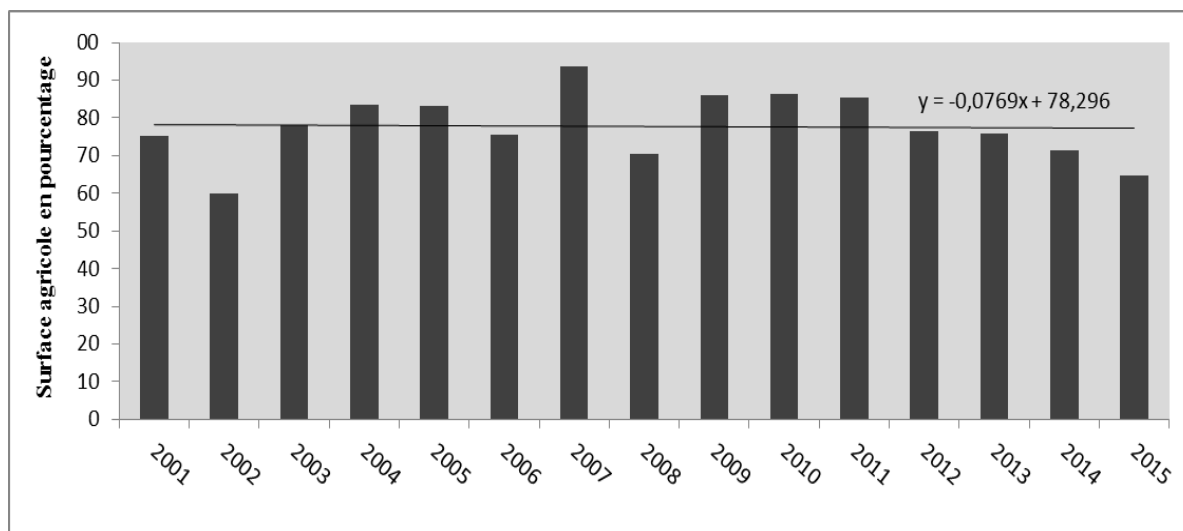


Fig. 4.13 - Evolution de la surface agricole touchée par une sécheresse de faible intensité ($0.2 < VHI < 0.4$).

➤ Suivi spatial de l'intensité de la sécheresse dans la zone agricole de la Beqaa centrale

Nous avons détectés 3 985 points représentant la surface agricole en Beqaa centrale. La figure 4.14 représente la répartition spatiale des points détectés.

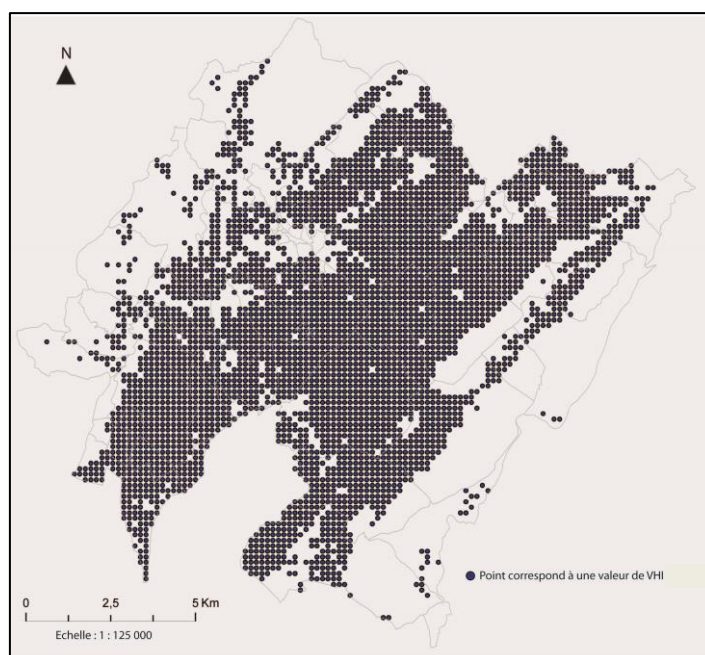


Fig. 4.14 - Points détectés dans la surface agricole en Beqaa centrale, correspondant à des valeurs en pixels.
Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.

La figure 4.15 illustre la répartition des valeurs de VHI pour la période allant de 2001 à 2015 pour la zone agricole. En effet, le nombre de points varie entre 38 000 (61,2%) et 59 000 (95,2%). Il atteint son maximum en 2011 et son minimum en 2008.

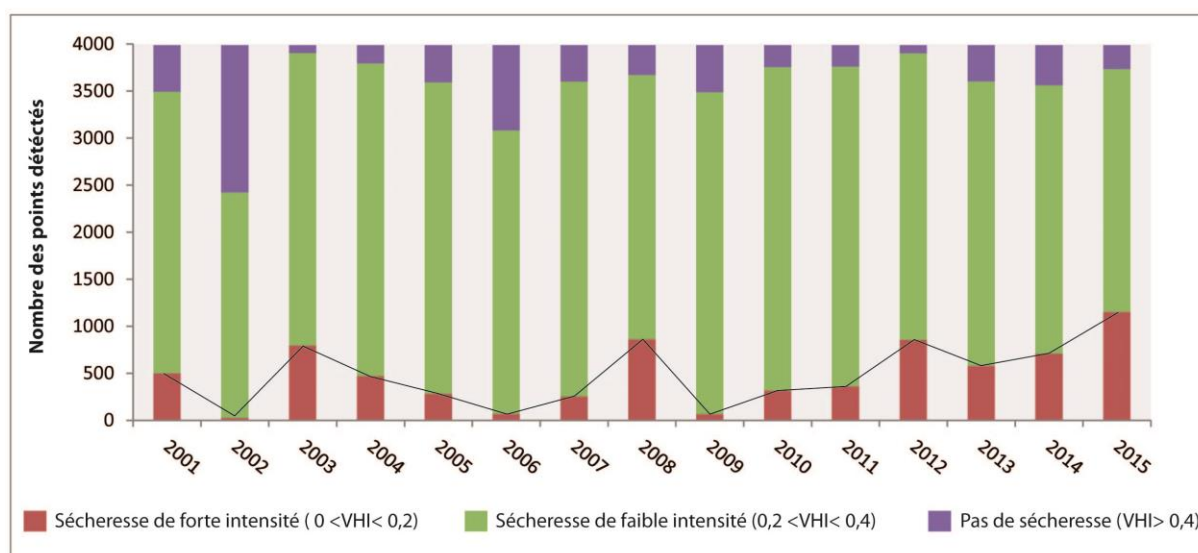


Fig. 4.15 - Répartition du nombre de points dans les différents intervalles de classification de sécheresse.
Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.

Dans l'intervalle de VHI indiquant une condition normale, le nombre de points reste faible pendant toute la période étudiée à l'exception de l'année 2002 où on observe une augmentation au-dessus de la moyenne.

Le VHI, compris entre 0,2 et 0,4, est peu variable. Pendant toute la période d'étude, elle est autour de 70% du nombre total des points détectés, alors que le VHI inférieur à 0,2 révèle une évolution très variable de 2001 à 2015.

Nous distinguons quatre étapes d'évolution successive :

- La première période est en 2001 dans laquelle nous avons détectés 500 points dans l'intervalle de VHI entre 0 et 0,2. Cela représente 12,5% du nombre total des points détectés.
- En 2003, on a décompté 790 points soit 19,8% du nombre total.
- En 2008, le nombre de points monte à 850 soit 21,3% du nombre total.
- En 2012, le nombre de points détectés a augmenté légèrement par rapport à la période précédente pour atteindre 860, soit 21,6% du nombre total.
- Le dernier est en 2015 où le nombre de points atteint son maximum, près de 29 % du nombre total.

Cette augmentation successive du nombre de points dans l'intervalle qui est inférieur à 0,2 indique une vulnérabilité élevée de la zone agricole face à la sécheresse.

A partir de ces résultats, la répartition spatiale des différents niveaux de sécheresse dans la zone agricole a été cartographiée afin de suivre son évolution. Pour cela, nous avons sélectionné l'année 2015 (la plus sèche) pour effectuer une comparaison spatiale par rapport à la carte de la sécheresse moyenne de 2001 à 2015 (figure 4.13). Par contre, une couverture de la sécheresse de forte intensité marque sa présence en 2015 par rapport à la moyenne. Cette sécheresse occupe près de 30 % de la zone agricole de la région d'étude.

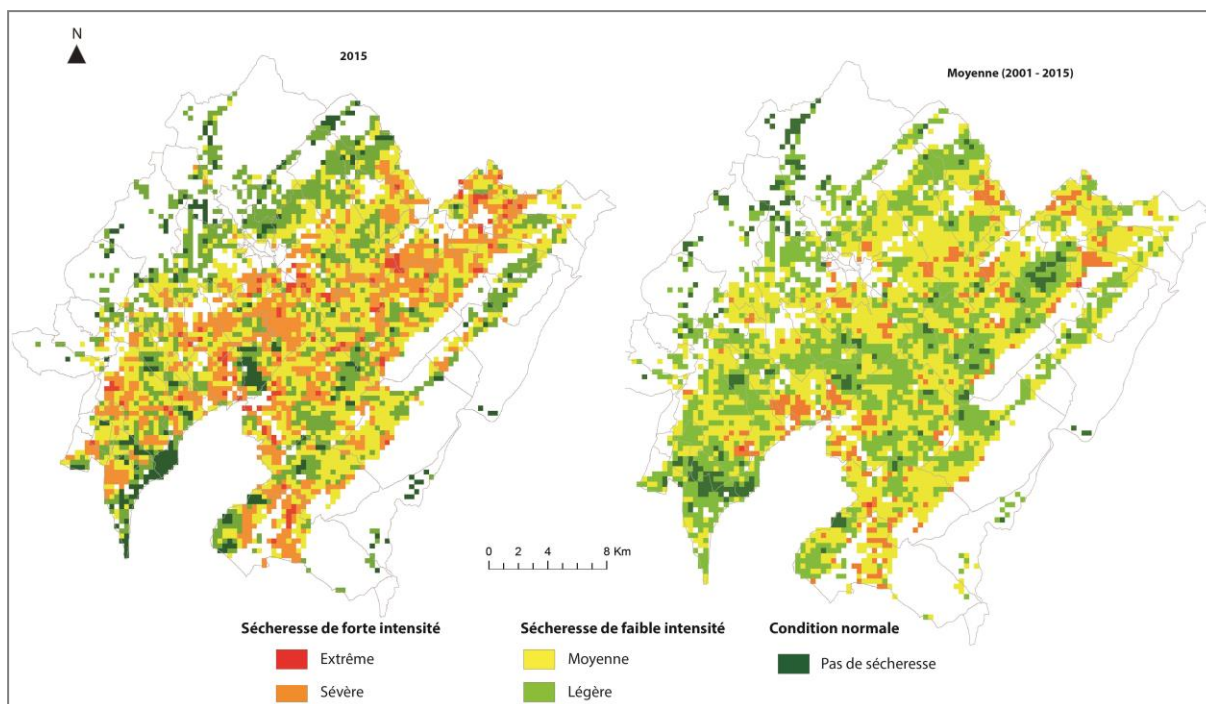


Fig. 4.16 - Répartition spatiale de différentes intensités de sécheresse pour l'année 2015 et la moyenne. Source : MODIS, NASA Réalisation : T. NASSER, 2018.

L'année 2015 a été particulièrement marquée par la sécheresse, quel qu'en soit le niveau. Ces chiffres indiquent des conditions de végétations agricoles très détériorées. La partie intérieure de la région est la plus impactée. Cette partie est caractérisée par une topographie moins élevée que le reste de la région et une prédominance de cultures de plein champ comme la pomme de terre, le blé et les cultures maraîchères (CNRS-L, 2011).

Le tableau 4.6 montre que la superficie agricole est vulnérable à la sécheresse. En moyenne, près de 90 % du couvert végétal est endommagé par une sécheresse agricole de faible intensité dont la moitié est de type modéré. Par contre, l'année 2015 montre une augmentation importante de la sévérité de la sécheresse ; la zone impactée a dépassé le quart de la superficie agricole, alors qu'en moyenne elle est inférieure à 10%. La part de la surface agricole concernée par une sécheresse sévère est pratiquement quatre fois supérieure à la moyenne.

Aux termes de cette comparaison, la surface qui n'est pas affectée par la sécheresse demeure globalement constante quelle que soit le VHI moyen. Cependant près de 20% de la surface agricole apparaît très vulnérable à la variation de l'intensité de la sécheresse.

L'ampleur de cette variation de l'intensité invite à questionner d'autres composantes afin de mieux préciser la notion de sécheresse agricole dans la région.

Types de sécheresse selon la valeur de VHI	2001 – 2015 (moyenne)		2015	
	Superficie (km ²)	Pourcentage	Superficie (km ²)	Pourcentage
Extrême (VHI < 0,1)	0,14	0,10 %	3,6	2,53 %
Sévère (0,1 < VHI < 0,2)	11,01	7,80 %	37,2	26,35 %
Total (0 < VHI < 0,2)	11,15 %	7,9 %	40,8	28,83 %
Modérée (0,2 < VHI < 0,3)	100,90	71,52 %	53,3	37,77 %
Légère (0,3 < VHI < 0,4)	20,85	14,78 %	38,1	27,03 %
Total (0,2 < VHI < 0,4)	121,75 %	86,3 %	91,4	64,80 %
Pas de sécheresse (VHI > 0,4)	7,72	5,47 %	8,9	6,32 %

Tableau 4.6 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse dans la zone agricole en 2015 ainsi que la moyenne de la période d'étude (source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).

4.3 Suivi de l'intensité de la sécheresse sur les principales cultures de la région d'étude

Nous avons sélectionné les trois cultures principales cultivées dans la région d'étude afin de suivre l'évolution de la sécheresse. Ces cultures représentent ensemble presque 90% de la surface agricole utilisée (CNRS-L, 2011). La zone agricole comprend principalement les cultures de plein champ (la pomme de terre en majorité, le blé et les légumineux), le vignoble et les arbres fruitiers à feuilles caduques (pommier, prunier, pêcher, abricotier et amandier).

Une carte de VHI de 2001 à 2015 a été réalisée pour chaque culture afin de spatialiser les différents niveaux de sécheresse (annexe 6). A partir de ces cartes, nous avons pu calculer la superficie touchée par chaque niveau de sécheresse ainsi que son évolution.

➤ Evolution de la sécheresse dans la surface cultivée en arbres fruitiers

La superficie cultivée en arbres fruitiers représente 52 km². La figure 4.17 représente la sécheresse moyenne de la période allant de 2001 à 2015. On remarque que le niveau de sécheresse est modéré à légère en majorité. La sécheresse sévère est peu présente et plutôt éparpillée.

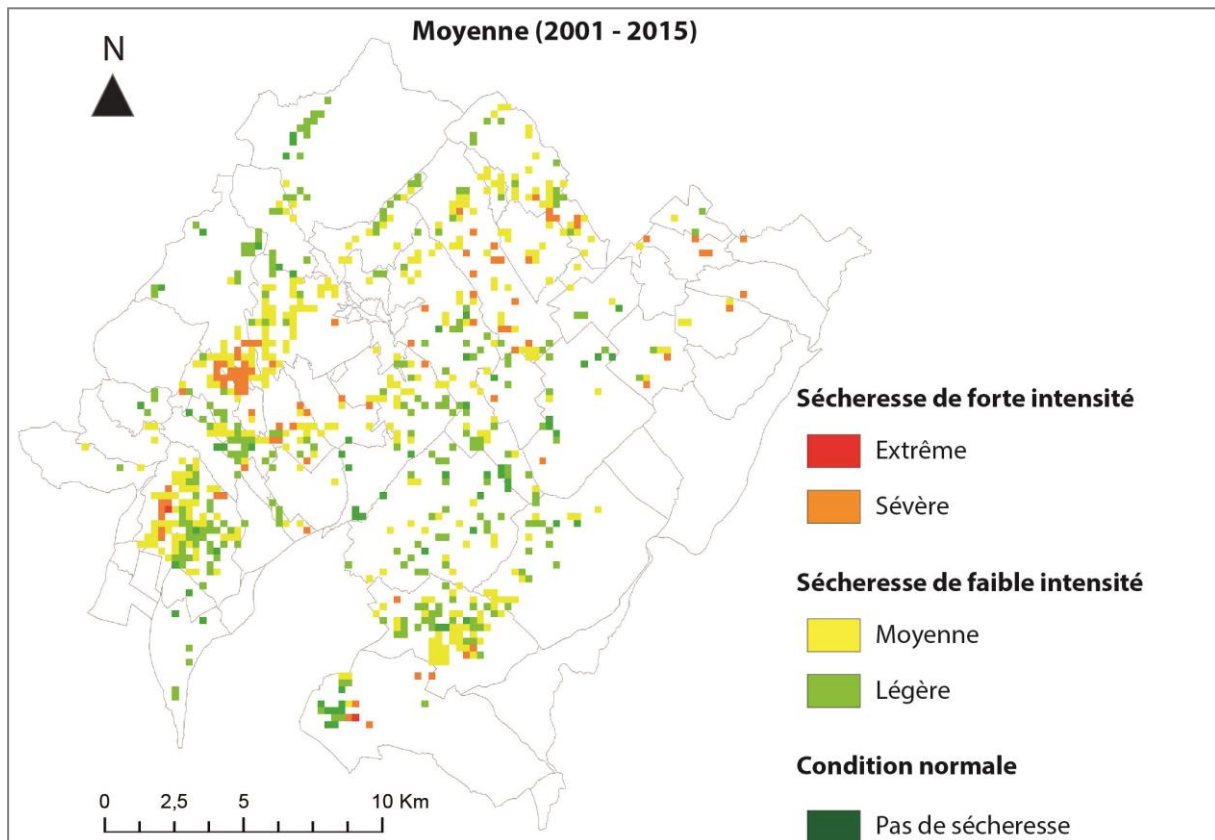


Fig. 4.17 - Carte de la sécheresse moyenne (2001-2015) de la surface cultivée en arbres fruitiers. Source : MODIS, NASA Réalisation : T. NASSER, 2018.

On visualise clairement une prédominance annuelle de la sécheresse de faible intensité (fig. 4.18). En effet, sa couverture spatiale varie entre 63% et 89% de la surface totale des arbres fruitiers. L'année 2002 semble la moins sèche où l'occupation de la sécheresse de forte intensité est quasiment absente par rapport aux autres années. En général, la sécheresse de forte intensité ne dépasse pas le seuil de 10% de la surface entre 2001 et 2014, alors que 2015 représente une année exceptionnelle où la surface touchée par cette sécheresse atteint 25%.

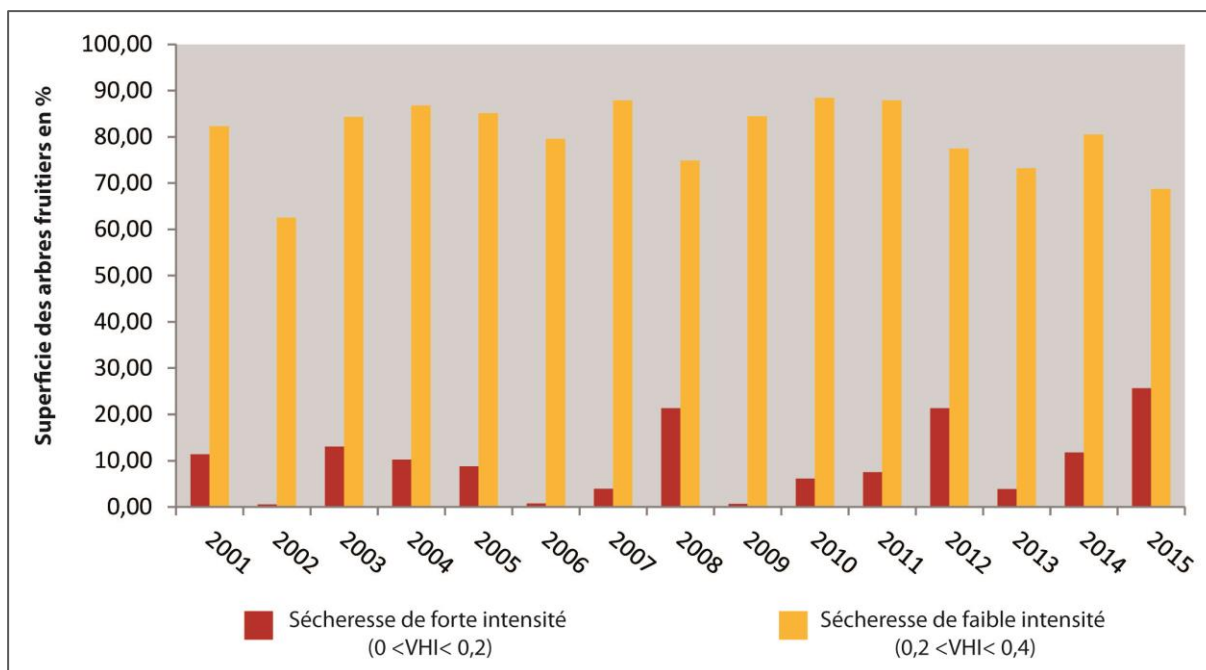


Fig. 4.18 - Evolution spatiale de la sécheresse dans la zone des arbres fruitiers. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

Le tableau 4.7 révèle la variation de la sécheresse selon son intensité pour l'année 2015 et la moyenne.

En moyenne, près de 80% (41,95 km²) de la surface en arbres fruitiers est touchée par un niveau modéré, alors que la sécheresse de type sévère couvre 7 km² soit 11% de la surface.

En revanche, pour une période très sèche, telle que l'année 2015, l'occupation spatiale de la sécheresse de forte intensité (sévère en majorité) atteint 25% de la surface, alors qu'une baisse de la sécheresse de faible intensité a été bien remarquée.

Niveau de sécheresse		Moyenne (2001 – 2015)		2015	
		Superficie (km2)	Pourcentage	Superficie (km2)	Pourcentage
	Extrême (VHI < 0,1)	0,09	0,17%	0,7	1,3 %
	Sévère (0,1 < VHI < 0,2)	5,91	11,56%	12,8	24 ,4%
Totale		7	11, 73%	11,73%	25,7%
	Modérée (0,2 < VHI < 0,3)	22,45	43,18%	19,4	37,2%
	Légère (0,3 < VHI < 0,4)	19,40	37,3%	16,5	31,5%
Totale		41,95	41,85	80,48%	68,7%
	Pas de sécheresse (VHI > 0,4)	4,15	7,98%	2,9	5,6%

Tableau 4.7 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse d'après le VHI pour les années sélectionnées.
Source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017.

➤ Evolution de la sécheresse dans la surface de culture en plein champ

La superficie cultivée par des cultures en plein champ représente environ 145 km². La répartition de la sécheresse par intensité dans cette surface agricole est illustrée dans la figure 4.19.

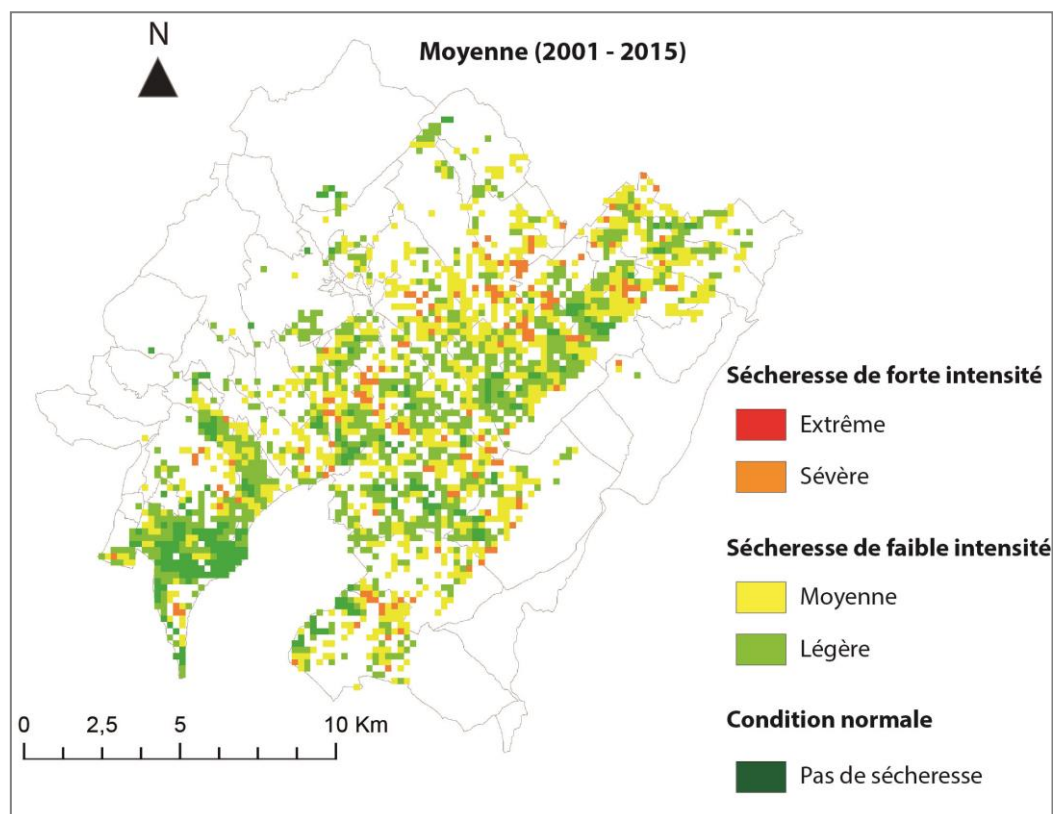


Fig. 4.19 - Carte de la sécheresse moyenne (2001-2015) de la surface occupée par les cultures en plein champ.
Source : MODIS, NASA. Réalisation : T. NASSER, 2018.

Comme pour la surface des arbres fruitiers, l'année 2002 représente la période la moins sèche, et celle de 2015 est la plus sèche (fig. 4.20). Cependant, cette fois la fréquence d'apparition de la sécheresse de forte intensité est plus importante. On constate que ce type de sécheresse a été fortement présent au moins quatre fois (2003, 2012 et 2015), où sa couverture spatiale a dépassé 20% de la surface.

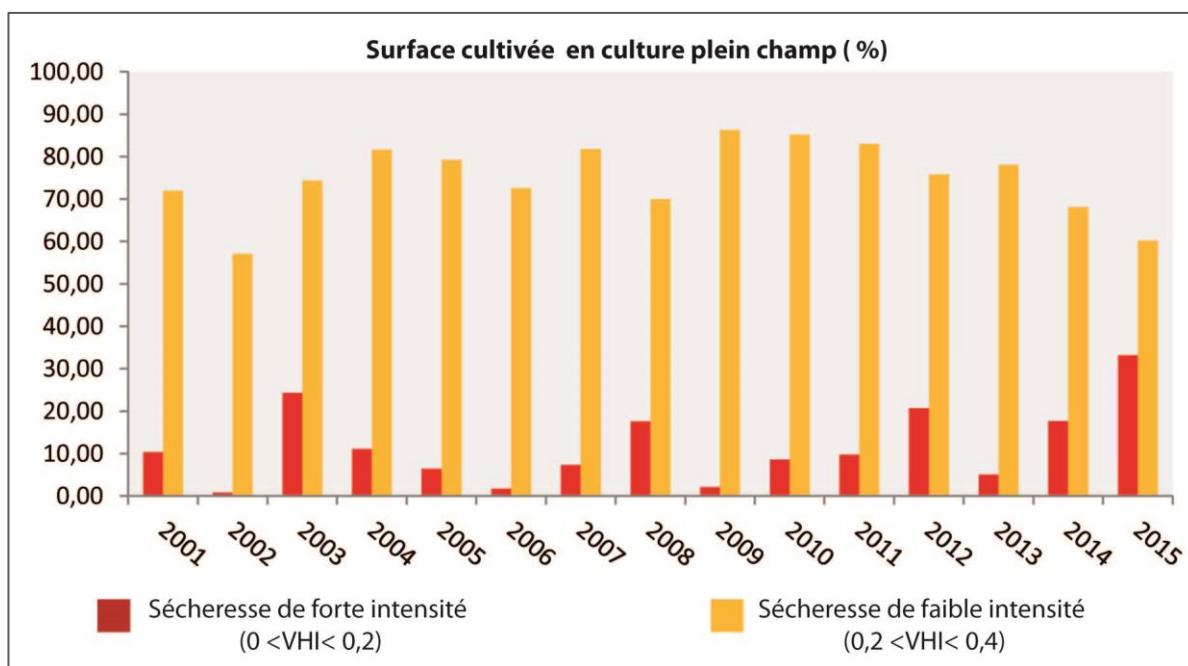


Fig. 4.20 - Variation de l'intensité de la sécheresse sur la surface des cultures en plein champ, pour la période 2001-2015. Source : MODIS, NASA. Réalisation : T. Nasser, 2017.

Le tableau 4.8 montre la variation de la sécheresse selon son intensité pour l'année 2015 et la moyenne dans la surface des cultures en plein champ.

En moyenne, près de 75% (109 km²) de la surface des cultures en plein champ est touchée par un niveau modéré. La forte sécheresse, quant à elle, couvre près de 12 km² soit 11% de la surface.

En 2015, l'occupation spatiale de la sécheresse de forte intensité atteint 30% de la surface. Ce qui indique une vulnérabilité à la sécheresse plus élevée que celle des arbres fruitiers dans notre région.

Niveau de sécheresse	Moyenne (2001 – 2015)		2015	
	Superficie (km ²)	%	Superficie (km ²)	%
 Extrême (VHI < 0,1)	1,3	0,90%	4,6	3,20%
 Sévère (0,1 < VHI < 0,2)	15,8	10,90%	42,3	30,00%
 Forte intensité	17,1	11,80%	48,9	33,2
 Modérée (0,2 < VHI < 0,3)	75,7	52,10%	64,3	42,78%
 Légère (0,3 < VHI < 0,4)	33,8	23,30%	30,1	21,30%
 Faible intensité	109,5	75,40%	94,4	64,08%
 Pas de sécheresse (VHI > 0,4)	18,6	12,80%	3,95	2,72 %

Tableau 4.8 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse d'après le VHI pour les années 2003 et 2015.
Source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017.

➤ Evolution de la sécheresse dans la surface cultivée en viticulture

La surface agricole occupée par des vignobles représente 27 km² d'environ. La couverture spatiale de la sécheresse par intensité est présentée dans la figure 4.21. On remarque une absence totale de la sécheresse de type extrême (VHI < 0,1).

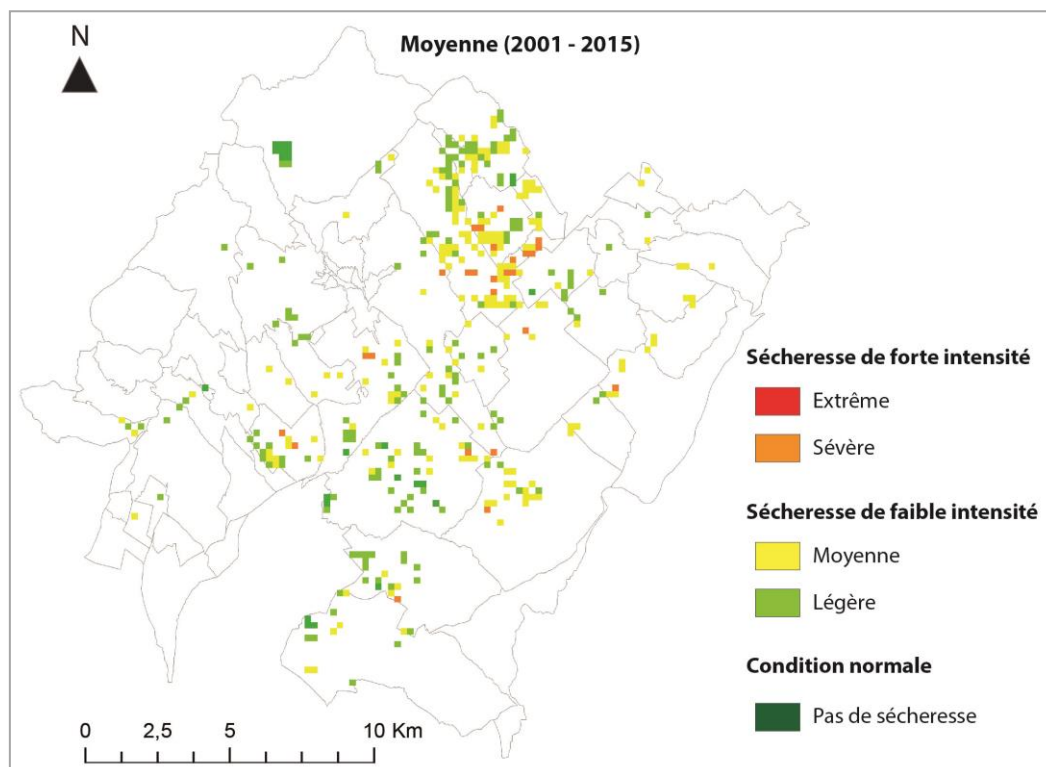


Fig. 4.21 - Carte de la sécheresse moyenne (2001-2015) de la surface occupée par la viticulture. Source : MODIS, NASA Réalisation : T. NASSER, 2018.

Ainsi, la présence de la sécheresse de forte intensité est bien présente pour les années 2008 et 2015 où son occupation représente respectivement 22% et 25% de la surface viticole. L'année 2002 est toujours la moins sèche et l'année 2015 est la plus sèche (figure 4.22).

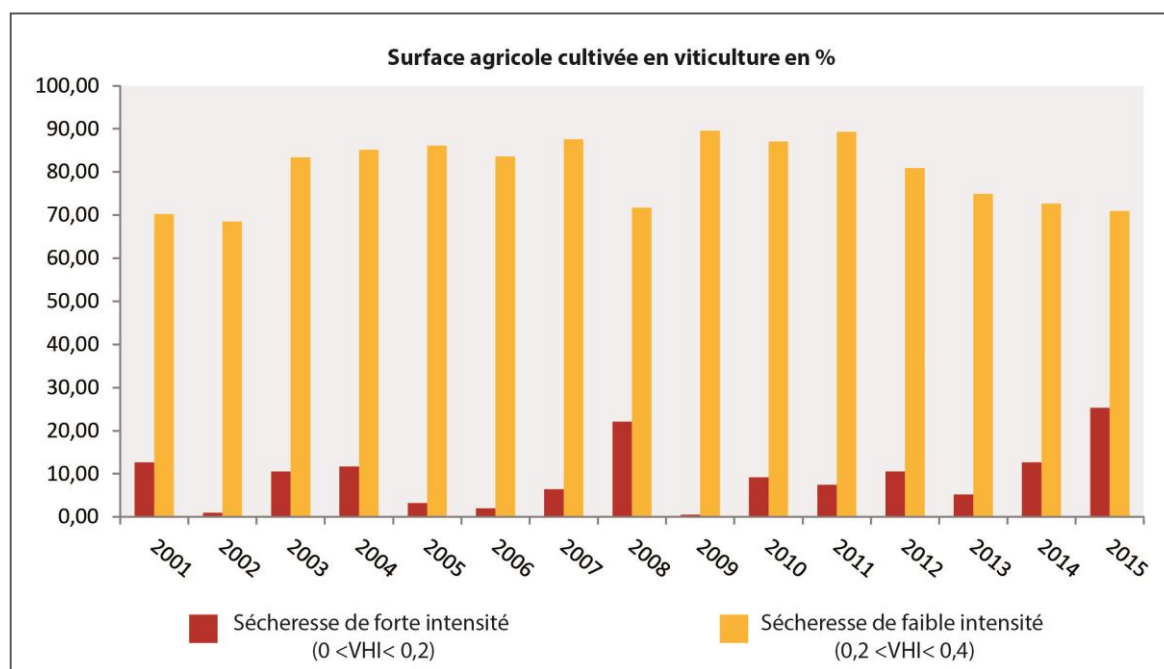


Fig. 4.22 - Evolution spatiale de la sécheresse dans la surface occupée par la viticulture, Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.

Le tableau 4.9 montre la variation de la sécheresse selon son intensité pour l'année 2015 et la moyenne dans la surface viticole.

En moyenne, près de 75% (109 km²) de la surface des cultures en plein champ est touchée par un niveau modéré. Alors que la forte sécheresse couvre près de 12 km² soit 11% de la surface.

En 2015, l'occupation spatiale de la sécheresse de forte intensité atteint 30% de la surface. Ce qui indique une vulnérabilité à la sécheresse plus élevée que celle des arbres fruitiers dans notre région.

VHI	Moyenne (2001 – 2015)		2015	
	Superficie (km2)	%	Superficie (km2)	%
Extrême (VHI < 0,1)	0	0 %	0	0 %
Sévère (0,1 < VHI < 0,2)	1,7	6,45 %	12,30	25,12 %
Forte intensité	1,7	6,45 %	12,30	25,12 %
Modérée (0,2 < VHI < 0,3)	14,5	53,76 %	25,87	52,82 %
Légère (0,3 < VHI < 0,4)	7,5	27,79 %	9,34	19,07 %
Faible intensité	22	81,55 %	35,25	71,89 %
Pas de sécheresse (VHI > 0,4)	3,24	12,00 %	1,48	3,02 %

Tableau 4.9 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse d'après le VHI pour les années 2003 et 2015 (source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).

D'après nos résultats précédents, on constate que l'année 2002 est la période la moins sèche pour la région agricole, et l'année 2015 est la plus sèche. Cependant, l'intensité de la sécheresse diffère d'une culture à une autre. La figure 4.23 illustre les valeurs du VHI moyen de chaque culture pour la période de 2001 – 2015.

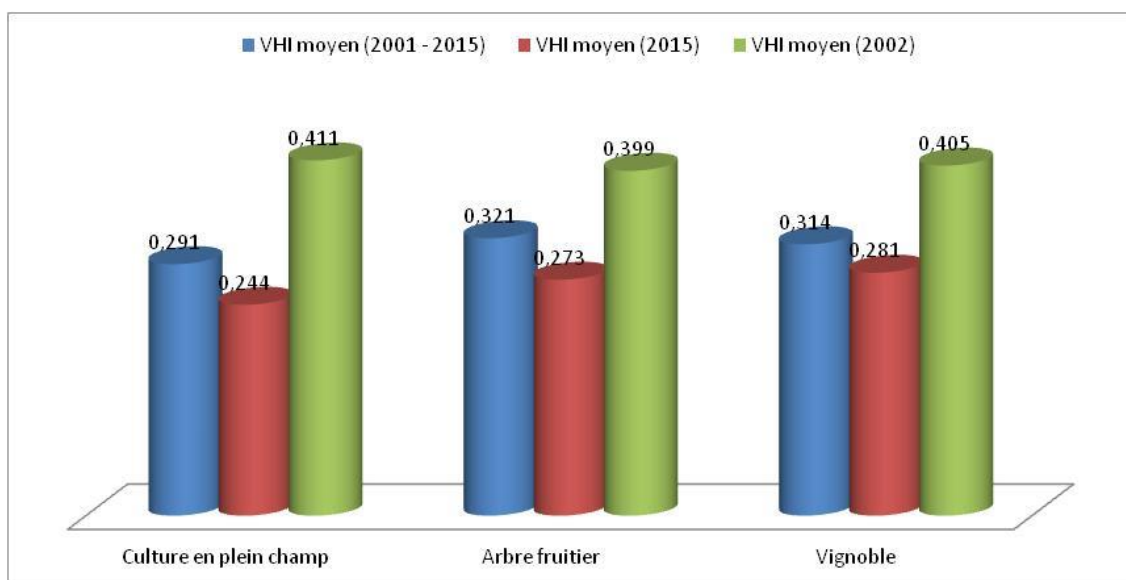


Fig. 4.23 - Comparaison de l'intensité de la sécheresse entre les différents types de cultures pour trois périodes (plus, moins sèche et moyenne). Calculs : T. NASSER - CEDETE, 2018.

On remarque que les trois cultures ont été impactées par le même niveau de sécheresse pour les périodes d'études. Cependant, l'intensité de la sécheresse est plus élevée pour la culture en

plein champ où le VHI indique des valeurs plus basses que pour les deux autres surfaces agricoles. Pourtant, cette surface est la plus irriguée de la région étude. Cela peut signifier un assèchement des puits agricoles suite à une recharge insuffisante par les précipitations ou une pratique agricole non adaptée qui ont conduit à une augmentation de la sécheresse.

La deuxième possibilité ne peut être suivie que par un travail du terrain auprès des agriculteurs. Par contre le lien avec la pluviométrie peut être évalué en utilisant des indicateurs de précipitations tels que le SPI.

4.4 Lien entre apports pluviométriques et sévérité de la sécheresse

Dans notre cas, le SPI a été calculé sur une période de 6 mois (octobre à mars) en se référant aux pluies tombant lors des saisons automnales et hivernales. La figure 4.24 illustre l'évolution du SPI (6 mois) pour la période 1956 – 2015. Les années ayant une valeur positive représentent des périodes humides et celles de valeur négative représentent les périodes sèches. Ce graphique indique clairement les années sèches et non sèches en se référant sur la classification de l'Organisation Météorologique Mondiale en 2012. Les années ayant une valeur positive représentent des périodes humides et celles de valeur négative représentent les périodes sèches. Durant cette période, l'année 1991 indique la période la plus humide tandis que l'année 2014 est la période la plus sèche.

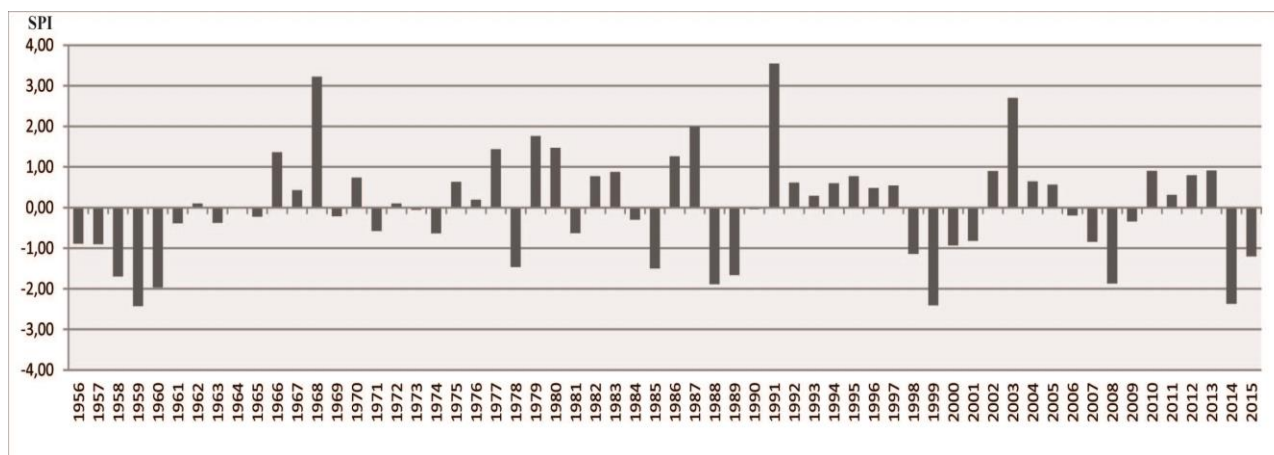


Fig. 4.24 - Evolution de SPI calculs de l'auteur, 2017. Source : Université Américaine de Beyrouth, Station de Haouche - Snaid ,1956-2015.

Dans le tableau 4.10, il est présenté la répartition des années de la période étudiée selon le degré de sécheresse ou d'humidité. Les années sèches, représentant 51% de la période étudiée, sont réparties entre forte sèche (17 %) et modérée sèche (34%). Les années humides, représentant 49 %, sont réparties entre extrême humide (5%), forte humide (8,5%) et modérée

humide (35,5%). Il est à noter que les années sont majoritairement réparties entre humide modérée et sèche modérée, représentant 70% de la période étudiée.

	Période Humide			Période sèche		
Type de sécheresse	Extrême	Forte	Modérée	Modérée	Forte	Extrême
Années	1991, 2003, 1968	1966, 1977, 1979, 1980, 1987	1962, 1964, 1970, 1972, 1975, 1976, 1982, 1983, 1986, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 2004, 2005, 2010, 2011, 2012, 2013	1956, 1957, 1961, 1963, 1965, 1969, 1971, 1973, 1974, 1981, 1984, 1990, 1998, 2000, 2001, 2002, 2006, 2007, 2009, 2015	1958, 1959, 1960, 1978, 1985, 1988, 1989, 1999, 2008, 2014	-
Nombre d'années	3	5	21	20	10	0
Taux (%)	5.08	8.48	35.59	33.9	16.95	0
Totale (%)	49.15			50.85		

Tableau 4.10 - Répartition temporelle de l'indice standardisé des précipitations (SPI) pour la période de 1956 à 2015. Source : Valeurs de SPI calculées à partir des données de précipitations de la station de Haouche-Snaïd de 1956 à 2015.

Afin d'élucider la variabilité des seuils de sévérité des sécheresses climatiques au cours d'une année, nous avons procédé à une comparaison des résultats VHI avec les résultats obtenus grâce à l'utilisation de l'indice SPI. La station de Haouche Snaïd qui est représentative de la zone d'étude (absence de relief dans cette région) possède une série de données pluviométriques continues depuis 1956. Ces données ont servi au calcul de l'indice SPI sur la période d'étude (2001 – 2015). Cette analyse n'a pas pour but de comparer les valeurs de ces deux indicateurs, elle vise cependant à élucider les causes des variations de l'indice VHI. Le SPI indique clairement les années sèches et non sèches en se référant sur la classification de l'Organisation Météorologique Mondiale en 2012. Les années ayant une valeur positive

représentent des périodes humides et celles de valeur négative représentent les périodes sèches.

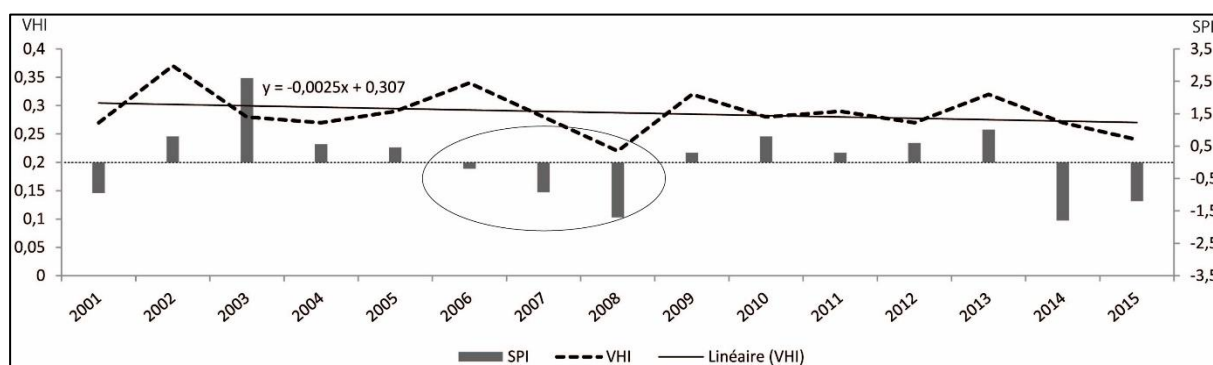


Fig. 4.25 - Lien entre VHI et SPI (Données MODIS et Station de Haouch-Snaïd, calculs de l'auteur, 2017. Calculs : T. NASSER - CEDETE, 2018.

La courbe linéaire de VHI montre une augmentation de la vulnérabilité de la surface agricole face à la sécheresse météorologique (figure 4.25). Nous remarquons que la sévérité de la sécheresse agricole augmente lorsqu'il s'agit d'une succession d'années déficitaires en pluviométrie comme pour l'année 2008 et 2015. A l'opposé, en 2009 et 2002, il y a eu un début de recharge hivernale, qui s'est accompagnée d'une augmentation de VHI qui est passé au-dessus du seuil de la moyenne.

Ainsi, c'est le cumul de plusieurs années sèches d'affilée qui provoquerait une augmentation de l'intensité de la sécheresse agricole et se traduirait par une baisse de la valeur du VHI.

Le décalage entre pluviométrie et retentissement sur le VHI peut s'expliquer par une utilisation des ressources hydriques pour l'eau d'irrigation sans qu'il n'y ait eu de recharge pluviométrique suffisante. Cette pratique non adaptée aux conditions climatiques a pu provoquer une surexploitation des réserves hydriques, ce qui a accéléré le processus de la sécheresse agricole.

Parfois, cependant, les résultats des deux indices de sécheresse sont plutôt discordants. Entre 2003 et 2005, la sévérité de la sécheresse agricole quantifiée par le VHI n'évolue pas directement en fonction du déficit ou du surplus pluviométrique dans la plaine de la Beqaa. En effet, on constate qu'il s'agissait d'une période relativement arrosée selon l'indicateur SPI, sans pour autant qu'il y est eu de variation importante de l'indicateur VHI. Cette anomalie pourrait s'expliquer soit par un problème pratique lié au collecte des données physiques, soit par une sous - valorisation agricole de ces ressources pluviométriques (Blanc, 2006).

Par contre, il ressort de nos résultats (VHI et SPI) que la surface agricole a été touchée par une sécheresse modérée de manière prédominante pour la période étudiée. Cependant, les résultats

obtenus doivent être interprétés avec une certaine réserve au vu de la complexité du phénomène de sécheresse à l'échelle spatio-temporelle.

L'indicateur VHI a montré une répartition spatiale de l'intensité de la sécheresse très variable avec des valeurs moyennes qui restent en dessous de la normale, indiquant une condition de végétation vulnérable. En effet, la valeur moyenne du VHI de 2001 à 2015 a montré un état critique avec seulement 4,7 % de la superficie agricole qui n'était pas concernée par une sécheresse. Le reste du territoire agricole étudié souffrait d'une sécheresse allant de faible à sévère. Les années 2008 et 2015 étaient particulièrement marquantes avec le tiers de la surface agricole qui était touchée par une sécheresse de forte intensité selon le calcul de VHI. Le SPI a révélé la présence d'années humides et sèches avec là encore un pic observé pour l'année 2008. Ainsi, il semble que la région d'étude ait connu des années humides pour la même période étudiée, contrairement à ce qui aurait pu être attendu pour un territoire considéré comme semi-aride.

Toutefois, les résultats fournis par ces deux indicateurs ne sont pas comparables quantitativement même si leur tendance est parfois semblable. Il a pu même être observé des résultats opposés pendant une période humide comme en 2003. L'indice de précipitation SPI était en faveur d'une période très humide, alors que le VHI montrait une condition de végétation vulnérable à la sécheresse. Cela démontre que malgré des précipitations correctes, la végétation souffrait de sécheresse même faible. De la même manière, l'indicateur SPI a atteint son pic de sécheresse pour l'année 2014 alors que la végétation semblait avoir été moins impactée selon les valeurs du VHI. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que la sécheresse n'est pas liée uniquement aux précipitations mais aussi à d'autres facteurs. D'une part, les fortes périodes d'ensoleillement ou de vent ont une forte influence sur les températures de surface qui constituent le TCI (VIAU, PAQUETTE, 1997). D'autre part, le type de culture est un facteur important dans la détection de l'intensité de la sécheresse.

En conclusion, les données climatiques et les données issues de la télédétection peuvent être utilisées de façon conjointe ou complémentaire afin de mieux caractériser les causes de la sécheresse. En effet, ils regroupent ensemble les trois principaux paramètres nécessaires à l'évaluation de la condition d'une végétation : température, précipitation et indice de végétation. Ainsi, il est souhaitable d'utiliser plusieurs indicateurs et sources pour obtenir un portrait plus complet de sécheresse (NDMC, 2005).

D'un point de vue géographique, on constate que certaines zones agricoles sont plus impactées que d'autres selon le traitement par imagerie satellitaire. Ainsi, cet outil a montré

une sécheresse permanente, quel que soit le niveau d'intensité, sur les 15 dernières années. Une question majeure émerge à travers ces résultats. Comment l'agriculteur peut-il exercer son activité en période sèche, puisque ce phénomène semble être continu dans la région? Les informations, issues de la télédétection, pourraient donner aux décideurs un outil relativement simple pour la gestion des ressources naturelles. Malgré cette importance, cet outil seul reste insuffisant pour comprendre et identifier la sécheresse vu sa complexité en plaine de la Beqaa.

Enfin, la sécheresse est un phénomène complexe qui associe des facteurs climatiques et des facteurs humains. L'indice de VHI reste un témoin indirect de ce problème majeur pour les agriculteurs. Il faudrait pouvoir quantifier le retentissement de la sécheresse sur le rendement agricole auprès des populations concernées. Pour cette raison, nous avons décidé d'évaluer son retentissement sur le terrain par des enquêtes menées auprès des agriculteurs, et de croiser ces données avec celles obtenues par télédétection, afin de mesurer au mieux les difficultés rencontrées pour pouvoir y faire face. Ces données sont présentées dans la troisième partie de cette étude.

Partie 3 -

La sécheresse analysée sous son aspect social

SOMMAIRE

Chapitre 5 – Un changement d'échelle pour identifier la sécheresse dans un milieu agricole : quel phénomène et quelle perception ?	130
Chapitre 6 – Vers une gestion adaptée de la ressource hydrique par le croisement entre données physiques et sociales	170

Chapitre 5 : Un changement d'échelle pour identifier la sécheresse dans un milieu agricole : quel phénomène et quelle perception ?

Intégrer le terrain peut s'avérer pertinent pour appréhender la sécheresse et ses impacts d'un point de vue des agriculteurs. Ce chapitre commence par une présentation de la méthodologie appliquée ainsi que son déroulement sur le terrain. Ensuite, il aborde les aspects sociaux de la sécheresse, les pressions exercées sur la ressource qui provoquent une baisse de la disponibilité de la réserve hydrique.

Ce chapitre offre une connaissance réelle de la situation de la sécheresse dans le contexte local du terrain d'étude que nous avons choisi : Qu'est-ce que la sécheresse pour les agriculteurs ? Quels sont les impacts perçus ? Quelles sont les pratiques agricoles adaptées pour éviter une situation de sécheresse ?

Nous sommes face à des éléments identifiés par les agriculteurs, selon leurs expériences, ce qui nous aidera à comprendre la place des épisodes de sécheresse dans le système agricole de la Beqaa.

5.1 Méthodologie de réalisation des enquêtes

Généralement, le travail d'enquête peut être mené de deux manières différentes : quantitative ou qualitative. Ces deux types d'analyse sont utilisés dans une recherche sociale pour mieux comprendre le comportement d'une société face aux risques naturels (Bryman, 2008). Dans ce travail, nous avons utilisé l'approche qualitative pour évaluer le phénomène de la sécheresse dans la zone d'étude. L'approche qualitative, par les enquêtes semi-directifs et par questionnaires, a été utilisée pour obtenir une image plus large de la situation de la région face à la sécheresse et pour identifier les impacts les plus communs et les stratégies d'adaptation.

Des entretiens test ont été réalisés en avril 2015 pour évaluer la fiabilité et la validité des indicateurs avant de mener les enquêtes. En effet, l'entretien test s'attachait à une question unique : le ressenti des agriculteurs vis-à-vis de la sécheresse dans la région. Après avoir testé ce premier thème avec trois différents agriculteurs dans la plaine de la Beqaa, nous avons réalisé que l'utilisation d'une seule question ouverte n'apportait pas assez d'informations pour mener l'étude. Pour cela, cette consigne unique a été déclinée sous la forme de plusieurs consignes courtes afin de permettre à l'agriculteur interrogé de raconter plus précisément son expérience avec les épisodes secs.

5.1.1 La grille d'entretien

Une grille d'entretien de type semi directif a été construite (annexe 7). Cette méthode a été choisie pour obtenir à la fois des réponses précises et une discussion libre avec les agriculteurs interrogés. Au final, ce type d'entretiens nous a effectivement permis de collecter les données précises attendues et des informations plus inédites, spontanément délivrées au fil de la conversation.

Nous n'avons pas pris en compte la durée mais les informations portées dans chaque entretien. Le temps moyen prévu pour chaque entretien était de 30 minutes. Cependant quelques agriculteurs étaient motivés par ce sujet et le temps de l'entretien est monté jusqu'à une heure. Nous avons senti qu'un nombre important des agriculteurs interrogés n'avaient pas envie de parler de certains sujets comme les modes d'utilisation de l'eau des puits pour l'irrigation pendant la période estivale. Cette réaction peut être liée à la légalité d'utilisation du forage chez certains agriculteurs. En effet, depuis l'apparition de la crise d'eau dans la région il y a quelques années, le ministère d'eau et de l'énergie a émis des nouvelles exigences sur l'utilisation des puits agricoles en Beqaa.

La grille d'entretien comprend trois parties :

- Une présentation générale de l'agriculteur enquêté : nom, prénom, âge, adresse du terrain et nombre de personnes à charge.
- La description et l'évolution de son activité : cette partie entre dans le détail des variétés cultivées, de la variation de la surface agricole utilisée, type d'irrigation utilisé, évolution de la méthode d'irrigation.
- L'expérience et le lien avec les épisodes secs : cette partie porte sur la manière dont les agriculteurs définissent la sécheresse, ainsi que sur la manière avec laquelle ils font face à ce phénomène. De plus, il a été posé une question sur les années des sécheresses qui les ont marqués. Cette question permet d'ébaucher des analyses sur la conduite de leur activité agricole.

Chaque entretien a fait l'objet d'un enregistrement audio et d'une prise de notes, après avoir recueilli l'autorisation de l'agriculteur. Cela nous a permis d'enregistrer toutes les informations en détails afin de faciliter le travail de traitement et d'analyse de chaque entretien. Ainsi, il nous est arrivé parfois que l'agriculteur demande si le dictaphone enregistrerait toute la conversation surtout lorsqu'il s'agissait de critiques de la planification agricole dans la région ou des modes d'utilisation des ressources en eau par les autres agriculteurs.

5.1.2 La prise de contact avec les agriculteurs

L'objectif de nos entretiens était de connaître le ressenti des agriculteurs, peu clair vis-à-vis de la sécheresse, en fonction du type d'agriculture qui s'y pratique et non pas de juger les pratiques agricoles exercées dans la plaine de la Beqaa. En effet, il s'agissait d'analyser leur interprétation, compréhension et appréhension des épisodes secs au cours des quinze dernières années.

Le rendez-vous avec chaque agriculteur a été préparé par le bouche à oreille, par une connaissance personnelle intermédiaire et par contact téléphonique. Le fait d'être étudiant ou de venir de la part de quelqu'un qu'ils les connaissent a joué parfois en faveur de l'acceptation. En effet, le premier agriculteur avait été contacté par connaissance personnelle et a accepté volontiers de nous fournir des contacts et des informations supplémentaires sur la région.

Le contact avec les agriculteurs, situés dans une même zone géographique mais qui pratiquent des productions différentes, permettait d'avoir une vision plus claire sur l'évolution des pratiques agricoles liée à la sécheresse.

Chaque agriculteur était appelé à retracer l'évolution de sa propre exploitation. Il était supposé que les épisodes de sécheresse étaient un facteur important de cette évolution : comment la sécheresse actuelle est vécue et interprétée par les agriculteurs ? S'agit-il d'un manque d'eau d'origine physique ou d'une mauvaise gestion d'une ressource limitée ? En effet, notre entretien permettait de présenter l'agriculteur, l'évolution de son exploitation par rapport aux épisodes secs, le choix de l'occupation du sol, le choix du type d'irrigation et sa relation avec les ressources naturelles.

Ces entretiens ont été riches en informations grâce à l'implication des agriculteurs. Ils n'ont pas hésité à mobiliser d'autres membres de leurs familles ou leurs proches pour avoir des réponses plus complètes sur l'évolution de l'activité agricole dans la région d'étude. Ensuite, chaque agriculteur enquêté a été invité, en fin de discussion, à nous donner les coordonnées d'autres collègues.

5.1.3 Le déroulement des entretiens – questionnaires

Les entretiens se sont déroulés dans huit villes agricoles au centre de la Beqaa. Nous avons effectué trois visites de terrain en 2015, 2016 et 2017.

La première visite en 2015 avait pour but d'observer les agriculteurs dans leur champ pendant la saison agricole. Cette visite d'observation n'était pas destinée à collecter des données mais à améliorer et préciser notre compréhension de la situation agricole dans la région. Durant cette visite, des entretiens pilotes ont été réalisés pour tester et évaluer la validité de la grille d'entretien avant de conduire l'étude. Cela nous a permis d'améliorer la grille d'entretien.

Une modification de cette grille a été apportée pratiquement après chaque entretien. Cela nous a permis d'intégrer, tout le long de l'enquête, des thèmes nouveaux qui sont apparus et auxquels nous n'avons pas spontanément pensé.

Une deuxième visite du terrain a été effectuée en 2016 en plaine de la Beqaa. Le premier contact a commencé par des appels téléphoniques. Sur 11 appels téléphoniques, sept agriculteurs ont accepté de prolonger et d'avoir une poursuite de la conversation sur le terrain. Ces entretiens, de type semi-directif, ont été réalisés pendant la saison agricole entre la mi-mars et la mi-mai de l'année 2016 dans huit villes agricoles (figure 5.1). En raison de

l'absence de données sur le recensement agricole par région ou par ville, nous nous étions fixés un objectif principal afin que l'étude soit représentative. Cet objectif était de rencontrer des profils relativement proches en localisation géographique (conditions climatiques, topographiques et physiques similaires). Nous avons considéré que cela nous permettait de mener une analyse cohérente avec les caractéristiques territoriales de la zone étudiée.

Le but de nos entretiens n'était pas la représentativité mais la connaissance du panel des profils (pratiques, représentations, opinions) relativement au thème de l'évaluation et la compréhension du phénomène de sécheresse.

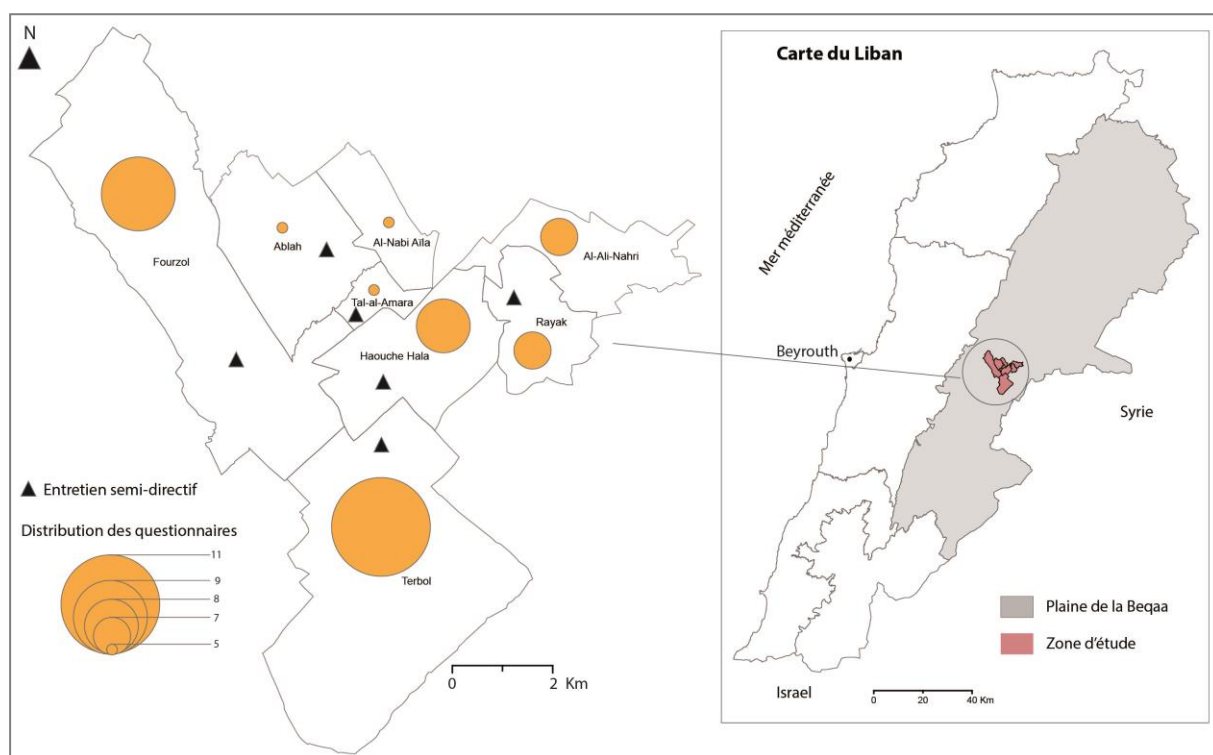


Fig. 5.1 - Localisation des agriculteurs interrogés. Source : Travail du terrain, 2016-2017. Réalisation et conception : T. NASSER, CEDETE, 2017.

Une troisième visite a été faite en avril – mai 2017 dans le but de passer des questionnaires quantitatifs auprès des agriculteurs. Cette technique avait pour but de collecter des données importantes sur les impacts des épisodes secs sur l'activité agricole dans la région. Ce sont 57 agriculteurs qui ont accepté de répondre au questionnaire.

L'enquête a été menée dans huit villages et le plus grand nombre de questionnaires ont été passés dans deux villages agricoles : Fourzol et Terbol.

Chaque rendez-vous a été soumis aux conditions de travail de chaque agriculteur. En effet, la majorité des agriculteurs ont privilégié un horaire tôt dans la matinée, avant de partir pour le travail dans leur terrain et peu sont ceux qui ont donné un horaire après le travail. La majorité des entretiens ont été réalisés sur le terrain des agriculteurs.

Une révision de chaque entretien a été effectuée afin de sélectionner les informations similaires. Cette sélection d'information a permis un groupement des données et des interactions qui peuvent apparaître. La retranscription des entretiens a constitué une étape importante de notre étude en permettant une clarification des informations recueillies.

Nos entretiens se sont déroulés souvent avec deux générations d'agriculteurs qui répondent ensemble aux questions (le père et le fils). Le fait de passer un entretien avec une personne plus âgée nous a permis de remonter plus loin dans le temps et de mobiliser au maximum des souvenirs temporels sur l'évolution de la perception de la sécheresse dans la région. C'est à partir de ces données sur leur ressenti que le phénomène de la sécheresse a été construit et interprété. Puis nous avons vérifié s'il existait un lien entre les éléments perçus et vécus (entretiens) et les éléments mesurables (données physiques). En effet, les éléments perçus et vécus ont été interprétés à travers leur expérience avec les périodes sèches au cours des dernières années et les modifications que les agriculteurs ont amenées dans leur pratique. Les éléments mesurables sont les données physiques disponibles (satellites et climatiques).

Ensuite, une analyse quantitative a été faite à partir des données issues de questionnaire afin de générer des données statistiques descriptives sur les impacts de la sécheresse. Il s'agit de retirer des informations qui décrivent le phénomène de la sécheresse et d'estimer les impacts des épisodes secs sur l'activité des agriculteurs.

5.1.4 L'anonymat et la confidentialité

Il était important de garder les identités et certaines caractéristiques, concernant les agriculteurs, anonymes. Selon Ritchie et Lewis (2005), « *la confidentialité consiste à éviter l'attribution de commentaires, dans des rapports ou des présentations, à des participants identifiés* »¹³. Pour cela, les noms des agriculteurs ont été remplacés par des codes (E1, E2,...). Une explication sur le but de l'entretien a été effectuée avant chaque entretien. Ainsi, une autorisation a été demandée pour pouvoir utiliser les informations recueillies dans cette étude.

¹³ "Confidentiality means avoiding the attribution of comments, in reports or presentations, to identified participants"

Certains agriculteurs ont été sensibles sur les questions sur l'âge, l'éducation, le nombre d'enfants qu'ils ont considéré comme une atteinte à leur vie privée.

5.2 Le terrain de réalisation des enquêtes

Dans cette étude, nous avons adopté les trois éléments fondamentaux, cités par Bertrand (1975), composants le milieu étudié : l'espace, le temps et l'homme. Le facteur humain, a joué un rôle important pour déterminer la nouvelle échelle de notre terrain. En effet, ce sont les localisations géographiques des entretiens et des questionnaires qui ont dessiné notre terrain. La limite administrative de chaque ville a été utilisée pour délimiter et cartographier notre zone. La disponibilité des données d'occupation de sol, pédologiques, satellitaires et climatiques sur cette zone ont encouragé notre choix du terrain.

5.2.1 La densité de la population

La région d'étude comprend 34302 habitants sont répartis dans les huit villages. Rayak comprend le nombre le plus élevé (6974 habitants) et la ville de Nabi-Aïla le nombre le moins élevé (610 habitants). Ces villages se caractérisent par plusieurs activités économiques d'ordre commerciales dont l'activité agricole est dominante.

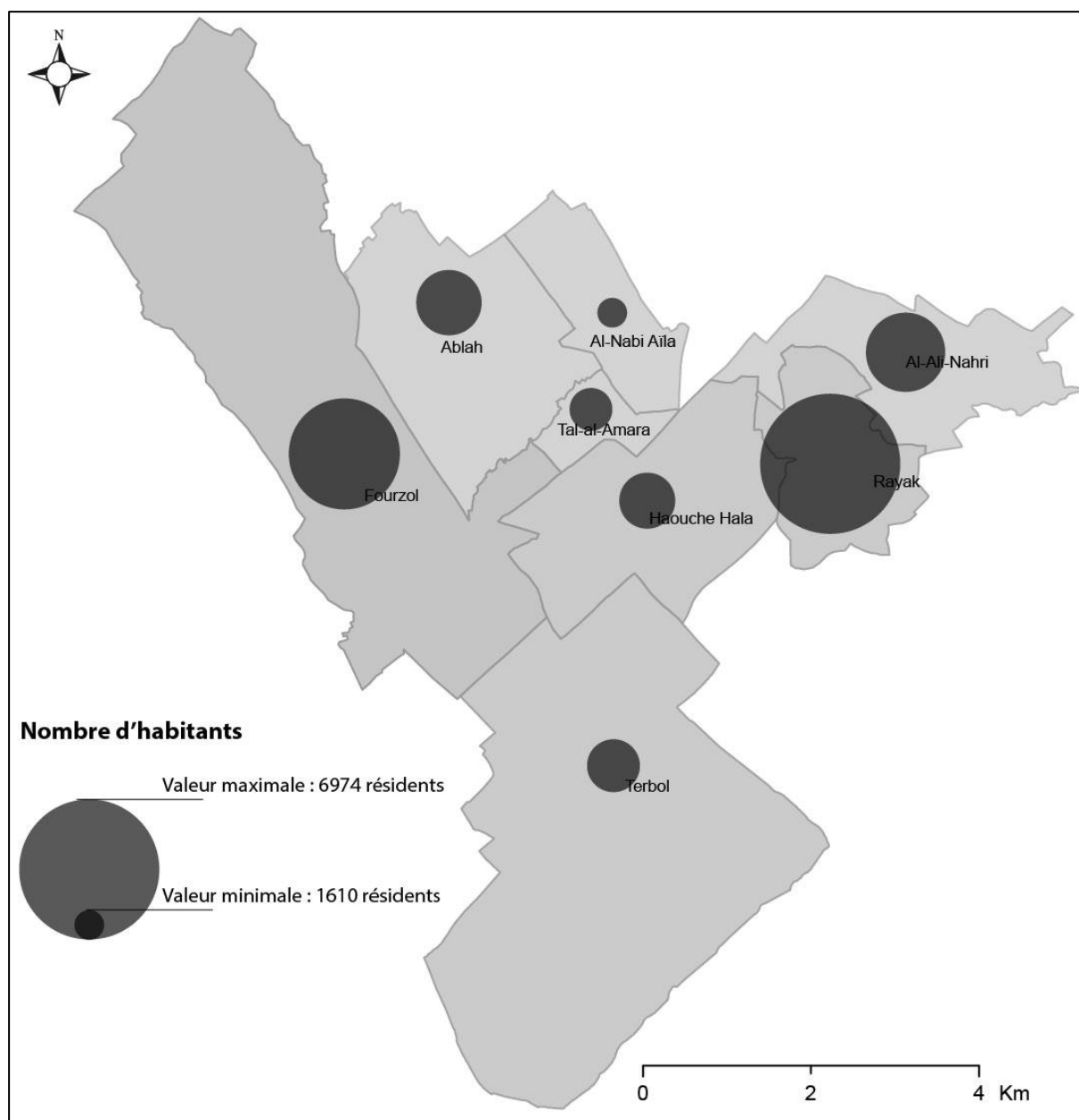


Fig. 5.2 - Répartition de la population dans notre région d'étude. Source : Atlas du Liban, 2015. Conception et réalisation : T.NASSER, CEDETE, 2017.

Le tableau 1 représente l'évolution de l'accroissement des résidents dans la région pour les années 2000, 2005 et 2013. En l'an 2000 l'accroissement de la population était 1533 habitants. Après une diminution dans l'année 2005, la population a eu une augmentation pour atteindre une valeur de croissance de 2044 habitants en 2013.

Années	2000	2005	2013
Nombre d'habitant	1533	443	2044

Tableau 5.1 - Accroissement des résidents dans la région. Source : Atlas du Liban, 2015

L'augmentation de la population a été bien remarquée ces cinq dernières années. L'extension urbaine dans la région est une des raisons essentielles. En effet, la ville de Zahlé (centre commercial de la Beqaa centrale) a connu une augmentation de 29600 m² de surface urbaine entre les années 2005 et 2012 (municipalité de Zahlé).

5.2.2 L'évolution de l'occupation du sol entre 1965 et 2011

Les données issues des images satellitaires de l'année 1998 et 2011 et les cartes topographiques de 1965, nous avons permis de suivre l'évolution de l'occupation du sol dans la région étudiée (tableau 5.2). Ces données déterminent la nature de la couverture du sol (urbanisation, végétation et sol nu).

Types d'occupation du sol	1965 (%)	1998 (%)	2011 (%)
Végétation	75,6	79,8	77,9
Sol nu	15,7	8,3	7,5
Zone urbaine	8,7	11,9	14,6

Tableau 5.2 - Mode d'occupation du sol pour les années 1965, 1998 et 2011

La couverture végétale montre une dominance pour les trois années étudiées. Ce mode d'occupation du sol n'indique pas un changement important en surface et elle est quasiment stable pour les trois périodes. Les terrains à sol nu ont diminué de moitié entre 1965 et 2011. En revanche, la zone urbaine a presque doublé dans la région. D'après ces chiffres, on peut constater que l'urbanisation a limité les surfaces à sol nu. Ainsi, cette région est confrontée à une augmentation d'urbanisation permanente d'une façon chaotique, au détriment du territoire agricole (Masri *et al.*, 2001).

5.2.3 Le paysage agricole

La carte de la figure 5 représente les différentes surfaces agricoles permanentes dans la région d'étude. Pour réaliser cette carte, les données issues des images satellitaires de 2005 ont été utilisées. Ces données déterminent la localisation des différentes cultures cultivées dans la région. Les types des cultures plantées dans la région sont variées et divisées en quatre groupes : les cultures en plein champs, la vigne, les arbres fruitiers et les cultures intensives. Les cultures plantées en plein champs occupent 59,4 % de la superficie agricole de la région

soit 2546 hectares environ. La pomme de terre constitue les 2/3 des cultures en plein champs et le reste contient du blé et des légumes (oignon, persil, laitue...). La vigne constitue 20%, soit 873 hectares, les arbres fruitiers 18% soit 777 hectares et les cultures intensives constituent seulement 3% et sont cultivées sous serres en plastique. Les cultures intensives au Liban sont caractérisées par un usage d'intrants important, cherchant à maximiser la production agricole.

Les villages de Fourzol et Terbol constituent la majorité de la superficie agricole de la région d'étude. Elles constituent ensemble 59 % soit 2529 hectares environ. Le village de Tal – Amara possède une superficie agricole moins importante que celle des autres villages de la région d'étude. Cette superficie ne représente que 2% de la surface agricole totale. La surface agricole des autres villages varie entre 5% et 12% par rapport à la surface agricole cultivée dans la région d'étude.

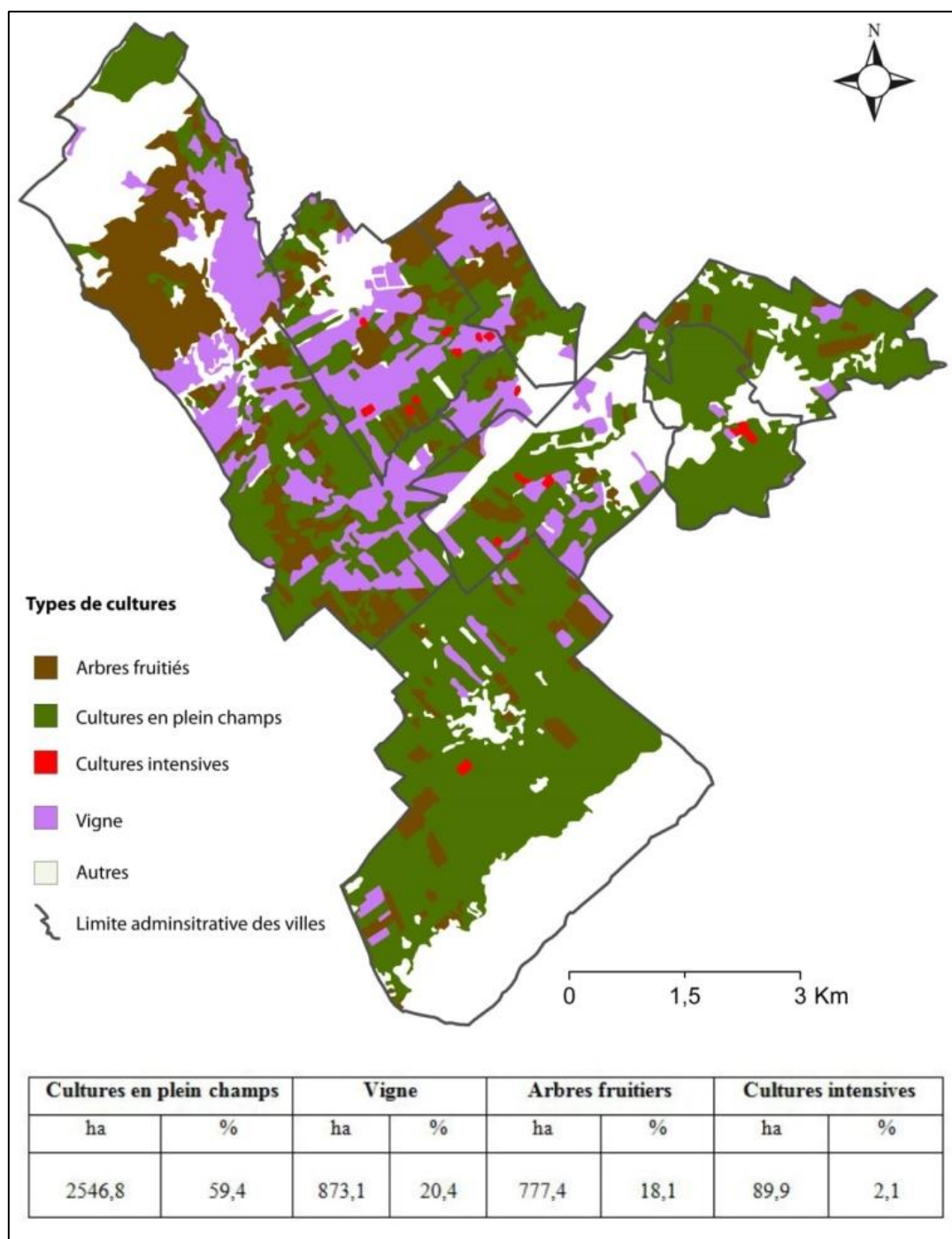


Fig. 5.3 - Répartition des cultures dans la région d'étude. Source : Données SIG fournies par le CNRS du Liban, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.

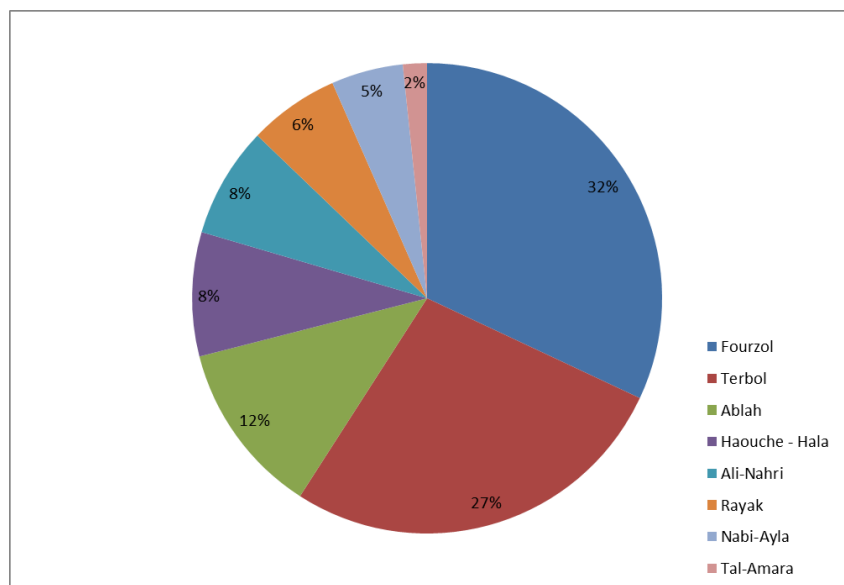


Fig. 5.4 - Répartition de la surface agricole de la région d'étude par ville. Source : calcul réalisé à partir des données SIG fournies par le CNRS du Liban, 2011. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.

La culture principale dans la plupart des villages est celle cultivée en plein champ, constituée principalement de céréalières et de légumières. Les arbres fruitiers et la viticulture occupent la deuxième place dans la région. En revanche, les cultures intensives ne dépassent pas le 5% de la surface agricole.

Type de culture	Cultures en plein champ (céréales et légumières)		Arbres fruitiers		Vigne		Cultures intensives	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Fourzol	494	36%	421,2	30,7%	421,7	30,8%	18,4	1,3%
Terbol	991	85,3%	102,4	8,8%	41	3,5%	27,63	2,4%
Ablah	205	40,1%	101,9	19,9%	189,1	37%	15,2	3%
Ali-Nahri	276,2	84,6%	36,3	11,1%	14,1	4,3%	15	4,6%
Rayak	256	95,7%	4	1,5%	8	3%	0,37	0,1%
Nabi-Aïla	65,9	31,3%	79,2	37,4%	64,2	30,3%	2,5	1,2%
Haouche-Hala	229	62,7%	28	7,7%	98	26,8	10,6	2,9%
Tal-Amara	29,2	41,2%	4,4	6,2%	37	52,2%	0,3	0,4%

Tableau 5.3 - Occupation agricole dans les huit villages de la région d'étude.

5.2.4 Ressources en eau et irrigation

L'irrigation dans la région d'étude est assurée principalement par les eaux souterraines provenant des puits. Les terrains agricoles irrigués représentent 3050 hectares environ soit 70,6 % de la surface cultivée (Kehdy, 2013). Selon la même source, le nombre de puits forés en Beqaa centrale est d'environ 390 soit de 0.9 puits/terrain. Ce nombre élevé de puits montre la forte dépendance de l'activité agricole aux eaux souterraines. Lors de notre entretien avec le directeur de LARI, il nous a expliqué plusieurs raisons responsables de l'augmentation des puits :

- Les espèces cultivées consommatrices d'eau comme la pomme de terre qui ont besoin entre 8 et 10 heures d'irrigation par jour.
- La pollution élevée du fleuve de Litani qui le rend inexploitable surtout pendant la saison sèche.
- Le manque de contrôle des forages.
- La diminution de la quantité de précipitation.

Les niveaux piézométriques dans la région se situent entre 20 m et 55 m (Kehdy, 2013). Parmi les agriculteurs enquêtés, 70% possèdent un niveau qui varie entre 30 m et 40 m, 28 % entre 20 m et 30 m et 2% entre 40 m et 50 m (figure 5.8).

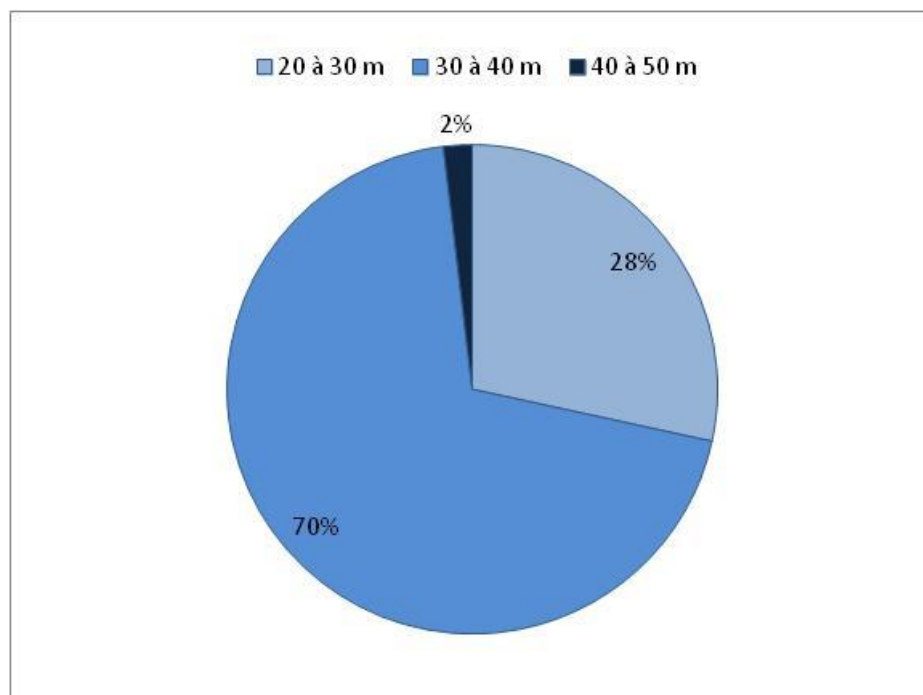


Fig. 5.5 - Niveau piézométrique selon les agriculteurs enquêtés de la région. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.

La surface agricole irriguée représente une partie importante de la SAU de la région d'étude. Elle représente près de 85 % de la SAU dans certains villages. Cette surface a subi une augmentation ces dernières années selon nos enquêtes. En effet, elle couvre la moitié de la SAU à Fourzol, le 2/3 à Haouch Hala et Rayak, et le 3/4 dans les autres villages.

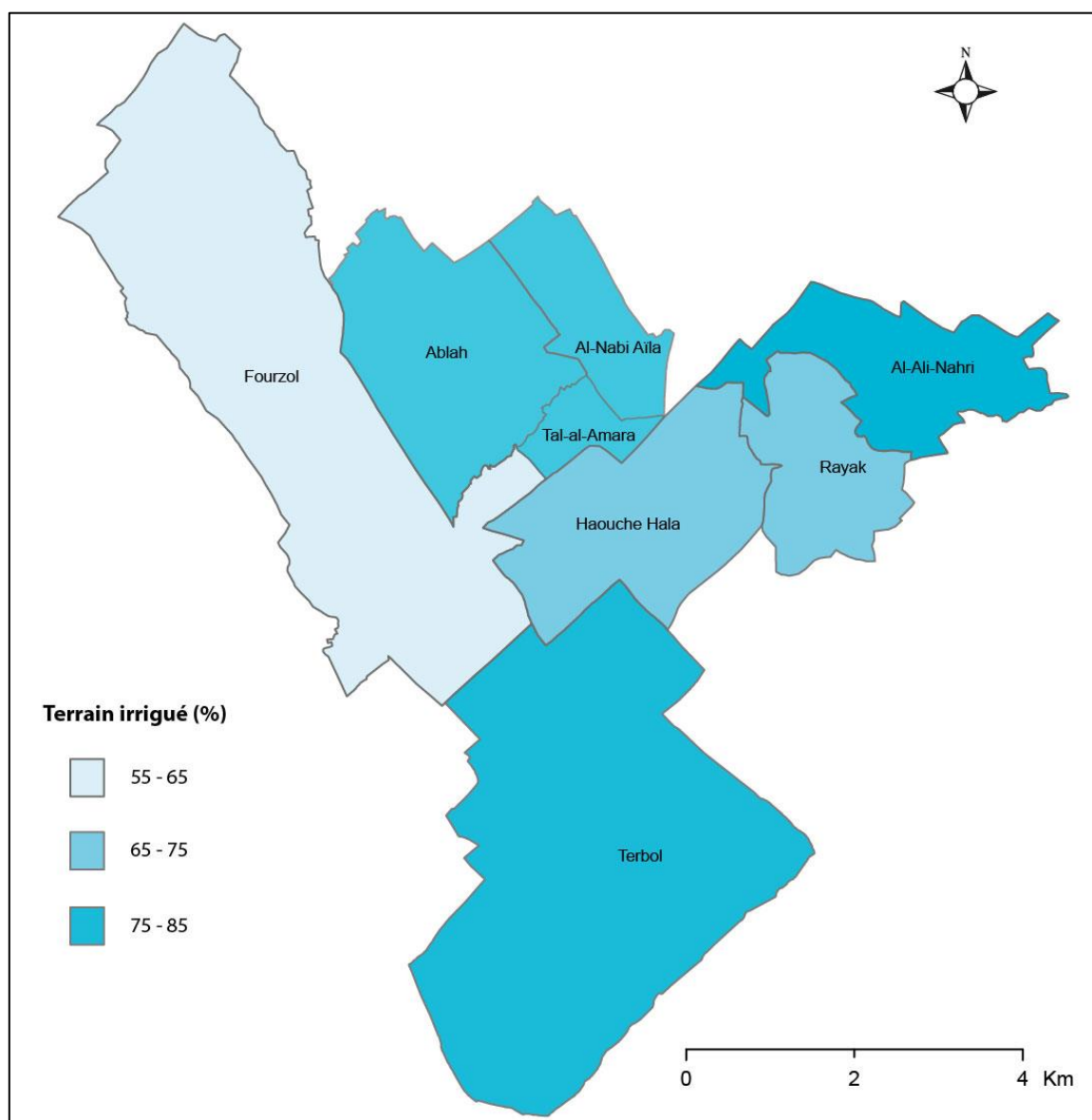


Fig. 5.6 - Les pourcentages des terrains irrigués dans notre région d'étude. Source : Atlas du Liban, 2015.
Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.

Les trois principales méthodes d'irrigation utilisées pour les terrains agricoles de la région sont : l'aspersion, le goutte-à-goutte et les canaux à ciel ouvert.

Méthode d'irrigation	Utilisation (%)	Types de cultures
Aspersion	68,4	Pomme de terre Blé Légumes
Goutte-à-goutte	21,9	Légumes Cultures intensives Vigne
Canaux à ciel ouvert	9,7	Arbres fruitiers Vigne

Tableau 5.4 - Méthodes d'irrigation dans notre région d'étude (%). Source : nos enquêtes, 2017. Réalisation : T. NASSER, 2017

L'irrigation par aspersion est fréquemment utilisée dans la région notamment pour les cultures en plein champs. Cette méthode est pratiquée pour les 2/3 des terrains agricoles.

Depuis quelques années, le goutte-à-goutte est en augmentation dans la région en raison du manque de ressource en eau (baisse de précipitation et tarissement des puits). Elle est pratiquée par le tiers des exploitations agricoles (enquêtes, 2017 et 2018). Lors de notre visite sur le terrain, nous avons remarqué des installations récentes de ce type d'irrigation notamment dans les champs de vigne.

Malgré la forte perte d'eau, l'irrigation par des canaux à ciel ouvert est toujours appliquée dans certains terrains agricoles de notre région d'étude. Elle est utilisée dans 10 % environ des terrains agricoles. Les agriculteurs utilisent encore cette méthode pour des raisons économiques.

Le choix des systèmes d'irrigation est lié au type de culture à irriguer et au facteur économique. Selon les données de nos enquêtes, les charges d'irrigation en grande culture représentent 20 à 25% du coût de production. Compte tenu de ce coût élevé, les aménagements hydrauliques sont rarement adaptés et calculés pour faire face aux périodes fortement sèches. Ainsi, les équipements d'irrigation utilisés par les agriculteurs ne permettent pas de satisfaire complètement les besoins en eau des cultures surtout quand il s'agit d'une sécheresse à forte intensité. Ces systèmes d'irrigation sont installés pour couvrir une durée entre 7 et 10 ans dans les meilleurs cas, mais souvent les agriculteurs tardent à changer leurs systèmes ce qui diminue l'apport en eau pour les espèces cultivées.

5.3 L'agriculture sur le terrain d'étude

L'agriculture joue un rôle primordial dans l'économie de la région d'étude. Le nombre d'exploitations agricoles est important en comparaison avec d'autres zones de la plaine de la Beqaa. Cela peut s'expliquer d'une part par le passage, au sein de la région de la rivière Litani, une source importante pour l'irrigation, d'autre part par la proximité de la ville de Zahlé (centre économique et commercial de la Beqaa).

5.3.1 Les exploitations agricoles

Le nombre total des exploitations agricoles dans la région est 641 réparties sur les huit villages. Cette répartition n'est pas uniforme dans tous les villages (figure 5.7). Le nombre d'exploitation varie de 13 à 161, Terbol possède le nombre le plus élevé (161 exploitations) et Nabi-Aïla le nombre le moins élevé (13 exploitations). Ce sont les exploitants qui décident la stratégie agricole de leurs propres exploitations. En ce qui concerne nos enquêtes, nous avons distingué trois types d'exploitants : petits, moyens et grands. Cependant, les exploitants qui gèrent des surfaces moyennes représentent la majorité des agriculteurs enquêtés.

Il faut noter que le nombre d'exploitation a souvent tendance à changer dans la région. En effet, ces dernières années, des exploitants, notamment qui gèrent des petites surfaces, ont abandonné leur activité agricole en raison des facteurs climatiques, économiques et politiques dans le pays (nos enquêtes, 2016).

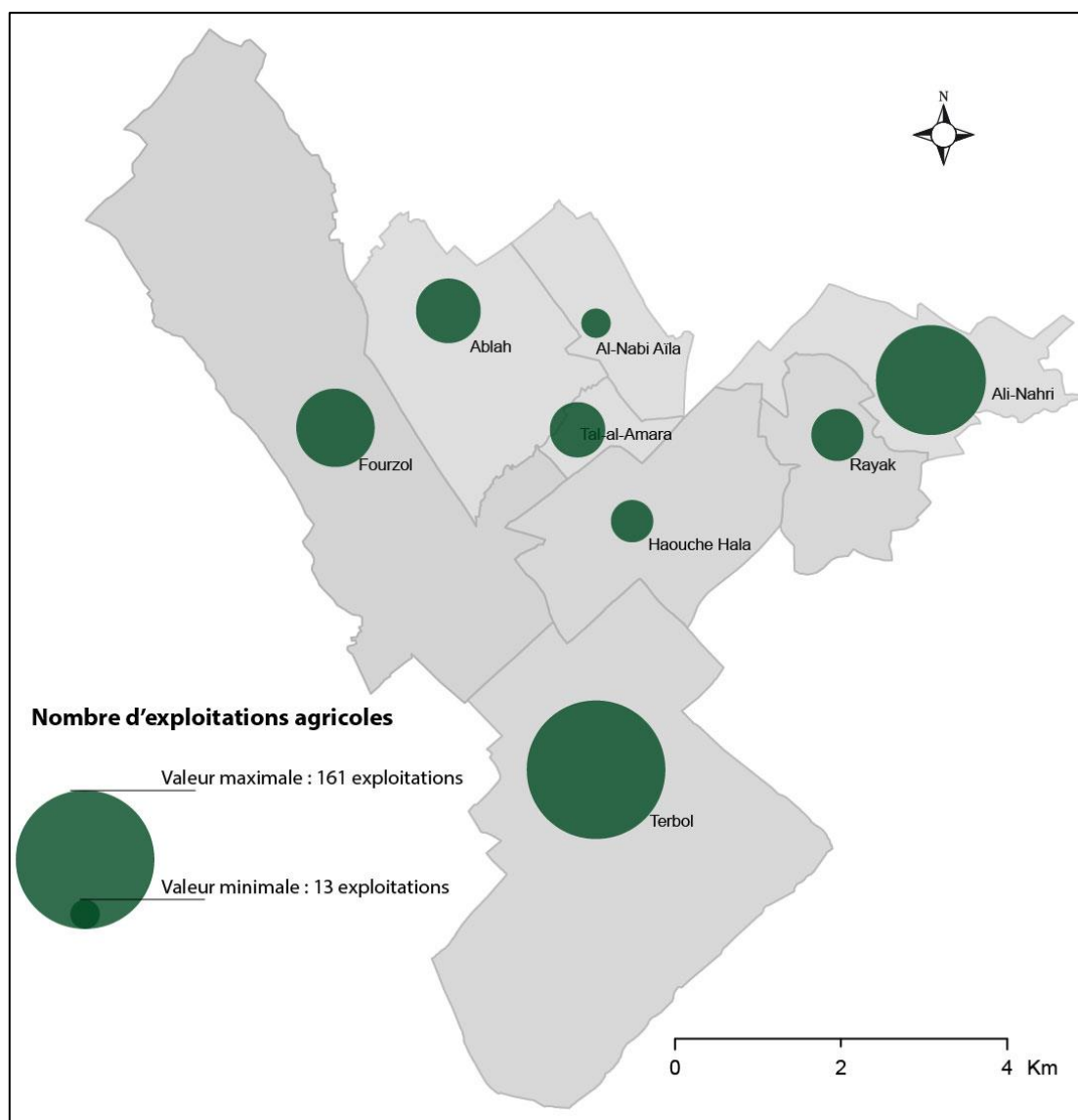


Fig. 5.7 - Répartition des exploitations agricoles. Source : Données SIG fournies par le CNRS du Liban, 1997.
Conception et Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017

5.3.2 La surface agricole utilisée

La surface totale dans notre région d'étude est égale à 5643 hectares environ (CNRS-L, 2005). Selon les données de l'Institut National de la Recherche Agronomique (2000) et le CNRS-L (2005), nous observons une évolution de la surface agricole utile au cours du temps (fig. 5.8). En 1965, la SAU couvrait 3968 hectares sur un total de 5643 hectares, soit 70,3 % de la surface totale de la région. En 1998, cette surface a eu une augmentation importante de 9 % pour atteindre les 4472 hectares, soit 79,2 % de surface totale de la région d'étude. En revanche, la carte de l'occupation du sol de CNRS-L de l'année 2005 montre un recul de cette

surface par rapport à 1999 pour atteindre 4287 hectares, soit 75,9 % de la surface totale de la région.

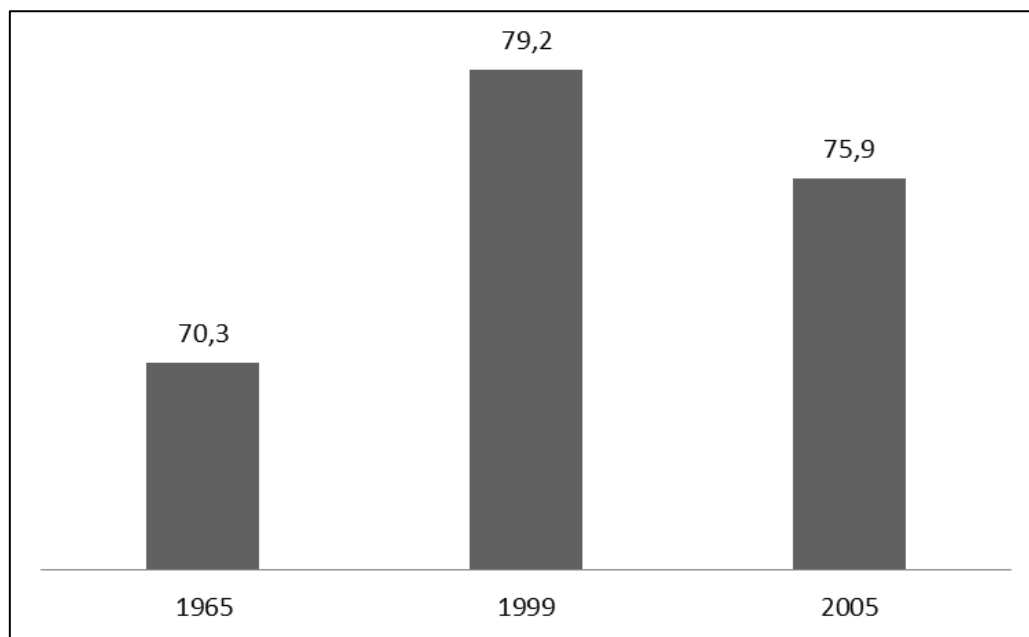


Fig. 5.8 - Evolution de la surface agricole cultivée pour les années 1965, 1999 et 2005. Source : INRA (2000) et CNRS-L (2005).

Le tableau 5.5 classe les villes de la région d'étude par ordre croissant selon leur superficie totale en hectares. Nous observons que les deux villages Fourzol (1697 ha) et Terbol (1673 ha) représentent plus que la moitié de la superficie totale de la région d'étude. La superficie la moins importante est celle de Tal-Amara (95 ha). Ce même tableau représente aussi la répartition de la surface agricole utile dans chaque village de la région. Nous remarquons que la surface agricole constitue la grande partie de la surface totale des villages, montrant l'importance de l'activité agricole dans la région.

Village	SAU (1965)		SAU (1999)		SAU (2005)	
	ha	%	ha	%	ha	%
Fourzol	1279,2	75,4	1307,1	77	1370,9	80,8
Terbol	974,3	58,2	1348,5	80,6	1162,5	69,5
Ablah	481,9	80,4	514,2	85,8	511,3	85,3
Haouche - Hala	394,3	68,9	388,4	67,8	365,5	63,8
Ali-Nahri	292,5	69,6	318,5	75,7	326,6	77,7
Rayak	284,4	85,6	296,7	89,3	267,6	80,5
Nabi-Ayla	197,8	77,8	222,3	87,5	211,9	83,4
Tal-Amara	63,8	67,1	76,8	80,7	70,92	74,6

Tableau 5.5 - Evolution de la surface agricole des villages de la région d'étude. Source : calcul réalisé à partir des données SIG fournies par le CNRS du Liban, 2005. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017

5.3.3 Profil des agriculteurs interviewés

La moyenne d'âge des agriculteurs interrogés est de 52 ans (variant de 25 à 70 ans). Cette information peut être faussée par notre sélection d'échantillon. Nous observons que la moitié des agriculteurs interrogés sont âgés de 40 à 55 ans (tableau 5.6). La structure familiale moyenne de l'agriculteur enquêté est de six personnes. Cela est relativement plus élevé que la taille moyenne d'une famille résident à Beyrouth qui est de quatre.

Intervalle d'âge	Pourcentage (%)
>25	6
25-40	18
40-55	51
55-70	32
< 70	3

Tableau 5.6 - Age des agriculteurs. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017

La moitié des agriculteurs ont suivi des études de niveau primaire, le 2/3 un niveau secondaire, et presque un dixième n'ayant pas suivi d'études (tableau 5.7). Le reste des agriculteurs, représentant moins de 5%, qui ont suivi des études universitaires sont des ingénieurs agronomes. Ainsi, ils ont eu le métier comme héritage et ils ont développé leurs terrains en appliquant des pratiques agricoles plus modernes que les autres, tels que les équipements. Certains d'entre eux ont développé du commerce dans le secteur agricole tels que le machinisme, les pesticides et les engrais.

Niveau d'étude	Pourcentage (%)
pas d'étude	9
Primaire	47
Secondaire	40
Universitaire	4

Tableau 5.7 - Education des agriculteurs en pourcentage. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017

Le revenu annuel moyen des agriculteurs enquêtés est de 7885 USD équivalent à 12 millions de livre libanaise environ. La moitié des agriculteurs ont un revenu annuel entre 7500 et 10000 dollars et le 1/4 entre 10000 et 12 500 dollars. Près de 10 % ont déclaré un revenu supérieur à 15 000 dollars et 5% en dessous de la moyenne, sachant que l'activité agricole n'est pas la seule source qui constitue le revenu de l'agriculteur.

Revenu annuel (USD)	Pourcentage (%)
Inférieur à 7500	5
7500 – 10 000	47
10 000 – 12 500	24
12 500 – 15 000	14
Supérieur à 15 000	10

Tableau 5.8 - Revenu annuel des agriculteurs. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017

5.3.4 Profil des exploitations agricoles

La production légumineuse dans la région, dominée par les tubercules en particulier la pomme de terre, occupe plus de la moitié de la surface agricole ; elle est caractérisée par une forte consommation d'eau.

La vigne constitue le 1/5 de la superficie agricole; une grande partie est irriguée par le goutte-à-goutte. Le quart des agriculteurs utilisent encore les canaux à ciel ouvert.

Les céréalières, dominée par le blé, constitue aussi un quart de la surface agricole ; cette culture est irriguée par l'aspersion notamment en début de la saison estivale.

Les arbres fruitiers dans cette région constituent 13% de la surface agricole ; ils ne sont pas irrigués et ne représentent pas de menaces réelles pour la ressource en eau.

On a constaté que certains agriculteurs subissent des difficultés pour commercialiser leur production agricole notamment en viticulture. Cette difficulté économique est apparue depuis le début de la guerre en Syrie notamment avec la fermeture de la frontière. Pour cela, certains d'entre eux ont arraché leurs vignes pour les remplacer par des potagers. Cela a permis d'apporter plus de bénéfices en raison de la présence du marché intérieur pour ce type de cultures.

La taille moyenne de l'exploitation agricole est de deux hectares environ.

Le 2/3 des agriculteurs exercent leur métier dans des parcelles inférieures à deux hectares et le 1/3 entre deux et cinq hectares.

Type de culture	Pourcentage (%)
Légumes (dont majorité pomme de terre)	47
Vigne	18
Céréales	24
Arbres fruitiers (amande, kaki, cerise)	13

Tableau 5.9 - Espèces cultivées par les agriculteurs interrogés Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017

Des études ont montré que les agriculteurs, ayant des ressources limitées en surface agricole, sont plus vulnérables aux chocs climatiques inattendus, entraînant des mauvaises récoltes et une insécurité du revenu (Hertel et Rosch, 2010; McDowell et Hess, 2012)

Superficie en hectare	Pourcentage (%)
Inférieur à 2 ha	62
Entre 2 ha et 5 ha	34
Entre 5 ha et 10 ha	4

Tableau 5.10 - Superficie utilisée en hectare. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017

Il était complexe de déterminer le nombre exact des heures d'irrigation et la quantité d'eau consommée par exploitation agricole. Cela est dû à deux facteurs principaux : l'absence de compteurs dans beaucoup de parcelles agricoles ; la fausse déclaration des agriculteurs en raison du nombre élevé des puits agricoles illégaux.

Sur 56 agriculteurs interrogés, nous avons eu 32 réponses claires, qui nous ont permis de déterminer le nombre d'heures d'irrigation par jour.

Les réponses des agriculteurs ont révélé une durée d'irrigation par jour relativement très élevée. La durée d'irrigation moyenne est 7,5 heures par jour environ. En effet, les 2/3 de ces agriculteurs irriguent entre 6 et 10 heures par jour. Seulement 1/5 des agriculteurs irriguent en dessous de la moyenne. On a remarqué aussi que certains agriculteurs dépassent les dix heures d'irrigation par jour. Cette consommation d'eau excessive pourrait parfois accentuer des conflits entre les usagers, qui devraient normalement travailler ensemble, dans le même périmètre régional.

Nombre d'heure d'irrigation par jour	Pourcentage (%)
Inférieur à 6	20,2
6-8	34
8-10	30,5
Supérieur à 10	15,3

Tableau 5.11 - Durée d'irrigation journalière. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017

5.4 La sécheresse vécue et perçue par les agriculteurs : origines et impacts

Le but de cette section était d'examiner de plus près quels impacts directs ces épisodes secs avaient sur l'agriculteur. Les agriculteurs ont été interrogés, dans leurs langues locales, sur la perception de la sécheresse observée et ses impacts sur leurs activités socio-économiques.

5.4.1 Définition de la sécheresse selon les agriculteurs interviewés

La sécheresse peut être perçue différemment par les agriculteurs. En effet, elle dépend de l'environnement physique de l'agriculteur, du type et du degré d'implication dans leurs activités agricoles ainsi que le niveau d'impact sur leur bien-être financier (Ashraf, Routray, 2013).

Plusieurs réponses ont émergé par notre question ouverte : « *Que signifie la sécheresse pour vous ?* » Ainsi, nous avons cité les réponses majeures résultantes de nos enquêtes. (Figure 5.9).

La majorité des agriculteurs ont défini la sécheresse comme une période hivernale avec peu ou pas de pluies entraînant une pénurie d'eau principalement pour l'utilisation domestique et agricole. Cette pénurie provoque mauvaise production agricole et ensuite une baisse d'activité économique dans la région. Ainsi, le terme « période morte » a été utilisé par plusieurs agriculteurs, ce qui montre le lien de l'épisode sec à l'économie agricole de la région. D'après les interviewés, la période morte dans la région signifie une forte baisse de revenus agricole. En outre, peu d'agriculteurs ont perçu la sécheresse comme une augmentation de la température atmosphérique (6%). Ces réponses nous ont permis de construire une idée sur les thèmes possibles des impacts de la sécheresse dans la région d'étude.

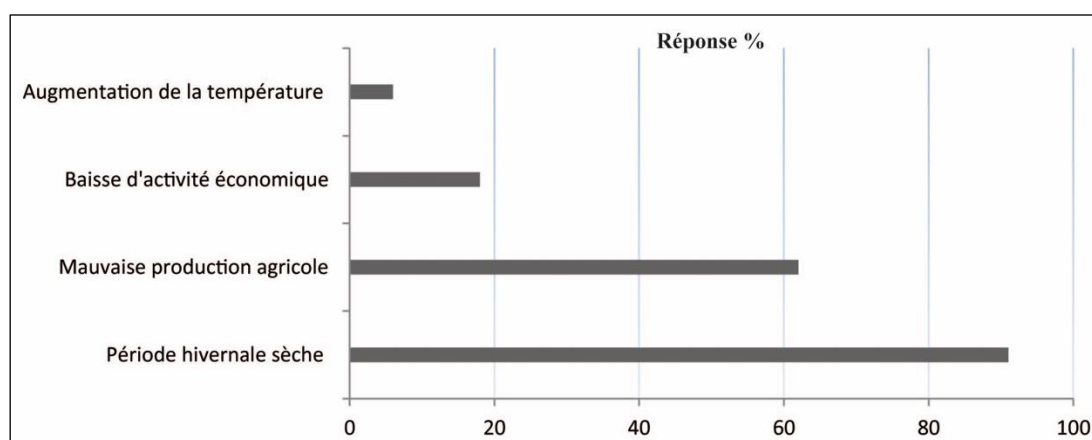


Fig. 5.9 - Définition de la sécheresse du point de vue des agriculteurs, 2017.

Ainsi, ces agriculteurs ont perçu les effets de la sécheresse selon différents degrés en fonction de leurs niveaux d'exposition, de leur résilience et de leurs capacités d'adaptation (figure 5.10).

Près de la moitié des agriculteurs ont estimé avoir eu des effets extrêmes à cause de la sécheresse. Ces effets sont ressentis souvent pendant la saison des récoltes, et ils sont moins fréquents pendant la croissance des cultures notamment avec l'apparition de la sécheresse intermittente.

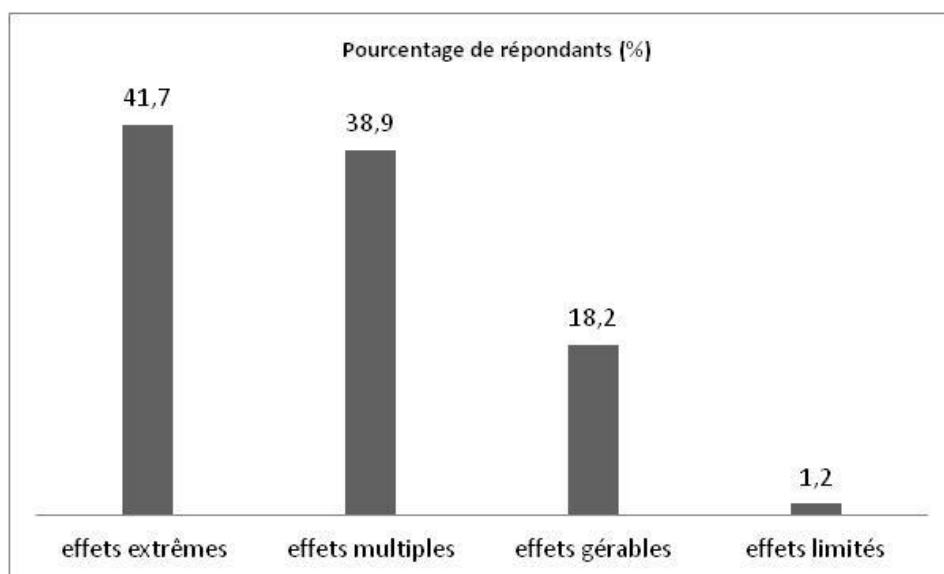


Fig. 5.10 - La vision des agriculteurs de l'étendue des effets de sécheresse au cours de 15 dernières années.

Les 2/3 des agriculteurs ont perçu la sécheresse au moins une fois pendant les cinq dernières années, sachant que la majorité pense que la sécheresse est devenue de plus en plus fréquente dans la région durant les 15 dernières années.

Enfin, une faible résilience et une forte vulnérabilité ont été remarquées chez les agriculteurs dans la région d'étude.

5.4.2 La sécheresse, une origine climatique ou humaine ?

Cette question a été posée telle quelle aux agriculteurs (figure 5.11). La relation qui unit l'agriculture à un milieu naturel est un point de départ essentiel pour définir la sécheresse d'un point de vue agricole. En effet, la sécheresse, en tant qu'aléa climatique est une des composantes du milieu naturel qui devient un risque, par la rupture de l'équilibre entre les

besoins d'une société et les ressources potentielles apportées par un milieu donnée (Charre, 1977).

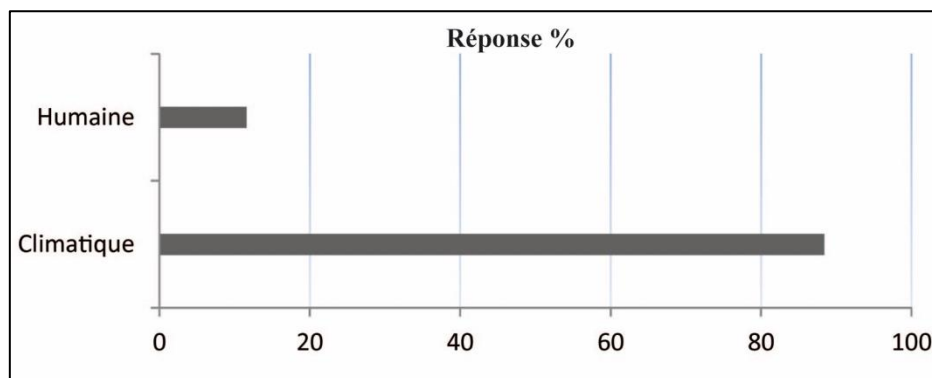


Fig. 5.11 - Origine de la sécheresse d'un point de vue des agriculteurs. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017

«Ma propre confiance en agriculture est diminuée à cause de la confusion au sujet des saisons. Pour cette raison, le rendement de culture a diminué énormément ».

Sur l'ensemble des agriculteurs interrogés, près de 85% attribuent la sécheresse à des raisons climatiques. Les agriculteurs ont vécu plusieurs fois une succession de mois déficitaires en pluviométrie. D'après eux, cela a aggraver la situation de l'agriculture dans la région surtout dans la période printanière, moment essentiel pour le démarrage de la saison agricole. L'évolution de la couverture neigeuse, sur les deux massifs montagneux (Anti-Liban et Mont-Liban) qui entourent la plaine Beqaa, a été fortement évoquée par ces agriculteurs ; la superficie et la durée de cette couverture ont diminué au cours des dernières années, ainsi que le taux et la durée des précipitations, qui sont des éléments cruciaux pour les agriculteurs en Beqaa.

Parmi les agriculteurs qui ont dit que la sécheresse est d'origine climatique, la majorité a déclaré une diminution de pluviométrie et seulement 25% ont parlé d'une irrégularité. Cela montre qu'une grande partie des agriculteurs ont connu des changements négatifs au niveau de pluviométrie (figure 5.12).

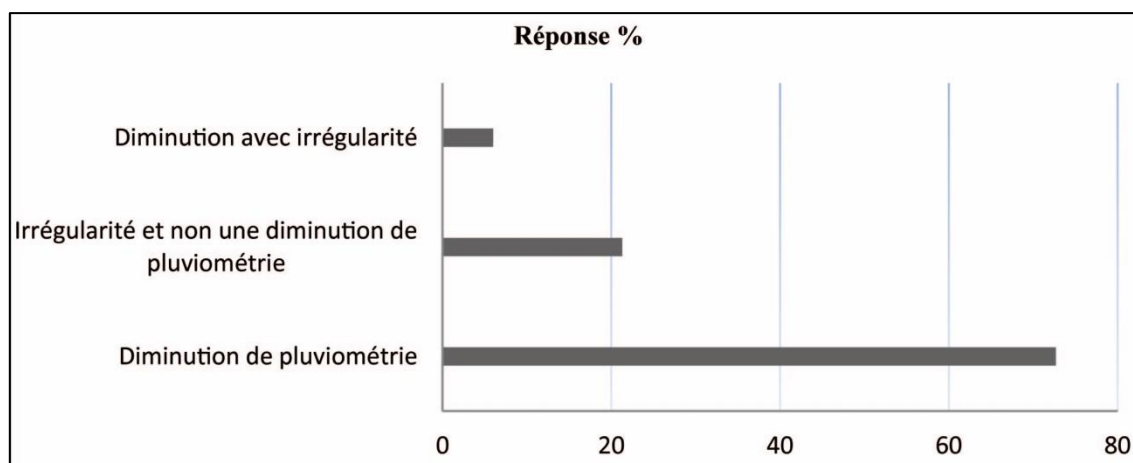


Fig. 5.12 - Evolution de la pluviométrie selon les agriculteurs interrogés. Source : Données des enquêtes du terrain, 2016-2017.

« La sécheresse, ce n'est pas nouveau. La seule différence est que le ressenti est devenu plus important à cause des mauvaises pratiques agricoles ».

En revanche, moins de 10% des agriculteurs interviewés pensent que la pénurie d'eau est d'origine gestionnaire. D'après cette partie d'agriculteurs, les puits agricoles sont fortement utilisés durant la saison sèche, notamment avec l'apparition des épisodes secs, ce qui exerce une forte pression sur la ressource en eau souterraine. Ainsi, ils considèrent que l'implantation massive et chaotique des forages est un facteur important de l'assèchement de la source d'eau et de la variation de niveau d'eau des puits.

5.4.3 Perception des impacts des sécheresses antécédentes

La collection des informations sur les impacts des sécheresses antécédentes est très importante pour planifier des futures réponses à ce phénomène. En effet, la comparaison des effets de la sécheresse entre les différentes activités socio-économiques d'une région peut aider à mettre une stratégie d'atténuation. La figure 5.13 montre les impacts directs des sécheresses antécédentes perçues par les agriculteurs. Ainsi, les divers impacts de la sécheresse peuvent être classés en impacts sociaux, économiques et environnementaux (Wilhite *et al.*, 2000).

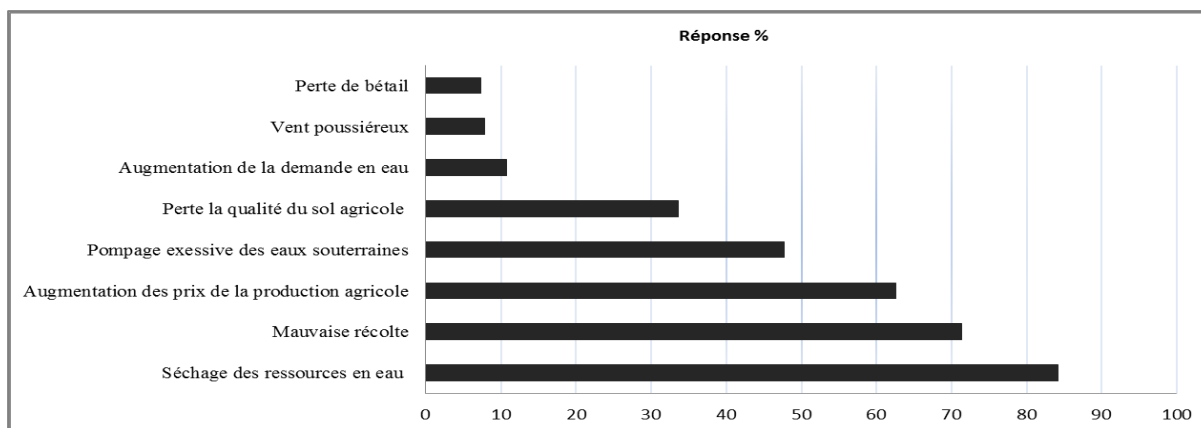


Fig. 5.13 - La perception des agriculteurs sur les impacts de la sécheresse. Source : Enquêtes, 2017

L'assèchement des ressources en eau est un des impacts principaux de la sécheresse d'après les réponses des agriculteurs (84%). « *Les pompes d'eau se remplissent d'air au bout de trois heures* ». Cela signifie que le niveau d'eau dans les puits est trop bas et ne suffit pas pour alimenter le champ cultivé. Dans ce cas, les agriculteurs sont obligés d'attendre pour que l'eau remonte de nouveau.

Ainsi, 83% des agriculteurs rencontrés possèdent des puits agricoles dont 67 % ont déclaré avoir eu un assèchement partiel ou total du puits pendant une saison sèche (figure 5.14).

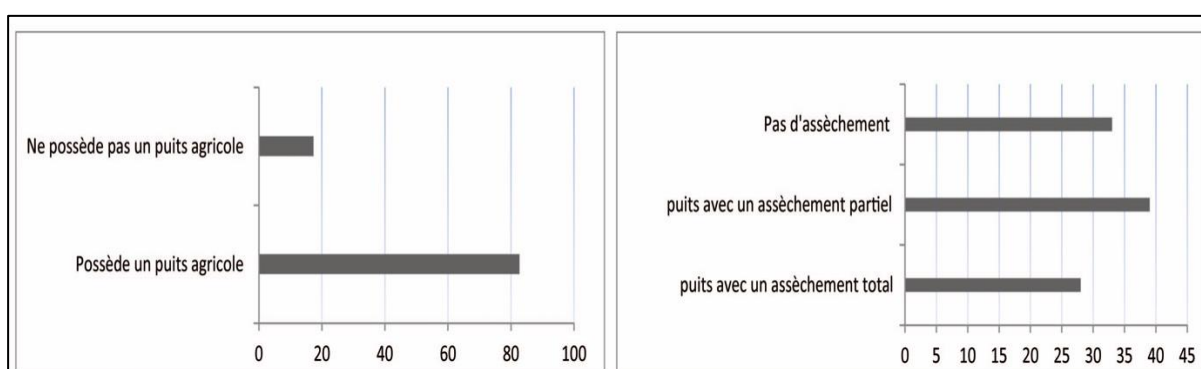


Fig. 5.14 - Situation des puits agricoles dans la zone d'étude. Source : Enquêtes, 2017

Le nombre de puits forés est en augmentation dans la ville selon le directeur de LARI à Tal Amara (entretien de l'année 2016). L'absence de contrôle de cette implantation massive des forages peut être considérée comme une conséquence importante de l'assèchement des ressources en eau et de la variation de niveau d'eau des puits. Ainsi, un dénombrement des puits agricole n'a pas été recensé depuis une dizaine d'année. Cela ne permet pas de limiter les volumes d'eau exploités ni de vérifier la distance autorisée entre les puits forés.

L'augmentation de prix de la production agricole a été abordée par les 2/3 des agriculteurs interviewés. « *Je dépense le double qu'avant. Les matériels d'irrigation coûtent cher ainsi*

que leurs entretiens. L'augmentation de pauvreté est fortement liée à la réduction des rendements des cultures en fonction de ses sensibilités à la sécheresse. Il est donc probable que les sécheresses répétées dans la région entraînent une augmentation de pauvreté même si l'agriculteur ne la prononce pas directement. Plus que la moitié des agriculteurs ont parlé d'un pompage excessif pendant la période sèche. En effet, certains agriculteurs pomperaient plus d'heures ou creuseraient plus profondément leurs puits pour avoir un accès à la ressource ce qui accélérerait l'assèchement des puits en privant les autres agriculteurs de l'eau. Cela induirait une baisse importante de l'eau dans les nappes phréatiques. Près de 1/3 des agriculteurs ont mentionné un lien entre les épisodes secs prolongés et la dégradation ou l'érosion du sol. La dégradation et l'érosion des sols constituent un défi pour de nombreux agriculteurs dans la plaine de la Beqaa. Les périodes prolongées de sécheresse peuvent contribuer indirectement à l'érosion du sol. En effet, si la végétation s'assèche complètement, les systèmes racinaires meurent et le sol devient sec, léger et moins cohésif ce qui augmente la probabilité de l'érosion. L'humidité du sol, essentielle pour les activités microbiennes, est réduite dans les conditions de sécheresse. En conséquence, cette diminution dans l'activité organique accélère la dégradation de qualité du sol.

5.4.4 Perception des impacts de la sécheresse sur l'activité agricole

La réduction ou la perte du rendement agricole est l'impact principal des épisodes secs. La moitié des agriculteurs ont déclaré des récoltes réduites en raison de faible pluviométrie et de l'augmentation des maladies et des ravageurs des cultures (puceron, cicadelle, cochylys, etc...). La plupart des agriculteurs dans la région ont fait face à des situations semblables plusieurs fois au cours de ces dernières années. Nous avons évalué les pertes de rendement pour la saison agricole 2014 - 2015. Cette période représente la sécheresse la plus récente dans la région selon les agriculteurs interviewés. Pour calculer cette perte, nous avons obtenu le rendement de référence moyen des cultures principales dans la plaine de la Beqaa à partir de la plateforme du ministère d'agriculture. Tout écart négatif au rendement de référence traduit l'action d'un facteur limitant d'origine agro-climatique.

La figure 5.15 (a et b) montre la sévérité des impacts de la sécheresse sur l'agriculture pour l'année de 2015, en termes de pourcentage de réduction de la superficie cultivée et la production des cultures pour la saison agricole. Nous présentons ci-dessous les données sur les pertes de rendement par culture selon les agriculteurs interviewés:

- les légumineuses: la perte de rendement est remarquable. Cette perte a connu une perte importante pour atteindre son maximum de 32,5%.
- la production céréalière: la perte maximale atteint 14,5%. La perte moyenne est autour de 11%.
- la production fruitière: la perte maximale est autour de 12,5% environ. La perte moyenne est de 8,5%.
- la vigne: la perte est moins importante que les autres productions agricoles. La perte maximale est 11% et la perte moyenne est de 7% environ.

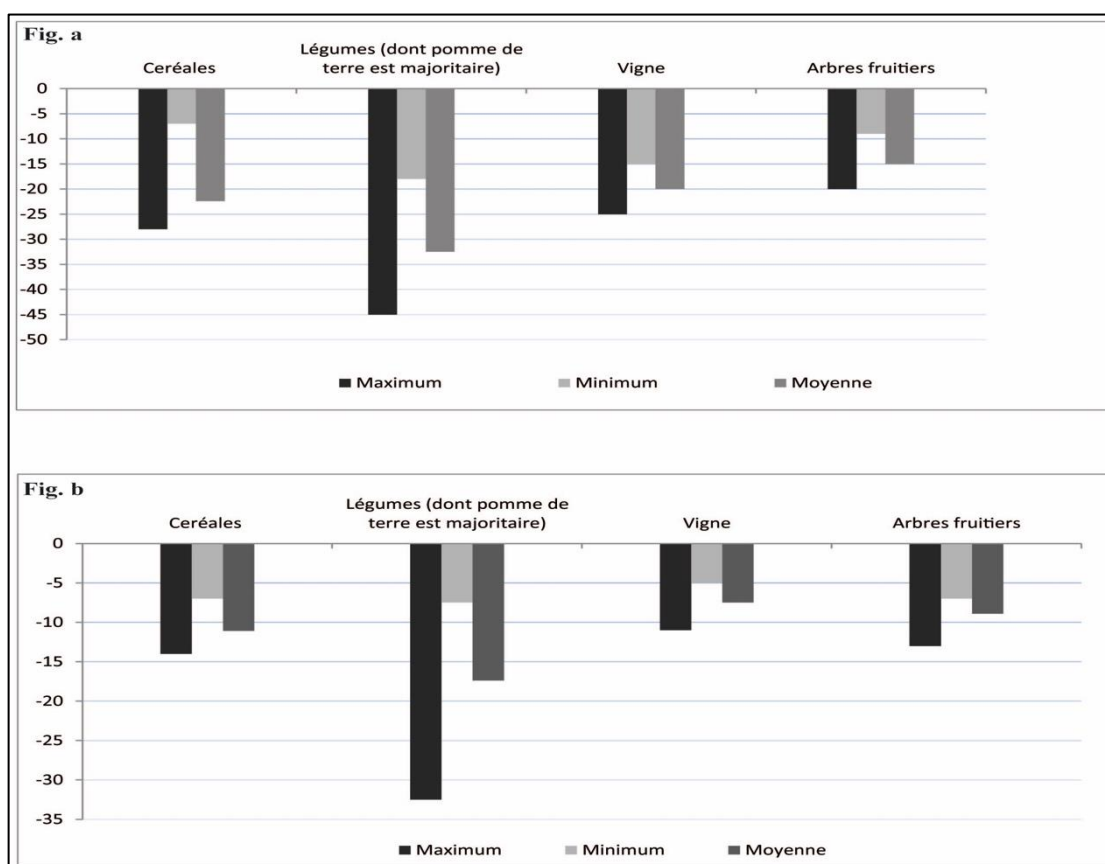


Fig. 5.15 - (a) Réduction en pourcentage de la surface agricole cultivée, (b) Réduction en pourcentage de rendement des principales cultures. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017

La sensibilité des cultures à la sécheresse dépend des conditions physiques (manque de pluviométrie, rayonnement et températures élevées) et des conditions de culture (période de semis, irrigation). Ces données rendent compte de la sensibilité des cultures liée notamment au manque d'eau quel que soit son origine.

Nous avons observé lors de nos enquêtes que les pertes variaient grandement d'un agriculteur à un autre. Cela peut s'expliquer par les pratiques agricoles utilisées par chaque agriculteur

comme les méthodes d'irrigation, le semis de la culture et les stratégies de stockage de l'eau pour faire face aux faibles disponibilités hydriques.

5.4.5 Perception des impacts socio-économiques

Une compréhension des impacts socio-économiques de la sécheresse est essentielle dans la conception technologique et les interventions politiques afin d'atténuer les effets de la sécheresse (Pandey et Bhandari , 2009). Selon nos enquêtes, les impacts des sécheresses étaient importants sur les principales activités économiques des agriculteurs (en cas d'irrigation limitée). Les épisodes secs ont entraînés des mauvaises récoltes, ce qui a conduit à affaiblir la situation financière des agriculteurs, une augmentation de chômage des ouvriers agricoles ainsi qu'une perte de temps dans la collecte de l'eau pour l'irrigation.

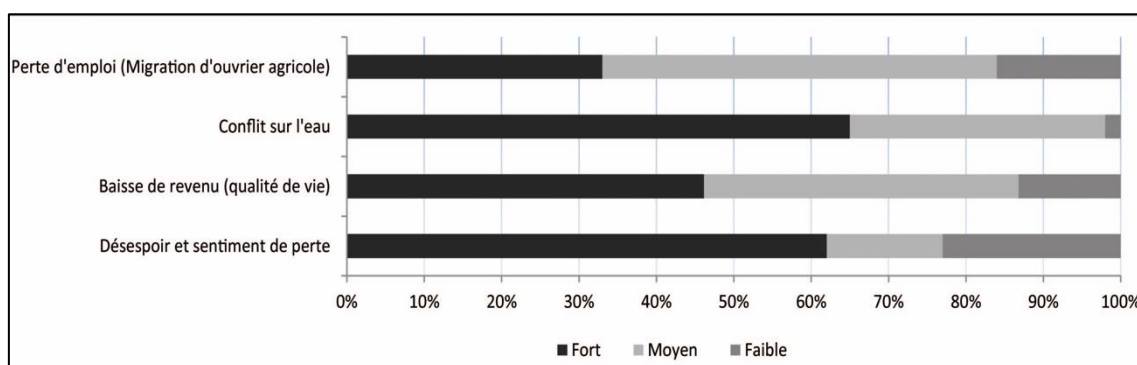


Fig. 5.16 - Perception des agriculteurs sur les impacts socio-économiques de la sécheresse. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.

La figure 5.16 révèle les réponses des agriculteurs sur les impacts socio-économiques perçus. Plus que 60% des agriculteurs ont ressenti un fort impact sur la distribution d'eau. Cela a créé des conflits entre les agriculteurs sur la façon d'utiliser des puits agricoles et les nombres d'heure d'irrigation journalière notamment pendant la saison agricole. En effet, lors d'une période sèche, certains agriculteurs creusent plus profondément leurs puits pour avoir un accès à la ressource ce qui accélère l'assèchement des puits et peut parfois priver leurs voisins de l'accès à l'eau. Ainsi, une différence significative, basée sur le niveau d'éducation des agriculteurs, a été observée dans la perception des conflits sur l'eau en raison de la sécheresse. En effet, les agriculteurs, possédant un faible niveau d'étude, croient que l'origine des conflits sur l'eau provient de la perte économique liée à la sécheresse climatique. Ce groupe des agriculteurs irriguent entre 6 à 8 heures par jour. D'un autre côté, les agriculteurs qui possèdent un niveau d'étude plus élevé, croient que l'origine de la sécheresse est l'utilisation

chaotique des ressources en eau par certains agriculteurs. Ce groupe d'agriculteurs croient que le nombre d'heure d'irrigation journalière excessive augmente la sévérité de la sécheresse. D'autres agriculteurs ont signalé un fort désespoir sur l'avenir de l'activité agricole en raison du manque d'une planification d'utilisation des ressources en eau pour l'irrigation.

Une partie des agriculteurs ont ressenti un impact élevé des épisodes secs sur la qualité de vie. Cependant, ces épisodes affectent surtout les agriculteurs à faible revenu et les obligent à réduire leurs dépenses ménagères.

Près de 1/3 des répondants ont signalé que les ouvriers agricoles qualifiés sont devenus de plus en plus rares à trouver dans la région. En raison de baisse d'activité agricole, une partie des ouvriers migrent vers d'autres régions surtout vers la capitale pour chercher des emplois.

5.4.6 Perception des impacts environnementaux

La sécheresse entraîne une diminution des débits et des niveaux d'eau des lacs et des aquifères souterrains. En effet, un débit faible accompagné par une température d'eau élevée peut causer une détérioration de la qualité d'eau (Massarutto *et al.*, 2013). De plus, les épisodes secs répétitifs réduisent l'eau dans le sol, ce qui a des effets négatifs sur la fertilité des sols et la biodiversité (Knutson *et al.*, 1998). La figure 5.17 révèle les impacts environnementaux de la sécheresse perçus par les agriculteurs. Ils ont signalé une augmentation de la température atmosphérique moyenne pendant une année de sécheresse par rapport à une année normale. Les agriculteurs ont perçu une diminution importante dans les surfaces d'eau à cause de la forte chaleur. Ils ont parlé de l'exemple de la pollution qui a apparu avec la baisse du niveau d'eau du lac de Qaraoun. Un autre exemple a été cité est la disparition de l'eau dans l'étang d'Ammiq.

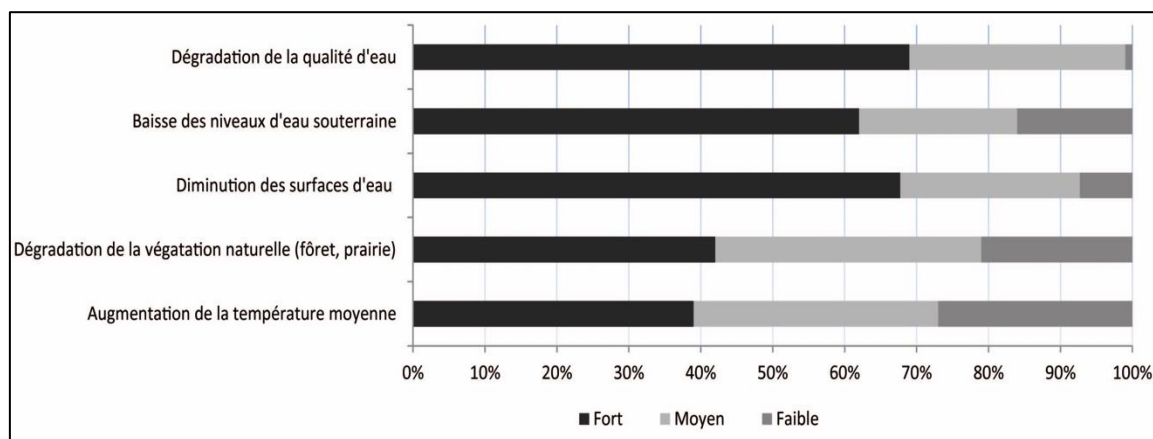


Fig. 5.17 - Perception des agriculteurs sur les impacts environnementaux de la sécheresse. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.

5.5 Les stratégies d'adaptations utilisées par les agriculteurs interviewés

L'adaptation à la sécheresse est un processus en deux étapes. La première est de reconnaître la sécheresse, la deuxième consiste à réagir à ses divers impacts par des activités d'adaptation et d'atténuation (Habiba *et al.*, 2012). La section précédente a montré que les agriculteurs sont conscients des impacts des épisodes secs sévères. Selon la perception de sévérité des impacts de la sécheresse, les agriculteurs appliquent un certain nombre de stratégies d'adaptation pour atténuer les effets néfastes de la sécheresse. Nous citons ci-dessous les plus importantes qui sont pratiquées dans la région.

5.5.1 Les pratiques agricoles

La figure 5.18 résume les principales techniques d'adaptation et le pourcentage de répondants utilisant chaque stratégie. Les détails de ces mesures adaptatives clés sont expliqués ci-dessous.

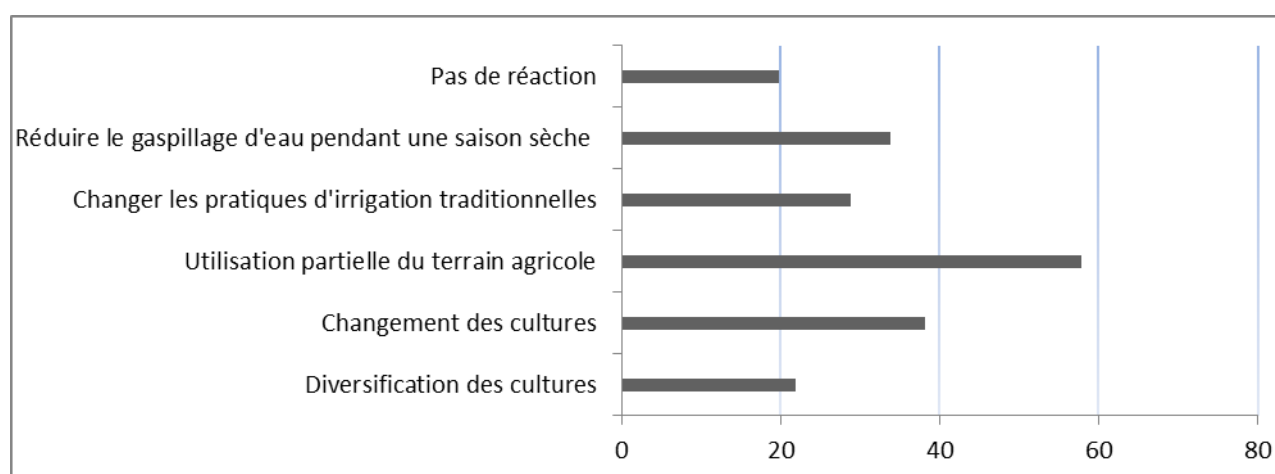


Fig. 5.18 - Principales mesures d'adaptation adoptées par les agriculteurs. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.

« Quand il y a une pénurie d'eau, je réduis mon espace cultivé et parfois de moitié pour pouvoir assurer une quantité d'eau optimale. Je retourne le sol du terrain non cultivé et je le laisse en friche ».

L'utilisation partielle du terrain agricole est une stratégie d'adaptation majeure pratiquée par plus de la moitié % des agriculteurs, qui considèrent que cette technique coûte moins chère. En effet l'exploitation de toute la surface agricole, durant une période de pénurie, nécessite plus de temps et d'argent pour collecter l'eau. Pour cette raison, ils préfèrent réduire leurs

revenus au lieu d'avoir une perte directe. Cette technique d'exploitation partielle permet aux agriculteurs d'assurer une quantité d'eau pour la parcelle cultivée et de maintenir la qualité de rendement. La photo 3 témoigne de la manière dont les agriculteurs laissent une parcelle cultivée et une autre au repos.



Photographie 5.1 - Utilisation partielle d'un terrain agricole. Cliché par T. NASSER, 2017

« Depuis quelques années j'ai arraché une partie de vigne et je l'ai transformé en parcelle pour la production de laitue afin de minimiser le risque. J'ai changé de culture parce que je préfère semer des espèces à croissance rapide » (Photo 1). Près du quart des agriculteurs interviewés ont changé de culture. Ils ont choisi des cultures irriguées par goutte-à-goutte ce qui rend la gestion d'eau plus facile pour l'agriculteur.

Le changement des variétés peut être aussi pour des raisons relativement économiques et non pas à cause de la sécheresse. Certains agriculteurs étaient obligés d'utiliser le goutte-à-goutte parce que les variétés cultivées les obligent à contrôler la quantité d'eau. Si non, ils ont déclaré qu'ils ne souhaitent pas utiliser ce système à cause de l'entretien et les charges sur le coût de la production.



Photographie 5.2 - Changement des cultures à Fourzol. Cliché par T. NASSER, 2017

« Pour moi, je suis une diversification de culture. Si un échec d'une variété se produit, peut être une autre survivra ».

La diversification des cultures est une stratégie d'adaptation importante dans la région d'étude, elle est pratiquée par 20% environ. La justification de la diversification des cultures est de réduire les effets économiques de la sécheresse. Ainsi, cette technique apparaît importante pour réduire l'usage des intrants comme l'eau d'irrigation, les pesticides et les engrais azotés. Elle permet d'avoir deux ou plusieurs variétés de cultures en une saison. Les agriculteurs peuvent cultiver des espèces plus ou moins consommatrices d'eau, ce qui permet de gérer la quantité d'eau disponible dans leurs puits. Cependant, la diversification des cultures progresse peu dans la région parce que les agriculteurs ciblent souvent les cultures les plus rentables. Cette technique est souvent appliquée par les agriculteurs qui possèdent une grande surface agricole permettant la diversification (Photographie 5.3).



Photographie 5.3 - Diversification des cultures à Terbol. Cliché par T. NASSER, 2017.

5.5.2 Des revenus non agricoles

« Un apport d'un revenu extérieur fixe permet d'assurer une réserve et d'augmenter les ressources en cas d'années de faible production ».

Le choix d'exercer un deuxième métier salarié autre qu'agricole semble un moyen pour assurer un revenu régulier au ménage, qui peut compenser les aléas des revenus agricoles. De manière générale les revenus des activités agricoles dans la région sont généralement faibles. Ils sont très volatiles d'une année à une autre et dépendant de la bonne ou la mauvaise récolte, ainsi que la commercialisation des produits agricoles. Les agriculteurs qui exercent un deuxième métier représentent les 2/3 des interviewés. Ils sont généralement commerçants ou chef d'une entreprise (propriétaire d'un supermarché, boutique pour vendre des pesticides), ouvrier ou employé (figure 5.19). Les agriculteurs qui exercent un deuxième métier sont souvent plus diplômés (niveau secondaire) que ceux qui sont mono-actifs.

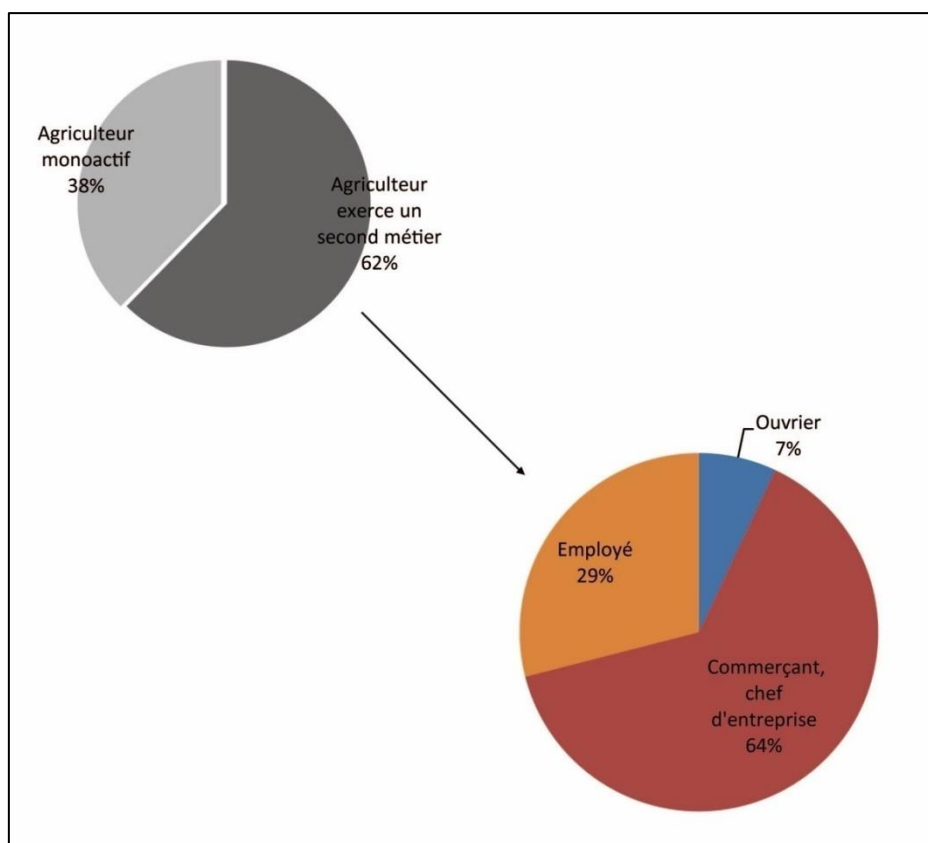


Fig. 5.19 - Nombre d'agriculteurs qui exercent un second métier. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.

Les agriculteurs qui exercent un second métier sont souvent des viticulteurs et des arboriculteurs. Ces individus ont choisi ce type de culture, précisément parce que ce type de culture leur laisse la disponibilité d'exercer une autre activité économique. Souvent, cette catégorie d'agriculteurs a hérité ou acheté ses terrains et l'activité agricole n'est pas considérée comme métier principal. A l'inverse, dans les exploitations maraîchères, peu d'exploitants exercent une deuxième activité salariale vu la nécessité d'une présence quasi-régulière sur le terrain.

« Le revenu de ma femme permet d'aider à l'investissement et au remboursement des emprunts puisqu'il garantit une régularité » (E4).

La majorité des agriculteurs vivent en couple dont 20 % des conjoints travaillent exclusivement sur l'exploitation, 70 % sont inactifs et moins de 15 % travaillent à l'extérieur (figure 5.20).

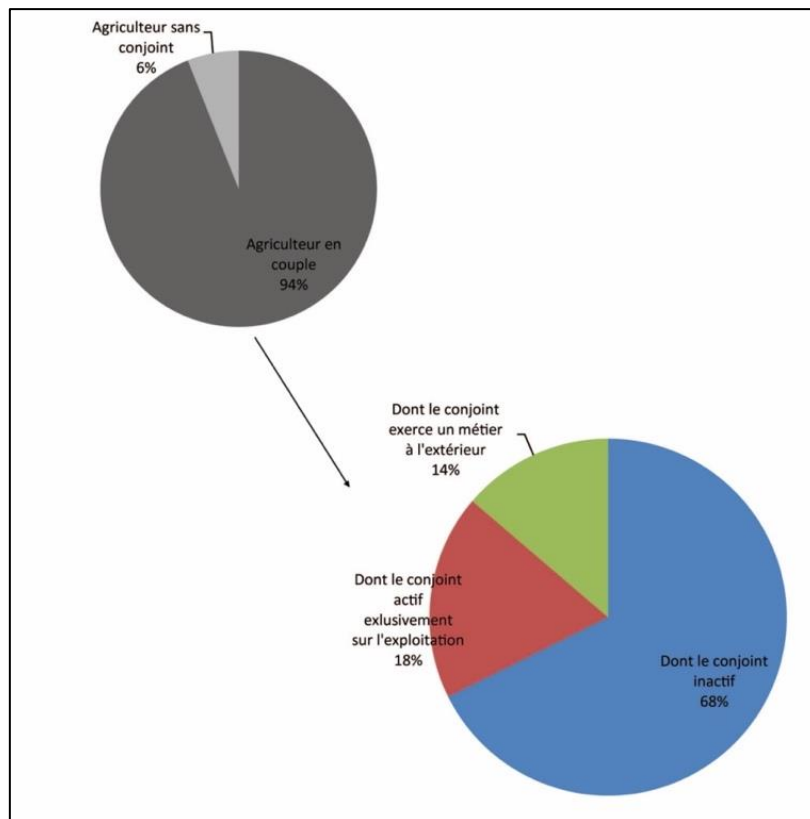


Fig. 5.20 - Répartition des métiers du conjoint. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.

Dans les petites exploitations comme dans les grandes, nous avons distingué trois groupes :

- Des couples strictement agricoles, avec un chef monoactif et dont le conjoint travaille sur l'exploitation ou est inactif.
- des couples qui apportent un revenu extérieur à l'exploitation (le chef d'exploitation et le conjoint exercent un second métier).
- Un chef d'exploitation monoactif dont le conjoint travaille à l'extérieur.

La proximité de la ville de Zahlé, centre économique et administratif de la Beqaa, explique sans doute pourquoi les agriculteurs de la région ont plus de facilités à exercer un second métier non agricole afin d'assurer une stabilité de revenu.

5.5.3 Les techniques d'irrigation et stockage d'eau

« La concurrence importante sur l'eau dans notre région a réduit énormément la quantité d'eau disponible pour l'agriculture » (E6).

Comme expliqué précédemment, la surexploitation des eaux provenant des nappes phréatiques dans la région a rendu nécessaire l'amélioration de méthodes d'irrigation et de conservation d'eau pour maintenir une production agricole suffisante. Les agriculteurs

pratiquent des méthodes d'irrigation et de stockage afin de s'adapter aux périodes de pénurie d'eau.

« En raison du tarissement régulier de mon puits, j'ai été obligé d'installer un système d'irrigation goutte-à-goutte pour mon champ de vigne. Il y a quelques années le niveau d'eau dans le puits ne nécessitait pas ce type de système » (E3).

Nous avons observé que cette technique d'irrigation est en augmentation ces dernières années. Cependant seulement 20 % des agriculteurs interrogés ont installé ce système (photo 3). Nous avons aussi remarqué que certains agriculteurs se sont vus forcés d'appliquer le système goutte-à-goutte en absence d'autre choix et ils seraient prêts à l'abandonner si le niveau d'eau remonte dans leurs puits à cause du coût d'entretien qui se répercute sur le prix de production.



Photographie 5.4 - Système d'irrigation goutte-à-goutte dans un champ de vigne. Cliché : T. NASSER-CEDETE, 2017.

« La pompe d'eau s'arrête au bout de trois heures, j'utilise des arroseurs économiques (tête réduite) pour une irrigation par aspersion pour ne pas épuiser vite l'eau de mon puits » (E2). Ces agriculteurs utilisent l'irrigation par aspersion notamment pour les cultures de plein champ (photographie 5.4). Cette technique est utilisée fréquemment pour la production des légumes et des céréales. Par contre, peu d'agriculteurs pratiquent ce système d'irrigation dans les champs cultivés en pomme de terre. Les agriculteurs préfèrent utiliser des canons qui se caractérisent par un fort gaspillage d'eau. Leur justification est que l'irrigation par aspersion

ne permet pas une bonne distribution d'eau à cause du vent. Ainsi, la grande surface cultivée par la pomme de terre nécessite beaucoup de matériels et d'entretien.



Photographie 5.5 - Irrigation par aspersion dans un champ de grandes cultures. Cliché : T. NASSER-CEDETE, 2017.

« A cause du manque d'eau, j'ai acheté des bassins en plastique pour stocker l'eau et l'utiliser pendant le printemps et l'été quand il fait sec » (E7). Cette technique devient une alternative viable pour les agriculteurs qui cultivent des petites surfaces agricole (inférieur à un hectare). Ils utilisent de grands réservoirs en plastiques pour stocker l'eau pendant l'hiver et les utiliser pendant les épisodes secs (photographie 5.5). Ils servent aussi à alimenter les systèmes d'irrigation à faible consommation d'eau comme le goutte-à-goutte. Cependant, cette technique résout le manque d'eau pour une petite durée de sécheresse.



Photographie 5.6 - Stockage d'eau dans des réservoirs en plastique. Cliché : T. NASSER-CEDETE, 2017.

« Un bassin souterrain en ciment est mieux pour moi, je ne perds pas une surface agricole, je stocke plus d'eau pour mon champ de légumes, l'irrigation dure plus longtemps et il y a moins d'évaporation d'eau » (E1). Peu d'agriculteurs utilisent cette technique à cause du cout élevé par rapport à leurs revenus. Nous avons rencontré un seul agriculteur lors de notre visite qui avait construit un bassin souterrain en ciment. Comme en Europe, il faut investir davantage pour produire. Selon cet agriculteur, cette technique coûte cher mais ça lui a permis d'avoir plus d'heures d'irrigation et d'augmenter sa production de légumes.



Photographie 5.7 - Stockage d'eau dans des réservoirs en ciment. Cliché : T. NASSER-CEDETE, 2017.

5.5.4 Soutien externe pour aider les agriculteurs à l'adaptation

Aucune statistique n'a été observée sur la dépendance des agriculteurs de l'aide extérieure pour leur adaptation aux effets néfastes des sécheresses. Notre échantillon d'enquêtes a montré que certains agriculteurs reçoivent une forme de soutien. La majeure partie de ce soutien est fournie sous forme d'une distribution de certains types de semences céréalières ainsi que quelques intrants agricoles subventionnés. Cependant, ce soutien reçu varie selon le type d'agriculture. En effet, nous avons remarqué que la majorité de subvention concerne majoritairement les produits céréaliers et la culture de tabac. Pour les agriculteurs qui ont reçu une forme de soutien, l'aide est généralement considérée comme bénéfique. Ce type de soutien a permis aux certains agriculteurs d'augmenter le rendement agricole dans certain cas.

Avantages du soutien	réponse	%
Le soutien accordé à l'adaptation externe de répondant est-il bénéfique?	oui	39
	Non	61
Avantage de l'aide à l'adaptation	Rendement amélioré	8
	Diminution de la perte après récolte	11
	Emprunt agricole subventionné	20

Tableau 5.12 - Perceptions des agriculteurs quant aux avantages du soutien externe à l'adaptation aux épisodes secs.

Les agriculteurs reçoivent aussi des informations météorologiques ainsi que des informations techniques. Les conditions météorologiques (précipitations, température et vent) sont fournies via des agents ou des instituts de vulgarisation dans la région. A titre d'exemple, l'institut LARI (Lebanese Agricultural Research Institute), qui est une organisation gouvernementale sous la tutelle du ministre de l'agriculture. L'institut mène des recherches scientifiques appliquées et fondamentales pour le développement et l'avancement du secteur agricole au Liban et en particulier en plaine de la Beqaa. Il a mis aussi à disposition des agriculteurs l'application « LARI-LEB » pour la diffusion d'informations sur les différents paramètres climatiques. Cependant, notre observation sur le terrain a montré qu'une grande partie d'agriculteurs n'utilisent pas régulièrement cette application.

Sources d'information climatique des agriculteurs	réponse	%
Information régulière des agents et des instituts de vulgarisation sur les précipitations et les températures attendues	oui	43,5
	Non	56,5
Autres sources d'informations en dehors des agents ou des instituts de vulgarisation	Radio	5
	Télévision	19,5
	voisinage (agriculteur)	32

Tableau 5.13 - Différentes sources d'informations climatiques utilisées par les agriculteurs.

Le tableau indique les résultats sur les différentes sources d'informations climatiques sollicités par les agriculteurs. Plus de la moitié des agriculteurs suivent les conditions climatiques par les voisins, la télévision et la radio. Moins de la moitié des agriculteurs reçoit des informations climatiques par les services de vulgarisation.

5.5.5 Les interventions d'adaptation les plus nécessaires identifiées par les agriculteurs

Les agriculteurs ont identifié leurs besoins les plus urgents en matière d'adaptation aux épisodes secs en tant que développement de l'irrigation, suivi de l'accès au crédit subventionné du gouvernement et aux services de santé (assurance maladie) (tableau 5.14).

Perception de l'intervention la plus nécessaire	%
Développement de l'irrigation	53,7
Facilité de crédit agricole	16,9
Electricité	11,4
Assurance maladie	6,1
Eau potable	5,7
Graines de cultures améliorées	3,3
Mécanisation agricole	2,9

Tableau 5.14 - Les services / investissements / développements les plus nécessaires aux agriculteurs pour l'adaptation

On constate que les agriculteurs n'ont pas mis en priorité leur besoin en assurance sur les récoltes. Ainsi, tous les agriculteurs interviewés n'ont jamais pensé à assurer leurs récoltes. Les raisons pour lesquelles les agriculteurs n'ont pas cherché ou adapté une mesure

d'assurance pour leur activité sont : le coût élevé, le manque d'information et la difficulté d'application dans la région.

Chapitre 6 : Vers une gestion adaptée de la ressource hydrique par le croisement entre données physiques et sociales

La sécheresse est un phénomène complexe, perçu différemment et avec une intensité variable selon les lieux, les agriculteurs en présence, les pratiques et les phénomènes physiques. Nous proposons dans ce chapitre de confronter nos résultats physiques au vécu des agriculteurs et de relier les différents éléments identifiés, afin de mieux comprendre les facteurs d'évolution des sécheresses. Nous prendrons donc en compte :

L'aspect physique qui comprend :

- Les facteurs climatiques comme les précipitations et leur évolution ainsi que son influence sur la vulnérabilité du système agricole.
- L'indicateur satellitaire et sa place pour identifier la sécheresse perçue par les agriculteurs.

L'aspect social qui comprend :

- L'appréhension de l'évolution de l'intensité de la sécheresse du point de vue des agriculteurs.
- Les pratiques agricoles et leur impact sur la baisse de la réserve hydrique et sur l'intensité de la sécheresse.

Dans un contexte d'évolution rapide des épisodes de sécheresses, ce chapitre servira aussi à alimenter les études prospectives d'aide à la décision et l'atténuation de la vulnérabilité, à une échelle locale ou régionale, en proposant des stratégies d'adaptation, utilisées dans d'autres régions ayant des caractéristiques similaires à la région d'étude, et qui pourraient être appliquées en plaine de la Beqaa.

6.1 La sécheresse, entre perception des agriculteurs et données satellitaires

« De quelle sécheresse vous parlez ? C'est toujours sec dans la région mais ça reste gérable grâce aux puits agricoles qui complètent mes besoins en eau. Sauf pendant les périodes difficiles quand les puits sont asséchés, ça devient catastrophiques. » (E7)

La plaine de la Beqaa est traditionnellement une zone sèche et les périodes de sécheresse ne sont pas un phénomène nouveau pour eux. Chaque année il fait sec pendant six ou sept mois, à partir de la fin de la saison des pluies en mars jusqu'au début de la saison des pluies de l'année suivante en novembre. La période la plus importante en ce qui concerne les précipitations (pluie et neige) est entre novembre et février. C'est durant cette période que les nappes phréatiques se rechargent pour être utilisées en irrigation pendant la saison sèche. Le changement de précipitations pendant cette période peut avoir un impact négatif important sur l'activité agricole dans la plaine de la Beqaa.

Suite aux entretiens sur le terrain, les agriculteurs de la région ont ressenti deux types de sécheresses. Ils les différencient sous les termes « sécheresse habituelle » et « sécheresse non habituelle ».

« Je considère que la sécheresse dans notre région est habituelle. Il faut juste que la température ne soit pas trop élevée sur une longue durée pour ne pas endommager le rendement. » (E2)

La sécheresse dite « habituelle », est de façon générale, considérée normale pour les cultures en place selon les agriculteurs interviewés. Elle est considérée comme non dangereuse car les agriculteurs ont l'habitude de réagir à ce type de sécheresses. Ils ont mis en place des stratégies d'adaptation permanentes lors de ces périodes : stockage d'eau pendant la période pluvieuse, apports complémentaires d'eau pour les cultures à forte consommation. Ce type de sécheresse pour les agriculteurs interviewés ne constitue pas un événement climatique remarquable.

« Oui, on fréquente de plus en plus des périodes sèches non habituelles pendant laquelle on souffre du manque d'eau sévère, ces périodes sont vraiment dures et les conséquences sont directs ». (E5)

Selon ces agriculteurs, la sécheresse « habituelle » correspond à une période exceptionnelle accompagnée par un déficit pluviométrique important et une température trop élevée. Ce type

de sécheresse a été perçu par le tiers des répondants (enquêtes, 2016). Les agriculteurs ont été amenés à augmenter les heures d'irrigation. Pour ceux qui ne sont pas équipés en matériel adéquat, c'était grâce à des systèmes débutants, tel que des tuyaux branchés à des bassins en plastiques tirés par un tracteur et parfois une bête, qu'ils ont fait face à la situation. Certains agriculteurs, plutôt plus âgés, étaient capables de citer les années des épisodes secs exceptionnels en remontant loin dans le temps. Ceux qui sont plus jeunes ont pu citer les épisodes secs exceptionnels des dix dernières années.

Ces deux types de sécheresse, *habituelle* et *inhabituelle*, identifiés par les agriculteurs pourraient faire le lien avec l'étude de Charre (1977) sur le seuil de sécheresse.

6.1.1 Sécheresse habituelle

La sécheresse dite « habituelle » peut correspondre à la sécheresse atmosphérique qui est caractérisée par un événement climatique non remarquable (Lambert, Lami, Senges, 1990). Ainsi, la sécheresse de faible intensité, ayant un VHI compris entre 0,2 et 0,4, identifiée par nos résultats de VHI coïncide avec la sécheresse habituelle perçue par les agriculteurs de la région. Ce type de sécheresse couvre la surface agricole d'une façon dominante pour la période étudiée (voir carte de VHI). Cette sécheresse est considérée comme non dangereuse pour les cultures en place, car les agriculteurs sont déjà préparés à être confronté à cette intensité (apports complémentaires d'eau pour les cultures gourmandes si l'intervalle entre deux périodes pluvieuses est important). Cette sécheresse est souvent prévisible, caractérisée par une période d'arrêt ou de reprise des pluies cyclique. C'est le cas de notre région d'étude qui se caractérise par une prévision saisonnière, caractérisée par une période pluvieuse d'octobre à mars. Cette prévision saisonnière du climat offrait des marges de manœuvre supplémentaires aux agriculteurs pour mettre en place des stratégies d'adaptation permanentes au risque de sécheresse (Meinke et Stone, 2005). Ainsi, dans les zones méditerranéennes semi-arides, la distribution des pluies au cours de la saison conditionne le succès des techniques de rationnement végétatif (Cooper et Gregory, 1987 ; Turner, 2004). En effet, le retour de pluie en automne décide de la date de l'implantation. Souvent la variabilité de pluviométrie peut empêcher d'accomplir un cycle de culture de printemps si le stock d'eau dans le sol est trop bas. Pour cette raison, les agriculteurs parlent plutôt d'irrigation d'appoint ou de complément pour compléter les ressources sol-pluie (Debaeke, 2003). Ces conditions sont celles rencontrées par les systèmes de culture en plaine de la Beqaa. Par exemple, les agriculteurs dans la région parlent de manque d'eau à la fin de la saison agricole où ils sont

obligés d'irriguer pour maintenir leur rendement cultural. Selon Turner (2004), c'est la sécheresse terminale qui indique un manque d'eau qui clôt le cycle cultural de la plante. Ainsi, ces conséquences sont variables selon la précocité et l'intensité de la sécheresse.

6.1.2 Sécheresse inhabituelle

La sécheresse dite « inhabituelle » est caractérisée par des événements climatiques remarquables, identifiée dans le temps. Elle entraîne une sécheresse pédologique et phréatique telle que définie par l'ESCO (Amigues *et al.*, 2006). Ce type de sécheresse peut correspondre à la sécheresse de forte intensité, ayant un VHI inférieur à 0,2. Ce type de sécheresse réduit les possibilités de récupération surtout pour les cultures à cycle court. Dans notre région d'étude, malgré une dominance d'une intensité faible, on constate que l'ampleur spatiale de la sécheresse sévère évolue avec le temps de 2001 à 2015. La sécheresse inhabituelle, qui est occasionnelle, se produit lors d'une sécheresse d'hiver ou de printemps accompagnée par des températures élevées à partir de juin. Cela pourrait aggraver la mise en place de la sécheresse pluviométrique et réduire la durée de cycles culturaux et les possibilités de récupération. C'est l'année 2015 qui répond à ce cas de figure où la sécheresse inhabituelle s'est fait sentir par la majorité des agriculteurs de la région. Ce type de sécheresse peut correspondre à la sécheresse exceptionnelle, caractérisée par un déficit pluviométrique important, qui est décrite par Voiron *et al.*, (1977). Ce type de sécheresse est fortement néfaste pour les cultures surtout quand elle s'accompagne de températures plus élevées que la normale. Au premier temps, cet événement climatique entraîne une sécheresse pédologique qui épuise la réserve Utile (RU) du sol en eau, directement disponible pour les plantes. La production végétale devient plus difficile, le système racinaire de la plante ne récupère plus l'humidité du sol sauf s'il est particulièrement profond pour profiter de réserves plus profondes. C'est à ce moment-là que l'agriculteur commence à irriguer afin de relancer la croissance végétative pour éviter des pertes ou de diminutions importantes de rendement. Ainsi, une succession de mois déficitaires en pluies peut se transformer en sécheresse phréatique qui épuise les eaux des nappes souterraines. C'est durant cette période que les conséquences directes vont se faire remarquer très rapidement : perte de rendement des grandes cultures, des fruits ou des légumes en plein champ. Cette situation de pénurie oblige l'agriculteur à mettre en place des techniques d'adaptation en cherchant des solutions pour faire face aux risques présents et futurs. Souvent, la modification la plus importante des pratiques agricoles a eu lieu à cause de ce type de sécheresse.

Suite aux résultats collectés sur le terrain, il ressort qu'il existe un lien entre la sécheresse identifiée par les agriculteurs et les données satellitaires. La figure 6.1 révèle la localisation de deux types de sécheresse en croisant les données recueillies sur le terrain et les images satellitaires de VHI.

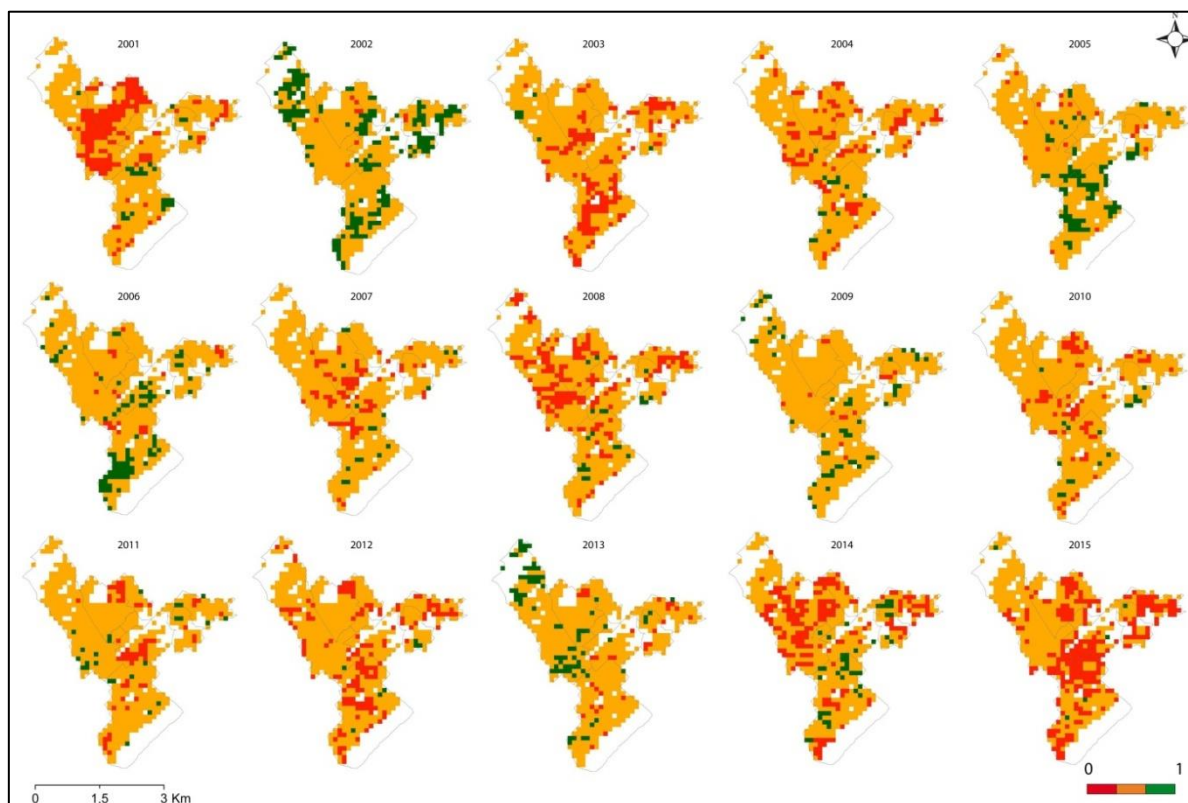


Fig. 6.1 - Localisation de deux types de sécheresse perçus par les agriculteurs par le croisement de données de VHI. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.

Nous avons calculé la couverture spatiale annuelle de deux types de sécheresse (figure 6.2). Ainsi, il paraît que cette surface agricole est majoritairement touchée par une sécheresse habituelle. Sa couverture spatiale atteint son maximum en 2009. En revanche, la sécheresse inhabituelle varie dans le temps et elle atteint son maximum en 2015 pour couvrir presque la moitié de la surface agricole.

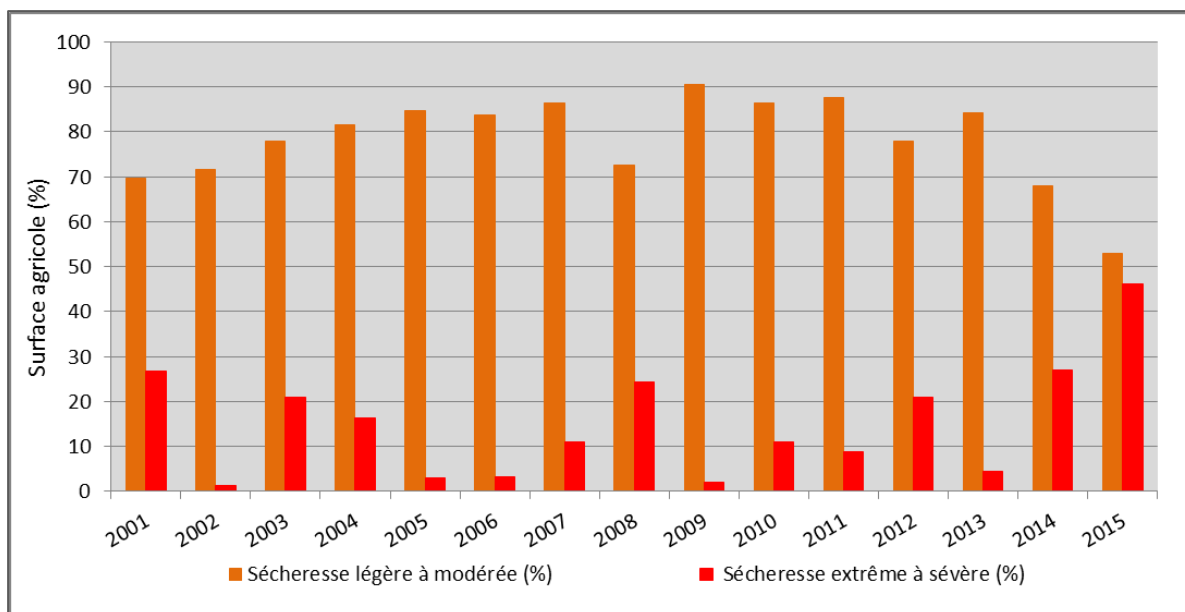


Fig. 6.2 - Evolution de l'intensité de sécheresse. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.

6.2 La sécheresse, analyse croisée entre apports pluviométriques et ressenti des agriculteurs

La relation qui unit l'agriculture et le climat nous semble essentielle pour étudier la sécheresse dans le contexte des agriculteurs. La sécheresse, en tant qu'aléa climatique, peut devenir un risque par la rupture de l'équilibre entre les besoins d'une société et les ressources potentielles apportées par un milieu donné (Charre, 1977). La sécheresse est un phénomène physique déterminé par un déficit pluviométrique et un déficit hydrique dans le sol. Selon l'étude de l'université de Columbia (2006), c'est à partir de 3 mois successifs de déficit pluviométrique en dessous de 50% de la moyenne que l'on peut s'attendre à des dommages économiques sur les cultures.

En plus d'une diminution significative, les deux dernières décennies montrent une irrégularité importante de pluies annuelles dans la région d'étude (fig. 6.3). Cette irrégularité perturbe la saison agricole parce qu'elle oblige l'agriculteur à suivre un régime d'irrigation non régulier pour faire face aux périodes sèches. Ces résultats se coïncident avec les agriculteurs qui ont perçu une variabilité de quantité de pluie ces dix dernières années.

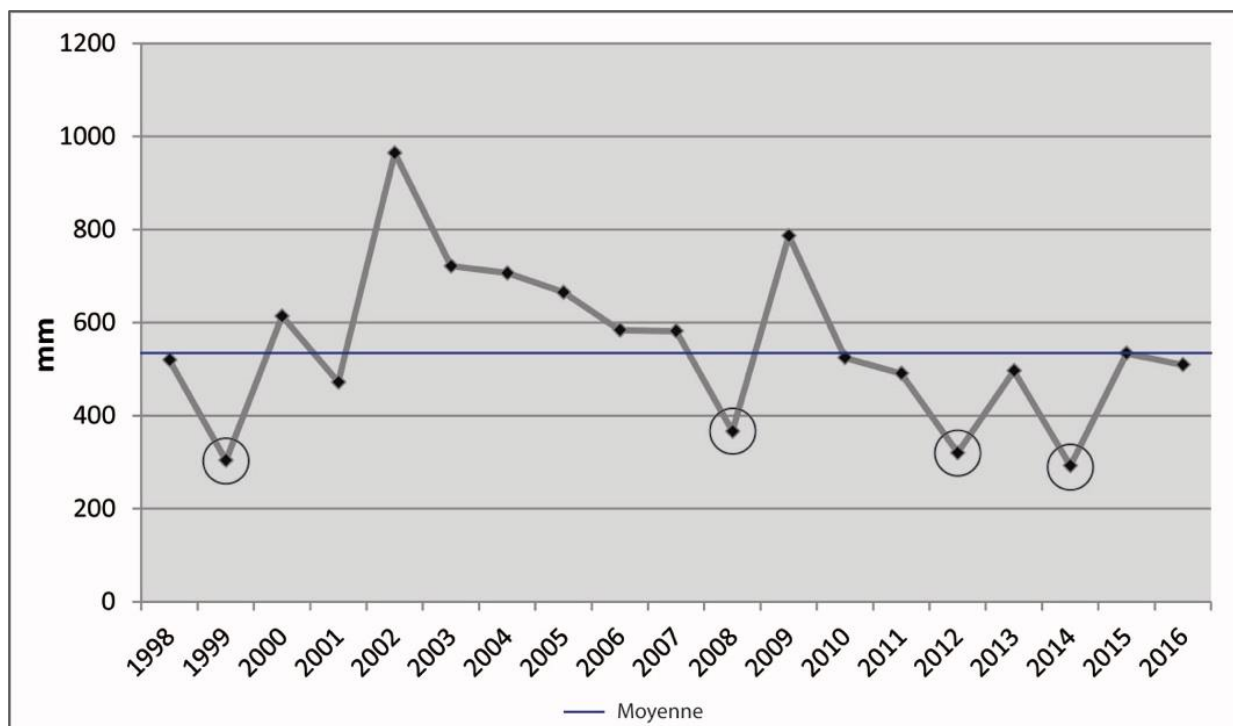


Fig. 6.3 - Pluviométrie annuelle pour les périodes (1998-2016). Source : Données issues de station de Rayak.
Réalisation du graphique : T.NASSER/CEDETE-2018.

Les données pluviométriques révèlent deux périodes relativement arrosées en 2002 et 2009 avec 964,1 mm et 786,3 mm respectivement. D'un autre côté, ces données montrent quatre périodes importantes de sécheresse pluviométrique :

- Une première période marquante en 1999 avec seulement 303,7 mm soit 55% de la moyenne.
- Une deuxième en 2008 avec un taux de précipitations de 366,1mm soit 66 % de la moyenne.
- Une troisième en 2012 avec seulement 319,8 mm soit 58 % de la moyenne annuelle.
- Une quatrième en 2014 où les précipitations n'atteignent que 292,2 mm soit 53 % de la moyenne.

Cependant, ces années déficitaires en pluviométrie n'ont pas été ressenties directement par les agriculteurs interrogés de la région. Cela peut s'expliquer par l'utilisation des eaux souterraines pendant les années déficitaires pour maintenir le cycle végétatif.

Dans la mémoire des agriculteurs interviewés, ce sont les années 2001 et 2015 qui ont été retenues pour des périodes sèches extrêmes sachant qu'elles sont relativement peu déficitaires par rapport à la normale. En effet, ces deux années sèches (2001 et 2015) sont perçues par les agriculteurs parce qu'elles ont fait suite à des années déficitaires.

Selon Rousset (1949), le déficit pluviométrique consécutif est inquiétant pour les nappes phréatiques et les sources d'un approvisionnement normal. En effet, pendant les périodes déficitaires qui ont précédé les années 2001 et 2015, les agriculteurs ont épuisé les eaux souterraines ce qui a créé un assèchement important des puits agricoles. Ainsi, la sécheresse de 2001 et 2015 (étant majeure) ont été très marquées car elles ont combiné un déficit pluviométrique et un épuisement des réserves hydrologiques des sols suite à une succession de mois déficitaires. Le cumul pluviométrique de ces deux années (2001 et 2015) qui apparaît moins déficitaire que les deux années qui les précèdent peut fausser l'analyse de l'intensité de la sécheresse qui ne paraît pas sévère d'après les données pluviométriques. C'est donc l'analyse d'un ensemble de données qui nous permet de comprendre la sécheresse des années 2001 et 2015 perçues par les agriculteurs.

Nous nous rapprochons de l'étude réalisée par Lambert pour distinguer deux types de sécheresse dans la région d'étude :

- La sécheresse atmosphérique où l'évapotranspiration serait effectuée à partir de la réserve utile des sols afin de pouvoir compenser l'assèchement de l'atmosphère. Cette sécheresse correspond aux périodes déficitaires en pluviométrie telles que les années 1999, 2008, 2012 et 2014.
- La sécheresse phréatique, survient lorsque les nappes phréatiques sont atteintes et que le niveau d'eau est abaissé de façon importante. A ce moment, les puits sont asséchés et la végétation souffre de manque d'eau. Cette situation s'est vue en 2001 et 2015 où les agriculteurs ont ressenti énormément la sécheresse.

6.2.1 Les années de sécheresse ressenties par les agriculteurs

Avec 454,6 mm de pluviométrie annuelle, l'année 2001 est peu déficitaire par rapport à la normale. Mais si nous regardons les données pluviométriques en détails de la période allant de 1999 à 2001 (figure 6.4), sur les 36 mois concernés, seuls 8 sont excédentaires, 7 mois sont autour de la moyenne et les autres sont répartis entre extrêmement déficitaires (10 mois qui n'atteignent pas 50% de la moyenne correspondant au mois) et déficitaires (11 mois au-dessous de la moyenne mensuelle). L'année 2001 est pénalisée par des mois hivernaux déficitaires (sauf janvier 2000 et février 2001, avec respectivement 183 % et 130 %). Le déficit durant la période hivernale atteint 76,1% de la pluviométrie moyenne entre janvier 1999 et décembre 2001. Nous remarquons aussi que les mois excédentaires ne sont pas consécutifs, ce qui impacte le niveau des nappes et rend l'irrigation plus difficile.

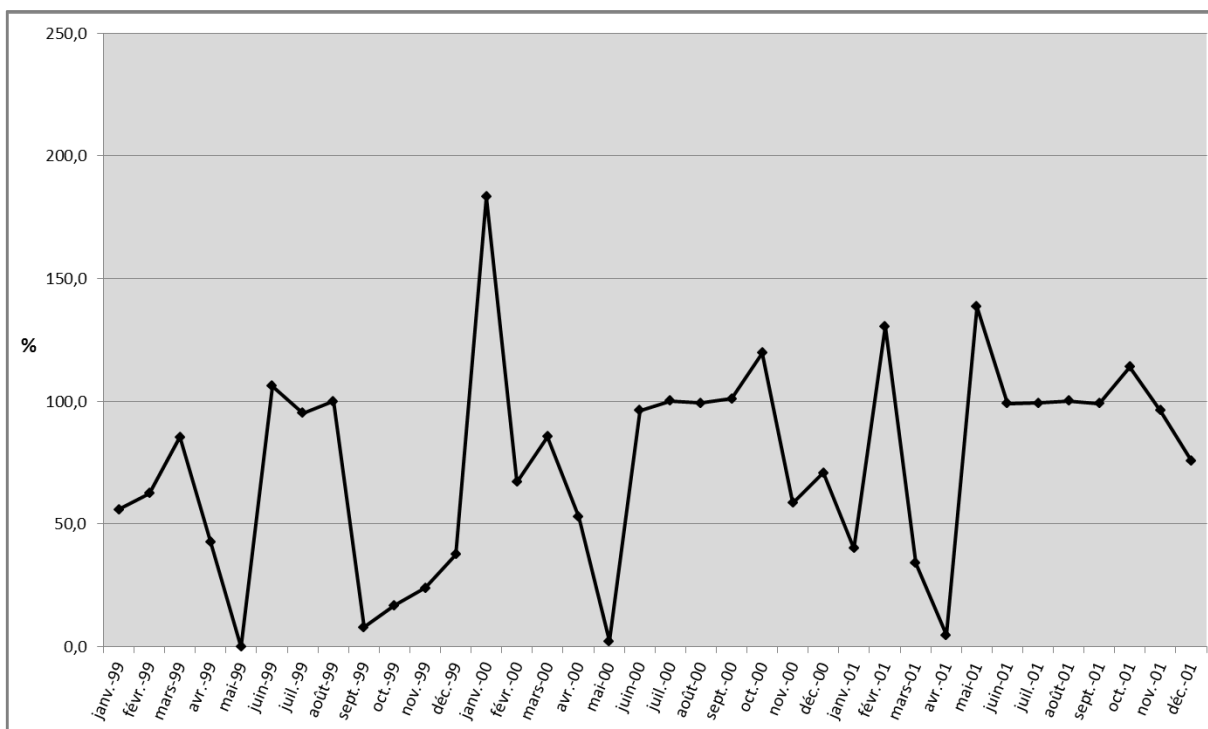


Fig. 6.4 - Variation des précipitations mensuelles (Excédent ou déficit) pour la période allant de janvier 1999 à décembre 2001. Source : Station météorologique de Rayak. Conception et réalisation : T. NASSER-CEDETE, 2018

L'année 2015 est la période durant laquelle les impacts de la sécheresse ont fortement touché l'activité agricole (selon les données de nos enquêtes). La pluviométrie annuelle est légèrement inférieure à la moyenne (89 % de la pluviométrie moyenne), sachant qu'elle a succédé à quatre années déficitaires (2011, 2012, 2013 et 2014) dont deux qui sont fortement déficitaires (2012 et 2014). Ainsi, sur les 36 mois de la période de 2013 à 2015, nous remarquons que la période allant de novembre 2013 jusqu'à octobre 2015 (24 mois) représentent des mois déficitaires en pluviométrie à l'exception du février 2015 (fig. 6.5). Cette période représente 9 mois extrêmement déficitaires avec une pluviométrie au-dessous de 50% de la normale. Ces mois représentent en majorité la période hivernale responsable de l'alimentation des nappes phréatiques. Cette longue succession de mois déficitaires en pluviométrie fait la force de cette sécheresse.

Ainsi, c'est la succession de périodes faiblement pluvieuses qui a accentué l'impact de ces années sèches comme celles de 2001 et de 2015 sur le rendement des cultures dans la région d'étude.

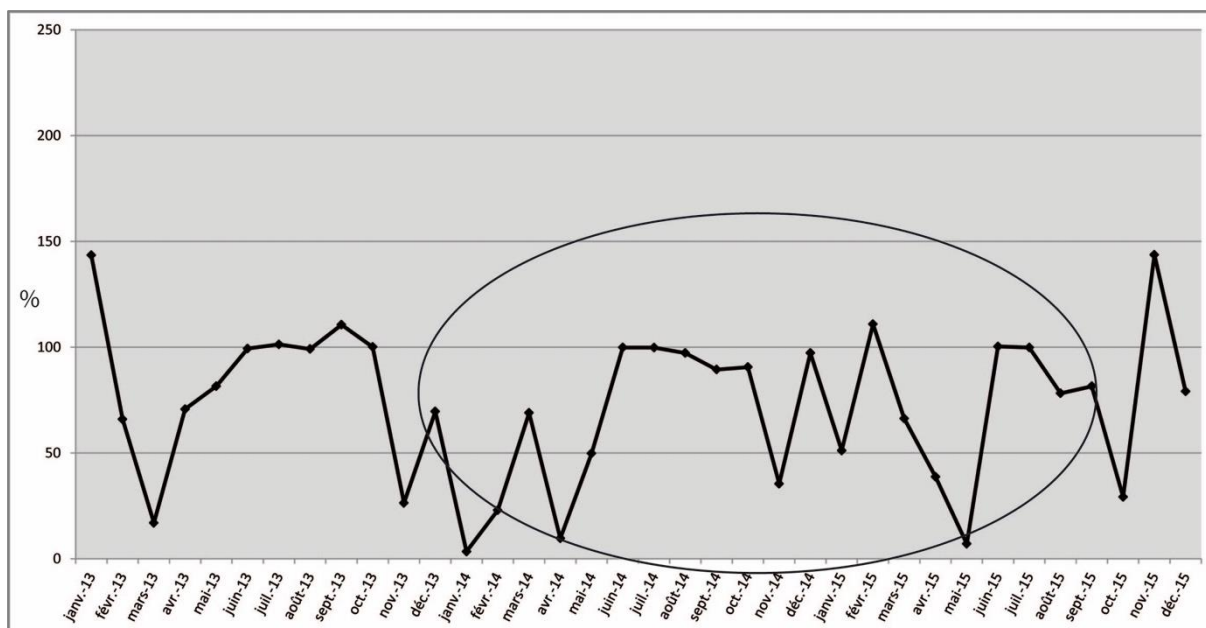


Fig. 6.5 - Variation des précipitations mensuelles (Excédent ou déficit) pour la période allant de janvier 2013 à décembre 2015. Source : Station météorologique de Rayak. Conception et réalisation : T. NASSER-CEDETE, 2018.

Par contre, les agriculteurs ont ressenti les impacts de la sécheresse de 2015 sur plusieurs saisons agricoles. En effet, la sécheresse commence à se faire sentir à partir de l'année 2014 et sa sévérité a atteint son pic en 2015 suite à une succession des périodes déficitaires qui a débuté en 2010.

Sur le plan physique, la période déficitaire qui a précédé à chaque fois une année sèche telle que 2011, 2012 et 2013, correspond à une période de sécheresse météorologique. Cependant, l'impact de ces années est resté très limité sur le rendement des cultures et les agriculteurs enquêtés ont faiblement ressenti le déficit pluviométrique. Cette faible réaction des agriculteurs est due à l'irrigation qui vient essentiellement rompre cette sécheresse météorologique, permettant un maintien et une poursuite de la campagne agricole. Par contre, si la pluviométrie hivernale reste inférieure à la moyenne, et se reproduit sur plusieurs mois, elle ne peut pas remplir son rôle d'alimenter les réserves. Or si ces réserves disponibles sont moins importantes, et que dans le même temps, les besoins sont accrus par un déficit hydrique, la quantité d'eau disponible pour faire face à une campagne agricole normale ne sera pas suffisante pour un rendement habituel.

Dans ce cas-là, une continuité d'irrigation va entraîner un épuisement des nappes souterraines qui va engendrer une sécheresse édaphique. C'est ce qui reste ancré dans la mémoire des agriculteurs : « *le sol devient dur et sec comme une pierre* » (E2). C'est le moment qui empêche la constitution de réserve Utile dans le sol. Cela se traduit sur la dynamique de la

végétation qui a été évaluée par nos calculs des valeurs de VHI dans la partie précédente. Cette période se caractérise par un flétrissement puis un jaunissement des feuilles, détectée par une valeur de VHI inférieure à 0,2, ainsi qu'un ralentissement du développement des fruits. Cette situation devient particulièrement stressante pour les agriculteurs, nécessite une charge de travail supplémentaire et une mise en place des pratiques conservatoires. D'après nos analyses et en nous basant sur l'approche satellitaire définie par VHI et sur l'approche sociale définie par nos enquêtes auprès des agriculteurs, nous pourrions localiser spatialement la sécheresse ressentie, dont la valeur de VHI est inférieure à 0,2.

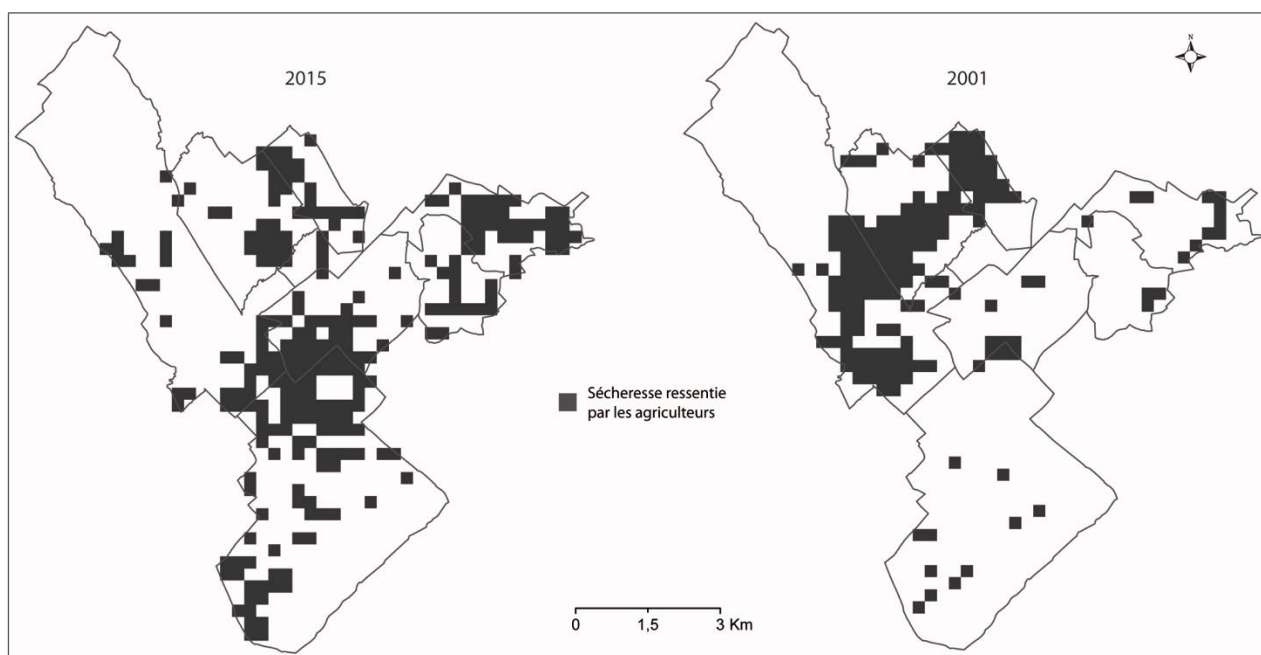


Fig. 6.6 - Localisation de la sécheresse ressentie par les agriculteurs de l'année 2015 et 2001 selon notre analyse.
Conception et réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018

Les années 2001 et 2015 ont été repérées suite à l'importance de la couverture spatiale de la sécheresse de forte intensité (fig. 6.6). La répartition de la sécheresse en 2015 est plus étalée dans la région, tandis que celle de 2001 est plus centralisée.

Chaque point présent dans la figure 6.7 représente à la fois une valeur de VHI, ainsi qu'une surface de la zone d'étude. Nous observons que les surfaces agricoles impactées par la sécheresse sont plus importantes en 2015 avec 249 points. Par contre, pour l'année 2001, le nombre des points est 171.

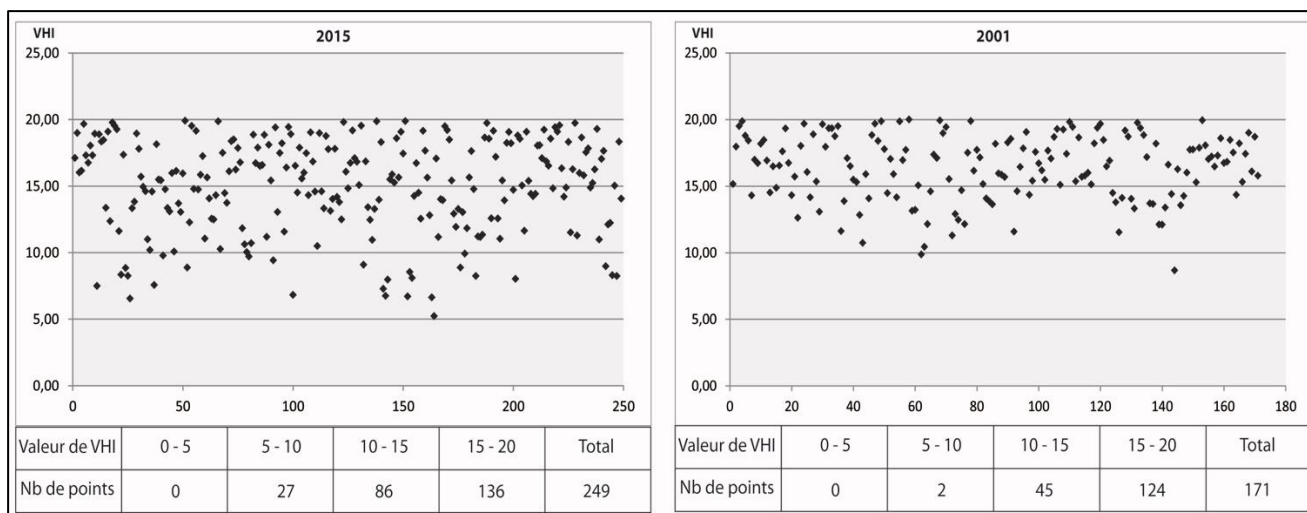


Fig. 6.7 - Répartition de valeur de VHI de la sécheresse ressentie en 2001.

Nous révélons aussi que l'intensité de la sécheresse en 2015 était remarquablement plus élevée qu'en 2001. En effet, les surfaces agricoles touchées par une sécheresse extrême (5-10) représentent 27 points sur le graphique de l'année 2015 soit 1687,5 m², alors que celui de 2001 montre seulement 2 points, soit 125 m².

6.3 Comparaison spatiale de la sécheresse

Plusieurs facteurs autres que le déficit hydrique peuvent influencer la valeur de VHI. Parmi ces facteurs, se trouve le type de végétation, le type de sol, l'intensité de la pluie et les pratiques culturales comme l'irrigation. Pour cette raison, nous avons choisi trois agriculteurs de la région, en découpant la même taille de parcelle afin d'effectuer une comparaison spatiale de l'intensité de la sécheresse (figure 6.8).

Ces trois agriculteurs pratiquent le même type de culture, la pomme de terre. Le VHI moyen de chaque zone sélectionnée a été calculé à partir des séries de données disponibles de la période 2001-2015.

Les agriculteurs A et B ont presque le même profil. Les deux ont un niveau d'étude moyen et ils appliquent la même pratique agricole dans leurs parcelles. Ils possèdent des puits agricoles sans compteur. Le système d'irrigation utilisé est l'aspersion.

La seule différence est dans le nombre d'heure en irrigation journalière pendant une saison agricole. Le premier arrose 8 à 10 heures par jour et le deuxième 4 à 6 heures par jour.

Le profil C diffère par plusieurs critères :

Il possède un niveau d'étude plus élevé que les deux agriculteurs précédents. En effet, il est un ingénieur agronome et a hérité son terrain de son grand père.

Il possède un puits agricole sur son terrain avec un compteur et un régulateur de pression. Il utilise un système d'irrigation par aspersion.

Il a construit un bassin souterrain pour récupérer les eaux de pluie.

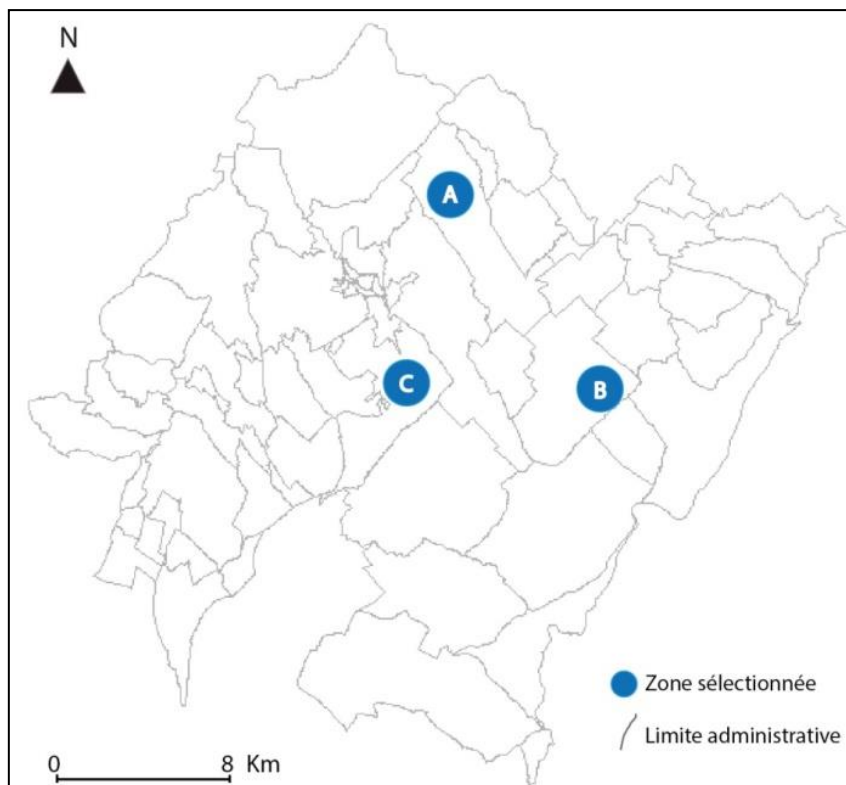


Fig. 6.8 - Localisation des parcelles agricoles sélectionnées

La figure 6.9 ne montre pas la même évolution de la valeur de VHI dans les trois parcelles agricoles :

Les parcelles A et B révèlent un VHI variable de l'année à l'autre. Il indique en majorité une sécheresse légère en intensité. Les années 2008 et 2015 montrent des périodes fortement impactées par la sécheresse avec une valeur de VHI qui est inférieure à 0,2. On constate aussi une tendance à la diminution de VHI à partir de 2010.

La parcelle A est plus endommagée que la zone B. En effet, l'utilisation de l'eau dans la parcelle A est beaucoup plus importante qu'en parcelle B. Cela a pu provoquer un assèchement de puits plus rapide et augmenter l'intensité de la sécheresse.

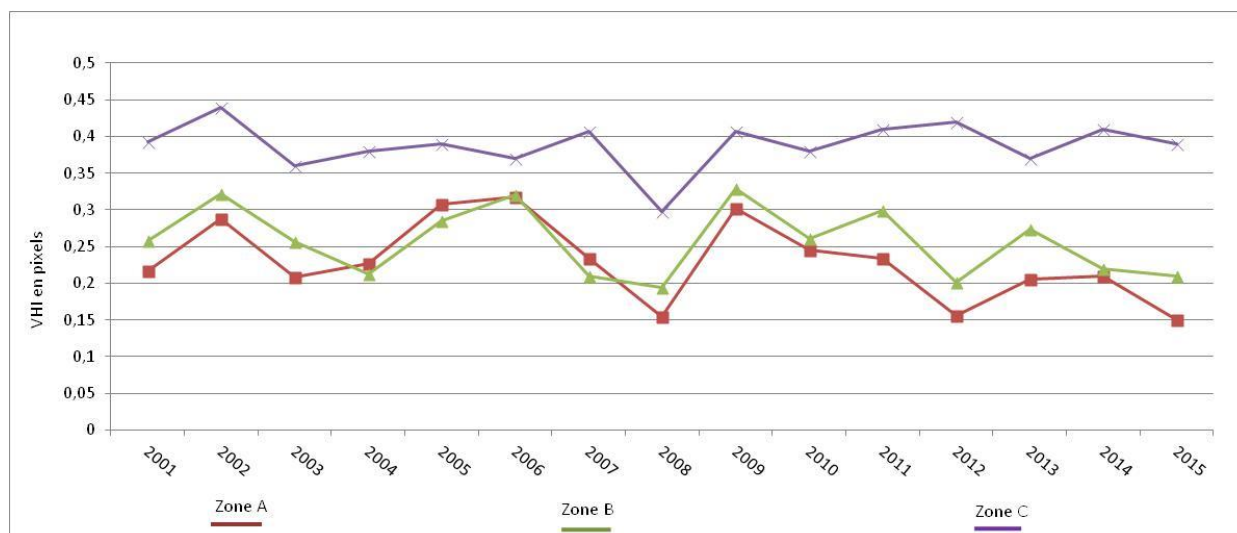


Fig. 6.9 - Evolution de VHI dans les zones sélectionnées

Par contre la parcelle du profil C, le VHI est peu variable et il montre plutôt une stabilité pendant la période d'étude. Cette parcelle est moins impactée par la sécheresse et cela peut être dû aux pratiques agricoles différentes de celles des deux autres parcelles. Ainsi, l'utilisation et la gestion optimale de l'eau a permis de lutter contre les périodes déficitaires. Sachant que les trois parcelles se situent dans les mêmes conditions climatiques, géographiques et topographiques, l'évolution de VHI ne suit pas toujours la même tendance. En 2008, la parcelle du profil C n'a pas été impactée par une sécheresse sévère comme dans les deux autres parcelles. L'intensité de la sécheresse a été atténuée par les pratiques agricoles adaptées. Pour cela l'agriculteur doit être prêt à plusieurs scénarios pour lutter aux aléas climatiques.

Ainsi, la fréquence d'occurrence de chaque type de sécheresse montre une différence entre les trois parcelles (tableau 6.1). On dénombre trois années de sécheresse sévère dans la parcelle A et une seule en parcelle B, tandis que la parcelle C n'a pas connu cette catégorie de sécheresse.

Fréquence par niveau de sécheresse	Zone A		Zone B		Zone C	
	Nb d'années	(%)	Nb d'années	(%)	Nb d'années	(%)
Extrême (VHI < 0,1)	0	0%	0	0%	0	0%
Sévère (0,1 < VHI < 0,2)	3	20%	1	6,7%	0	0%
Modérée (0,2 < VHI < 0,3)	9	60%	11	73,3%	1	6,7%
Légère (0,3 < VHI < 0,4)	3	20%	3	20%	9	60%
Pas de sécheresse (VHI > 0,4)	0	0%	0	0%	5	33,3%

Tableau 6.1 - Fréquence d'occurrence de sécheresse par niveau dans les zones sélectionnées de 2001 à 2015

On peut mettre aussi en évidence une prédominance d'épisodes secs modérés dans les parcelles A et B. En revanche, c'est la sécheresse légère qui se manifeste dans la parcelle du profil C.

Cette différence d'intensité entre les parcelles agricoles met en évidence d'autres facteurs qui influencent l'intensité de la sécheresse.

Ainsi, le comportement de la végétation de chaque parcelle est présenté dans la figure 6.10.

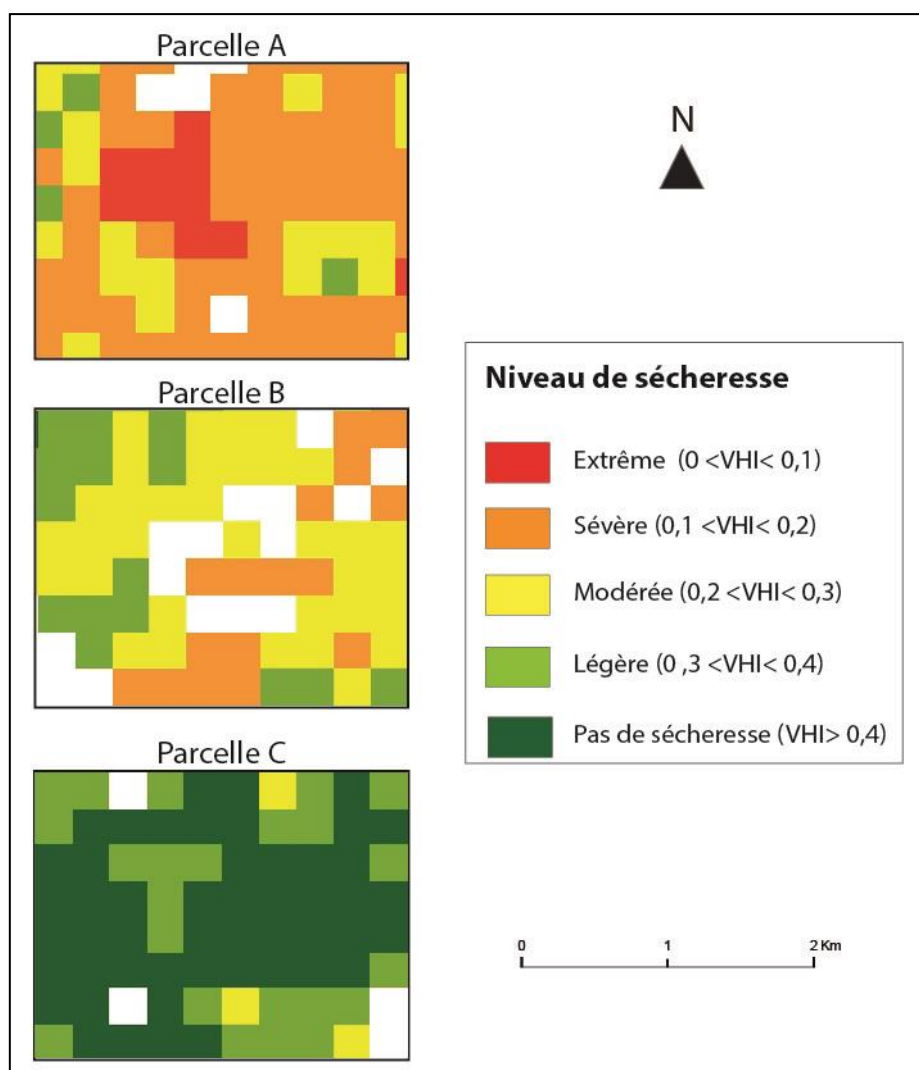


Fig. 6.10 - Variation moyenne du VHI de différentes valeurs observées sur la période 2001-2015 pour les parcelles sélectionnées dans la région de la Beqaa centrale.

Les espaces qui ne sont pas cultivés ne dépassent pas les 10% par rapport à la surface totale de chaque parcelle agricole. Le travail réalisé dans cette partie s'appuie principalement sur les images issues du capteur MODIS. Le tableau 6.2 illustre les secteurs retenus dans chaque parcelle agricole. La zone C représente la surface la plus importante 98,6%, la zone B 93,7% et la zone C 92,7%.

Secteur représentant les différentes valeurs du VHI	Zone A	Zone B	Zone C
Total de secteurs	80	69	75
Secteurs non retenus ayant des valeurs de VHI	5	5	1
Secteurs retenus	75	64	74
Secteurs retenus en %	93,7%	92,7%	98,6%

Tableau 6.2 - Secteurs retenus dans les trois zones sélectionnées.

On constate que l'impact sur l'agriculture diffère entre chaque parcelle.

La parcelle A montre une condition très défavorable où la valeur de VHI n'a pas dépassé le seuil de 0,4 sur le plan spatial. Par contre, plus que des deux tiers de sa surface agricole est touchée par une forte sécheresse.

Niveau de sécheresse	Surface agricole touchée (%)		
	Parcelle A	Parcelle B	Parcelle C
Sécheresse de forte intensité (VHI <0,2)	78,75 %	24,6 %	0 %
Sécheresse de faible intensité (0,2 < VHI < 0,4)	21,25 %	75,4 %	33,3 %
Pas de sécheresse (VHI > 0,4)	0 %	0 %	66,7 %

Tableau 6.3 - Surface agricole touchée par une sécheresse selon son degré d'intensité.

La surface agricole de la parcelle B est moins impactée et elle est majoritairement touchée par une sécheresse de faible intensité.

En revanche, le comportement de la végétation dans la parcelle C montre une sécheresse moins importante en termes d'intensité. La surface agricole montre des conditions optimales en majorité presque deux tiers de sa surface agricole ne sont pas touchées par une sécheresse.

La comparaison entre ces parcelles agricoles nous permet de connaître la place importante des pratiques agricoles dans la gestion de l'intensité de la sécheresse à l'échelle de l'exploitation.

C'est pourquoi il est important d'adapter les systèmes agricoles pour diminuer les effets néfastes de la sécheresse sur la saison agricole. Il faut mettre en place des stratégies d'adaptation convenable à la région d'étude pour faire face aux risques présents et futurs.

6.4 Le besoin d'une stratégie d'aménagement et d'adaptation en plaine de Beqaa

Dans les régions arides et semi-arides où le manque de ressources hydriques est toujours problématique, les systèmes agricoles se sont adaptés depuis longtemps (Turner, 2004). Cependant, dans la région d'étude, la sécheresse exceptionnelle, manifestée au cours de la dernière décennie, est devenue un événement accepté comme un risque. Ainsi, les cycles de sécheresse cumulés avec une absence de recharge hivernale nécessitent une gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation.

L'analyse des sécheresses récentes par nos enquêtes montre que les agriculteurs dans la région ont commencé à mettre en place des solutions immédiates pour faire face aux risques présents et futurs. L'évolution des contraintes aux agriculteurs est dépendante de l'ampleur de ces épisodes (niveau des déficits pluviométriques et sa durée). Les agriculteurs se sont ajustés avant tout par une rotation des cultures en augmentant les espèces d'hiver ou d'été à faible consommation d'eau d'irrigation.

Cependant, pour la saison agricole 2014-2015, la sécheresse brutale, après un hiver sec, n'a pas permis aux agriculteurs d'utiliser la technique de rotation.

En 2015, l'augmentation légère de la pluviométrie (par rapport à l'année 2014) a permis d'anticiper sur le choix de rotation uniquement pendant l'hiver. Toutefois, la saison agricole (mars jusqu'au mai) a été fortement impactée par la sécheresse suite à une succession de sécheresse cumulée des années précédentes qui a empêché le remplissage hivernal des nappes souterraines.

Certains agriculteurs interviewés (producteurs des légumes de plein champ et pomme de terre) ont fait le choix d'investir dans du matériel d'irrigation (pompes électriques, asperseurs, goutte-à-goutte), construction des bassins souterrains ou d'installer des bassins en plastiques. Le but de ces agriculteurs était de réaliser leur propre réserve en eau pour pouvoir persister face aux épisodes secs exceptionnels. Ainsi, ce type d'agriculteur sont persuadés que la fréquence de tels épisodes va augmenter avec le temps. Pour cette raison, la sécurisation des récoltes devient une nécessité chez ces agriculteurs qui ont l'activité agricole comme revenu principal.

D'autres agriculteurs ont adopté des variétés de culture plus performantes, et surtout plus productives comme la mise en place de vergers ayant un cycle de production plus court. Néanmoins, même s'ils disent avoir adopté cette stratégie à cause du manque d'eau, nous avons remarqué que cette stratégie est plutôt économique parce qu'elle répond plutôt aux demandes des consommateurs.

Ceux qui n'ont pas les moyens financiers n'ont pas pu investir dans du matériel d'irrigation pour économiser et stocker de l'eau. Ainsi, leur activité est devenue limitée avec un risque élevé lorsque la sécheresse se produit.

Plusieurs travaux scientifiques, sur les stratégies d'adaptation à la contrainte des ressources en eau, ont été menés dans des régions semi-arides où le déficit hydrique est structurel (Connor et Loomis, 1991 ; Debaeke et Aboudrare, 2004 ; Passioura, 2006).

Dans notre cas, nous avons sélectionné les problèmes majeurs identifiés par les agriculteurs, cités dans le chapitre précédent. Ensuite, nous avons cherché des solutions et des mesures qui ont été appliquées dans d'autres régions, et peuvent être adaptées à notre zone d'étude en présence du déficit hydrique. Ces solutions proposées peuvent être considérées comme des outils de gestion agricole potentiels. L'objectif principal est d'économiser l'utilisation de l'eau par un développement d'une irrigation efficace. L'adaptation de la culture de pomme de terre a été aussi abordée. Cette culture a été sélectionnée vu sa grande importance et dominance dans notre région d'étude.

6.4 Gestion et planification de l'irrigation

La surface agricole irriguée dans notre région d'étude représente près de 70 % de la SAU. Cette surface est relativement stable depuis dix ans sachant qu'il y a eu une dimension plus importante des choix d'équipements en irrigation. Pour cela, les charges d'irrigation sont devenues plus élevées pour représenter 20 à 25 % du coût de production (entretien et main d'œuvre compris). En plus du coût élevé, les équipements d'irrigation installés dans les exploitations agricoles sont rarement calculés pour couvrir les besoins en eau des cultures dans les périodes extrêmement sèches.

La pomme de terre est la principale culture irriguée dans la région. Le taux global d'irrigation de la pomme de terre est fortement élevé (entre 6 et 8 heures en moyenne par jour). Pour cela, les irrigants doivent maîtriser une utilisation optimale des moyens d'arrosage pour éviter un assèchement possible des puits agricoles.

Les systèmes d'irrigation sont aménagés pour engager l'agriculteur pour plusieurs années, souvent 10 saisons agricoles dans les meilleurs cas. Nous présentons dans le tableau ci-dessous une méthode de gestion d'irrigation qui couvre la durée de vie du système d'irrigation.

Toute la durée du système d'irrigation (10 ans)	Annuelle	Hebdomadaire
-Prévoir une ressource d'eau -Planifier une main d'œuvre et matériel pour l'irrigation - Ajuster les types de cultures irriguées	-Adapter le choix d'irrigation aux contraintes économiques et hydriques -Ajuster le calendrier prévisionnel d'arrosage et le plan d'utilisation du matériel	-Pilotage de l'irrigation en cours d'une saison agricole en fonction des évènements présents -Management et contrôle du matériel d'irrigation
Les agriculteurs prennent en compte le climat des années précédentes		Les agriculteurs prennent en compte le climat actuel observé

Tableau 6.4 - Gestion de l'irrigation menée pour plusieurs années. Réalisation : T. NASSER-CEDETE, 2018.

6.4.1 Gestion prévisionnelle pour plusieurs années

L'agriculteur prévoit un accès à une ressource d'eau, souvent un forage d'un puit agricole, pour maintenir une irrigation régulière pendant toute la durée du système d'irrigation. Cependant, un défaut dans le remplissage hivernal du puit agricole pendant une année sèche peut impacter fortement la gestion du système. Ainsi, l'agriculteur recherche une utilisation optimale de son système agricole d'après une planification de main d'œuvre et du matériel.

6.4.2 Gestion annuelle

L'agriculteur adapte ses choix en fonction des contraintes économiques de l'année (le coût de l'eau et des produits agricoles) et hydriques (état de la ressource en eau). La rotation de cultures doit tenir compte de ces contraintes : quelles espèces cultivées, quelle quantité d'eau et quel débit pour chaque culture irriguée. Le calendrier prévisionnel d'arrosage et d'utilisation du matériel d'irrigation sont ajustés chaque année surtout dans les champs de pomme de terre où l'utilisation des canons est fréquente.

6.4.3 Gestion hebdomadaire

Pendant la saison agricole, l'agriculteur conduit une irrigation adaptée aux évènements présents: état de la culture irriguée, ressource en eau et climat. Il contrôle aussi le fonctionnement du matériel d'irrigation afin de donner le temps nécessaire pour irriguer l'ensemble des parcelles.

6.4.4 Planification prévisionnelle de l'irrigation

Une planification prévisionnelle d'irrigation des cultures est très importante pour assurer une campagne agricole. L'irrigation des cultures est une technique complexe pour laquelle la gestion et les choix des agriculteurs sont importants en cours d'une saison agricole. Ce sont les irrigants qui décident du démarrage et de la fin de l'irrigation (stade de développement de la culture, état du sol et de la végétation, quantité de pluies). Si la ressource en eau d'irrigation n'est pas assurée, l'agriculteur s'adapte en choisissant des cultures moins exigeantes en eau, ou en modifiant les stratégies d'irrigation par culture (date de démarrage, fréquence de retour). Les stratégies d'irrigation peuvent s'appliquer d'une façon collective pour éviter les conflits sur l'eau entre les agriculteurs. La décision collective permet d'organiser la gestion de pompage d'eau d'irrigation afin d'éviter un tarissement des puits de distance proche.

Le rôle des organisations du conseil en irrigation est très important dans les régions ayant des faibles ressources en eau. Cependant, le rôle de ces organisations reste très limité dans la plaine de la Beqaa en raison de l'absence d'une politique publique performante et réglementaire, comme déjà expliqué dans la partie précédente de la thèse. Notre travail de terrain a montré que les actions de conseil d'irrigation sont portées essentiellement par les entreprises agricoles du secteur privé. Ces entreprises qui partagent des consignes avec les agriculteurs, sur l'utilisation des systèmes d'irrigation, sont plutôt commerciales. Ainsi, l'institut LARI a mis à disposition des agriculteurs une application qui fournit des données climatiques journalières de la région. Cela permet aux agriculteurs de planifier leurs pratiques agricoles pour les mois à venir.

Le rôle d'une organisation de conseil sur le pilotage de l'irrigation au cours d'une campagne agricole semble être important pour les agriculteurs de la région. En effet, un avertissement d'irrigation pourrait être efficace pour la conduite des irrigations des cultures. Ce système existe dans la quasi-totalité des départements en France où l'irrigation est significative. Prenons l'exemple de la Charente-Maritime où les avertissements d'irrigations sont envoyés chaque semaine à plus de 1000 irrigants (Deumier et al., 2005). Ce système s'appuie sur le suivi de parcelles de référence situées chez les irrigants et sur les relevés météorologiques des stations représentatives de la région. Cet avertissement est envoyé sous forme de messages qui comprend 4 rubriques (Debaeke et al., 2006) :

- Un rappel sur la consommation en eau des cultures la semaine précédant l'envoi.

- Une rubrique « ce qu'il faut faire » indiquant la marche à suivre pour la semaine en cours.
- Une rubrique « actualité sur l'eau » qui rend compte des événements relatifs à l'état et à l'évolution de la ressource en eau.
- Une rubrique « données climatiques brutes » avec le détail des ETP et pluies pour chaque parcelle de référence et chaque station météorologique.

Une généralisation de l'avertissement d'irrigation peut conforter les décisions des irrigants et conduire à une bonne stratégie d'adaptation à chaque exploitation (Debaeke *et al.*, 2003).

6.5 Modèle d'élaboration du rendement des cultures

En condition de manque d'eau, Passioura a créé un modèle d'élaboration du rendement composé de trois termes indépendants : la transpiration (T), l'efficacité de transpiration (TE) et l'indice de récolte (IR). Il a également décomposé le terme de la transpiration de la façon suivante : $T = (T+ES) / (1+ES/T)$, où ES est l'évaporation du sol.

Il a montré que l'amélioration du rendement s'obtient en diminuant la contribution de ES (ES/T) et en augmentant la quantité totale d'eau disponible pour la culture des autres termes (T+ES), (TE) et (IR). En effet, la diminution du rapport ES/T peut se produire par le Mulching ou par le choix d'une variété caractérisée par une couverture rapide du sol. Par contre, l'augmentation de la quantité d'eau initiale et son extraction par la culture (T+ES) peut se faire en deux étapes. La première consiste à choisir un endroit à forte disponibilité initiale (profondeur du sol, stock hydrique laissé par la culture précédente). La deuxième étape est l'amélioration de cette disponibilité (irrigation, désherbage, gestion des résidus, extraction profonde après sous-solage).

En plus, la diminution de la demande d'eau en période végétative est une des stratégies d'adaptation à la sécheresse afin de conserver la ressource (Debaeke et Aboudrare, 2004). Ceci peut s'obtenir par une réduction de la densité de peuplement ou défoliation partielle afin d'optimiser la contribution de la transpiration post-floraison à la transpiration totale pour augmenter l'indice de récolte.

6.6 Stratégies d'adaptation préconisées pour les systèmes agricoles peu irrigués

Plusieurs stratégies d'adaptation à la contrainte hydrique ont été adoptées dans la littérature scientifique, qu'il s'agisse d'un système agricole non ou peu irrigués (Debaeke et

Aboudrare, 2004 ; Passioura, 2006). Les surfaces agricoles peu ou non irriguées dans notre région d'étude représentent environ 30% de la superficie agricole utilisée. Les solutions proposées ci-dessous ont été appliquées dans des régions semi-arides comme la plaine de la Beqaa où le déficit hydrique est fréquent.

6.6.1 Modifier la date d'un cycle cultural pour s'adapter aux ressources hydriques disponibles

Ajustement de semis à la disponibilité des eaux souterraines

Les cultures dans notre région sont souvent semées au printemps (avril- mai) durant laquelle l'évaporation est modérée. Cependant, les phases de croissance végétative tombent dans les périodes où le risque de déficit hydrique est plus fort (fin mai - juin). Pour cela, les agriculteurs parlent de difficultés d'irrigation en raison d'épuisement des puits agricoles. L'irrigation en fin de saison agricole rencontre parfois des problèmes surtout dans les années où la recharge hivernale de la réserve du sol est faible. Pour s'affranchir l'assèchement des puits, un ajustement du cycle cultural à la ressource en eau disponible peut être effectué. Il s'agit de semer les cultures en automne ou en hiver au lieu du printemps. Ce changement de période de semis permet de supprimer l'irrigation d'appoint en fin de saison agricole pour des cultures comme le blé, orge et le pois. Ainsi, cette méthode a été appliquée en Espagne du Sud et au Maroc (Gimeno *et al.*, (1989) et Boujghagh (1990). Cette méthode a besoin de sélectionner des espèces tolérantes au froid et des travaux de désherbage et de fertilisation en azote.

Ajustement de semis en fonction du climat

En climat méditerranéen, le semis précoce avec le commencement des pluies (mi- automne au Liban) augmente le rendement potentiel en raison du stock d'eau important disponible dans les nappes souterraines (Turner, 2004b). Le risque principal de cette méthode provient des maladies et du gel tardif (souvent dans la nuit en Beqaa) qui peut affecter la montaison¹⁴ des céréales. En revanche, cette méthode a montré une réussite pour les légumineuses caractérisées par une durée de floraison indéterminée. En effet, ces variétés pourraient tolérer des températures basses survenant de manière intermittente (Turner *et al.*, 2001). Ainsi, cette méthode a été appliquée en Syrie pour la féverole où la production était supérieure à celle

¹⁴ Processus d'allongement rapide des entre-nœuds d'une plante constituant une tige dressée florifère permettant la production de semence.

cultivée avec de l'irrigation d'appoint ou de complément. Prenons un autre exemple, Israël, caractérisé par un climat proche de celui du Liban. Le sorgho avec des semis de mi-mars (versus mi-avril) a donné de meilleurs rendements avec une consommation d'eau réduite (Blum, 1972). En effet, la quantité d'eau consommée, en cas de semis précoce, est moins importante pendant les premières phases du cycle où l'indice foliaire est plus faible et le développement du système racinaire est plus lent. Cela permet un maintien prolongé de la surface foliaire.

Cependant, le choix de la date de semis n'est pas facile pour les agriculteurs qui ont conditionné leurs travaux à l'échelle de leur exploitation en fonction de la demande du marché.

Choisir des variétés précoces pour faire face à la sécheresse terminale (stress de fin de cycle cultural)

Ces variétés consomment moins d'eau en raison d'un cycle plus court et d'un indice foliaire réduit. Cependant, ces variétés sont moins productives en conditions favorables en comparaison par les variétés normales. Au contraire, la production est améliorée en conditions sèches. Des études ont montré l'intérêt d'utiliser des variétés précoces en conditions arides et semi-arides par exemple le blé et l'orge précoces (Debaeke, 2004 ; Wahbi et Sinclair, 2005).

Enfin, l'ajustement d'un cycle cultural dépend fortement de la variabilité climatique et de l'intensité de la contrainte climatique. Selon Debaeke (2004), il est plutôt conseillé de privilégier les variétés à floraison précoce en conditions méditerranéennes semi-arides. Par contre, en climat où la pluviométrie est mieux répartie, l'utilisation des variétés précoces conduit à une diminution de production probablement plus pénalisante que les impacts du stress hydrique.

6.6.2 Planter des espèces d'été intrinsèquement tolérantes à la sécheresse

La recherche de variétés tolérantes à la sécheresse est un des objectifs de sélection majeure à l'échelle mondiale (Debaeke *et al.*, 2004). Il s'agit de choisir des espèces qui sont capables à prélever l'eau en profondeur comme le sorgho et le tournesol. Ces deux cultures possèdent un système racinaire très efficace en profondeur et qui s'adapte à la ressource en eau disponible (Unger, 1990 ; Krieg et Lascano, 1990). Ainsi, elles sont utilisées en alternance avec le maïs (consommateur d'eau) en cas de pénurie d'eau. En effet, dans les régions à déficit hydrique, il

a été montré que le rendement de ces cultures était plus important que celui de maïs en l'absence d'irrigation (Rachidi et al., 1993 ; Sinclair et Muchow, 2001). Ainsi, l'amélioration génétique du sorgho a beaucoup évolué pour faire face au réchauffement climatique (Debaeke, 2005). En effet, cette culture a montré une bonne adaptation aux conditions thermiques et hydriques dans le sud de France caractérisé par un climat méditerranéen.

Cependant, la production de tournesol et de sorgho possèdent quelques défauts techniques et socio-économiques qu'il faut prendre en compte. Au niveau socio-économique, le prix du tournesol à la commercialisation est moins important en comparaison avec les autres cultures céréalières (Desbois et Legris , 2003). Dans la plaine de la Beqaa, nous avons remarqué une baisse importante des surfaces de tournesol malgré sa capacité à maintenir un rendement satisfaisant dans les situations de contrainte hydrique.

Au niveau technique, la production de tournesol est souvent affectée par un dessèchement précoce lié au Phoma¹⁵. Ainsi, la difficulté de désherbage, techniquement et physiquement, pour le sorgho décourage les agriculteurs à investir dedans.

6.6.3 Conservation de la réserve en eau du sol pour la culture

Le stockage de l'eau du sol, pour le semis de la culture, est une des problématiques qui concerne les zones méditerranéennes semi-arides, telle que la Beqaa, dépendantes essentiellement des pluies hivernales. Pour limiter l'évaporation de la quantité en eau initiale, il est recommandé de couvrir le sol avec mulch de résidus pour limiter l'évaporation, réduire le ruissellement pour faciliter l'infiltration et maintenir le sol sans végétation pour limiter les pertes d'eau par transpiration. Selon Scopel (1994), le semis direct avec paillis peut économiser de l'eau et protéger contre les effets climatiques. Cet ensemble des techniques qu'on l'appelle l'aridoculture est très appliquées dans le sud-ouest des Etats Unis ainsi qu'en Afrique (Cooper et Gregory, 1987 ; Unger et al., 1991 ; Gerik et Freebairn, 2004). Ces techniques consistent à optimiser l'utilisation des eaux de surface afin de rendre la culture possible. Dans les régions semi-arides, on parle de culture flexible lors d'un semis en fonction de la réserve en eau disponible dans le sol (Muchow et al., 1994).

Ces techniques de conservation pourraient alors être considérées en cas d'épisodes secs sévères.

¹⁵ Ces champignons du sol communs comprennent de nombreuses espèces phyto-pathogènes.

Cependant, les effets de ces techniques peuvent être variables selon l'année et selon le type de sol. Ainsi, maximiser la quantité d'eau initiale du sol n'est pas toujours la meilleure solution pour certaines cultures comme le tournesol (Aboudrare *et al.*, 2006).

6.6.4 Optimisation de la surface foliaire afin de réduire la demande en eau de la culture

La gestion du couvert foliaire est très important dans le sens d'une réduction de la transpiration pendant la période végétative afin d'utiliser l'eau non consommée dans la phase de remplissage (Passioura, 1977). Cela peut être un avantage dans le cas où l'eau est abondante dans la première partie du cycle végétatif et déficitaire dans le cycle de floraison. Dans ce cas-là, il devient important de sélectionner des variétés à faible conductance stomatique (indicateur du taux de transpiration foliaire) ou à indice foliaire modéré (Richards, 2006). Ainsi, la sélection des variétés qui se caractérisent par une couverture rapide de la surface foliaire permet de réduire l'évaporation du sol (Soltani et Galeshi, 2002).

La quantité d'eau consommée est influencée par la densité de peuplement des plantes. En effet, le rapport évaporation/transpiration tend à diminuer lorsqu'il s'agit d'une fermeture précoce de la surface foliaire (densités élevées, écartements réduits). Par contre, il est recommandé de réduire la densité des plantes lorsque l'eau disponible dans le sol est limitée afin d'augmenter la quantité d'eau par plante. La densité optimale de peuplement de triticales¹⁶ en Australie varie entre 80 à 190 plantes/m². En France et en particulier à Toulouse, la densité optimale est de 7 à 8 plantes/m² pour le tournesol irrigué (Debaeke et Nolot, 2000).

Le choix d'écartements des plantes dépend aussi de la pluviométrie (Connor et Loomis, 1991). En absence d'une pluviométrie significative, il est approprié de choisir des écartements larges car l'évaporation est faible. En revanche, si une pluviométrie significative est prévue au cours d'une saison agricole, il est préférable de choisir des écartements étroits. Cette technique est pratiquée dans les régions méditerranéennes en sud de la France.

En revanche, cette méthode a été critiquée en particulier pour la culture du blé à cause des rendements faibles (Turner *et al.*, 1994 ; Van den Boogard *et al.*, 1996).

De la même manière, l'application d'une fertilisation azotée favorise le rapport transpiration/évaporation, notamment en céréales (Anderson, 1985 ; Cooper et Gregory, 1987). En effet, l'utilisation d'azote peut renforcer le système racinaire en profondeur

¹⁶ Hybride artificiel entre le blé et le seigle

permettant une extraction d'eau plus facile (Gregory *et al.*, 1984 ; Brown *et al.*, 1987). Au contraire, l'utilisation excessive de l'azote peut épuiser la réserve en eau et influencer négativement le remplissage du grain (Cantero-Martinez *et al.*, 1995).

Dans les régions méditerranéennes, certaines cultures ne répondent pas à l'application d'azote si la pluviométrie est inférieure à 450 mm (Lopez-Bellido *et al.*, 1996). Dans la plaine de la Beqaa, la pluviométrie moyenne est proche de 550 mm, ce qui rend possible l'utilisation de l'azote. Cependant, il a été observé quelques années où la pluviométrie était inférieure à 450 mm sur la période étudiée (2001 à 2015). L'application d'azote doit donc prendre en compte la variabilité climatique et l'intensité des contraintes. Cela peut se confirmer à l'aide de bilans prévisionnels qui tiennent compte du facteur hydrique afin d'évaluer l'efficacité de l'azote (Westfall *et al.*, 1996 ; Nolot et Debaeke, 2001).

6.7 Adaptation de la pomme de terre à la pénurie d'eau: irrigation, gestion et renforcement de la tolérance à la sécheresse

La pomme de terre est un produit de base important en Beqaa notamment dans notre région d'étude. Les événements climatiques affectent principalement la production de pommes de terre dans les climats chauds et secs tel que la plaine de la Beqaa.

La culture de pomme de terre dépend d'un approvisionnement en eau pour garantir des rendements de haute qualité. Les facteurs du stress tels que la sécheresse ont des effets néfastes sur la croissance et le rendement. En plus, une étude de modélisation réalisée au centre international de la pomme de terre (IPC : International Potato Center) a indiqué que la plupart des pays producteurs de pomme de terre subissent des baisses du rendement considérables, en raison d'un déficit hydrique accompagné par des températures élevées (Hijmans, 2003). La même étude ajoute qu'une amélioration de l'adaptation au stress hydrique et thermique est nécessaire pour atténuer la perte de rendement.

La production de la pomme de terre peut être affectée de manière complexe pour plusieurs raisons, nous citons les plus connues :

- La pomme de terre est très sensible à la sécheresse de forte intensité, qui constitue un facteur essentiel du stress abiotique pour sa production (Burton, 1981 ; Levy et Veilleux, 2007). Pour cela, cette culture doit être irriguée d'une façon efficace pour maintenir un indice de récolte élevée (Vos et Haverkort, 2007).

- Dans les régions semi-arides et arides où l'irrigation est obligatoire, le flétrissement transitoire sous condition d'une haute température et une faible humidité d'air est un phénomène courant pour la plante de la pomme de terre. Ce stress transitoire pourrait entraîner une perte de rendement et de qualité des tubercules. Burton (1981) a estimé que la perte potentielle d'eau, pendant une journée chaude, à travers la transpiration stomatique chez la pomme de terre est d'environ 100.000 kg d'eau par hectare par jour. Ainsi, lorsqu'un manque d'eau se produit, le potentiel hydrique de la conductance stomatique diminue de 0.3 à 0.4 MPa¹⁷ au niveau des feuilles de la plante (Iwama *et al.*, 2006). Cette situation entraîne une diminution du processus de photosynthèse (Vos *et al.*, 1989b). Pour cela, un taux maximal de CO₂ est essentiel à la production optimale en pomme de terre (Fleisher *et al.*, 2008a). Il est donc important d'appliquer une restriction de transpiration, pour atténuer la sécheresse. L'optimisation de la transpiration a montré son efficacité en cas de sécheresse modérée, alors qu'elle ne peut pas être une option parfaite pour maintenir le système de production en cas de sécheresse sévère (Sinclair, 2011). Les pratiques d'irrigation optimisées tels que la programmation d'arrosage, les mesures répétées de l'évapotranspiration et la rétention de l'eau dans les sols, seraient appropriées pour éviter les effets des épisodes secs et diminuer le taux de transpiration (Pehrson *et al.*, 2010; Walworth et Carling 2002).

- Des conditions météorologiques non favorables peuvent entraîner une perte importante de rendement surtout lorsque la plante est en pleine croissance (Turner, 1982 ; Rockstrom, 2003, Blum, 2011). Cela exige une phénologie précise de la pomme de terre en fonction des conditions météorologiques. Ainsi, l'intégration des mécanismes d'adaptation de la pomme de terre à la sécheresse nécessite une compréhension approfondie de la réponse de la plante aux conditions de croissance défavorables. Le développement des cultivars précoces a été une stratégie d'évitement réussie pour les zones de courte saison. Cette approche permet aux plantes d'échapper aux conditions climatiques défavorables, rencontrées souvent dans la dernière partie de la saison de croissance (Tardieu, 2012).

Le seul inconvénient de cette approche est le cumul faible de photosynthèse (Tardieu, 2012). Pour réaliser cette approche, une synchronisation des stades de croissance et de développement de la culture avec la disponibilité des ressources hydriques (Blum, 2009).

Ci-dessous, nous abordons plusieurs solutions qui ont été appliquées pour des cultures de pomme de terre afin de défier la sécheresse :

¹⁷ Mégapascal : unité de pression valant un million de pascals (10⁶ Pa). 1 Mpa = 1 Newton/mm²

Par l'amélioration de l'efficacité du système racinaire

Le système racinaire de la pomme de terre est composé des racines fibreuses ramifiées, qui se forment en association avec des tubercules (Cutter, 1978 ; Kratzke *et al.*, 1985). La plupart des variétés sont caractérisées par un système racinaire peu profond (Iwama, 2008). Cela est dû à l'incapacité des racines à se développer dans un sol très dense à haute résistance supérieur à 1MPa (Miller *et al.*, 1987). Certaines pratiques agricoles peuvent augmenter cette incapacité. Par exemple, un labour plus profond pourrait être néfaste pour la croissance du système racinaire de la plante. Cela montre l'importance de créer un environnement de sol favorable au développement de la plante de la pomme de terre.

L'amélioration de l'efficacité du système racinaire peut être un moyen important pour retarder ou éviter les effets de la sécheresse. En effet, dans les conditions de faible résistance du sol (<1MPa), une pénétration des racines dans le sol à des profondeurs supérieures à 100 cm a été observée (Stalham et allen., 2001). Pour cette raison, il est important de sélectionner des variétés de plantes, ayant des capacités racinaires à pénétrer les sols à haute résistance et à extraire l'eau dans les zones exposées à la sécheresse (lahlou *et al.*, 2005 ; Tardieu, 2012).

Par l'ajustement osmotique

Plusieurs études ont montrés l'importance d'ajuster le processus d'osmose pour faire face au stress hydrique (Coleman, 1986; Levy, 1992 ; Jefferies, 1993; Heuer *et al.*, 1998). En effet, lorsque la sécheresse affecte la culture de pomme de terre, le premier effet morphologique observé est la réduction de la taille des feuilles (Jefferies, 1993; Jefferies et Mackerron 1993). Dans les climats semi-arides et arides, cette modification morphologique est plus fréquente en raison des conditions climatiques.

Ainsi, cette réduction au niveau foliaire entraîne une perte de densité stomatique, responsable du processus de l'osmose. Une perturbation de ce processus baisse le taux d'humidité dans les feuilles qui diminue, entraînant la résistance à la sécheresse.

L'ajustement osmotique peut aider à maintenir la turgescence des feuilles et favoriser une récupération plus rapide après un stress hydrique (Chaves et Oliveira, 2004 ; Blum, 2011).

Pour réaliser un ajustement efficace afin de maximiser le rendement en période sèche, une acquisition optimale de l'humidité du sol est nécessaire pour soutenir la transpiration stomatique.

Des études ont parlé de la discrimination des isotopes de carbone, fortement associée à l'augmentation de l'efficacité de la transpiration, qui pourrait être un attribut positif pour le

rendement des cultures de pomme de terre dans des conditions extrêmement sèches (Richards, 2006 ; Blum, 2011 ; Tardieu, 2012).

Par l'optimisation de l'irrigation pour s'adapter à la sécheresse

Compte tenu de la vulnérabilité de la culture de pomme de terre à la sécheresse et la diminution des ressources hydriques en Beqaa, les agriculteurs doivent penser à économiser de l'eau pour maintenir un rendement optimal.

Une utilisation de protocoles d'irrigation efficaces, en évitant le gaspillage et les fuites, est fortement recommandée dans notre région d'étude.

Par exemple, au Mexique, l'irrigation par des goutteurs de basse pression (0,14-0,21 kg/cm²) a permis de conserver 40% de l'eau par rapport à l'irrigation par submersion dans les champs de pomme de terre (Dowgert *et al.*, 2006).

Dans la région aride d'Arava en Israël, climat proche à celui de la Beqaa, où les principales sources d'eau pour l'irrigation sont des réservoirs souterrains, la pomme de terre est cultivée avec succès dans des sols sablonneux. Les goutteurs utilisés de 0,6l/h à la place de 3,5 l/h ont permis d'économiser 30% d'eau sans avoir eu une réduction en quantité et en qualité des tubercules (Levy, 2013).

Par l'utilisation de l'irrigation déficitaire (ID) ou séchage partiel de la zone racinaire

Cette technique permet à l'agriculteur d'augmenter les surfaces agricoles cultivées. En outre, l'agriculteur doit envisager une application réduite de nutriments, de pesticides tout en acceptant des rendements réduits pour améliorer la rentabilité.

Ainsi, pour faire réussir une irrigation déficitaire, une modélisation de la production végétale de pomme de terre doit être mise en œuvre, en se basant sur la quantification des différents intrants, des gains de productivité et les coûts d'exploitation (Campbell *et al.*, 1976; Haverkort et MacKerron 1995)

Les études et les essais de la technique de l'irrigation déficitaire n'ont pas eu les mêmes résultats sur le terrain.

Par exemple, dans l'Oregon aux Etats Unis, Shock et Feibert (2002) ont appliqués l'ID sur trois ans. Les résultats ont montré une réduction du rendement de pomme de terre.

En Espagne, Fabeiro *et al.*, (2001) ont également appliqué cette technique sur la pomme de terre. Ils ont constaté que le rendement des tubercules était corrélé avec la quantité d'eau

appliquée. L'effet le plus négatif sur le rendement est survenu lorsque la pénurie d'eau est imposée pendant les étapes de la croissance des tubercules.

Par contre, Darwish *et al.*, (2006) n'ont pas observé une baisse du rendement des tubercules chez la variété de pomme de terre « cv. *Santana* » au Liban. En effet, il a appliqué une ID en utilisant 80% de l'évapotranspiration mesurée.

Le séchage partiel de la zone racinaire est une forme modifiée de l'irrigation déficitaire. Elle consiste à arroser une partie de système racinaire de la plante et laisser sécher une autre partie pour économiser l'eau d'irrigation (Ahmadi *et al.*, 2010a, b; Sepaskhah et Ahmadi 2010).

Cette méthode a été appliquée dans un climat semi-aride dans le nord de la Chine. Les résultats ont montré qu'un séchage partiel des racines n'affecte pas le rendement des tubercules (Xie *et al.*, 2012).

Par contre, cette méthode a conduit à une baisse du rendement de 28% dans un climat tempéré à Arhus en Danemark (Ahmadi *et al.*, 2010a, b; Sepaskhah et Ahmadi 2010).

Nous pouvons constater qu'il n'existe pas de stratégie unique pour appliquer ces techniques d'irrigation et que les niveaux de tolérance à la sécheresse diffèrent d'une variété à une autre d'une part et les différents stades de développement de la plante d'autre part.

Par l'irrigation avec des sources d'eau alternatives

Aujourd'hui, le manque d'eau douce a stimulé la recherche d'autres ressources d'eau alternatives pour l'irrigation. Ainsi, ces ressources en eau, autres que l'eau douce, sont devenues une source principale pour l'irrigation dans de nombreuses régions du monde (Turrall *et al.*, 2011).

- Les eaux de drainage d'origine agricole : Environ 40% de l'eau utilisée pour l'agriculture, rejetée sous forme d'eau de drainage dans les nappes souterraines, peut être réutilisée pour l'irrigation (Rhoades *et al.*, 1989 ; Grattan, 2002). Cependant, l'eau de drainage agricole ne peut pas être utilisée avant qu'elle ne soit contrôlée et examinée. En effet, cette eau d'origine agricole peut contenir des pesticides ainsi qu'une salinité élevée. Une mauvaise application peut entraîner des effets néfastes sur la qualité du rendement agricole.

- Les eaux usées recyclées : Les eaux usées recyclées peuvent être utilisées pour irriguer certaines cultures telles que la pomme de terre. Par exemple, en Australie, l'eau recyclée est fréquemment utilisée dans le milieu agricole. Ainsi, le programme national pour l'irrigation

durable « Land & Water » en Australie, a publié un document sur l'utilisation d'eaux usées, tout en mentionnant les différentes sources qui sont sujettes à la collecte, au traitement et au recyclage. Ces eaux peuvent contenir des produits chimiques et industriels hautement toxiques. Pour cette raison, l'utilisation d'eau recyclée pour l'irrigation des cultures doit être contrôlée afin d'assurer la sécurité des agriculteurs et des consommateurs (Pescod, 1992). Cela nécessite des facilités économiques pour une adaptation plus large.

Par l'agriculture de Précision (AP)

Cette technique a été conçue pour augmenter l'efficacité et la rentabilité d'un système agricole dans un contexte d'une agriculture durable. Il s'agit d'une gestion spécifique d'une zone agricole en tenant compte de la variation des propriétés du sol et de l'exigence des espèces cultivées.

Cette technique permet de faciliter la gestion des champs agricoles. En effet, elle consiste à partager les champs agricoles en petites parcelles, et les différencier selon le type de sol, les variétés de culture et l'application des engrais. D'une part, elle permet de mieux contrôler la quantité d'eau irriguée au niveau de parcelle. D'autre part, elle permet d'observer et d'évaluer la relation entre le rendement de la pomme de terre et les autres facteurs. Cela consiste à développer une stratégie de gestion par parcelle pour les années à venir.

Van Bergeijk *et al.*, (2001) ont appliqué cette méthode sur des champs cultivés en pomme de terre afin de comprendre la relation du rendement avec la teneur en argile. Ainsi, la variation de la teneur en argile de la terre végétale a été corrélée avec la variation spatiale du rendement. Cela a permis une meilleure précision, au niveau de la parcelle, de l'irrigation par rapport à la teneur en argile. Cette étude a montré que le rendement de la pomme de terre pourrait augmenter de 20% en tenant compte de la relation entre la teneur en argile dans le sol et la quantité d'eau irriguée.

L'application d'une agriculture de précision nécessite la mise en œuvre des technologies informatiques telles que les systèmes d'information géographique (SIG) ainsi que des capteurs de sol et de culture (Pierce et Nowak, 1999). Cependant cette méthode est surtout pertinente pour les grandes exploitations, où la taille du champ justifie les coûts (Cassman 1999)

Enfin, on suggère que l'utilisation d'une agriculture de précision pourrait être une méthode de gestion très importante dans la Beqaa pour résoudre le problème d'irrigation et augmenter le

rendement. Ainsi, elle peut être appliquée sur des cultures autres que la pomme de terre notamment les céréales (Khosla *et al.*, 2008)

Conclusion et perspectives

Les objectifs de cette thèse étaient d'étudier la sécheresse agricole en plaine de la Beqaa, et ses évolutions de la période allant de 2001 à 2015, en termes de fréquence et d'intensité. En effet, l'intensité de la sécheresse pourrait augmenter avec les variations climatiques ; via une augmentation de la température et une diminution consécutive des précipitations. Le retentissement de la sécheresse est évalué sur le terrain auprès des agriculteurs, afin de mesurer au mieux les difficultés rencontrées pour pouvoir y faire face.

Notre démarche méthodologique est originale car elle est centrée sur une approche physico-sociale. Cette approche a permis une meilleure évaluation et compréhension de l'évolution de l'intensité de la sécheresse dans une région agricole telle que la Beqaa centrale. En effet, le croisement des données satellitaires, climatiques et socio-humaines, a démontré leur utilité pour le suivi des sécheresses. Cela a montré la nécessité d'intégrer des données multi-sources afin de mieux définir et quantifier la sécheresse dans une région agricole.

Dans le cadre de cette thèse, le calcul du VHI sous ArcGIS a permis de traiter une masse de données conséquentes, et de calculer l'intensité de la sécheresse à différentes échelles spatiales et temporelles. Les données d'occupation du sol, fournies par le CNRS du Liban, ont permis d'enrichir les calculs de l'intensité de la sécheresse d'un secteur précis tel que l'agriculture. Le calcul du VHI a permis de suivre le stress hydrique de la végétation agricole traduit par le manque d'eau éventuel pour la plante. L'analyse et le suivi de cet indice permet donc de cerner au mieux la dynamique de la ressource en eau dans le sol et d'en saisir le retentissement sur la culture en place. Le suivi d'un autre indice, le SPI, rend compte également de la recharge hydrique dans le sol, qui intervient souvent pendant l'hiver. Cette recharge hivernale impacte indirectement l'intensité de la sécheresse : en effet, si les réserves hydriques ne sont pas assez rechargées à la fin d'hiver ou pendant des périodes consécutives, il risque d'y avoir une sécheresse plus intense pour une saison agricole qui débute le printemps. Il ressort de nos résultats que la surface agricole a été touchée par une sécheresse faible à modérée de manière prédominante pour la période étudiée. En même temps, une nette tendance à l'augmentation de l'intensité de la sécheresse a été observée à partir de 2010. D'un point de vue géographique, on a pu observer des variations d'intensité de sécheresse au niveau spatial et temporel.

Notre autre objectif était de déterminer si ces résultats avaient un réel retentissement par les principaux acteurs économiques de cette région, les agriculteurs.

L'analyse des enquêtes a permis de compléter les résultats physiques. Elle a pu distinguer deux types de sécheresse agricole : la sécheresse habituelle et la sécheresse occasionnelle. La sécheresse habituelle est considérée comme « normale » ou « non dangereuse » dans les régions traditionnellement sèches, comme la plaine de la Beqaa, car les pratiques agricoles en place sont adaptées pour faire face à ce type de sécheresse. Ainsi, cette sécheresse ne constitue pas un événement remarquable pour les agriculteurs car ils appliquent une irrigation de complément pour accomplir un cycle cultural et maintenir leur rendement (Lambert, Lami, Senges, 1990), le cas dans la plaine de la Beqaa. Il est donc possible de considérer la sécheresse « modérée à légère », identifiée par les résultats de VHI, comme une sécheresse non dangereuse parce qu'elle reste gérable. En revanche, la sécheresse de type sévère à extrême peut ressembler à la sécheresse occasionnelle décrite par Charre (1977). Cela correspond à un seuil de sécheresse dépassé dans lequel le système agricole est inadapté. Cet événement se produit souvent après une période hivernale déficitaire en pluviométrie, période de recharge des nappes souterraines, provoquant une sécheresse phréatique (Lambert, 1990). A ce moment, une irrigation non adaptée peut entraîner un assèchement des puits agricoles. En effet, dans la plaine de la Beqaa, les nappes phréatiques, une de principales sources d'eau d'irrigation, sont alimentées essentiellement par les précipitations pendant la période hivernale (novembre à février). Une succession des mois déficitaires en précipitations peut impacter négativement le niveau des nappes souterraines et provoquer une sécheresse phréatique.

D'autres facteurs qu'une succession des périodes déficitaires en précipitations peuvent influencer l'état de la végétation et impacter l'intensité de la sécheresse dans une région agricole. En effet, une analyse de l'intensité de la sécheresse d'un point de vue agricole a été réalisée en sélectionnant trois parcelles agricoles situées dans des conditions climatiques et pédologiques homogènes. Cette comparaison a permis de montrer que les pratiques agricoles pourraient impacter l'intensité de la sécheresse. Certains agriculteurs pompent plus l'eau des sols, entraînant un déficit hydrique précoce, ce qui déclenche une sécheresse plus intense.

A la lumière des résultats obtenus, nous pouvons donc dire que nous avons atteint les objectifs fixés en introduction. L'amélioration de la capacité de suivi de sécheresse et la communication en temps réel des données de surveillance sont des étapes importantes dans le lancement de toute réponse à la sécheresse. En ce sens, le travail acquis dans cette thèse présente un intérêt direct. L'un des résultats de ce travail est la discrétisation de la sécheresse dans la plaine de la Beqaa. En effet, nous avons déduit de l'utilisation du VHI, qu'il n'y avait

pas d'intérêt à suivre la sécheresse modérée et légère ($VHI > 0,2$) parce qu'elle ne correspondait pas à la réalité du phénomène sur la zone agricole de la région d'étude. Par contre, on a constaté qu'il faudrait suivre la sécheresse possédant une valeur de VHI inférieur à 0,2, parce qu'elle reflète la réalité complexe du terrain. En effet, ce type de sécheresse, considéré comme dangereux, a un réel impact sur l'activité agricole dans la région. Cette information inédite devrait être fournie au centre de télédétection du Liban, qui attend les résultats de ce travail. Elle devrait aussi intéresser un autre organisme de recherche, le LARI, avec lequel on avait signé une convention pour pouvoir accéder à leurs données de terrain. Cet institut, qui travaille directement avec les agriculteurs, peut bénéficier de ces résultats, qui lui permettraient de classer en priorité les zones agricoles les plus touchées ou qui sont à risques élevés.

Les cartes produites par ce travail, localisant la sécheresse dite dangereuse, pourraient être aussi diffusées dans les zones et les communautés touchées, mais également aux décideurs locaux et nationaux. Cette diffusion peut s'effectuer via internet ou par d'autres moyens, tels que les technologies de téléphonie intelligente. On sait déjà que les cartes de la sécheresse sont des outils très utiles aux États-Unis et au Brésil pour accroître la sensibilisation et accélérer les réactions des gouvernements face à l'évolution de la sécheresse. Ainsi, une meilleure surveillance de la sécheresse conduit à une meilleure planification de lutte contre la sécheresse. La planification à long terme des risques de sécheresse peut être mise œuvre rapidement une fois que les sécheresses sont identifiées. C'est pourquoi, il est souhaitable de croiser les données physiques et humaines afin de caractériser les sécheresses. L'analyse de la relation entre les différents indicateurs permet de tirer un critère qui permet de définir le début et la fin des périodes sèches.

Aujourd'hui, la forte dépendance de l'agriculture à l'irrigation dans la Beqaa, sous condition de la quantité d'eau disponible, l'a rendu particulièrement vulnérable à ce que les agriculteurs définissent « sécheresse occasionnelle ». Nous sommes donc en présence d'une sécheresse qui impacte directement les pratiques agricoles. Les agriculteurs sont alors plus confrontés à ce phénomène qui les touche dans leur gestion de l'exploitation à court et à moyen terme. Ils devraient donc réorienter leurs pratiques agricoles pour faire face au risque de la sécheresse : mise en place de techniques pour l'économie de l'eau soit par un changement du matériel d'irrigation, soit par un changement culturel. C'est pourquoi, la mise en place d'une stratégie d'aménagement agricole dont la ressource en eau serait mieux répartie pendant l'année, est également une solution à l'adaptation de l'agriculture au risque de l'augmentation de

l'intensité de la sécheresse. Nous proposons des solutions qui ont été appliquées dans d'autres régions semi-arides : gestion et planification de l'irrigation, aménagement des modèles agricoles peu irrigués.

Il existe néanmoins des limites dans notre étude dont il faut tenir compte pour l'interprétation des résultats. L'utilisation d'images satellites sur une série temporelle plus longue (30 ans) serait appropriée pour calculer la moyenne de l'indice de végétation VHI. Dans notre étude, nous disposons de série de données de 15 ans parce que le capteur MODIS avait été lancé en 1999 et que les images de l'année 2000 étaient inexploitable pour des raisons du calibrage (CNRS-L, 2015). En outre, les données géo-spatiales de l'utilisation du sol ne sont pas toujours à jour et peuvent être modifiées suite à un changement de culture ou à une cessation d'activité agricole. De plus, il faut ainsi prendre en considération une autre limite concernant le lieu de déroulement d'enquêtes. En effet, notre terrain d'étude ne forme qu'une échelle locale voire micro-locale. On pourrait donc élargir et développer à une échelle régionale afin de former un grand ensemble de données sociales et économiques, et mieux comprendre les enjeux de la gestion de l'eau au niveau territorial.

Les résultats de cette étude pourraient avoir des perspectives intéressantes en termes de recherches. Une amélioration du calcul de l'intensité de la sécheresse serait importante à prévoir. Utiliser plusieurs indices satellitaires à différentes résolutions spatiales pourrait également enrichir le calcul de cette intensité. En effet, on décompte une dizaine d'indicateurs pour caractériser l'état de la végétation (Bannari *et al.*, 1995). Ces indicateurs permettent de prédire les rendements des cultures ou de détecter le stress hydrique. L'indicateur utilisé dans cette étude utilise des bandes spectrales rouges et infrarouges. Il en existe d'autres comme le NDWI qui fait appel à la bande de l'infrarouge moyen (SWIR). Cette bande spectrale est particulièrement sensible au contenu total en eau des feuilles. Il serait intéressant d'effectuer une combinaison des données mesurées par différents indicateurs afin d'offrir un portrait plus complet des sécheresses. Cette combinaison pourrait également réduire les incertitudes sur les qui sont difficiles à identifier dans une image satellite provenant d'un seul indicateur.

Les SIG permettent d'analyser plusieurs types de données, de sources et d'échelles spatiales différentes (NRC, 2006d). Ils permettent d'effectuer non seulement une combinaison entre les indicateurs satellitaires mais aussi avec d'autres météorologiques. Par exemple, Han *et al.*, (2003) ont réalisés une combinaison de données météorologiques, de résultats de modélisation climatiques et des données satellitaires pour calculer les indices forêt-météo au Canada. Aux Etats-Unis, les sécheresses ont été catégorisées à l'aide d'une combinaison du PDSI, des

centiles de l'humidité du sol, des centiles des débits hebdomadaires, du SPI et du VHI (NDMC, 2005).

Les données du VHI, utiles au suivi des sécheresses, pourraient être aussi introduites dans des modèles pour calculer l'érosion du sol dans la région d'étude. Il existe des modèles empiriques simples comme SEMMED¹⁸, réalisé par De Jong (1994) qui mesure l'érosion en région méditerranéenne. Ce modèle est basé sur plusieurs facteurs dont principalement la dynamique de la couverture végétale.

Cette étude pourrait aussi être étendue à d'autres régions, confrontées aux problématiques de la gestion de l'eau. Il serait souhaitable de travailler sur une grande échelle pour offrir une représentation spatiale complète et dynamique du territoire. Une étude de comparaison entre les pays voisins pourrait être intéressante pour le suivi de la sécheresse à différentes échelles climatique et pédologiques.

Enfin, le contexte du développement durable et plus particulièrement sur l'agriculture amène des réflexions prospectives à prendre en compte pour atténuer les impacts des futures sécheresses. En effet, notre étude est basée sur des données rétrospectives. Une approche agronomique plus poussée, prenant en compte les stades phénologiques des cultures, permettrait d'améliorer le réalisme de la sécheresse. On pourrait intégrer des agriculteurs dans un programme du suivi de la fréquence et de l'intensité de la sécheresse en utilisant des pratiques agricoles adaptées, et qui sont abordées dans le dernier chapitre. Cela apporte une dimension supplémentaire et plus appliquée au travail dans cette thèse. L'interprétation des résultats de ce programme pourraient servir d'aide à la décision. Ce programme du suivi permettra également de tester l'impact de différents types de culture sur la réserve hydrique et l'intensité de la sécheresse dans le contexte d'une agriculture durable.

¹⁸ Soil Erosion Model for MEDiterranean areas : un modèle d'érosion qui est basé sur la télédétection, permettant d'étudier les propriétés et les types du sol.

Références bibliographiques

Abd El Al., 1948. *Le Litani*, éd. du Cénacle Libanais.

Aboudrare A., Debaeke P., Bouaziz A., Chekli H., 2006. Effects of soil tillage and fallow management on soil water storage and sunflower production in a semiarid Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*, 83, 183-196.

Abou El-Enin, H.S., 1980. Essai sur la géomorphologie du Liban. *Hannon* vol. VIII – XII, 98-201.

Abraham, J., 2006. Assessing Drought Impacts and Vulnerabilities for Long-Term Planning and Mitigation Programs. Ph.D. Dissertation. Department of Geography and Regional Development. Tucson, AZ: University of Arizona. 47 p. Available from <http://www.ndmc.unl.edu/plan/Abraham.pdf>. Accessed 13 February 2007.

Achard, F., Malingreau, J.P., and Phulpin, T., 1994. A mission for global monitoring of the continental biosphere. VEGETATION International Users Committee Secretariat, Joint Research Center, Institute for Remote Sensing Application. I-21020 ISPRA (Va), Italy, <http://www.vegetation.cnes.fr/>.

Adjizian G. J., Zaarour R., Badaro-Saliba N., Traboulsi M., Gérard P. C., Bakhache C, Kehdy N., El Ess F., 2013 : *Beyrouth face à l'aridification du climat, Sécheresse*, 24, 214–223.

AFP., 2018. Liban: le cèdre, emblème du pays, menacé par le réchauffement climatique Publié le 28/11/2018 à 7h19 - Mis à jour le 29/11/2018. <https://www.geo.fr/environnement/au-pays-du-cedre-le-rechauffement-climatique-menace-lembleme-du-liban-193645>.

Ahmadi, S.H., M.N. Anderson, F. Plauborg, R.T. Poulsen, C.R. Jensen, A.R. Sepakhah, and S. Hansen., 2010a. Effect of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Gas exchange and xylem ABA. *Agricultural Water Management* 97: 1486–1494.

Ahmadi, S.H., M.N. Anderson, F. Plauborg, R.T. Poulsen, C.R. Jensen, A.R. Sepakhah, and S. Hansen., 2010b. Effect of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agricultural Water Management* 97: 1923–1930.

ALLAN J.A., 2005. Water in the Environment. Socio-Economic Development Discourse: Sustainability, Changing Management Paradigms and Policy Responses in a Global System, in: *Government and Opposition* 40, p. 181-199.

Alley, W.M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 1100-1109. Rushton, K.R. & Ward, C., 1979. The estimation of groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 41, 345-361

Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006. *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*, Expertise scientifique collective, synthèse du rapport (2006) INRA, France, 72p.

Anderson W.K., 1985. Grain yield responses of barley and durum wheat to split nitrogen applications under rainfed conditions in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 12, 191-202.

Augier P et Blanc P., 2009. Quatrième Forum Inter-Libanais sur l'Agriculture. CIHEAM.

Arkitov, I., S.J. Hoffman, G.D. Lynne, L.M. Pytlik Zillig, Q. Hu, A.J. Tomkins, K.G. Hubbard, M.J. Hayes, and W. Waltman., 2006. Understanding the Influence of Climate Forecasts on Farmer Decisions as Planned Behavior. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45 (9): 1202-14.

Ashraf M., Routray JK., 2013. Perception and understanding of drought and coping strategies of farming house holds in north-west Balochistan. *Int J Disaster Risk Reduct* 2013; 5:49–60.

Atlas climatique du Liban, 1963, Service météorologique, Ministère des travaux publics et des transports, 52p.

Avitem (Agence des villes et Territoires méditerranéens Durables., 2018. <https://www.avitem.org/fr/content/avril-2018>

Bagnouls F et Gaussen H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie* (1957), volume 66, numéro 355, pp. 193-220.

Baldy C., 1959. Contribution à l'étude climatique du Liban. *Revue de géographie de Lyon*. Vol. 34, p.57-73.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & Huete, A.R., 1995. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95-120.

Banque Mondiale., 2009a. Republic of Lebanon, *Water Sector: Public Expenditure Review*.

Baret, F., and Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, pp. 161-173.

Baret, F., Guyot, G., and Major, D.J., 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria*, 43, pp 241–256.

Bates, B. C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J. P. (Eds.), 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

Bastiaanssen, W. G. M. and Makin, I. W., 2003. Special issue: Remote sensing for agricultural water management - Introduction. *Agricultural Water Management*, 58, pp. 87-88.

Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J. and Makin, I. W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46, pp. 137-155.

Bastiaanssen, W. G. M. and Perry, C. J., 2000. Earth observation demands for improved water resources management. *Observing Land from Space: Science, Customers and Technology*, 4, pp. 105-117.

Beauchamp J., 2006. Université de Picardie Jules Vernes/ Jacques Beauchamp. <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm>

Bédard F., Crump S., and Gaudreau J., 2006. A comparison between Terra MODIS and NOAA AVHRR NDVI satellite image composites for the monitoring of natural grassland conditions in Alberta, Canada. *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 32, No. 1, pp. 44–50, 2006.

Bennafla K., 2006. Le développement au péril de la géopolitique: l'exemple de la plaine de la Beqaa (Liban), Development constrained by political and strategic factors: the example of the Bekaa plain (Lebanon), *Géocarefour*, vol. 81/4, 2006.

Bertrand G., *Pour une histoire écologique de la France rurale*, in *Histoire de la France rurale*, tome 1, DUBY G. et WALLON A., Paris, édition du Seuil, 1975, pp. 39-118.

Blanc P., 2010. Le Liban, l'eau, la souveraineté. L'Harmattan « Confluences Méditerranée ». 2006/3 N. 58, pages 127-136 ISSN 1148-2664. ISBN 2296016006. <http://www.cairn.info/revue-confluences-mediterranee-2006-3-page-127.htm>.

BLANC P., 2006. De la tutelle à la coopération ? La difficile transition des relations syro libanaises, *Confluences Méditerranée* 56, p. 55-70. DOI: 10.3917/come.056.0055.

Blum A., 1972. Effect of planting date on water-use and its efficiency in dryland grain sorghum. *Agronomy Journal*, 64, 775-778.

Blum, A., 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research* 112: 119–123.

Blum, A., 2011. Drought resistance is it really a complex trait? *Functional Plant Biology* 38: 753–757.

Boken V.K., Cracknell A.P. and Heathcote R.L., 2005. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. Oxford: Oxford University Press.

Bolle, H.-J., 2002. *Mediterranean climate: variability and trend*. Springer-Verlag, Berlin, 450 pp.

Bonn, F., and Rochon, G., 1992. Précis de télédétection – Vol. 1 - Principes et Méthodes. Universités Francophones, Presses de l'Université du Québec/AUPELF. pp. 485.

Bou Kheir R., 2002. Etude des risques d'érosion hydrique des sols par télédétection et SIG. Application à une région représentative du Liban. Thèse soutenue le 2 mai en 2002. UFR « Dynamique des milieux et organisations spatiales ». Département de l'Agronomie et de l'Environnement. INA P-G. 261p. 78 850. Thiverval-Grignon.

Boujghagh M., 1990. Effets des semis d'hiver sur deux géotypes de tournesol dans la région du Saïss-Fès. *Helia*, 13 (13), 107-119.

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.

Brown S.C., Keatinge J.D.H., Gregory P.J., Cooper P.J.M., 1987. Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in Northern Syria. I. Root and shoot growth. *Field Crops Research*, 16, 53-66.

Brundtland, G. H., 1987. Rapport Brundtland - Notre avenir à tous. 349 (Oslo).

Bryman A., 2008. *Social Research Methods*, Third Edition, Oxford University Press, New York

Burton, W.G., 1981. *Challenges for stress physiology in potato*. American Potato Journal 58: 3-14.

Campbell, M.D., G.S. Campbell, R. Kunkel, and R.I. Papendick., 1976. A model describing soil-plant-water relations for potatoes. American Potato Journal 53: 431-441.

Cantero-Martinez C., Villar J.M., Romagosa I., Fereres E., 1995. Nitrogen fertilization of barley under semi-arid conditions, *European Journal of Agronomy*, 4, 309-316.

Changnon, S.A., and D.R. Vonnahme., 2003. Impact of Spring 2000 Drought Forecasts on Midwestern Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129 (1): 18-25.

Changnon, S.A., 2002. Impacts of the Midwestern Drought Forecasts of 2000. *Journal of Applied Meteorology* 41 (10): 1042-52.

Chapman, S. C., Ludlow, M. M., Blamey, F. P. C. & Fischer, K. S., 1993. Effect of drought during early reproductive development on growth of cultivars of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). I. Utilization of radiation and water during drought. *Field Crops Research* 32, 193-210.

Cardot, H. and Faivre, R., 2003. Functional approaches for predicting land use with the temporal evolution of coarse resolution remote sensing data. *Journal of Applied Statistics*, vol.30, pp: 1185-1199.

Carlson, T.N., and Ripley, D.A., 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, pp. 241-252.

Cassman, K.G., 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96: 5952-5959.

Castany G., 1982 : Hydrogéologie principes et méthodes, DUNOP, Bordas Paris, 238 p.

Charre J., A., 1977. Propos de sécheresse, In *Revue de géographie de Lyon*, vol. 52 (1977) pp : 215-226.

Chaves, M.M., and Oliveira M.M., 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: Prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany* 55: 2365–2384.

CESBIO., 2014. Etude de la variabilité climatique et de son impact sur l'hydrologie au Liban. Consulté en ligne: <http://egypte.ird.fr/layout/set/print/les-activites/projets-de-recherche-au-liban/etude-de-la-variabilite-climatique-et-de-son-impact-sur-l-hydrologie-au-liban>.

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.

Coleman, W.K., 1986. Water relations of the potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars Raritan and Shepody. *American Potato Journal* 63: 263–276.

Comair F., 2008 : Gestion intégrée des ressources en eau au Liban, efficience d'utilisation de l'eau réunion d'experts, 44 p

COMMISSION EUROPEENNE. *L'agriculture de l'Union européenne : répondre aux besoins et attentes de la société*, Luxembourg, 2008, 16p.

COMMISSION EUROPEENNE. *Agriculture : le « bilan de santé » de la PAC aidera les agriculteurs à faire face aux nouveaux défis*, IP/08/1749, Bruxelles, 20 novembre 2008, 3p.

COMMISSION EUROPEENNE. *Faire face aux problèmes de rareté de la ressource en eau et de sécheresse dans l'Union européenne*, Communication de la commission au parlement européen et au conseil, Bruxelles, le 18 juillet 2007, 15p.

Connor D.J., Loomis R.S., 1991. Strategies and tactics for water-limited agriculture in low rainfall Mediterranean climates, in: *Proceedings International Symposium on Improvement and Management of Winter Cereals under Temperature, Drought and Salinity Stresses*, INIA, Cordoba (Spain), p. 441-465

Cooper P.J.M., Gregory P.J., 1987. Soil water management in the rain-fed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use and Management*. 3, 57-62.

Courault, D., Lacarrere, P., Clastre, P., Lecharpentier, P., Jacob, F., Marloie, O., Prevot, L. and Olioso, A., 2003, Estimation of surface fluxes in a small agricultural area using the three dimensional atmospheric model meso-NH and remote sensing data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, pp. 741-754.

CORAIL ICEA., 2004. *Les Libanais et l'eau potable, enquêtes socio-économiques*, Ambassade de France au Liban, ministère de l'Énergie et de l'Eau, 160 p.

CNRS-L/FAO., 2011. La carte de l'occupation du sol de Liban.

Cuomo, V., Lanfredi, M., Lasaponara, R., Macchiato, M., Simoniello, T., 2001. Detection of

interannual variation of vegetation in middle and southern Italy during 1985–99 with 1 km NOAA AVHRR NDVI data. *Journal. Geophysical. Research.* Vol.106, pp: 17863-17876.

Cutter, E.G., 1978. Structure and development of the potato plant. In *The Potato Crop*, ed. P.M. Harris, 70–152. London: Chapman & Hall.

Crago, R.D., 1996. Conservation and variability of the evaporative fraction during daytime. *Journal of Hydrology*, **180**, 173-194.

Dai, A., 2011. Drought under globalwarming: a review. *WIREs Clim. Change* 2 (1), 45–65, doi: 10.1002/wcc.81.

Dai, A., Qian, T. T., Trenberth, K. E., Milliman, J. D., 2009. Changes in Continental Freshwater Discharge from 1948 to 2004. *J. Clim.* 22 (10), 2773–2792, doi:10.1175/2008JCLI2592.1. Dai, A., Trenberth, K. E., Qian, T. T., 2004. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J. Hydrometeorol.* 5 (6), 1117–1130, doi: 10.1175/JHM-386.1.

Darwish, T.M., Atallah T.W., Hajhasan S., and Haidar A., 2006. Nitrogen and water use efficiency of fertigated processing potato. *Agricultural Water Management*, 85: 95–104.

Davis S., Deweist R., 1996. *Hydrogeology*. John Willey and Willey and Sons Inc., 463p.

Debaeke P., Nolot J.M., Raffaillac D., 2006. A rule-based method for the development of crop management systems applied to grain sorghum in south-western France. *Agricultural Systems* (90), 180-201.

Debaeke P., 2004. Scenario analysis for cereal management in water-limited conditions by the means of a crop simulation model (STICS). *Agronomie (N° Special STICS)* 24, 315-326. Hijmans, R.J. 2003. The effect of climate change on global potato production. *American Journal of Potato Research* 80: 271–279.

Debaeke P., Nolot J.M., 2000. Testing crop management systems for sunflower in South-West France. *Proc.15th Int.Sunflower Conf.*, Toulouse, C, 1-6

Debaeke P., Estragnat A., Reau R., 2003. Influence of crop management on sunflower stem canker (*Diaporthe helianthi*.). *Agronomie*, 23, 581-592

Debaeke P., Aboudrare A., 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of .Agronomy*, 21, 433-446.

Deblonde, G.; Cihlar, J., 1993. A multiyear analysis of the relationship between surface environmental variables and NDVI over the Canadian landmass. *Remote Sensing Revue.*, vol.7, pp: 151-177.

De Jong S M., 1994. Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a Mediterranean environment.

Deumier J.M., Boussaguet J., Mailheau M., 2005. Stratégie des agriculteurs, pilotage et ajustement des apports d'eau aux besoins des cultures. Actes du *Colloque Cemagref « Eau et agriculture durable »*, SIMA, Paris, 1/03/2005.

Deumier J.M., Balas B., Leroy P., Jacquin C., 1996. Maîtrise des systèmes irrigués. Gestion d'un équipement existant. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 82 (5), 89-102.

Desbois D., Legris B., 2003. « D'une réforme de la politique agricole commune à l'autre. Baisse des prix et maîtrise des coûts », Insee Première n° 927, octobre.

Domenikiotos, C., Spiliotopoulos, M., Tsiros, E. & Dalezios, N.R., 2004. Early cotton assessment in Greece based on a combination of the drought Vegetation Condition Index (VCI) and the Bhalme and Mooley Drought Index (BMDI). *International Journal of Remote Sensing*, 25-23, 5373-5388.

Dowgert, M., B. Marsh, R. Hutmacher, T.L. Thompson, D. Hannford, J. Phene, J. Anshutz, and C. Phene., 2006. Low pressure drip irrigation lessens agricultural inputs. Irrigation-toolbox.com/ ReferenceDocuments/.../IA/ 2006/ 012.pdf (Accessed 6 Jan 2013).

Duchemin, B., Guyon, D., and Lagouarde, J.P., 1999. Potential and limits of NOAA-AVHRR temporal composite data for phenology and water stress monitoring of temperate forest ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, **20**, pp. 895-917.

Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., Kharrou, M.H., Khabba, S., Mougenot, B., Oliso, A., Rodriguez, J.C., and Simonneaux, V., 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, **79**, pp. 1-27.

Duchemin, B., Hagolle, O., Mougenot, B., Simonneaux, V., Benhadj, I., Hadria, R., Ezzahar, J., Hoedges, J., Khabba, S., Kharrou, M. H., Boulet, G., Dedieu, G., Er-raki, S., Escadafal, R., Oliso, A. and Chehbouni, A. G., 2008. Agrometeorological study of semi-arid areas: an experiment for analysing the potential of FORMOSAT-2 time series of images in the Marrakech plain. *International Journal of Remote Sensing*.

Dracup, J.A., Lee, K.S. & Paulson, E.G.Jr., 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research*, 16-2, 297-302.

EurAqua., 2004. Towards a European Drought Policy. Discussion document. EurAqua Secretariat, CEH, Wallingford, UK.

El Ess F., 2012. Changement climatique au Moyen-Orient, analyse des températures et des précipitations – le cas du Levant (1964 – 2004), Thèse de doctorat en géographie, Université Saint-Joseph (Liban), 360 p.

European Environment Agency., 2010. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe. An overview of the last decade. Tech. Rep. 13, Copenhagen, Denmark.

Fabeiro, C., F.M.D. Olalla, and J.A. de Juan., 2001. Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management* 48: 255–266.

Fadlallah A.R., 2001. *Le Liban étude géographique*, 437p. La maison de la renaissance, Beyrouth.

Faour Ghaleb, Mhawej Mario, Abou Najem Sandra., 2015. Regional Landsat-Based Drought Monitoring from 1982 to 2014. *Climate* 2015, 3, 563–577, doi:10.3390/cli3030563.

Fawwaz A., 2007. *Nahwa siyassa maiyya fi lubnan*, Vers une politique de l'eau au Liban (ed. arabe), École Supérieure d'Ingénierie de Beyrouth.

Fayed Y., 1972. Le climat du liban entre le littoral et la plaine, 50p., Dar el Ahad, Beyrouth.

Feyen, L., Dankers, R., 2009. Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *J. Geophys. Res.*, Atmos. 114, 17, doi: 10.1029/2008JD011438.

Fleisher, D.H., D.J. Timlin, and V.R. Reddy., 2008a. Elevated carbon dioxide and water stress effects on potato canopy gas exchange, water use, and productivity. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1109–1122.

Fleisher, D.H., D.J. Timlin, and V.R. Reddy., 2008b. Interactive effects of carbon dioxide and water stress on potato canopy growth and development. *Agronomy Journal* 100: 711–719.

Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Luethi, D., Schaer, C., 2007. Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophys. Res. Lett.* 34 (6), L06707, doi: 10.1029/2006GL029068.

Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Florke, M., Wimmer, F., Bianchi, A., 2014. Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrol. Earth System Sci.* 18 (1), 85–108, doi: 10.5194/hess-18-85-2014.

Gausson Henri. Climatologie. In: *Annales de Géographie*, t. 66, n°353, 1957. pp. 9-14, doi : 10.3406/geo.1957.18482.4010_1957_num_66_353_18482.http://www.persee.fr/doc/geo_0003.

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.

Gerik T, Freebairn D., 2004. Management of extensive farming systems for drought-prone environments in North America and Australia. In “New directions for a diverse planet”, *Proc 4th Int Crop Science Cong.*, Brisbane (Australia), [www.cropscience.org.au](http://www.cropsscience.org.au), 9 p.

Gèze B., 1956. Carte de Reconnaissance des sols du Liban au 1 :200000. République Libanaise, Ministère de l'agriculture.

Gimeno V., Fernandez-Martinez J.M., Fereres E., 1989. Winter planting as a means of drought escape in sunflower. *Field Crops Research*, 22, 307-316.

Girard M.C. & Girard C.M., 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, pages 75 à 86.

Grattan, S.R., 2002. Irrigation water salinity and crop production, University of California Division of Agriculture and Natural Resources. Oakland: Farm Water Quality Planning Publication 8066.

Guérif, M.F., Baret, F., Moulin, S., and Bégue, A., 2001. Télédétection, hétérogénéité parcellaire et gestion spatialisée des interventions techniques. In : Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. Collection Repères, édition CIRAD-INRA, pp. 303-326.

Gibbs, W.J. & Maher, J.V., 1967. Rainfall Deciles as Drought Indicators. Director of Meteorology of Melbourne, Australia, 32p.

Ghiotti, S., 2008. Territoires hydrauliques au Liban. Grands barrages et habitants. Les risques sociaux du développement 207–215.

Girard, C.M., and Girard, M.C., 1999. Traitement des données de télédétection. Edition DUNOD Paris, ISBN 2 10 004185 1, pp. 527.

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.

Gutman, G.G., 1999. On the use of long-term global data of land reflectances and vegetation indices derived from the advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 104, pp. 6241-6255.

Guyot, G., 1990. Optical properties of vegetation canopies, Applications of Remote Sensing in Agriculture. *Butterworths, London*, pp. 19-43.

GWP., 2000. Integrated water resources management. (TAC background paper; no. 4), Stockholm, Sweden, Global Water Partnership. 67 p.

Habiba U, Shaw R, Takeuchi Y., 2012. Farmers perception and adaptation practices to cope with drought : perspectives from Northwestern Bangladesh. *Int J Disaster Risk Reduct* 2012 ; 1:72 84.

Hamzé *et al.*, 2010. Lebanese agriculture and climate change. Climate change and water resources in the Mediterranean region. The CIHEAM Watch Letter No 12 | 2010, 4-6.

Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Florke, M., Hanasaki, N., Konzmann, M., Ludwig, F., Masaki, Y., Schewe, J., Stacke, T., Tessler, Z. D., Wada, Y., Wisser, D., 2014. Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 111 (9), 3251–3256, doi: 10.1073/pnas.1222475110.

Hall, F.G., Townshend, J.R., and Engman, E.T., 1995. Status of Remote-Sensing Algorithms for Estimation of Land-Surface State Parameters. *Remote Sensing of Environment*, **51**, pp.138-156.

Hallegatte S., Somot S., Nassopoulos H., 2008. *Région méditerranéenne et Changement Climatique*. IPEMD (Institut de Prospective Economique du Monde Méditerranéen), 63 p.

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.

Haverkort, A.J., and D.K.L. MacKerron., 1995. Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth. Proceedings of the 2nd International Potato Modeling Conference. 3, 396. Wageningen: Kluwer.

Hayes M., 1996. Drought Indices. National Drought Mitigation Center. Consulté en ligne: <http://enso.unl.edu/ndmc>.

Heim R.R. Jr., 2002. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8): 1149-65.

Hertel TW, Rosch SD., 2010. Climate change, agriculture and poverty. Policy Research Working Paper No. 5468. World Bank, Washington, DC.

Heuer, B., and A. Nadler., 1998. Physiological response of potato plants to soil salinity and water deficit. *Plant Science* 137: 43–51.

Hijmans, R.J., 2003. The effect of climate change on global potato production. *American Journal of Potato Research* 80: 271–279.

Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T., Kimoto, M., 2008. Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *Hydrol. Sci. J.* 53 (4), 754–772, doi: 10.1623/hysj.53.4.754.

Huete, A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote sensing of Environment*, 25, 295-309.

Hu, Q., L.M. Pytlik Zillig, G.D. Lynne, A.J. Tomkins, W.J. Waltman, M.J. Hayes, K.G. Hubbard, I. Artikov, S.J. Hoffman, and D.A. Wilhite., 2006. Understanding Farmers' Forecast Use from Their Beliefs, Values, Social Norms, and Perceived Obstacles. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45 (9): 1190-1201.

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.

Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F. & Moneo, M., 2007. Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean. *Water Resources Management* 21, 775-788.

Iona-Toroimac G., Zaharia L., Bigot S., Beltrando G., 2006. Activité végétale et caractéristiques hydroclimatiques en Dobroudja (Roumanie) : l'apport des données Spot-4 Végétation. *Télédétection*, vol N. 6, n°3, pp 195-204.

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 (Intergovernmental Panel on Climate Change)., 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press.

Iwama, K., 2008. Physiology of the potato: New insights into root system and repercussions for crop management. *Potato Research* 51: 333–353.

Iwama, K., and J. Yamaguchi., 2006. Chapter 7: Abiotic Stresses. In *Handbook of potato production, improvement, and postharvest management*, ed. J. Gopal and S.M.P. Khurana, 231–278. New York: The Haworth Press.

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.

Jefferies, R.A., 1993. Responses of potato genotypes to drought. I. Expansion of individual leaves and osmotic adjustment. *Annals of Applied Biology* 122: 93–104.

Jefferies, R.A., and D.K.L. MacKerron., 1993. Responses of potato genotypes to drought. II. Leaf area index, growth and yield. *Annals of Applied Biology* 122: 105–112.

Karam F et Sarraf., 2010. Strategic planning for water ressources management and agricultural development for drought mitigation in Lebanon. *Food Security and climate change in dry areas*. pp. 149 – 156.

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.

Karaa, K., Karam, F., 2000. « Recent trends in the development of sustainable irrigated agriculture in the Bekaa valley of Lebanon ». *Options Méditerranéennes*, 31.

Karam F., Breidy J., Stephan C., and J. Roupheal., 1991. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. *Agric. Water Manage*, 63: 125-137, 1991.

Kehdy N., 2013. La gestion intégrée quantitative de la ressource en eau souterraine, cas du Kaza de Zahlé. Thèse de doctorat, USG, 330 p.

Keyantash J et Dracup J.A., 2002. The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8): 1167-80.

Khosla, R., D. Inman, D.G. Westfall, R.M. Reich, M. Frasier, M. Mzuku, B. Koch, and A. Hornung., 2008. A synthesis of multidisciplinary research in precision agriculture: Site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the USA. *Precision Agriculture* 9: 85–100.

Kogan, F., Salazar, L & Roytman, L., 2012. Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA. Pages 2798-2814, volume 33, 2012 – Issue 9. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.621464>

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.

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.N., 1997. Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78-4, 621-636.

Kogan F.N., 1995. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA Polar Orbiting Satellite Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*.

Kogan F.N., 1995. Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for drought detection. *Advances in Spatial Research*, 15, pp. 91-100.

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.N., 1990. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogenous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11-8, 1405-1419.

Kratzke, M.G., and J.P. Palta., 1985. Evidence for the existence of functional roots on potato tubers and stolons: Significance in water transport to the tuber. *American Potato Journal* 62: 227–236.

Krieg D.R., Lascano R.J., 1990. Sorghum. In : (B.A.Stewart and D.R.Nielsen eds), *Irrigation of Agricultural Crops, Agronomy Monograph N°30*, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, p 719-739.

Knutson CL, Hayes MJ, Philipps T., 1998. How to reduce drought risk. Lincoln: Western Drought Coordination Council, Preparedness and Mitigation Working Group.

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 Semiarid Rangelands. *Journal of Applied Meteorology*, 32, 1781-1790.

Lahlou, O., and J.F. Ledent., 2005. Root mass and depth, stolons and roots formed on stolons in four cultivars of potato under water stress. *European Journal of Agronomy* 22: 159–173.

Lambert R., 1996. *Géographie du cycle de l'eau*, collection Amphi 7, géographie, PUM, Toulouse, 439p.

LARI (Lebanese Agricultural Research Center), Climatic Data, Monthly Bulletin., 2009.

LARI (2010, 2012, 2014, 2016). LARI Annual Reports.

Levy, D., and G.C.C. Tai., 2013. Differential response of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) to salinity in an arid environment and field performance of the seed tubers grown with fresh water in the following season. *Agricultural Water Management* 116: 122–127.

Levy, D, Veilleux, R.E., 2007. Adaptation of potato to high temperatures and salinity. A review. *American Journal of Potato Research* 84: 487–506.

Levy J.D., Bertin M., Combes B., Mazodier J., Roux A., 2005. *Irrigation durable*. Rapport CGGREF-MAAPR, 38 p. + annexes.

Levy, D., 1992. Osmotic potential of potatoes subjected to a single cycle of water deficit. *Potato Research* 35: 17–24.

Linsley, R. K. Jr, Kohler, M. A. and Paulhus, J., 1975: *Hydrology for Engineers* (second edition), McGraw-Hill, New York, USA, 482 pp.

Lhomme, J-P. & Katerji, N., 1991. A simple modeling of crop water balance for agrometeorological applications. *Ecological Modeling*, 57, 11-25.

Lopez-Bellido L., Fuentes M., Castillo J.E., Lopez-Garrido F.J., Fernandez E.J., 1996. Long-term tillage, crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal*, 88, 783-791.

LRA., 2012. Litani River Authority, discharge records.

Mader, S., 1987. *Biologie. Évolution, diversité et environnement*. Éditions du Trécaré, Les Éditions Reynald Goulet inc., Saint-Laurent, Qc., Canada.

Margat J. & Vallée D., 1999. *Vision méditerranéenne sur l'eau, la population et l'environnement au XXIème siècle*. MEDTAC / Plan bleu.

Maria Pedro-Monzonis., Abel Solera., Javier Ferrer, Teodoro Estrela, Javier Paredes Arquiola., 2015. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology* 527 (2015). pp. 482 – 493.

Markandya, A., Mysiak, J., Palatnik, R., Breil, M., Balzarolo, P., Martin-Ortega, J., 2009. *Economic and Social Impacts of Droughts and Demand Side Options - State of the Art Review*, Background Document Xerochore.

Masri T., Khawlie M., Faour G., 2001. *Les facteurs du changement d'utilisation et de couvert des sols et les ressources en eau au Liban, étude sur 40 ans*. CNRS-L, 9p.

Massarutto A, Musolino D, Pontoni F, de Carli A, Senn L, de Paoli L, et al., 2013. Analysis of historic events in terms of socio-economic and environmental impacts. Technical report No. 9. The DROUGHT- R&SPI project.

McDowell JZ, Hess JJ., 2012. Accessing adaptation: multiple stressors on livelihoods in the Bolivian highlands under a changing climate. *Glob Environ Change*. 2012;22:342–352. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.11.002.

McKee T.B., Doesken N.J et Kleist J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scale. 8th Conference on Applied Climatology, pp.179-184.

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.

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.

Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J. M., Noda, A., Raper, S. C. B., Watterson, I. G., Weaver, A. J., Zhao, Z.-C., 2007. Global Climate Projections. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Sci. Adv.* 2 ,e1500323.

Mesfin M. Mekonnen and Arjen Y. Hoekstra., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances* . Vol. 2, no. 2, e1500323 DOI: 10.1126/sciadv.1500323.

Ministère de l’Energie et de l’eau., 2011. *Stratégie nationale du secteur de l’eau au Liban*, en anglais, rapport non publié.

Miller, D.E., and M.W. Martin., 1987. The effect of irrigation regime and subsoiling on yield and quality of three potato cultivars. *American Potato Journal* 64: 17–25.

MOA and LARI., 2008. *A technical package of booklets for the following selected crops: apple, cherry, grapevine, tomato, potato*, EU Agriculture Development project MED/2003/5715/ADP, Beirut.

MOA et FAO., 2005. Atlas agricole du Liban. Beyrouth. Projet assistance au recensement agricole, 112p.

MOA., 1966. Census of Agriculture 1961., (1999), *Rapport de Synthèse du Recensement Général Agricole*.(2008), *Enquête sur la production agricole 2006-2007*, (en arabe).

Moulin, S., Bondeau, A. and Delecolle, R., 1998, Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, pp. 1021-1036.

Moran, M.S., Rahman, A.F., Washburne, J.C., Goodrich, D.C., Wertz, 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.

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.

Montigaud J.C., Sabra R., Chahine H. et Henri P., 2004. Les filières fruits et légumes frais au Liban : structures, fonctionnement et perspectives. AGRO. M et INRA, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex 1, F. ISBN : 2-7380-1172-1.60p.

MOLLE F. et FLOCH P., 2008. *The “Desert bloom” syndrome: Irrigation development, politics, and ideology in the Northeast of Thailand*. Working Paper, (fonds IRD).

Muchow R.C., Hammer G.L, Vanderlip R.L., 1994. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. II. Effects of planting date, soil water at planting, and cultivar phenology, *Field Crops Research*, **36**, 235-246.

Myneni, R.B., Los, S.O., Tucker, C.J., 1996. Satellite-based identification of linked vegetation index and sea surface temperature anomaly areas from 1982 to 1990 for Africa, Australia and South America. *Geophysical. Research. Letters*. Vol. 23, pp: 729-732.

Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., and Nemani, R.R., 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, **386**, pp. 698-702.

Narasimhan, R. and Srinivasan, R., 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring, *Agr. Forest Meteorol.*, **133**, 69-88.

NASA., 2016. NASA Finds Drought in Eastern Mediterranean Worst of Past 900 Years. Consulté en ligne: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nasa-finds-drought-in-eastern-mediterranean-worst-of-past-900-years>.

NDMC., 1996. National Drought Mitigation Center. Consulté en ligne : <http://www.drought.unl.edu/enigma/indices.htm>, 1998.

NDMC., 2005. National Drought Mitigation Center. Consulté en ligne: <http://www.drought.unl.edu/index.htm>, 2006.

NDMC., 2006. National Drought Mitigation Center. What is Drought? Drought Indices. Consulté en ligne: <http://www.ndmc.unl.edu/whatis/indices.htm>.

NDMC., 2006a. What is Drought? Understanding and Defining Drought. Available from <http://www.ndmc.unl.edu/whatis/concept.htm>. Accessed 30 November 2007.

NDMC., 2006d. Understanding Your Risk and Impacts: Impacts of Drought. Available from <http://www.ndmc.unl.edu/risk/. Impacts. htm>. Accessed 13 February 2007.

NDMC., 2006e. Understanding Your Risk and Impacts: Drought Impacts and Vulnerability. Available from <http://www.ndmc.unl.edu/risk/impactvulnerability.htm>. Accessed 26 May 2009.

NDMC., 2006f. Understanding Your Risk and Impacts: Ranking Drought Impacts. Available from <http://www.ndmc.unl.edu/risk/rankdroughtimpact.htm>. Accessed 26 May 2009.

NDMC., 2006g. Understanding Your Risk and Impacts: Drought Vulnerability Analysis. Available from <http://www.ndmc.unl.edu/risk/vulnerabilityanalysis.htm>. Accessed 26 May 2009

NDMC., 2006i. Planning for Drought: Why Plan for Drought? Available from <http://www.ndmc.unl.edu/plan/whyplan.htm>. Accessed 27 May 2009.

Nolot, J.M, Debaeke, P., 2001. A generic model to manage N in cropping systems differing by water availability. *11th Nitrogen Workshop*, Reims (France), 9-12 /09/2001, 401-402.

Nimah M. N. , Ryan J. and. Chaudhry2 M. A., 1983. Soil Science Society of America Journal Abstract. Effect of Synthetic Conditioners on Soil Water Retention, Hydraulic Conductivity, Porosity, and Aggregation. doi: 10.2136/sssaj1983.03615995004700040026x.

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.

L'Orient Le Jour (OLJ)., 2014. Sécheresse: les agriculteurs libanais subissent de plein fouet la rareté de l'or bleu. <https://www.lorientlejour.com/article/855238/secheresse-les-agriculteurs-encaissent-de-plein-fouet-la-rarete-de-lor-bleu.html>.

Oliosio, A., Chauki, H., Courault, D., and Wigneron, J.P., 1999a. Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models. *Remote Sensing Environment*, vol.68, pp : 341-356.

Orlowsky, B., Seneviratne, S. I., 2013. Elusive drought: uncertainty in observed trends and short- and long-term CMIP5 projections. *Hydrol. Earth System Sci.* 17 (5), 1765–1781, doi:10.5194/hess-17-1765-2013.

Palmer W., 1968. Keeping track of the Crop Moisture Conditions, Nationwide: The new crop Moisture Index. *Weatherwise*, 21, 156-161.

Palmer, W.C., 1965. Meteorological Drought. U.S. Weather Bureau Research Paper No. 45. 58p..

Pandey S, Bhandari H. Drought., 2009. Coping mechanisms and poverty: insights from rainfed rice farming in Asia. Occasional Paper 7: knowledge for development effectiveness. International Fund for Agricultural Development.

Panu, U. S. and Sharma, T. C., 2002. Challenges in drought research: some perspectives and future directions, *Hydrol. Sci. J.*, 47 (SI): S19-S30.

Passioura J.B., 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of Australian Institute of Agricultural Science*, 43, 117-120.

Passioura J.B., 2006. Increasing crop productivity when water is scarce – from breeding to field management. *Agricultural Water Management*, 80, 170-196.

Peake, D. C. I., Henzell, E. F., Stirk, G. B. & Peake, A., 1979. Simulation of changes in herbage biomass and drought response of a buffel grass (*Cenchrus ciliaris* cv. biloela) in Southern Queensland. *Agro-Ecosystems* 5, 23-40.

Pehrson, L., R.L. Mahler, E.J. Bechinski, and C.Williams., 2010. Water management practices used in potato production in Idaho. *American Journal of Potato Research* 87: 253–260.

Pescod, M.B., 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO) No 47*, FAO, Rome, 139 pp.

Peters, E., Torfs, P. J. J. F., van Lanen, H. A. J., Bier, G., 2003. Propagation of drought through groundwater – a new approach using linear reservoir theory. *Hydrol. Process.* 17 (15), 3023–3040, doi: 10.1002/hyp.1274.

Peters, J., Waltershea, E.A., Ji, L., Vliia, A., Hayes, M., Svoboda, M.D., Nir, R., 2002. Drought monitoring with NDVI-based Standardized Vegetation Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. vol.68, pp: 71-75.

Pierce, F.J., and P. Nowak., 1999. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy* 67: 1–85.

Pinty, B. & Verstraete, M. M., 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101, 15-20.

Propastin, P., Kappas, M., 2009. Modeling net ecosystem exchange for grassland in Central Kazakhstan by combining remote sensing and field data. *Remote Sensing*. Vol.1, pp: 159-183.

Prudhomme, C., Giuntoli, I., Robinson, E. L., Clark, D. B., Arnell, N. W., Dankers, R., Fekete, B. M., Franssen, W., Gerten, D., Gosling, S.N., Hagemann, S., Hannah, D. M., Kim, H., Masaki, Y., Satoh, Y., Stacke, T., Wada, Y., Wisser, D., 2014. Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proc.Natl.Acad. Sci.U.S.A.* 111 (9), 3262–3267, doi:10.1073/pnas.1222473110.

Qi, J., Chehboumi, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. & Sorooshian. S., 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119-126.

Unganai L.S et Kogan F. N., 1998. “Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data,” *Remote Sensing of Environment*, 63, pp. 219–232.

Unger P.W., 1990. Sunflower. In: *Irrigation of Agricultural Crops*. B.A. Stewart and D.R. Nielson (eds). ASA Monograph n° 30, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 775-791.

Unger P.W., Stewart B.A., Parr J.F., Singh R.P., 1991. Crop residue management and tillage methods for conserving soil and water in semi-arid regions. *Soil Tillage Research*, 20, 219-240.

Rachidi F., Kirkham M.B., Stone L.R., Kanemasu E.T., 1993. Soil water depletion by sunflower and sorghum under rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, 24, 49-62.

Redmond, K.T., 2002. The Depiction of Drought: A Commentary. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8): 1143-47.

Rahman, H., and Dedieu, G., 1994. SMAC: A Simplified Method for the Atmospheric Correction of Satellite Measurements in the Solar Spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 15, pp. 123-143.

Riachi R., 2012. Agriculture et système alimentaire sous la mission hydraulique libanaise, *Méditerranée*, 119 | 2012, 35-43.

Riachi R., Chaaban., 2012. *Regional Water Projects: Bridging Distributive Politics to Equity and Efficiency*, working paper.

Richards R.A., 2006. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agricultural Water Management*, 80, 197-211.

Richardson, A.J., C.L. Wiegand, D.F. Wanjura, D. Dusek and J.L. Steiner (1992). Multisite analyses of spectral-biophysical data for sorghum. *Remote Sensing of Environment*, 41, pp. 71-82.

Ritchie, J, and Lewis, J., 2005. *Qualitative Research Practice: A Guide for Social Science Students and Researchers*, Thousand Oaks, Sage Publications, London

Rhoades, J.D., F.T. Bingham, J. Letey, G.J. Hoffman, A.R. Dedrick, P.J. Pinter, and J.A. Replogle., 1989. Use of saline drainage water for irrigation: Imperial Valley study. *Agricultural Water Management* 16: 26–36

Rockström, J., 2003. Water for food and nature in drought-pronetropics: Vapour shift in rain-fed agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences* 358: 1997–2009.

Romm, J., 2011. The next dust bowl. *Nature* 478, 450–451, doi:10.1038/478450a.

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., and Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In : *3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, pp. 309-317.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., and Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md.*, pp. 371.

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.

Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N.W., Clark, D. B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B. M., Colon-Gonzalez, F. J., Gosling, S. N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F. T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wada, Y., Wisser, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L., Kabat, P., 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 111 (9), 3245–3250, doi: 10.1073/pnas.1222460110.

Schmidt, G., Benitez-Sanz, C., 2013. How to distinguish water scarcity and drought in EU water policy? GWF Discussion Paper 1333, Global Water Forum, Canberra, Australia. UNEP, 1994. United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. Paris, France.

Scotford, I. M. and Miller, P. C. H., 2005, Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: A review. *Biosystems Engineering*, 90, pp. 235-250.

Scopel E., 1994. Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique: Intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière. Thèse de doctorat, INA PG, 334 p.

Sellers, P.J., 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, vol.6, pp: 1335-1372.

Seiler R.A., Kogan F.N., Guo W et Vinocur M., 2007. Seasonal and interannual responses of the vegetation and production of crops in Cordoba, Argentina assessed by AVHRR-derived vegetation indices, *Advances in Spatial Research*, 39(1), pp. 88-94.

Shaban Amin, Houhou Rola., 2015. Drought or humidity oscillations? The case of coastal zone of Lebanon. *Journal of Hydrology*. journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol.

Shaban A., 2009. Indicators and Aspects of Hydrological Drought in Lebanon, *Water Resources Management Journal* 23, p. 1875-1891. DOI : 10.1007/s11269-008-9358-1

Shaban A., 2008. Indicators and Aspects of Hydrological Drought in Lebanon. Received: 23 May 2007 / Accepted: 3 October 2008 / Published online: 29 October 2008. Springer Science Business Media B.V. 2008. *Water Resource Manage* (2009) 23:1875–1891, doi: 10.1007/s11269-008-9358-1

Shaban A, Faour G, Khawlie M, Abdallah C., 2004. Remote sensing application to estimate

the volume of water in the form of snow on Mount Lebanon. *Hydrol Sci J* 49(4):643–653.
doi:10.1623/hysj.49.4.643.54432.

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. In *Proceedings of Western Snow Conference*, Reno, NV, USA, 19–23 April 1982; pp. 164-175.

Sheffield, Eric F. Wood, Nathaniel Chaney, Kaiyu Guan, Sara Sadri, and Xing Yuan., 2014. A Drought Monitoring and Forecasting System for Sub-Sahara African Water Resources and Food Security

Sheffield J et Wood E. F., 2011. Drought: Past Problems and Future Scenarios, 210 pp. Taylor & Francis.

Shock, C.C., and E.B.G. Feibert., 2002. Deficit irrigation of potato, FAO Corporate Document Repository. Natural Resources Management and Environment Department.

Seiler R.A., Kogan F.N., Guo W et Vinocur M., 2007. Seasonal and interannual responses of the vegetation and production of crops in Cordoba, Argentina assessed by AVHRR-derived vegetation indices, *Advances in Spatial Research*, 39(1), pp. 88-94.

Seneviratne, S. I., Luthi, D., Litschi, M., Schar, C., 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443 (7108), 205–209, doi: 10.1038/nature05095.

Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G. K., Allen, S. K., Tignor, M., Midgley, P. M. (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109–230.

Sneyers R., 1990. On the statistical analysis of series of observation. WMO, Technical Note n° 143, Genève.

Sepaskhah, A.R., and S.H. Ahmadi., 2010. A review on partial rootzone drying irrigation. *International Journal of Plant Production* 4: 241–258.

Sinclair, T.R., 2011. Challenges in breeding for yield increase for drought. *Trends in Plant Science* 16: 289–293.

Sinclair T.R., Muchow R.C., 2001. System analysis of plant traits to increase grain yield on limited water supplies. *Agronomy Journal*. 93, 263-270

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.

Soltani A., Galeshi S., 2002. Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment : experimentation and simulation, *Field Crops Research*, 77, 17-30.

Stalham, M.A., and E.J. Allen., 2001. Effect of variety, irrigation regime and planting date on depth, rate, duration and density of root growth in the potato (*Solanum tuberosum*) crop. *Journal of Agricultural Science* 137: 251–270.

Stéphane Ghiotti et Roland Riachi., 2013. La gestion de l'eau au Liban : une réforme confisquée ? Éditions de l'EHESS | « Etudes rurales ». 2013/2 n°192 | pages 135 à 152. ISSN 0014-2182. ISBN 9782713223983. <http://www.cairn.info/revue-etudes-rurales-2013-2-page-135.htm>.

Swain S., Wardlow B. D., Narumalani S., Tadesse T et Callahan K., 2011. “Assessment of Vegetation Response to Drought in Nebraska Using Terra-MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index,” *GIScience & Remote Sensing*, 48(3), pp. 432-455.

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.

Tallaksen, L. M., Hisdal, H., Van Lanen, H. A. J., 2009. Space-time modelling of catchment scale drought characteristics. *J. Hydrol.* 375(3-4), 363–372, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.032.

Tallaksen, L.M. and Van Lanen, H.A., 2004. Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Vol. 48, Elsevier, Amsterdam. pp. 99–138.

Tardieu, F., 2012. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: Just design the right drought scenario. *Journal of Experimental Botany* 63: 25–31.

Tate, E.L. & Gustard, A., 2000. Drought definition: A Hydrological perspective. Drought and Drought Mitigation in Europe. Jurgen V. Vogt and Francesca Somma (Editors). Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Thorntwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55-94.

Tissot P., 1947. L'Agriculture libanaise : son présent et son avenir. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée Année 1947* 293-294 pp. 110-119.

Turrall, H., J. Burke, and J.M. Faures., 2011. Climate change, water and food security. *FAO Water Reports* 36 FAO, Rome p 174.

Turner N.C., 2004b. Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Annals of Applied Biology* , 144, 139-147.

Turner N.C., Wright G.C., Siddique K.H.H., 2001. Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 71, 193-231.

Turner N.C., Prasertsak P., Setter T.L., 1994. Plant spacing, density, and yield of wheat subjected to postanthesis water deficits. *Crop Science*, 34, 741-748.

Turner, N.C., 1982. The role of shoot characteristics in drought resistance of crop plants. In Drought resistance in crops with emphasis on rice, ed. The International Rice Research Institute, 115–134. Manila: IRRI.

Traboulsi M., 2014. Les fortes chaleurs au Proche-Orient et leurs relations avec la circulation atmosphérique régionale. Etude des tendances indicatrices des changements climatiques, *Hannon, Revue de géographie libanaise*, volume 27, 48-83.

Traboulsi Mariam Makké., 2010. La pluviométrie moyenne annuelle au Liban interpolation et cartographie automatique. *Lebanese Science Journal*, Vol. 11, No. 2, 2010.

Vermote, E.F., El Saleous, N.Z., and Justice, C.O., 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 97-111.

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.

Wahbi A., Sinclair T.R., 2005. Simulation analysis of relative yield advantage of barley and wheat in an eastern Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 91, 287-296.

Walworth, J.L., and D.E. Carling., 2002. Tuber initiation and development in irrigated and non-irrigated potatoes. *American Journal of Potato Research* 79: 387–395.

Westfall D.G., Havlin J.L., Hergert G.W., Raun W.R., 1996. Nitrogen management in dryland cropping systems. *Journal of Production Agriculture*, 9, 192-199.

WGA (Western Governors' Association)., 2004. Creating a Drought Early Warning System for the 21st Century: The National Integrated Drought Information System.

Wilhelmi, O. V., Hubbard, K. G. and Wilhite, D. A., 2002. Spatial representation of agroclimatology in a study of agricultural drought, *Int. J. Climatol.*, 22, 1399–1414, doi: 10.1002/joc.796.

Wilhelmi, O.V., 1999. Methodology for Assessing Vulnerability to Agricultural Drought: A Nebraska Case Study. Ph.D. Dissertation. Department of Agricultural Meteorology. Lincoln, NE: University of Nebraska-Lincoln. 136p.

van Bergeijk, J., D. Goense, and L. Speelman., 2001. Soil tillage resistance as a tool to map soil type differences. *Journal of Agricultural Engineering Research* 79: 371–387.

Van den Boogaard R., Veneklaas EJ, Peacock JM, Lambers H., 1996. Yield and water use of wheat in a Mediterranean environment : cultivar differences and sowing density effects. *Plant and Soil*, 181, 251-262.

Van Lanen, H. A. J., Wanders, N., Tallaksen, L. M., Van Loon, A. F., 2013. Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure. *Hydrol. Earth System Sci.* 17 (5), 1715–1732, doi:10.5194/hess-17-1715-2013.

Van Lanen, H.A. J., Dijkma, R., 2004. Impact of groundwater on surfacewater quality: role of the riparian area in nitrate transformation in a slowly responding chalk catchment (Noor, The Netherlands). *Ecohydrology and Hydrobiology* 4 (3), 315–325.

Van Lanen, H.A.J. & Peters, E., 2000. Definition, effects and assessment of groundwater droughts. In: Vogt, J.V., Somma, F. (Eds.), *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer, Dordrecht, 49-61.

Van Loon, A. F., Van Lanen, H. A. J., 2012. A process-based typology of hydrological drought. *Hydrol. Earth System Sci.* 16 (7), 1915–1946, doi:10.5194/hess-16-1915-2012.

Van Vliet, M. T. H., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Voegelé, S., Lettenmaier, D. P., Kabat, P., 2012. Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. *Nature Clim. Change* 2 (9), 676–681, doi: 10.1038/nclimate1546.

Verdeil E., Faour G., et Velut S., 2007. *Atlas du Liban, Beyrouth, Liban, Institut français du Proche – Orient / CNRS Liban « Etudes contemporaines », 210p.*

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.

Vidal, J.-P., Martin, E., Kitova, N., Najac, J., Soubeyroux, J.-M., 2012. Evolution of spatio temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrol. Earth System Sci.* 16 (8), 2935–2955, doi: 10.5194/hess-16-2935-2012.

Villalobos, A.A., 2007. Análisis y seguimiento de distintos tipos de sequía en la cuenca del río Júcar. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de València (Tesis Doctoral).

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. & 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.

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.

Voiron H., Jail M., Loup J., Martin N., 1977. La sécheresse dans les Alpes du Nord en 1976, In *Revue de géographie alpine*, tome 65, n°3, 1977, pp. 241-256

Vos, J., and A.J. Haverkort., 2007. Water availability and potato crop performance. In *Potato biology and biotechnology: Advances and perspectives*, ed. D. Vreugdenhil, J. Bradshaw, C. Gebhardt, F. Govers, M.A. Taylor, D.K.L. MacKerron, and H.A. Ross, 333–351. Amsterdam: Elsevier.

Vos, J., and J. Groenwold., 1989a. Genetic differences in water-use efficiency, stomatal conductance and carbon isotope fractionation in potato. *Potato Research* 32: 113–121.

Vos, J., and J. Groenwold., 1989b. Characteristics of photosynthesis and conductance of potato canopies and the effects of cultivar and transient drought. *Field Crops Research* 20: 237–250.

Wilhite D.A., Svoboda M. D. et Hayes M. J., 2007. Understanding the complex impacts of drought. A key to enhancing drought mitigation and preparedness,” *Water Resources Management* 21, pp. 763-774.

Wilhite, D.A., M.J. Hayes, and C.L. Knutson., 2005. Drought Preparedness Planning: Building Institutional Capacity. Chapter 5 pp. 93-135. In Wilhite, D.A. [ed.] 2005. *Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*. CRC Press.

Wilhite DA., 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: Wilhite DA (ed) *Droughts: a global assessment*. Routledge, London, pp 3–18

Wilhite, D.A., 1994. *Drought assessment, management, and planning: theory and case studies*, Kluwer, Boston, 293p.

Wilhite, D.A. Planning for Drought: A Methodology., 1993. Chapter 6 pp. 87-108. In Wilhite, D.A. *Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Wilhite, D.A. et Glantz M.H., 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International* , 10, 111-120.

Wong, G., Van Lanen, H.A. J., Torfs, P. J. J. F., 2013. Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought. *Hydrol. Sci. J.* 58 (2), 253–270, doi: 10.1080/02626667.2012.753147.

Xie, K.Y., X.X. Wang, R.F. Zhang, X.F. Gong, S.B. Zhang, V. Mares, C. Gavilán, A. Posadas, and R. Quiroz., 2012. Partial root-zone drying irrigation and water utilization efficiency by the potato crop in semi-arid regions in China. *Scientia Horticulturae* 134: 20–25.

Zribi M., Chahbi A., Shabou M., Lili-Chabaane Z., Duchemin B., Baghdadi N. , Amri, R., Chehbouni A., 2011. Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using ENVISAT ASAR radar data for soil evaporation evaluation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 345-358.

Liste des figures

Fig. 1.1 - les différents types de sécheresse et sa propagation dans le cycle hydrologique Source : modifiée du Journal of Hydrology (2015) et Villalobos (2007). Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	16
Fig. 1.2 - Modèle théorique d'un diagramme ombro-thermique. Réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2017.....	17
Fig. 1.3 - Modèle théorique de la différence de réflectance entre les deux portions du spectre électromagnétique (NIR-R) dans les deux saisons (sèches et favorables) Réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2017.....	22
Fig. 1.4 - Exemples de sécheresses très sévères pour la période 1994-2013. Source : The OFDA/CRED International Disaster Database. www.em-dat.net – Université Catholique de Louvain – Bruxelles – Belgique.	29
Fig. 1.5 - Diagramme de l'impact agricole. Source : NDMC, 2006g.	31
Fig. 1.6 - Structure organisationnelle du plan de sécheresse. Source : Wilhite et <i>al.</i> , 2005.....	34
Fig. 2.1 - Carte géographique du Liban : géo-localisation de deux chaînes montagneuses. Source : AMIOT, 2013. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.....	38
Fig. 2.2 - Mont-Liban et L'Anti-Liban, réservoirs d'eau. Source MODIS, 2016.	40
Fig. 2.3 - Répartition des principales cultures au Liban en pourcentage. Source : Ministère de l'agriculture, 2005.	41
Fig. 2.4 - Répartition spatiale de différents types d'occupation du sol en plaine de la Beqaa. Source : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.	44
Fig. 2.5 - Délimitation de la région d'étude (Beqaa centrale) au sein de la plaine de la Beqaa. Source de données : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.....	45
Fig. 2.6 - Répartition spatiale de différents types d'occupation du sol dans la zone d'étude (Beqaa centrale). Source : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.	46
Fig. 2.7 - Répartition spatiale de différents types de cultures dans la zone d'étude (Beqaa centrale). Source : CNRS-L, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018.	47
Fig. 2.8 - Répartition spatiale de la pluviométrie en plaine de la Beqaa. Source : CNRS-L, 2016. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.....	52
Fig. 2.9 - Répartition spatiale de la pluviométrie en zone d'étude. Source : CNRS-L, 2016. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.	53
Fig. 2.10 - Répartition de la surface de la région d'étude selon l'ampleur du risque de désertification (%). Source : Ministère de l'agriculture du Liban, 2016.....	55
Fig. 2.11 - Répartition des sols dans la Beqaa centrale. Source : GEZE, 1956. Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018.	57
Fig. 2.12 - Tendance à la hausse des températures annuelles moyennes (TM), minimales (Tn) et maximales (Tx) (à gauche) et évolution des jours de fortes chaleurs (à droite) à Beyrouth. Source : Changement climatique au Moyen-Orient, université Saint Joseph (El Ess, 2012).....	59
Fig. 2.13 - Evolution des précipitations annuelles au Liban durant la période 1961– 2009.	59
Fig. 2.14 - Circulation des fleuves Oronte et Litani. Conception et réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2018. Source : CNRS, 2003.	61
Fig. 2.15 - Hiérarchie de dépendance des institutions de l'eau	65
Fig. 2.16 - Répartition de la SAU irriguée selon l'origine de l'eau. Sources : MOA et FAO., 2005. Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018.....	67

Fig. 2.17 - Répartition de la SAU irriguée selon les modes d'irrigation. Sources : MOA et FAO, 2005. Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018.	69
Fig. 3.1 - Spectre du rayonnement. Conception et réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, CEDETE, 2017.	73
Fig. 3.2 - Réflectance de couverts végétaux dans divers états physiologiques. Source : GIRARD, 1999. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2017.	74
Fig. 3.3 - Géométrie de mesure du signal réfléchi par les éléments de surface (GDTA, 1991).....	75
Fig. 3.4 - Schéma du fonctionnement d'un capteur (Girard, 1999).....	76
Fig. 3.5 - Fonctionnement d'un capteur pour l'acquisition d'une image. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE-2018.	76
Fig. 3.6 - Mesure de la résolution spatiale par le détecteur. Source : Garrigues, 2004.	77
Fig. 3.7 - Relation entre résolution spatiale, largeur de fauchée et le cycle de répétitivité	78
Fig. 3.8 - Exemple de la correction géométrique d'une image. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.....	79
Fig. 3.9 - Exemple de transformation polynomiale à partir de deux polynômes pour la correction géométrique. Source : esri.com. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.	80
Fig. 3.10 - Chaîne de traitement de données satellitaires à partir du capteur MODIS-TERRA (sources : MODIS, NASA. Réalisation : T. Nasser, 2017).	87
Fig. 3.11 - Utilisation du sol en Beqaa centrale selon le nouveau regroupement. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans-CEDETE, 2018.....	90
Fig. 3.12 - Structure de la démarche méthodologique de SIG utilisée pour le traitement des images MODIS. Réalisation : T. NASSER, Université d'Orléans - CEDETE, 2018.	91
Fig. 3.13 - Illustration de traitement par l'outil de découpage. Source : ArcMap, 10.5. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.	92
Fig. 3.14 - Fenêtre de l'outil « Découper une entité » utilisé pour extraire l'entité de notre région d'étude. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.....	93
Fig. 3.15 - Traitement par l'outil d'extraction par masque. Source : ArcMap, 10.5. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.	93
Fig. 3.16 - Fenêtre de l'outil « Extraction par masque » utilisé pour créer une couche raster de la zone agricole de notre région d'étude. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.....	94
Fig. 3.17 - Fenêtre de l'outil « calculatrice raster » utilisé pour extraire les zones agricoles touchées par la sécheresse. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.	95
Fig. 3.18 - Traitement par l'outil « Raster vers polygones ». Source : ArcMap, 10.5. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.	96
Fig. 3.19 - Transformation le raster (entrée) en entité surfacique sous forme polygonal (sortie). Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.	96
Fig. 3.20 - : Sélectionner les polygones de la sécheresse via Gridecode. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.	97
Fig. 3.21 - Transformation d'un raster en un point (image raster en entrée à gauche et image avec des points en sortie à droite). Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.....	98
Fig. 3.22 - Calcul de la valeur moyenne de VHI entre 0,3 et 0,4 représentant la sécheresse légère. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.	99
Fig. 4.1 - Répartition de l'intensité de la sécheresse mesurée par VHI sur une zone agricole de la Beqaa, pour la période agricole 2001-2015 (sources : MODIS, NASA. Réalisation : T. Nasser, 2017).	105

Fig. 4.2 - Evolution de VHI de l'intervalle 0 à 0.2 correspondant à la sécheresse de forte intensité pour la période de 2001 à 2015.....	106
Fig. 4.3 - Evolution de la surface touchée par une sécheresse de forte intensité selon les valeurs de VHI pour la période 2001 - 2015.	107
Fig. 4.4 - Evolution de VHI de l'intervalle 0,2 à 0,4 correspondant à la sécheresse de faible intensité	107
Fig. 4.5 - Evolution de la surface touchée par une faible intensité de sécheresse de 2001 à 2015.....	108
Fig. 4.6 - Points détectés dans la plaine de la Beqaa, correspondant à des valeurs en pixels. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018	109
Fig. 4.7 - Répartition du nombre de points dans les différents intervalles de classification de sécheresse. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.....	110
Fig. 4.8 - Répartition spatiale de différentes intensités de sécheresse pour l'année 2008 et la moyenne (2001 – 2015). Source : MODIS, NASA Réalisation : T. NASSER, 2018.....	111
Fig. 4.9 - Evolution de VHI pour la zone agricole pour la période agricole 2001-2015. Sources : MODIS, NASA. Réalisation : T. Nasser, 2017.....	114
Fig. 4.10 - Evolution de VHI dans l'intervalle 0 - 0,2 dans le territoire de la région d'étude pour la période de 2001 à 2015.	115
Fig. 4.11 - Evolution de la surface touchée par une sécheresse de forte intensité dans la zone agricole en Beqaa centrale de 2001 à 2015.	116
Fig. 4.12 - Evolution de VHI dans l'intervalle 0,2 - 0,4 dans le territoire de la région d'étude pour la période de 2001 à 2015.	116
Fig. 4.13 - Evolution de la surface agricole touchée par une sécheresse de faible intensité ($0.2 < VHI < 0.4$).....	117
Fig. 4.14 - Points détectés dans la surface agricole en Beqaa centrale, correspondant à des valeurs en pixels. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.....	118
Fig. 4.15 - Répartition du nombre de points dans les différents intervalles de classification de sécheresse. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans – CEDETE, 2018.....	118
Fig. 4.16 - Répartition spatiale de différentes intensités de sécheresse pour l'année 2008 et la moyenne. Source : MODIS, NASA Réalisation : T. NASSER, 2018.....	120
Fig. 4.17 - Carte de la sécheresse moyenne (2001-2015) de la surface cultivée en arbres fruitiers. Source : MODIS, NASA Réalisation : T. NASSER, 2018.	122
Fig. 4.18 - Evolution spatiale de la sécheresse dans la zone des arbres fruitiers. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.	123
Fig. 4.19 - Carte de la sécheresse moyenne (2001-2015) de la surface occupée par les cultures en plein champ. Source : MODIS, NASA. Réalisation : T. NASSER, 2018.....	124
Fig. 4.20 - Variation de l'intensité de la sécheresse sur la surface des cultures en plein champ, pour la période 2001-2015. Source : MODIS, NASA. Réalisation : T. Nasser, 2017.	125
Fig. 4.21 - Carte de la sécheresse moyenne (2001-2015) de la surface occupée par la viticulture. Source : MODIS, NASA Réalisation : T. NASSER, 2018.	126
Fig. 4.22 - Evolution spatiale de la sécheresse dans la surface occupée par la viticulture, Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2018.....	127
Fig. 4.23 - Comparaison de l'intensité de la sécheresse entre les différents types de cultures pour trois périodes (plus, moins sèche et moyenne). Calculs : T. NASSER - CEDETE, 2018.....	128
Fig. 4.24 - Evolution de SPI calculs de l'auteur, 2017. Source : Université Américaine de Beyrouth, Station de Haouche - Snaid ,1956-2015.....	129

Fig. 4.25 - Lien entre VHI et SPI (Données MODIS et Station de Haouch-Snaïd, calculs de l'auteur, 2017. Calculs : T. NASSER - CEDETE, 2018.....	131
Fig. 5.1 - Localisation des agriculteurs interrogés. Source : Travail du terrain, 2016-2017. Réalisation et conception : T. NASSER, CEDETE, 2017.	139
Fig. 5.2 - Répartition de la population dans notre région d'étude. Source : Ministère de l'intérieur du Liban, 2015. Conception et réalisation : T.NASSER, CEDETE, 2017.....	142
Fig. 5.3 - Répartition des cultures dans la région d'étude. Source : Données SIG fournies par le CNRS du Liban, 2011. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	145
Fig. 5.4 - Répartition de la surface agricole de la région d'étude par ville. Source : calcul réalisé à partir des données SIG fournies par le CNRS du Liban, 2005. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.	146
Fig. 5.5 - Niveau piézométrique selon les agriculteurs enquêtés de la région. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	147
Fig. 5.6 - Les pourcentages des terrains irrigués dans notre région d'étude. Source : ministère de l'agriculture, 2011. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.	148
Fig. 5.7 - Répartition des exploitations agricoles. Source : Données SIG fournies par le CNRS du Liban, 1997. Conception et Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017	151
Fig. 5.8 - Evolution de la surface agricole cultivée pour les années 1965, 1999 et 2005. Source : INRA (2000) et CNRS-L (2005).....	152
Fig. 5.9 - Définition de la sécheresse du point de vue des agriculteurs, 2017.....	157
Fig. 5.10 - La vision des agriculteurs de l'étendue des effets de sécheresse au cours de 15 dernières années.	158
Fig. 5.11 - Origine de la sécheresse d'un point de vue des agriculteurs. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.....	159
Fig. 5.12 - Evolution de la pluviométrie selon les agriculteurs interrogés. Source : Données des enquêtes du terrain, 2016-2017.	160
Fig. 5.13 - La perception des agriculteurs sur les impacts de la sécheresse. Source : Enquêtes, 2017	161
Fig. 5.14 - Situation des puits agricoles dans la zone d'étude. Source : Enquêtes, 2017	161
Fig. 5.15 - (a) Réduction en pourcentage de la surface agricole cultivée, (b) Réduction en pourcentage de rendement des principales cultures. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017	163
Fig. 5.16 - Perception des agriculteurs sur les impacts socio-économiques de la sécheresse. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.....	164
Fig. 5.17 - Perception des agriculteurs sur les impacts environnementaux de la sécheresse. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.....	165
Fig. 5.18 - Principales mesures d'adaptation adoptées par les agriculteurs. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.	166
Fig. 5.19 - Nombre d'agriculteurs qui exercent un second métier. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.....	170
Fig. 5.20 - Répartition des métiers du conjoint. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.	171
Fig. 6.1 - Localisation de deux types de sécheresse perçus par les agriculteurs par le croisement de données de VHI. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.	182
Fig. 6.2 - Evolution de l'intensité de sécheresse. Conception et réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	183
Fig. 6.3 - Pluviométrie annuelle pour les périodes (1998-2016). Source : Données issues de station de Rayak. Réalisation du graphique : T.NASSER/CEDETE-2018.	184

Fig. 6.4 - Variation des précipitations mensuelles (Excédent ou déficit) pour la période allant de janvier 1999 à décembre 2001. Source : Station météorologique de Rayak. Conception et réalisation : T. NASSER-CEDETE, 2018.....	186
Fig. 6.5 - Variation des précipitations mensuelles (Excédent ou déficit) pour la période allant de janvier 2013 à décembre 2015. Source : Station météorologique de Rayak. Conception et réalisation : T. NASSER-CEDETE, 2018.....	187
Fig. 6.6 - Localisation de la sécheresse ressentie par les agriculteurs de l'année 2015 et 2001 selon notre analyse. Conception et réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018.....	188
Fig. 6.7 - Répartition de valeur de VHI de la sécheresse ressentie en 2001.....	189
Fig. 6.8 - Localisation des parcelles agricoles sélectionnées	190
Fig. 6.9 - Evolution de VHI dans les zones sélectionnées.....	191
Fig. 6.10 - Variation moyenne du VHI de différentes valeurs observées sur la période 2001-2015 pour les parcelles sélectionnées dans la région de la Beqaa centrale.	192

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Classification de SPI. Source : Organisation Météorologique Mondiale, guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitation, 2012.	19
Tableau 1.2 - Processus de la planification de la sécheresse. Source : Wilhite et al. 2005.....	32
Tableau 2.1 - Répartition des exploitations agricoles au Liban. Source : Ministère de l'agriculture, 1999.	41
Tableau 2.2 - Répartition de différents types d'occupation du sol en plaine de la Beqaa. Source : CNRS-L, 2011.....	43
Tableau 2.3 - Répartition de différents types d'occupation du sol en plaine de la Beqaa. Source : CNRS-L, 2011. Calcul de données par SIG: T. NASSER – CEDETE, 2017.	46
Tableau 2.4 - Répartition de différents types de cultures dans la zone d'étude. Source : CNRS-L, 2011. Calcul de données par SIG: T. NASSER – CEDETE, 2017.	47
Tableau 2.5 - Température mesurée par deux stations météorologiques situées dans la zone d'étude. Source : Atlas climatique du Liban, 2016.	54
Tableau 2.6 - Les textes juridiques concernant les lois sur l'eau. Source : Ministère de l'Énergie et de l'Eau, 2011.	63
Tableau 2.7 - Surface irriguée au Liban. Source : Institut de recherche agricole libanais, département de l'irrigation et de l'agro-météorologie (LARI), 2016.	66
Tableau 2.8 - Etat de la surface irriguée au Liban. Source: (LRA - Rural Development Department), 1999 et IRWA project, 2006.	68
Tableau 3.1 - Caractéristiques des capteurs Landsat 7 ETM (http://landsat.gsfc.nasa.gov/), HRVIR-SPOT 4 (http://www.cnes.fr/), FORMOSAT-2 (http://www.nspo.org.tw/).....	82
Tableau 3.2 - Bandes spectrales du capteur Landsat 7 ETM+. Source : http://landsat.gsfc.nasa.gov/	82
Tableau 3.3 - Bandes spectrales du capteur HRVIR-SPOT 4. Source : www.cnes.fr	82
Tableau 3.4 - Bandes spectrales de FORMOSAT-2. Source : http://www.nspo.org.tw/	83
Tableau 3.5 - Caractéristiques des capteurs MODIS-TERRA (http://modis.gsfc.nasa.gov/), VEGETATION (http://vegetation.cnes.fr/).	84
Tableau 3.6 - Les 7 premières bandes spectrales de MODIS-TERRA (http://modis.gsfc.nasa.gov/)... ..	84
Tableau 3.7 - Bandes spectrales du capteur SPOT VEGETATION (http://vegetation.cnes.fr/).....	84
Tableau 3.8 - Classification d'utilisation du sol en Beqaa centrale selon les images satellitaires IKONOS. Source : CNRS-L, 2011.	88
Tableau 3.9 - Regroupement d'utilisation du sol en Beqaa centrale. Réalisation : T. NASSER, université d'Orléans-CEDETE, 2018. Source : CNRS-L, 2011.....	89
Tableau 4.1 - - Valeur moyenne de VHI de 2001 à 2015 Sources : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).....	103
Tableau 4.2 - Répartition des points, correspondant aux valeurs des cellules raster, selon les différents intervalles de classification de VHI pendant toute la période d'étude. Calcul de l'auteur, 2017.....	109
Tableau 4.3 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse dans la plaine de la Beqaa.....	112
Tableau 4.4 - Valeur moyenne de VHI de 2001 à 2015 pour la zone agricole en Beqaa centrale. Sources : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).....	113
Tableau 4.5 - Situation de VHI par rapport à la moyenne pour la période d'étude. (Réalisation : T. NASSER-université d'Orléans- CEDETE, 2018).....	115
Tableau 4.6 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse dans la zone agricole en 2015 ainsi que la moyenne de la période d'étude (source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).....	121

Tableau 4.7 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse d'après le VHI pour les années sélectionnées (source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017	124
Tableau 4.8 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse d'après le VHI pour les années 2003 et 2015 (source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).....	126
Tableau 4.9 - Répartition spatiale de l'intensité de sécheresse d'après le VHI pour les années 2003 et 2015 (source : MODIS, NASA, calculs de l'auteur, 2017).....	128
Tableau 4.10 - Répartition temporelle de l'indice standardisé des précipitations (SPI) pour la période de 1956 à 2015. Source : Valeurs de SPI calculées à partir des données de précipitations de la station de Haouche-Snaïd de 1956 à 2015.	130
Tableau 5.1 - Accroissement des résidents dans la région. Source : Ministère de l'intérieur du Liban, 2015.....	142
Tableau 5.2 - Mode d'occupation du sol pour les années 1965, 1998 et 2011.....	143
Tableau 5.3 - Occupation agricole dans les huit villages de la région d'étude.	146
Tableau 5.4 - Méthodes d'irrigation dans notre région d'étude (%). Source : nos enquêtes, 2017. Réalisation : T. NASSER, 2017	149
Tableau 5.5 - Evolution de la surface agricole des villages de la région d'étude. Source : calcul réalisé à partir des données SIG fournies par le CNRS du Liban, 2005. Réalisation : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	153
Tableau 5.6 - Age des agriculteurs. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.....	153
Tableau 5.7 - Education des agriculteurs en pourcentage. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017.	154
Tableau 5.8 - Revenu annuel des agriculteurs. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017	154
Tableau 5.9 - Espèces cultivées par les agriculteurs interrogés Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017	155
Tableau 5.10 - Superficie utilisée en hectare. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017	156
Tableau 5.11 - Durée d'irrigation journalière. Source : Enquêtes du terrain, 2016-2017	156
Tableau 5.12 - Perceptions des agriculteurs quant aux avantages du soutien externe à l'adaptation aux épisodes secs.	175
Tableau 5.13 - Différentes sources d'informations climatiques utilisées par les agriculteurs.	176
Tableau 5.14 - Les services / investissements / développements les plus nécessaires aux agriculteurs pour l'adaptation	176
Tableau 6.1 - Fréquence d'occurrence de sécheresse par niveau dans les zones sélectionnées de 2001 à 2015.....	191
Tableau 6.2 - Secteurs retenus dans les trois zones sélectionnées.....	193
Tableau 6.3 - Surface agricole touchée par a sécheresse selon son degré d'intensité.	193
Tableau 6.4 - Gestion de l'irrigation menée pour plusieurs années. Réalisation : T. NASSER-CEDETE, 2018.....	196

Liste des photographies

Photographie 2.1 - Culture maraîchère à gauche (laitue) et à droite (pomme de terre) dans la ville d'Ablah (Beqaa centrale). Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017.	48
Photographie 2.2 - La culture du blé dans la ville de Fourzol. Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017	49
Photographie 2.3 - Arbres fruitiers à gauche (abricotiers) et à droite (amandiers) dans la ville de Fourzol (Beqaa centrale). Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	49
Photographie 2.4 - Oliviers dans la ville de Rait (Beqaa centrale). Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	50
Photographie 2.5 - La culture de vigne dans la ville de Fourzol (Beqaa centrale). Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	50
Photographie 2.6 - Mise en évidence de l'hétérogénéité parcellaire de point de vue aménagement et superficie. Cliché : T. NASSER, CEDETE, 2017.....	51
Photographie 5.1 - Utilisation partielle d'un terrain agricole. Cliché par T. NASSER, 2017.....	167
Photographie 5.2 - Changement des cultures à Fourzol. Cliché par T. NASSER, 2017	168
Photographie 5.3 - Diversification des cultures à Terbol. Cliché par T. NASSER, 2017.....	169
Photographie 5.4 - Système d'irrigation goutte-à-goutte dans un champ de vigne. Cliché : T. NASSER-CEDETE, 2017.....	172
Photographie 5.5 - Irrigation par aspersion dans un champ de grandes cultures. Cliché : T. NASSER-CEDETE, 2017.....	173
Photographie 5.6 - Stockage d'eau dans des réservoirs en plastique. Cliché : T. NASSER-CEDETE, 2017.....	174
Photographie 5.7 - Stockage d'eau dans des réservoirs en ciment. Cliché : T. NASSER-CEDETE, 2017.....	174

Liste des annexes

Annexe 1 – Synthèse des indicateurs potentiels de suivi de la sécheresse

Approches traditionnelles

- Pourcentage à la normale (Percent of Normal)

Types de données : Précipitation

Remarques :
-Très efficace lorsque utilisé sur une seule région ou une seule saison ;
-Problème de comparaison entre différentes régions

- Déciles de précipitation (Precipitation Deciles)

Types de données : Précipitation

Remarques :
-Historique des conditions climatiques de longue durée nécessaire ;
-Développé pour palier aux faiblesses du PN

- Indice de précipitation standardisé (Standardized Precipitation Index)

Types de données : Précipitation

Remarques :
-Créé pour tenir compte de l'effet de différentes périodes de temps sur les ressources en eau;
-Transformation des données parfois nécessaire;
-Utilisé pour une comparaison régionale;
-Surveille également les périodes humides

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

Types de données : Précipitation journalière, température maximale journalière

Remarques :
-Estime le déficit cumulatif en humidité pour les humus profonds et les couches supérieures du sol;
-La moyenne annuelle des précipitations doit être connue pour la région;
-Lié au contrôle des feux en milieux forestiers ou en régions naturelles ;
-Index journalier

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

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

Remarques :
-Basé sur le concept de réserve et de demande du bilan hydrique;
-Permet la comparaison de différentes régions;
-Permet de caractériser le début, la durée et l'intensité d'une sécheresse;
-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

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

Types de données : Température moyenne; précipitation totale.

Remarques :
-Développé 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;
-Définit les sécheresses en fonction de la magnitude du déficit en évapotranspiration;
-Varie rapidement face aux changements des conditions environnementales

- Indice des réserves en eau de surface (Surface Water Supply Index)

Types de données : Couverture neigeuse, débits fluviaux, précipitation, emmagasinement du réservoir, température.

Remarques :
-Complément aux indices de Palmer ;
-Incorpore des composantes hydrologiques et climatiques;
-Créé en fonction de régions qui dépendent de la fonte des neiges comme principale source d'eau de surface;
-Calibré pour régions homogènes.

- Capacité de rétention utile du sol (Available water Capacity)

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

Remarques :
-dépend de la texture et de la structure du sol et des caractéristiques de drainage;
-Mesuré directement sur le terrain;

Approches satellitaires

- Indice de végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Remarques :
- Indice normalisé qui permet la comparaison de différentes régions;
- Saturation en milieu dense;
- Problèmes d'interprétation des résultats dans les zones non homogènes;

- Indice de Végétation Ajusté pour les Sols (Soil Adjusted Vegetation Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Remarques :
- Affecté par la végétation sénescence;
- Limitations associées à l'acquisition des données satellitaires : nuages, aérosols, couvert non végétatif, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite.

- SAVI modifié (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Remarques :
- Réduit l'effet des sols nus;
- Limitations liées en zone de forte densité de végétation ;
- Limitations associées à l'acquisition des données satellitaires : nuages, aérosols, couvert non végétatif, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite.

- Indice de la condition de la végétation (Vegetation Condition Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Remarques :
- Dérivé du NDVI;
- Adapté aux aires hétérogènes ;
- Limitations associées à l'acquisition des données satellitaires : nuages, aérosols, couvert non végétatif, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite.

- Indice de la santé de la végétation (Vegetation Health Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Remarques :
- Dérivé du NDVI;
- Adapté aux aires hétérogènes ;
- Adapté aux zones agricoles ;
- 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, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite.

- Indice de la production de la végétation (Vegetation Production Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge.

Remarques :
 - 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.

- Indice du contenu en eau des feuilles (Leaf Water Content Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge, et de l'infrarouge moyen.

Remarques : - Difficulté de pratiquer sur le terrain.

- Indice du stress en humidité (Moisture Stress Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et infrarouge, et de l'infrarouge moyen.

Remarques : - Hautement corrélé au NDVI.

- Température de surface (Surface temperature)

Types de données : Bandes spectrales rouge et l'infrarouge thermique.

Remarques : - Utile pour la surveillance du stress végétatif dû à la saturation du sol en eau

- Indice de la condition thermique (Temperature Condition Index)

Types de données : Bandes spectrales rouge et l'infrarouge thermique.

Remarques :
 - Dérivé de la température de surface ;
 - Augmente la précision de la surveillance des sécheresses ;
 - 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, dégradation de la calibration des capteurs et dégradation de l'orbite du satellite.

Approches combinées

- **Indice de déficit en eau (Water Deficit Index)**

Types de données : Température de surface, température de l'air.

Remarques : - Surestime le déficit hydrique dans les régions à faible densité de végétation ;

- **Indice de stress en eau des cultures (Crop Water Stress Index)**

Types de données : Température de brillance de la bande thermique, VPD déficit de la pression de l'air, rayonnement net, résistance aérodynamique.

Remarques : - Efficace pour la détection du stress hydrique ;
- Nécessite des données non satellitaires : déficit de pression nde vapeur, rayonnement net.
- Influencé par l'ensoleillement ainsi que l'ombre ;
- n'est pas efficace à la présence du sol nu.

- **Simple Water Stress Index (Indice de stress en eau)**

Types de données : Évapotranspiration, précipitation, coefficient de culture, humidité maximale disponible.

Remarques : - Efficace pour la surveillance des cultures ;
- Ignore la montée capillaire.

- **Simple Water Stress Index (Indice de stress en eau)**

Types de données : Évapotranspiration, précipitation, coefficient de culture, humidité maximale disponible.

Remarques : - Efficace pour la surveillance des cultures ;
- Ignore la montée capillaire.

- **Fraction évaporatoire (Evaporative fraction)**

Types de données : Évapotranspiration, flux de chaleur sensible du sol, rayonnement net.

Remarques : - Nécessite d'estimer le bilan énergétique ;

Annexe 2 – Carte géologique de la région d'étude

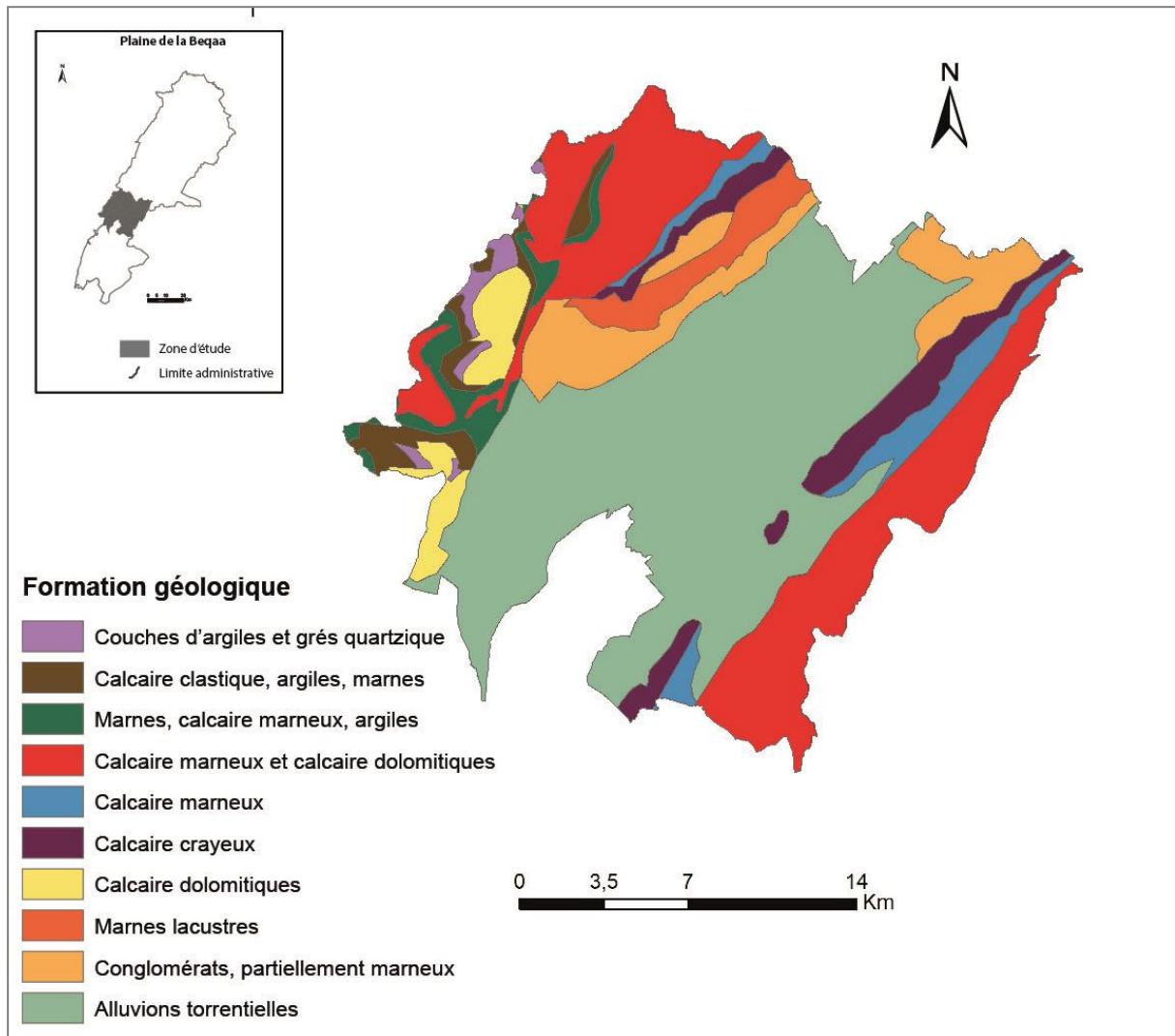


Fig. 1 : Formation géologique en région d'étude. Source :CNRS-L. Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2018.

Annexe 3 – Les lois et les articles concernant l'eau (traduit de l'arabe)

Le décret numéro 14438 Le décret numéro 14438 publié les 2/5/1970, et republié le 12/8/2010 par le ministère de l'eau dans le journal officiel numéros 118, point 2 et 3 de l'article 4 : Article 4, point 2: Il est interdit de forer un puits à l'intérieur d'un rayon de 350 m d'un puits appartenant au secteur public ou bien d'une source jaillissante permanente ou bien intermittente. Mais le permis peut être donné à l'intérieur du rayon d'une source non jaillissante ou bien sèche et à condition que ce puits n'endommage pas les sources d'eau publiques et que l'institut public de l'eau ne peut alimenter en eau l'eau aux habitants résidant à l'intérieur de ce périmètre. Dans ce cas le ministère donne l'autorisation de forage à des particuliers. Article 4, point 3: À l'intérieur d'un rayon de 350 m et dans une région située à moins de 2000 m d'altitude, le ministère peut donner une autorisation de forage même à côté d'une source jaillissante permanente ou intermittente à condition que d'une part, l'institut de l'eau de la région annonce qu'elle ne peut pas assurer l'alimentation en eau aux différents foyers et, d'autre part, si ce puits n'a aucun effet négatif sur les ressources en eaux publiques après études géologiques. ----- Ce jugement est formé de 9 points : • Le premier point porte sur la manière qui doit être suivi pour présenter une demande pour forer, nettoyer ou bien utiliser un puits. • Le deuxième point aborde 4 titres importants : ○ Le premier parle des documents officiels demandés pour permettre aux habitants de forer un puits, par exemple le lieu l'utilisation du puits les cartes administratives,.... ○ Le deuxième parle des processus juridique qu'il faut être suivi par les services administratifs afin de donner l'approbation aux habitants pour forer le puits. ○ Le troisième parle de la droit de la direction de faire un relevé technique dans n'importe quel temps en ce qui concerne les documents officiels et l'utilisation du puits foré et l'état juridique du forage sur le terrain après la commande de la ministre ou en se basant sur la suggestion du directeur général du ministère et après la permis du ministre. Cette loi n'est pas réalisé à cause de l'insuffisante des employés officiels pour faire ces contrôles. ○ Le quatrième considéré très important porte des facteurs essentiels dans cette nouvelle tonique : ▪ Empêcher le forage des puits dans les zones interdits qui est déjà énoncées dans les lois et les règlements en vigueur. ▪ Au-dessus de 2000 m le permis de forage sera donné si l'institut de l'eau annonce qu'elle ne peut pas assurer la quantité de l'eau demandée par l'habitant.

- Le puits sera fermé et accumulé au frais du propriétaire du puits si après une étude géologique l'institut de l'eau annonce que le puits a des effets négatifs sur les ressources en eaux de la région (sources, puits publics, rivières,...). Cette loi n'est pas appliquée à cause du chaos dans les ministères.
 - Le ministre peut accorder lui-même des autorisations de forage dans le but de développer les projets productifs et d'augmenter la productivité des secteurs agricole, industriel ou touristique dans le but de répondre aux besoins des institutions religieuses, les municipalités, les unions municipales, les institutions, les administrations publiques après avoir réalisé les études demandées. Et sous le prétexte de ce grand nombre de ces institutions dans notre région d'étude le ministre a le droit de donner des centaines d'autorisations sans revenir aux processus administratifs demandés pour le forage. Et puisque le ministre peut donner lui-même l'autorisation cela peut être très rependu en vue du clientélisme politique qui donne des avantages à ceux qui soutiennent le point de vue politique de la ministre.
- Le quatrième point concerne les demandes de nettoyage des puits et les documents officiels qu'il faut être présenté pour avoir le permis de nettoyage.
 - Le troisième point concerne les demandes d'utilisation des puits et les documents officiels qu'il faut être présenté pour avoir le permis de les utiliser.
 - Le cinquième point concerne les puits forés sans avoir une autorisation de forage. Et ce point est négligé dans ces quatre étapes.
 - Le seizième point concerne la déclaration qu'il faut être présenté par l'habitant qui va forer ou nettoyer un puits. Ce point insiste que la déclaration doit être écrite et présentée au ministère et à l'institut de l'eau.
 - Le septième point parle de la méthode de communication entre la direction et le partenaire du puits dans le cas de compléter les documents officiels demandés ou bien les avis des habitants.
 - Le huitième point parle de la méthodologie qu'il faut suivre lors de la modification des points précédents.
 - Le neuvième et le dernier point parle du temps de commencement de mise en œuvre de ces points.

Annexe 4 – Calculs des indicateurs satellitaires VCI, TCI et VHI de 2001 à 2015

Année	TCI	VCI	VHI = (VCI + TCI)/2
2001	0,06	0,52	0.29
2002	0,15	0,53	0.34
2003	0,10	0,44	0.27
2004	0,07	0,49	0.28
2005	0,07	0,49	0.28
2006	0,07	0,57	0.32
2007	0,08	0,56	0.32
2008	0,05	0,41	0.23
2009	0,07	0,59	0.33
2010	0,05	0,59	0.32
2011	0,07	0,53	0.30
2012	0,07	0,45	0.26
2013	0,06	0,62	0.34
2014	0,06	0,52	0.29
2015	0,07	0,57	0.32
Moyenne	0,07	0,53	0.30

Tableau 1 : Valeurs des trois indicateurs (TCI, VCI et VHI). Calculs : T. NASSER - CEDETE, 2017.

Annexe 5 – Images des indicateurs satellitaires VCI et TCI pour la période de 2001 – 2015

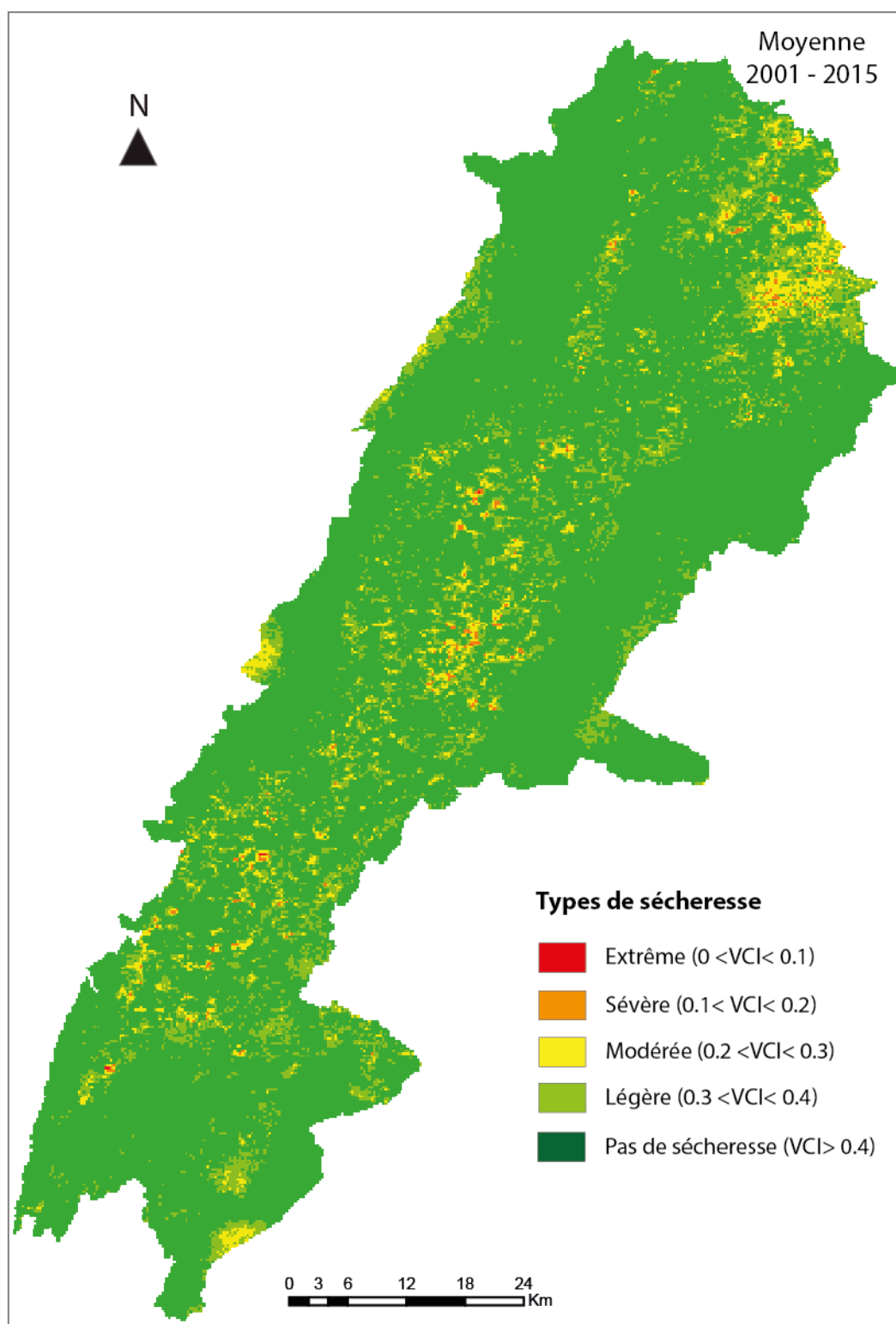


Fig. 2 : VCI moyen pour la période 2001 – 2015. Réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2019.

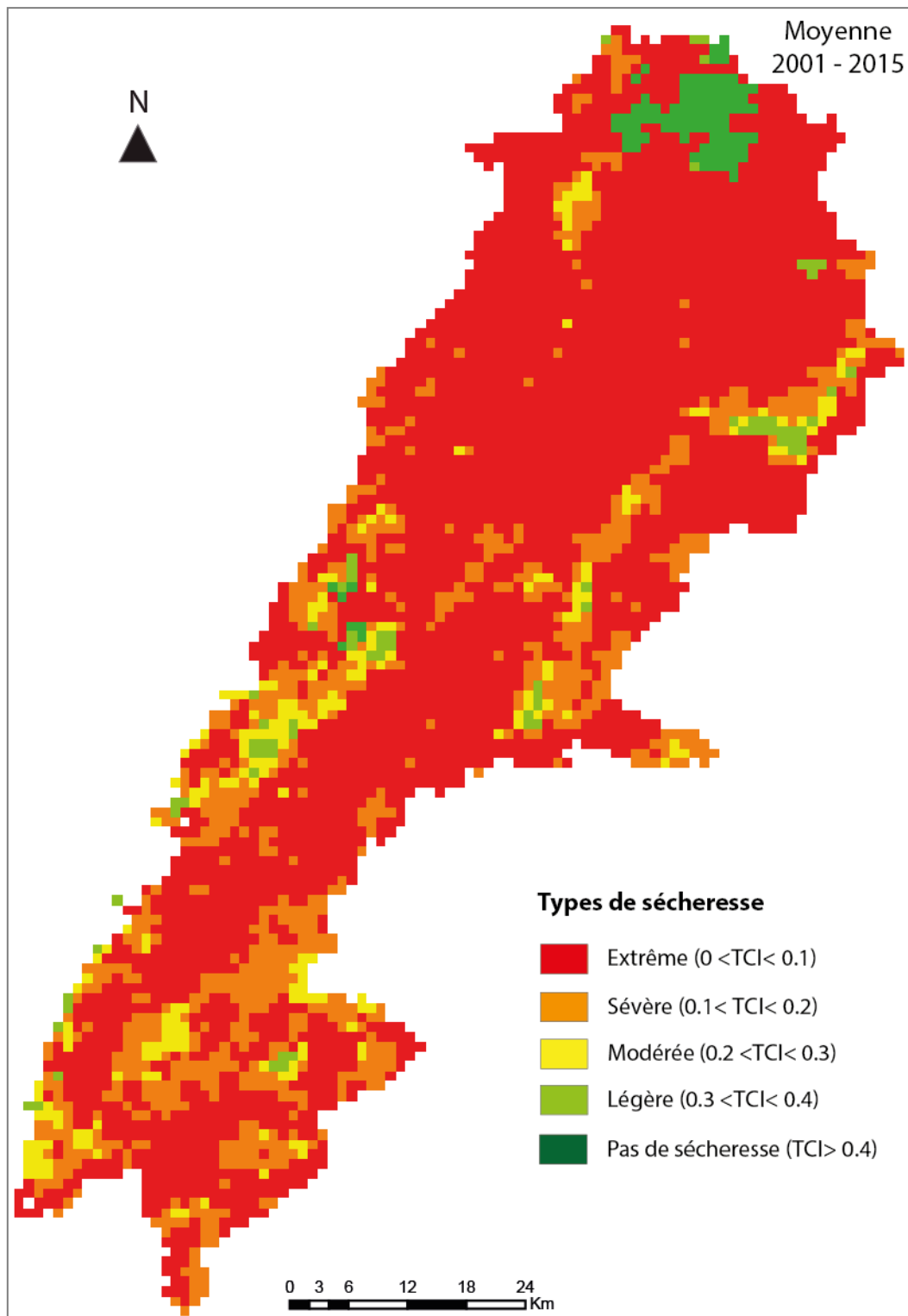


Fig. 3 : TCI moyen pour la période 2001 – 2015. Réalisation : T. NASSER - CEDETE, 2019.

Annexe 6 – Spatialisation et classification de la sécheresse selon le type de culture en zone d'étude pour la période de 2001 – 2015

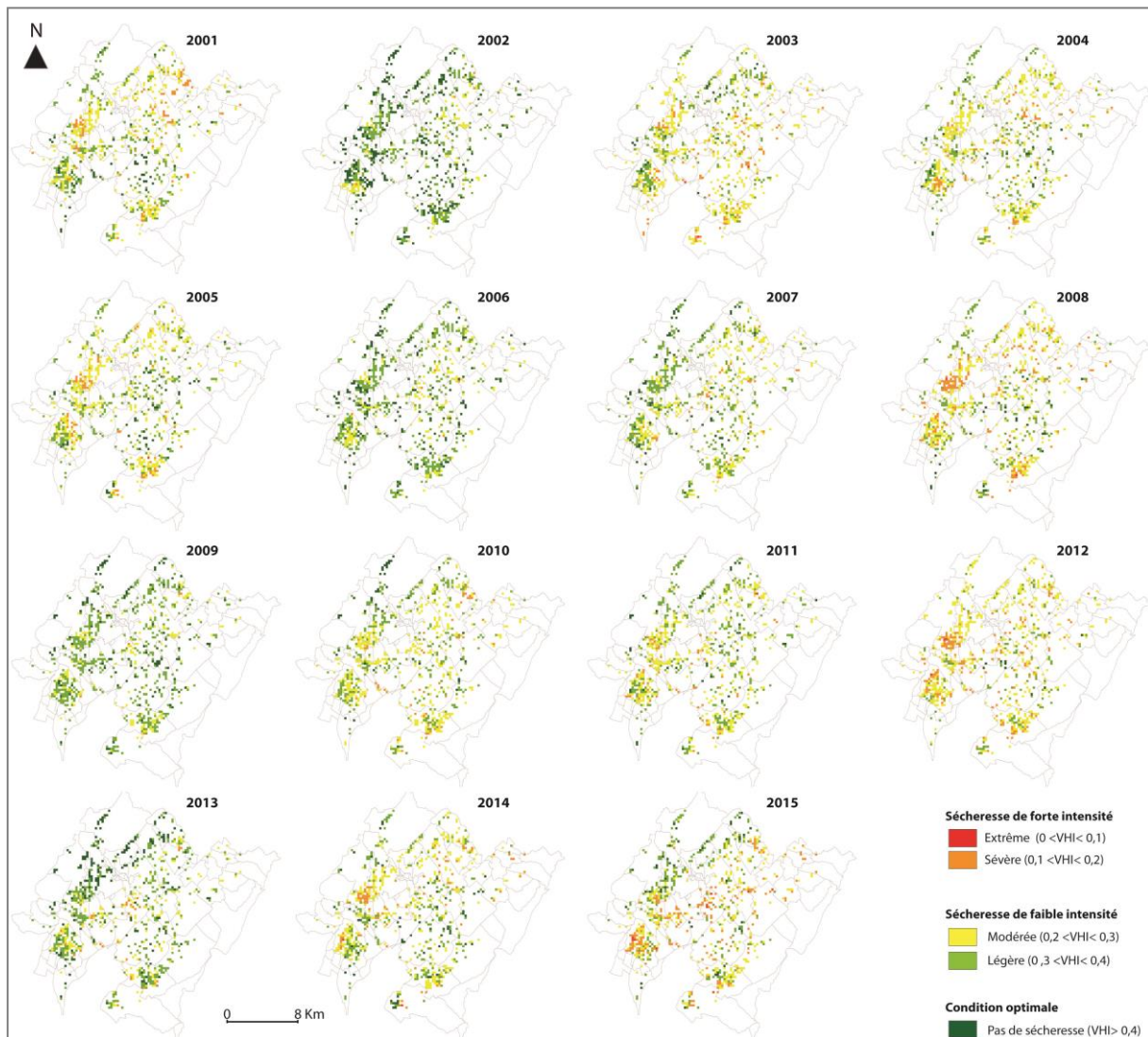


Fig. 4 : Classification de la sécheresse en surface des arbres fruitiers de 2001 à 2015. Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2017.



Fig. 5 : Classification de la sécheresse en surface des vignobles de 2001 à 2015. Réalisation : T. NASSER – CEDETE, 2017.

Annexe 7 – Grille d’entretien

Date de l'enquête :

Numéro de l'enquête :

Enquête « sécheresse et pratiques agricoles »

Nom, prénom :

SAU :

Lieu d'activité agricole :

Quelle (s) culture (s) cultivez – vous (superficie utilisée) ? Comment vous la pratiquez ?

Avez – vous été amené à changer vos pratiques agricoles au cours des dix dernières années ? Pour quelle (s) raison (s) ?

Quel système d'irrigation utilisez – vous ? Combien d'heures d'irrigation en moyen ?

Quelle source d'eau utilisez-vous ?

Avez – vous été amené à changer ou modifier votre système d'irrigation ?

Pour vous, qu'est-ce que la sécheresse ?

Est – elle habituelle ou occasionnelle ?

Pour vous, la sécheresse est une origine climatique ou humaine ?

Quelle est la différence entre les deux ?

Avez – vous vécu une sécheresse (habituelle ou occasionnelle) ces dix dernières années ? Si oui quand ?

Quels sont ses impacts ?

Comment avez – vous réagit durant la période sèche ? Comment adaptez –vous dans le cas d'une sécheresse exceptionnelle ?

Table des matières

Remerciements

Liste des sigles et acronymes

Sommaire

Introduction générale.....1

Partie 1 - La sécheresse sous tous ses aspects..... 12

Chapitre 1 : Cadre théorique de l'étude, définition et méthodes de suivi des sécheresses. 13

1.1 Définition de la sécheresse 14

1.2 Propagation de la sécheresse 15

1.3 Suivi de la sécheresse 17

1.4 Impacts régionaux de la sécheresse 29

1.5 Planification de la sécheresse 32

1.6 La perception de la sécheresse 34

1.7 Influence du changement climatique sur la sécheresse future..... 35

Chapitre 2 : La plaine de la Beqaa mise en contexte..... 37

2.1 Présentation générale du Liban 38

2.2 L'agriculture libanaise : exploitations agricoles, types de culture et régions agricoles 40

2.3 Présentation de la zone d'étude : un territoire agricole en plaine de la Beqaa 42

2.4 Typologie des sols..... 55

2.5 Contextualisation de la situation hydrique au Liban 57

2.6 Les besoins de la plaine de la Beqaa en terme d'outils de détection et de suivi des sécheresses 69

Partie 2 - Méthodologie et résultats..... 71

Chapitre 3 : Démarche méthodologique en télédétection et SIG : notions élémentaires, capteurs et images satellites, application pour le suivi de la sécheresse dans notre région d'étude.....72

3.1 Principe de la télédétection pour le suivi des états du couvert végétal..... 73

3.2 Observation spatiale d'un capteur satellite : fonctionnement, caractéristiques spatio-temporelle dans le rayonnement solaire 75

3.3 Prétraitement des images acquises par les capteurs satellitaires 78

3.4 Caractéristiques des capteurs satellites..... 81

Chapitre 4 : Mise en évidence et suivi des sécheresses observées en plaine de la Beqaa entre 2001 et 2015 : la donnée de végétation 102

4.1 Suivi de l'intensité de la sécheresse selon la condition de la végétation en plaine de la Beqaa 103

4.2	Suivi de la sécheresse sur un territoire agricole : Cas de la Beqaa centrale	113
4.3	Suivi de l'intensité de la sécheresse sur les principales cultures de la région d'étude	121
4.4	Lien entre apports pluviométriques et sévérité de la sécheresse	129
Partie 3 - La sécheresse analysée sous son aspect social		134
Chapitre 5 : Un changement d'échelle pour identifier la sécheresse dans un milieu agricole : quel phénomène et quelle perception ?		135
5.1	Méthodologie de réalisation des enquêtes	136
5.2	Le terrain de réalisation des enquêtes.....	141
5.3	L'agriculture sur le terrain d'étude.....	150
5.4	La sécheresse vécue et perçue par les agriculteurs : origines et impacts.....	157
5.5	Les stratégies d'adaptations utilisées par les agriculteurs interviewés.....	166
Chapitre 6 : Vers une gestion adaptée de la ressource hydrique par le croisement entre données physiques et sociales		178
6.1	La sécheresse, entre perception des agriculteurs et données satellitaires.....	179
6.2	La sécheresse, analyse croisée entre apports pluviométriques et ressenti des agriculteurs.....	183
6.3	Comparaison spatiale de la sécheresse	189
6.4	Gestion et planification de l'irrigation	195
6.5	Modèle d'élaboration du rendement des cultures.....	198
6.6	Stratégies d'adaptation préconisées pour les systèmes agricoles peu irrigués	198
6.7	Adaptation de la pomme de terre à la pénurie d'eau: Irrigation Gestion et renforcement de la tolérance à la sécheresse	203
Conclusion et perspectives.....		210
Références bibliographiques.....		215
Liste des figures.....		239
Liste des tableaux.....		244
Liste des photographies.....		246
Liste des Annexes.....		247
Table des matières.....		261

Thierry Tarek NASSER

Evolution et impact de la sécheresse sur une région agricole.
Cas de la plaine irriguée de la Beqaa

Résumé : La plaine intérieure de la Beqaa est considérée comme le grenier agricole du Liban. Dans cette région, la sécheresse représente une problématique majeure, qu'elle soit d'origine climatique ou due à une gestion mal conduite de la ressource. Ce travail s'intéresse à la sécheresse agricole dans la région semi-aride de la plaine de la Beqaa. Afin de suivre l'évolution de son intensité, on a utilisé principalement les méthodes de la télédétection. Les années les plus sèches ont été repérées à partir d'un indicateur de sécheresse, Vegetation Health Index (VHI), combinant un indicateur de végétation et de température, issue du capteur satellitaire MODIS. Cette méthode de travail a permis d'observer la variation de l'intensité de la sécheresse sur le territoire agricole. L'intensité de la sécheresse variait considérablement dans le temps et dans l'espace. Des épisodes de sécheresses exceptionnelles ont été détectés, avec un quart de la superficie agricole touchée par une sécheresse sévère. Par conséquent, il existe un lien entre l'index de la sécheresse agricole (VHI) calculé et la pluviométrie, mais ceci n'apparaît pas directement sur son intensité dans la zone agricole.

Ensuite, le travail sur le terrain a permis d'identifier deux types de sécheresse : habituelle et occasionnelle.

En conclusion, la sécheresse agricole représente un phénomène qui est plutôt récurrent dans la plaine de la Beqaa, variable en intensité selon les lieux et qui pourrait s'aggraver si elle combinée à un changement climatique.

Mots clés : Beqaa, sécheresse agricole, télédétection, VHI

Evolution and impact of drought on an agricultural region.
Case of the irrigated plain of Beqaa

Abstract : The interior plain of Beqaa is regarded as the bread basket of Lebanon. The drought is one of the major problems, whether of climatic origin or due to poor management of the resource. This work focuses on agricultural drought and the link with meteorological drought in the semi-arid region of the Beqaa plain.

In order to follow the evolution of the intensity of agricultural drought, the methods of remote sensing was applied.

An indicator of drought, Vegetation Health Index (VHI), was computed from a measurement of vegetation and temperature obtained using the MODIS satellite sensor, allowing us to determine the driest years. This method was applied in order to understand the variation of the drought intensity on the agricultural territory. The intensity of drought varied considerably in time and space. An exceptional year of drought was detected, with a quarter of the agricultural surface, including the agricultural zones privileged in irrigation, affected by a severe drought.

Subsequently, there is a link between the calculated drought index (VHI) and the rainfall, but this does not appear directly on its intensity in the agricultural zone.

In conclusion, the drought is an ongoing phenomenon in the plain of Beqaa, variable in intensity and which could worsen if combined with climate change.

Keywords: Beqaa, agricultural drought, remote sensing, VHI