
**SUIVI DU ROMARIN DANS LA PROVINCE DE JERADA AU MAROC :
CARTOGRAPHIE À PARTIR DE DONNÉES SECONDAIRES ET EXPLORATION
DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE POUR L'ESTIMATION DE**

Auteur : Masure, Marion

Promoteur(s) : Tychon, Bernard

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée pays en développement

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5728>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Royaume du Maroc



Haut Commissariat aux Eaux et Forêts
et à la Lutte Contre la Désertification

ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**SUIVI DU ROMARIN DANS LA PROVINCE DE JERADA AU MAROC :
CARTOGRAPHIE À PARTIR DE DONNÉES SECONDAIRES ET EXPLORATION DE LA
COUVERTURE VÉGÉTALE POUR L'ESTIMATION DE LA PHYTOMASSE**

MARION MASURE

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT À FINALITÉ PAYS EN
DÉVELOPPEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : M. BERNARD TYCHON

*Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'**Université de Liège**, représentée par le promoteur membre du personnel enseignant de l'ULg*

Le présent document n'engage que son auteur.
Auteure du présent document : MASURE Marion
marion.masure@laposte.net

ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**SUIVI DU ROMARIN DANS LA PROVINCE DE JERADA AU MAROC :
CARTOGRAPHIE À PARTIR DE DONNÉES SECONDAIRES ET EXPLORATION DE LA
COUVERTURE VÉGÉTALE POUR L'ESTIMATION DE LA PHYTOMASSE**

MARION MASURE

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT À FINALITÉ PAYS EN
DÉVELOPPEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : M. BERNARD TYCHON

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à exprimer ma reconnaissance à Bernard Tychon, promoteur de ce mémoire, pour son encadrement, son implication et ses bons conseils.

Je remercie également Antoine Denis pour sa disponibilité, son intérêt et la pertinence de ses observations.

Merci au personnel de la Direction Régional des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de l'Oriental pour leur accueil et leur réactivité. Un grand merci à Mohammed Karimi pour ses conseils, ses encouragements et pour m'avoir mis à disposition les ressources nécessaires.

Je souhaite remercier mes amis et camarades d'étude, notamment Alix et Carleta pour leur bonne humeur et leur énergie positive, Firmin et Joseph pour leur présence, leurs encouragements et leur sagesse. Un énorme merci à mes partenaires de danse pour les rires, les moments d'évasion et m'avoir remonté le moral quand j'en avais besoin, notamment Jean-François, Marc-Olivier, Sean, Ayman et Adrien. Merci à Hadrien pour ses commentaires.

Enfin, j'exprime ma gratitude envers ma famille pour leur soutien sans faille.

RESUME

Mots-clés : romarin, classification de la végétation, SENTINEL-2, modèle allométrique, estimation de phytomasse, couverture végétale, photographie au nadir

La télédétection et les techniques d'analyse d'image deviennent incontournables dans les questions de cartographie et d'estimations de phytomasse de part leur flexibilité, leur coût et les informations qu'elles fournissent. Les méthodes employées actuellement par les Eaux et Forêts dans ces domaines exigent beaucoup de ressources. Ce travail réalisé dans le cadre de la coopération belgo-marocaine a donc proposé une méthodologie de cartographie du romarin à partir d'images satellites de 10 m de résolution et d'une carte de peuplement au 1/25 000 dans la province de Jerada. Loin d'être optimaux, les résultats soulignent le besoin d'accorder les résolutions des données utilisées et d'en améliorer la résolution spatiale et spectrale. L'autre objectif était d'étudier l'apport de la variable couverture végétale dans des modèles d'estimation de phytomasse de romarin grâce à l'échantillonnage de 134 touffes dans la province de Jerada. Cette variable a été obtenue à travers l'analyse de photographies prises au nadir avec le logiciel CAN-EYE. Si la couverture végétale des touffes de romarin permet d'expliquer 87 % de la phytomasse récoltable par touffe dans des modèles simples, linéaire et non-linéaire, avec des erreurs types de 164,70 et 166,39 g, l'analyse des photos doit encore être automatisée pour pouvoir répondre aux besoins de l'administration des Eaux et Forêts.

ABSTRACT

Key words : rosemary, vegetation classification, SENTINEL-2, allometric model, phytomass estimation, crown cover, nadir photography

Remote sensing and image analysis are becoming major techniques in cartography and phytomass estimations due to their flexibility, their cost and the information they provide. The methods used by the Water and Forests administration at present are resource-intensive. Realized within the framework of Belgian-Moroccan cooperation, this work thus proposed a methodology to map rosemary from 10 m satellite images and a 1/25 000 vegetation map within the province of Jerada. Far from optimal, these results underline the need to match the spatial resolution of the data used and to use data with higher spatial and spectral resolutions. The other objective was to study the variable crown cover in models estimating the phytomass of rosemary thanks to data collected on 134 bushes in the province of Jerada. This image-derived variable was obtained from the analysis of nadir-photographs with CAN-EYE software. If the crown cover of rosemary bushes explains 87 % of the exploitable phytomass of a single bush in simple models, linear or not, with standard errors between 164,70 and 166,39 g, this image-analysis still has to be automated to meet the needs of the Water and Forests administration.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1 MISE EN CONTEXTE.....	4
1.1 Rôle de l'état dans le secteur des PAM et présentation de la Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de l'Oriental	4
1.2 Géographie de la région de l'Oriental et caractéristiques de la zone d'étude	7
1.3 Caractéristiques de <i>Rosmarinus officinalis</i> dans l'Oriental	10
1.4 Exploitation du romarin : de l'allocation des lots à la gestion par les coopératives. 13	
1.5 Valorisation de <i>Rosmarinus officinalis</i>	17
1.6 État des nappes de romarin et pressions sur la ressource.....	19
2 OBJECTIFS ET PROBLÉMATIQUES.....	23
2.1 Cartographie des nappes de romarin.....	23
2.2 Estimation de la phytomasse de romarin par la couverture végétale	24
3 REVUE DE LITTÉRATURE.....	26
3.1 Cartographie du romarin	26
3.2 Estimation de la biomasse aérienne.....	27
4 MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	30
4.1 Cartographie du romarin selon la carte des peuplements simplifiés	30
4.1.1 Méthodologie	30
4.1.2 Données utilisées	31
4.1.3 Logiciels utilisés	33
4.2 Exploration d'une nouvelle variable pour l'estimation de phytomasse de romarin 33	
4.2.1 Méthodologie	34
4.2.2 Données utilisées	35
4.2.3 Logiciels et matériel utilisés	37

5	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	38
5.1	Cartographie des nappes de romarin.....	38
5.2	Estimation de la phytomasse de romarin par la couverture végétale	42
5.2.1	Caractéristiques des variables étudiées.....	43
5.2.2	Modèles allométriques d'estimation de phytomasse de romarin.....	44
	CONCLUSION	51
	RÉFÉRENCES	53
	ANNEXE 1 – ORGANIGRAMME DE LA DREFO	57
	ANNEXE 2 – VÉGÉTATION ANNUELLE RENCONTRÉE LORS DES SORTIES TERRAIN.....	58
	ANNEXE 3 – DISTRIBUTION DES VARIABLES INVENTORIÉES SUR LES 134 TOUFFES DE ROMARIN SELON LA CATÉGORIE.....	60

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX, CARTES ET PHOTOS

Figure 1-1 Évolution des exportations de feuilles de romarin	18
Figure 1-2 Évolution des exportations d'HE de romarin.....	19
Figure 1-3 Degré de lignification des nappes étudiées	22
Figure 4-1 Images satellites SENTINEL-2 de la zone d'étude, 6 avril 2017 (gauche) 14 août 2017 (droite).....	32
Figure 4-2 Analyse de la couverture végétale des photos prises au nadir (touffes G1 à G6)..	36
Figure 5-1 Résultats de la classification supervisée pour avril (gauche) et août (droite) 2017.	39
Figure 5-2 Séparabilité des classes pour la classification de l'image d'avril 2017 (haut) et d'août 2017 (bas)	41
Figure 5-3 Modèle linéaire à 3 variables : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de calibration)	45
Figure 5-4 Profileur de prévision : plus la droite d'une variable est inclinée, plus son impact sur la variable à expliquer est fort	45
Figure 5-5 Modèle linéaire à 3 variables : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de validation).....	46
Figure 5-6 Modèle linéaire à 1 variable : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de calibration)	46
Figure 5-7 Modèle linéaire à 1 variable : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de validation).....	47
Figure 5-8 Relation entre le poids et le diamètre moyen (haut) ou la couverture végétale (bas) selon une fonction puissance (données de calibration).....	47
Figure 5-9 Modèle de puissance à 1 variable : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de calibration), selon la variable diamètre moyen (haut) et couverture végétale (bas)	48
Figure 5-10 Modèle de puissance à 1 variable : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de validation), selon la variable diamètre moyen (haut) et couverture végétale (bas)	49
 Tableau 1-1 Coopératives concernées par l'étude portant sur l'évaluation de l'état des nappes de romarin	 22

Tableau 3-1 Répartition des touffes par catégorie	29
Tableau 5-1 Matrice de confusion associée à la classification de l'image d'avril 2017	40
Tableau 5-2 Matrice de confusion associée à la classification de l'image d'août 2017	40
Tableau 5-3 Moyenne et étendue des variables inventoriées sur les 134 touffes de romarin, dans chaque canton et globalement.....	43
Tableau 5-4 Sélection de modèles linéaires générés par JMP.....	44
Carte 1-1 Provinces de l'Oriental au Maroc	7
Carte 1-2 Cantons des zones étudiées	9
Carte 1-3 Aire de répartition des faciès à romarin concernés par l'IG, par commune rurale .	13
Carte 1-4 État d'aménagement des faciès à romarin dans la région de l'Oriental.....	20
Carte 4-1 Carte des peuplements simplifiés	33
Carte 4-2 Carte d'échantillonnage des touffes de romarin	35
Photo 1-1 Type de paysages observés dans la forêt de Béni Yaâla (est) et le canton de Guefait (respectivement haut et bas)	10
Photo 1-2 Fruit du romarin : tétrakène.....	10
Photo 1-3 Fleurs de romarin	11
Photo 1-4 Squelette ligneux de romarin : dégâts de la chrysomèle	12
Photo 1-5 Fleur de <i>Cistus libanitus</i> ou faux romarin.....	12
Photo 1-6 Stockage des feuilles de romarin tamisées à la coopérative	15
Photo 1-7 De gauche à droite : séchoir, tamiseur et cuve à distillation	16
Photo 1-8 Récolte des parties lignifiées du romarin.....	18
Photo 1-9 Grandes touffes en cours de lignification (absence de feuilles à la base des branches).....	20
Photo 4-1 Coupe de romarin (phytomasse récoltable)	35
Photo 5-1 Différence d'illumination entre deux photos (grandes touffes)	43

SIGLES ET ABBREVIATIONS

µm	micromètre
BVE	biomasse verte exploitable
CCDRF	Centres de Conservation et de Développement des Ressources Forestières
CV	couverture végétale
D	diamètre
dhs	dirhams
DREFO	Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la lutte Contre la Désertification
E&F	Eaux et Forêts
FNF	Fonds Nationale Forestier
H	hauteur
HCEFLCD	Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification
HE	huile essentielle
IG	indication géographique
Jo	<i>Juniperus oxycedrus</i> (oxycèdre)
L	lignifiée
m	mètre
MF	masse foliaire
ML	moyennement lignifiée
NDVI	normalized difference vegetation index (indice de végétation par différence normalisée)
NL	non lignifiée
nm	nanomètre
PAM	plantes aromatiques et médicinales
SEAP	Service des Études, des Aménagements et de la Planification
SIG	Systèmes d'information géographique
St	<i>Stipa tenacissima</i> (alfa)
Ta	<i>Tetraclinis articulata</i> (thuya)
ULg	Université de Liège

INTRODUCTION

Le Maroc est le 12^{ème} exportateur mondial de plantes aromatiques et médicinales (PAM). La production nationale repose à plus de 90 % sur la cueillette de plantes spontanées, dont les principales sont le thym, le romarin, le caroubier, l'armoise et le laurier sauce. Cette filière représente donc des enjeux socio-économiques importants pour le pays, à tel point qu'elle a été intégrée dans le Plan Maroc Vert (2008) qui « vise à faire de l'agriculture un des moteurs de croissance de l'économie nationale », et dont l'un des piliers vise le « développement agressif d'une agriculture à haute valeur ajoutée » en partie tournée vers l'exportation (Inter-réseaux Développement rural, 2016). Le Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD), chargé d'élaborer et de mettre en œuvre la politique du gouvernement notamment dans le domaine du développement durable des ressources forestières dans les terrains soumis au régime forestier, a ainsi traduit cette politique gouvernementale en une stratégie de développement de la filière des PAM en 2009. (Fellah Trade, s. d.) Le romarin, représentant 63 % du volume des exportations marocaines de PAM (Jacob, 2017, 5 avril), a une importance non négligeable dans le paysage forestier du Maroc, et notamment dans la région de l'Oriental, qui produit 60 % du romarin national. Poussant spontanément sur presque 500 000 ha du domaine forestier domanial de cette région, c'est la Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de l'Oriental (DREFO) qui est responsable de son administration. Exploité depuis 1960 par des sociétés et des exploitants après l'achat de droit de récolte lors d'adjudications publiques, la valorisation du romarin peut également être effectuée par des coopératives via une entente directe avec l'administration des Eaux et Forêts depuis 2006. Cette gestion participative est privilégiée dans la mesure du possible puisqu'elle participe au développement et à la création de richesse locale.

Aujourd'hui, les coopératives font partie des principaux acteurs de la filière des PAM. Dans l'Oriental, 19 coopératives gèrent le romarin sur presque 200 000 ha. Or, celles-ci manquent d'organisation, de formation et d'équipement puisque la qualité des produits pourraient être améliorée et les bonnes pratiques ne seraient pas toujours respectées. Les contestations récurrentes des estimations de phytomasse de romarin par des coopératives, impactant le calcul des redevances et taxes à verser, ont mené la DREFO à vouloir améliorer la précision de son système de gestion actuel en se basant notamment sur les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection. Cet objectif global a résulté en la

signature d'une coopération bilatérale directe entre la DREFO et le Département Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège (ULg) en 2017 pour une période de 5 ans. Dans ce cadre, un stage a été effectué de mars à mai 2018, dont ce travail de fin d'étude est la continuité.

Les objectifs de ce travail sont de cartographier les nappes de romarin à partir de données secondaires en utilisant des images satellites Sentinel-2 (résolution 10 m) disponibles gratuitement dans les cantons de Béni Yaâla, Guefait et Lebkhata Est (province de Jerada) et d'explorer la variable couverture végétale pour l'estimation de phytomasse de romarin, à partir d'échantillonnage dans les cantons de Béni Yaâla et de Lebkhata Ouest. Pour la poursuite du premier objectif, il a fallu obtenir des images satellites corrigées pour des périodes pertinentes et simplifier la carte des peuplements disponible, de manière à obtenir des faciès correspondant aux classes voulues lors de la classification. Des zones d'intérêts sélectionnées selon les faciès de la carte ont permis la classification supervisée des images satellites selon la méthode du maximum de vraisemblance (maximum likelihood). La matrice de confusion permet de contrôler l'accord entre la classification des images satellites et la carte des peuplements et la séparabilité des classes est également vérifiée en se basant sur l'indice de Jeffries-Matusita. Le deuxième objectif a nécessité un échantillonnage aléatoire de touffes de romarin pour relever 3 variables morphométriques usuelles : petit et grand diamètre et hauteur dominante, prendre une photo à la verticale et peser la phytomasse récoltable de chaque touffe. Les photos ont été analysées grâce au logiciel CAN-EYE pour obtenir la couverture végétale. Cette variable, ainsi que les 3 précédentes et le diamètre moyen (calculé) ont servi d'entrées pour des modèles dans JMP afin d'expliquer la phytomasse. La sélection des modèles s'est faite grâce au coefficient de détermination et à l'erreur type notamment. Les données ont été séparées en deux sets de valeur afin de valider les modèles calibrés et sélectionnés.

Les sources utilisées proviennent majoritairement de la DREFO et d'autres institutions marocaines. Le travail a aussi fait appel à des articles scientifiques pour alimenter la revue de littérature liée au sujet.

Ce mémoire s'organise en cinq parties. La première présente le contexte du travail et les éléments importants à sa compréhension. Ensuite, les objectifs poursuivis et les problématiques liées sont expliqués. Le troisième chapitre s'intéresse aux études déjà effectuées par la communauté scientifique et qui sont pertinentes pour le présent travail.

Les matériels et méthodes constituent la quatrième partie. La dernière partie présente les résultats obtenus pour les deux objectifs et ouvre la discussion quant aux limites rencontrées, aux perspectives rendues possible et aux nouveaux obstacles à franchir. La conclusion clôture ce travail en rappelant les éléments les plus importants.

1 MISE EN CONTEXTE

Ce travail fait suite à un stage auprès de la Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de l'Oriental et son intérêt réside de manière générale dans une meilleure gestion de la ressource en romarin de la région de l'Oriental, en utilisant les techniques de télédétection.

Cette section sert ainsi à poser les bases nécessaires à la compréhension des besoins de la DREFO à ce sujet. Pour cela, le rôle de l'état ainsi que la structure de l'organisme d'accueil sont présentés, tout comme la région et la zone d'étude. Les caractéristiques de la ressource étudiée, le romarin, sont exposées afin de comprendre sa dynamique; et l'ensemble de la chaîne de valeur est reprise : de l'acquisition des droits d'exploitation à la vente. Enfin, l'état de la nappe de romarin met fin à cette section.

1.1 Rôle de l'état dans le secteur des PAM et présentation de la Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de l'Oriental

La Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de l'Oriental, créée en mars 2009, répond au Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. Celui-ci, actuellement sous tutelle du Ministère de l'Agriculture, a subi plusieurs restructurations : d'abord une administration du même Ministère, elle est devenue le Ministère chargé des Eaux et Forêts relevant du Ministère de l'Agriculture, puis le Haut Commissariat des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification affilié au Premier Ministre.

Une des missions du HCEFLCD est d'administrer le domaine forestier de l'État ainsi que les autres biens soumis au régime forestier (dahir du 10 octobre 1917 sur la conservation et l'exploitation des forêts). Alors qu'avant les années 2000 le secteur des plantes aromatiques et médicinales ne soulève que peu d'intérêt, il est mis de l'avant par l'état dans son Plan Maroc Vert en 2008 de par son potentiel de lutte contre la pauvreté rurale (revenus complémentaires) et dont un des objectifs est d'agréger les producteurs (coopératives) (Inter-réseaux Développement rural, 2016). En 2009, le HCEFLCD lance donc la stratégie nationale de développement de la filière des PAM basée entre autres sur :

- l'optimisation de la production et de la commercialisation en vue d'une meilleure valorisation des PAM marocaines et
- la promotion des populations locales, la préservation et la gestion durable de la ressource.

Ce secteur est en effet plus rémunérateur que celui sylvicole (Iharchine, conversation, 18 mai 2018). Le Haut Commissariat favorise donc la formation de coopératives pour que les communautés rurales profitent financièrement de ces ressources naturelles, tout en passant « d'un secteur fournisseur de matières premières non transformées à un véritable secteur industriel, offrant des gammes de produits de qualité, à forte valeur ajoutée, destinés aussi bien au marché local qu'au marché international. », tel qu'il a été recommandé dans l'étude de la filière de romarin dans la région de l'Oriental menée par la DREFO en 2012. Pour assurer ses missions et l'exécution des plans et programmes d'action avec efficacité, le Haut Commissariat s'est doté de services déconcentrés lors de sa restructuration en 2009 (HCEFLCD, 2009). On compte ainsi 12 Directions Régionales des Eaux et Forêts et de Lutte Contre la Désertification au Maroc qui ont pour objectif d'organiser, de coordonner et de mettre en œuvre les missions du HCEFLCD sur leur territoire respectif. Elles peuvent compter elles-mêmes sur un réseau de Directions Provinciales. On trouve finalement les centres de conservation et de développement des ressources forestières (CCDRF) et les postes de secteur forestier à l'échelle plus locale, tenus par les chefs de secteur.

La DREFO s'est donc appropriée cette vision consistant à faire profiter la population au premier plan des revenus des PAM, ici le romarin, en mettant en place une gestion participative basée sur des coopératives. Ce secteur des PAM est d'autant plus intéressant qu'il est créateur d'emplois en milieu rural et profite des ressources naturelles qui poussent spontanément. Au niveau environnemental, la terre est donc épargnée d'éventuels produits phytosanitaires et dans les zones concernées, certaines PAM jouent un rôle de lutte contre la désertification.

Le directeur de la DREFO est M. Mohammed Bennani Baïti. Le service d'accueil a été celui des études, des aménagements et de la planification (SEAP), dirigé par M. Mohammed Karimi depuis 8 ans, également encadrant du stage. Ingénieur en agronomie, il a d'abord été chef de laboratoire en phytopathologie au Haut Commissariat à Rabat. Il a effectué un doctorat en écologie et présenté sa thèse sur les plantes aromatiques et médicinales du Maroc Oriental en 2014, en explorant plus particulièrement les aspects de phytoécologie, d'éthnobotanique, de modélisation et de phytochimie.

Le SEAP présente les attributions suivantes :

- Préparation et suivi des études de planification (études d'aménagement des forêts et des bassins versants);
- Élaboration des dossiers techniques, des projets de développement forestier et de lutte contre la désertification;
- Établissement des études de définition des programmes du HCEFLCD (conservation des eaux et des sols, reboisement, exploitation, dispositifs expérimentaux, etc) et
- Appui à la mise en œuvre et suivi des projets et des contrats-programmes du HCEFLCD.

En ce qui nous concerne plus précisément, la réalisation des plans d'aménagement et de gestion par le SEAP consiste en trois points :

- connaître le potentiel productif du domaine concerné;
- connaître les contraintes de ce domaine et
- élaborer un scénario d'aménagement.

Ce dernier point regroupe un ensemble d'actions réparties dans le temps et l'espace selon les typologies suivantes :

- actions de conservations, comme le reboisement, la régénération assistée ou la mise en défens;
- actions de valorisation et de développement, généralement la conduite sylvicole ou la régénération des vieilles touffes de romarin;
- actions d'accès à l'espace par l'ouverture et la réhabilitation de pistes et
- actions génératrices de revenus telles la distribution de ruches, la création de points d'eau ou l'assistance à la constitution des coopératives. (Iharchine, conversation, 18 mai 2018)

Les autres services de la DREFO sont les suivants :

- Services des Ressources Humaines et des Affaires Générales;
- Service du Partenariat pour la Conservation et le Développement des Ressources Naturelles;
- Service de la Programmation, de la Valorisation et de l'Évaluation et
- Centre Technique pour le Suivi du Phénomène de la Désertification.

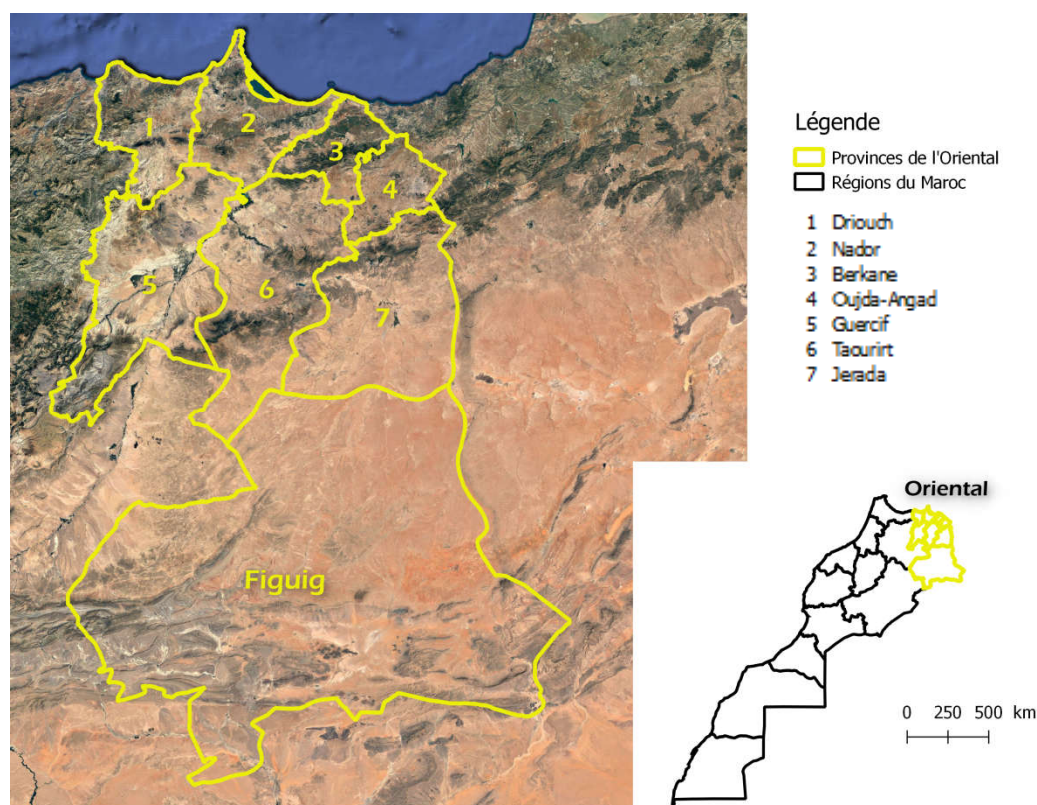
Un organigramme de la structure est disponible en annexe 1.

Il faut finalement mentionner la convention de coopération signée avec l'Université de Liège depuis 2014, cadre dans lequel s'est effectué ce stage. D'une durée de 5 ans, cette convention a été reconduite pour une nouvelle période et porte notamment sur la

formation, le transfert de connaissances et la mise en œuvre de projets communs de recherche et développement. Les domaines visés par la convention sont la gestion environnementale et la préservation des ressources naturelles; la lutte contre la désertification; la modélisation de la relation eau-sol-plante-atmosphère et la télédétection et les SIG.

1.2 Géographie de la région de l'Oriental et caractéristiques de la zone d'étude

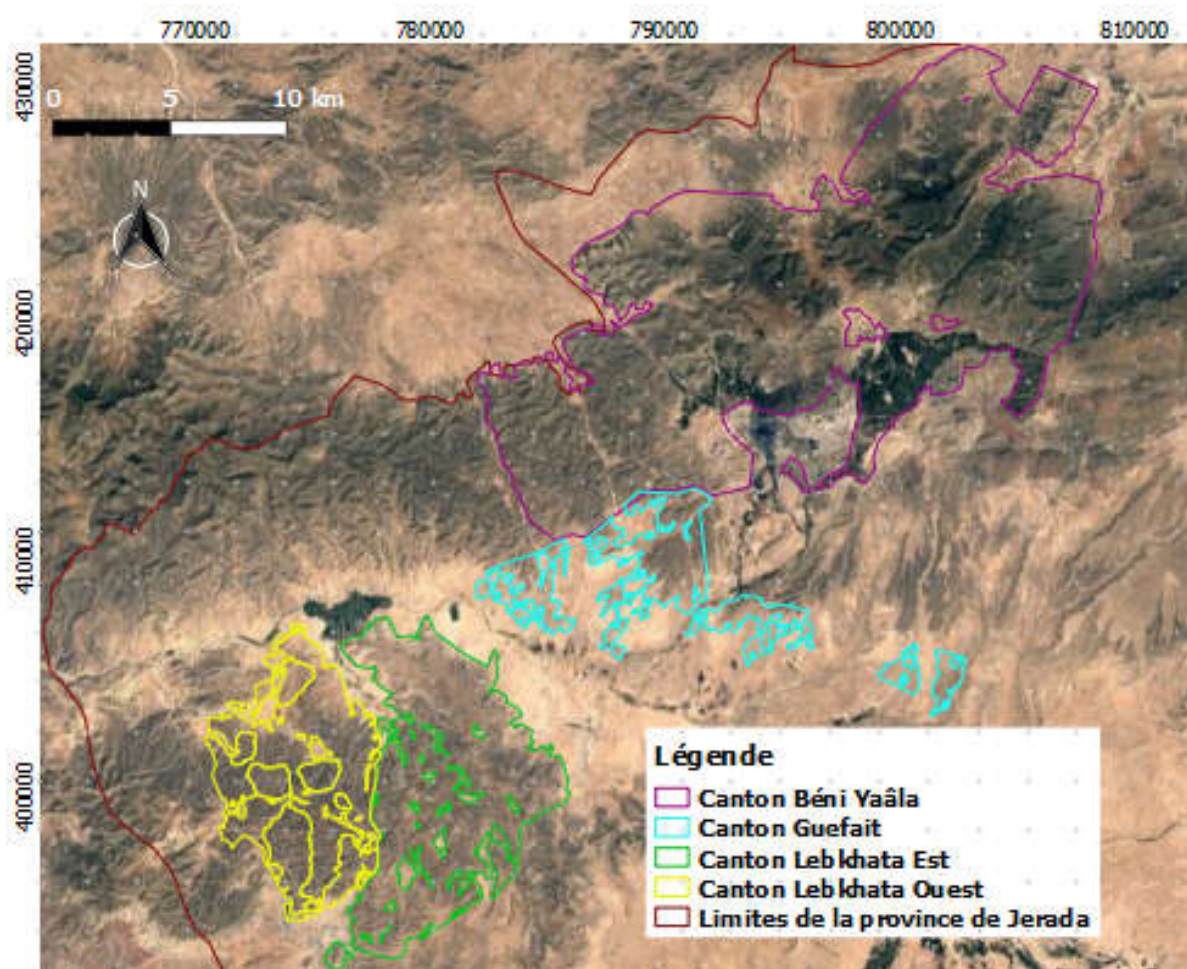
La région de l'Oriental est la deuxième plus grande région du royaume du Maroc avec 90 130 km² (12,7 %) et se compose d'une préfecture : Oujda-Angad et de 7 provinces : Berkane, Driouch, Figuig, Guercif, Jerada, Nador et Taourirt (Carte 1-1). Peuplée par 2,314 millions d'habitants, la densité moyenne est de 25,7 habitants/km², tirée vers le bas par la province de Figuig (2,5 hab/km²). (Haut Commissariat au Plan, 2016a) Le taux de chômage y est le plus élevé au Maroc avec 15,7 % de la population de plus de 15 ans (Haut Commissariat au Plan, 2016b).



Carte 1-1 Provinces de l'Oriental au Maroc (fond : Google Satellite, auteure : Masure)

Bordée par la mer méditerranée au nord, on trouve donc un climat maritime, qui laisse place à un climat continental dans les terres. Cette situation, ainsi que les reliefs (Rif, chaîne des Béni Snassen et chaîne des Horsts, Moyen et Haut Atlas), influencent les précipitations qui s'échelonnent de 90 à 650 mm/an, définissant ainsi des climats de type saharien, aride, semi-aride et sub-humide. Si la région se caractérise par un substrat calcaire, les types de sols sont plus diversifiés : rouge et fersialitique en altitude, jusqu'aux sols peu évolués d'apport alluvial et minéraux bruts. (EWI-MAROC/EWI-ZURICH, s. d.)

Les 9/10 de la région, notamment les hauts plateaux, sont considérés comme domaines pastoraux : caillouteux, c'est une des rares exploitations qui s'en accommodent. Cependant, la sur-utilisation (parcours) pose ponctuellement des problèmes au niveau de la dégradation des écosystèmes. (Direction Régionale d'Oujda, 2012) Les formations végétales de la région de l'Oriental sont dominées par les nappes alfatières (plus de deux millions d'hectares), les nappes de romarin (500 000 ha), la chênaie verte (140 362 ha) et la tétraclinaie (forêts de thuya, 116 000 ha). La richesse en espèces végétales, dont quelques 500 espèces de PAM, témoigne de la variété des climats et des paysages rencontrés. (Karimi, 2014). Si le potentiel de développement des PAM est bien présent dans la région de l'Oriental, seul le romarin y est pour l'instant exploité à l'échelle industrielle, tel que la région contribue à plus de 60 % à la production nationale. La province de Jerada plus particulièrement, où se situe la zone étudiée, concentre 13 % des ressources en romarin de l'Oriental. Cette zone recouvre la forêt de Béni Yaâla et une partie des cantons de Guefait, de Lebkhata Est et de Lebkhata Ouest (Carte 1-2).



Carte 1-2 Cantons des zones étudiées (fond : Google Satellite, projection : EPSG 26191, coordonnées décimales, auteure : Masure)

La forêt de Béni Yaâla se trouve sur la chaîne des Horsts, caractérisée par des sols généralement rouges méditerranéens et calcimagnésiques alors que les cantons de Guefait et Lebkhata se situent sur les Hauts Plateaux, présentant des sols sur une croûte calcaire. Dans les deux cas, ce sont des sols rocailleux. La gamme d'altitudes varie de 760 à 1660 mètres, où les altitudes supérieures à 1200 mètres sont retrouvées dans la forêt de Béni Yaâla. D'ailleurs, si cette dernière est dominée par des formations forestières variées (genévrier oxycèdre – *Juniperus oxycedrus*, thuya – *Tetraclinis articulata*, chêne vert – *Quercus rotundifolia*), les cantons de Guefait et de Lebkhata présentent davantage un paysage steppique, dominé par l'alfa (*Stipa tenacissima*) (Photo 1-1). Selon les stations météorologiques de Guefait et de Jerada, les précipitations annuelles moyennes fluctuent entre 278 et 339 mm tandis qu'on retrouve des températures moyennes minimales de 1 °C en hiver et de 31,1 °C en été (données de 1982 à 2012). Mises en relation dans un diagramme ombro-thermique, ces informations indiquent une saison sèche de presque 6



Photo 1-1 Type de paysages observés dans la forêt de Béni Yaâla (est) et le canton de Guefait (respectivement haut et bas)

mois selon la méthode de Bagnouls et Gaussen (un mois est considéré sec lorsque la totalité des précipitations est inférieure ou égale au double de la température). (HCEFLCD, 2018) Les sols, tantôt rouges, brun clair et brun très clair, sont toujours caillouteux.

1.3 Caractéristiques de *Rosmarinus officinalis* dans l'Oriental

Le romarin officinal, de la famille des Lamiacées, est un arbuste aromatique méditerranéen toujours vert pouvant atteindre 2 mètres, que l'on retrouve de préférence sur des substrats



Photo 1-2 Fruit du romarin : tétrakène

calcaires bien drainés, voire caillouteux. Ses petites feuilles sont longues, sessiles, opposées, persistantes et enroulées sur les bords. Le fruit est un tétrakène (Photo 1-3), caractéristique de la plupart des Lamiacées, chaque akène contenant une graine unique de forme ovoïde qui assure la reproduction sexuée. La dissémination est réalisée par l'apesanteur (barochorie), le vent

(anémochorie), l'eau (hydrochorie) et les animaux (zoochorie). La reproduction peut également se faire de manière asexuée par le bouturage et l'éclat de touffes : c'est cette voie qui est choisie lors du repeuplement de zones dégradées, étant donné que le semis

donne de mauvais résultats. L'inflorescence, en épis très courts et avec des bractées de 1 à 2 mm, dévoile de petites fleurs entre le blanc et le bleu violacé (Photo 1-3).



Photo 1-3 Fleurs de romarin

Ces petites fleurs sont visibles de décembre à fin avril, lors de la floraison. (HCEFLCD, 2014)
La croissance peut reprendre dès février, lorsque les températures remontent mais ralentit voire s'arrête durant les périodes de forte chaleur (juillet, août). La tige est ligneuse et la partie basse défoliée gagne en hauteur avec la sénescence de la plante. Ainsi, la lignification commencerait après 10 ans sans exploitation. Si la durée de vie d'une touffe de romarin est difficile à estimer (conditions bioclimatiques et d'exploitation), elle est tout de même évaluée à 30 ans.

Le romarin se développe spontanément dans les régions subhumides et semi-arides, voire arides : en témoignent ses petites feuilles, caractère de xérophytisme. Il est ainsi retrouvé dans des forêts, des broussailles et des matorrals; notamment au Maroc dans le Moyen Atlas (provinces de Taourirt, Driouch, Guercif), le Haut-Atlas (communes de Bumerieme et Talsint) et les hauts plateaux de l'Oriental (provinces de Berkane et Jerada). (HCEFLCD, 2014)
Il est caractéristique des faciès de dégradation des tétraclinaies (forêts de thuyas), des forêts de genévriers et des chênaies vertes (Karimi, 2014).

On lui connaît un parasite, la chrysomèle *Chrysolina americana*, qui s'attaque aux feuilles des Lamiacées (dont font partie la lavande et le thym) et laisse derrière elle les squelettes



Photo 1-4 Squelette ligneux de romarin : dégâts de la chrysomèle

ligneux des brins voire de la plante entière comme sur la Photo 1-4 (Gamm vert, s. d.).

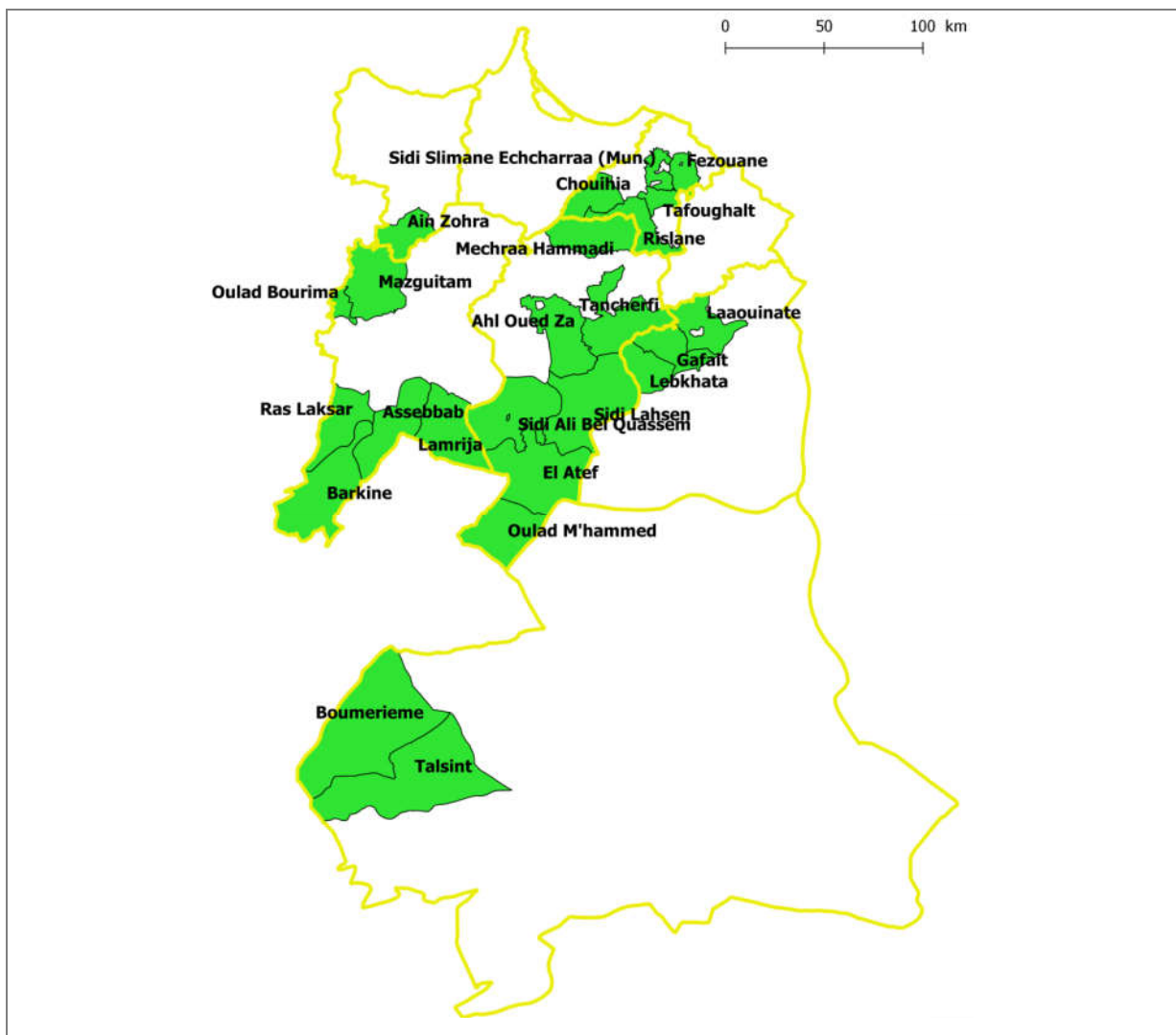
Récemment l'objet de deux indications géographiques (IG) « feuilles séchées du romarin de l'Orient » et « huile essentielle du romarin de l'Orient » dont l'aire est visible Carte 1-3, le romarin de l'Orient se caractérise en effet par le chémotype à 1,8 cinéole (ou eucalyptol) de son huile essentielle. Alors qu'on dénombre plus de 30 composés, l'eucalyptol est présent à 40-60% suivi

en général par le camphre (9-15,5 %), l'alpha-pinène (8-13%), le bêta-pinène (2-4%) et le bornéol (2,5-3 %). Il ne faut pas le confondre avec l'espèce *tournefortii* et le faux romarin *Cistus libanitus*. Contrairement à *Rosmarinus officinalis*, l'inflorescence de *Rosmarinus tournefortii* est en épis plus longs, tout comme les bractées. (HCEFLCD, 2014) De plus, l'analyse chimique de l'huile essentielle de l'espèce *tournefortii* donne le camphre comme composé majoritaire. Quant au faux romarin, la distinction se fait notamment à l'odeur (aucune) ou lors de la floraison (grande fleur blanche), bien que la feuille soit également différente (collante, plus fine) (Photo 1-5). Tandis qu'aucune occurrence de l'espèce



Photo 1-5 Fleur de *Cistus libanitus* ou faux romarin

tournefortii n'a été notée sur les zones étudiées, le faux romarin est bien présent dans certaines zones.



Carte 1-3 Aire de répartition des faciès à romarin concernés par l'IG, par commune rurale (inspirée de DREFO, 2016)

1.4 Exploitation du romarin : de l'allocation des lots à la gestion par les coopératives

Les ressources de romarin, spontanées dans la région excepté les replantations pour régénérer les nappes en situation critique, font partie du domaine forestier, d'où l'implication de la DREFO. Grâce aux actions menées par la DREFO afin d'atteindre l'objectif du HCEFLCD de valorisation participative des ressources, 19 coopératives ont été répertoriées dans l'Oriental et gèrent environ 185 000 ha avec un potentiel de phytomasse verte valorisable estimée à 29 000 t (Karimi, conversation, 16 avril 2018).

Les lots, divisés en parcelles, doivent être achetés pour pouvoir exploiter le romarin qu'ils contiennent. Les acheteurs peuvent être soit des sociétés ou des exploitants (carte d'exploitant à l'appui), qui s'inscrivent pour participer à l'adjudication publique (vente au rabais, une à deux par an) lors de laquelle sont proposés les différents lots mis en vente,

renseignés dans un cahier affiche. Le prix annoncé pour un lot est donc décroissant, mais il existe un seuil en-dessous duquel le lot sera retiré de la vente si personne ne l'acquiert.

Le prix annoncé dépend du tonnage du lot en matière fraîche (MF, feuilles et brins récoltés). Ce tonnage est estimé comme suit : un nombre minimal de 30 placettes est effectué (selon l'homogénéité/l'hétérogénéité de la zone) dans lesquelles sont renseignés principalement la densité en romarin (nombre de touffes par catégorie : petite, moyenne et grande) et le poids (une touffe représentative de chaque catégorie est coupée puis pesée). La moyenne (densité, poids) est calculée selon les placettes et ces informations sont ramenées à l'hectare. (Karimi, conversation, 4 mai 2018) Alternativement, la phytomasse de romarin exploitable est estimée par un modèle allométrique, propre à chaque site, faisant intervenir notamment le diamètre et la hauteur et éventuellement la pente (DREFO, 1996 et DREFO, 1998). La vente s'effectue normalement pour trois ans, mais elle peut être d'un an s'il y a un désir qu'une coopérative s'installe. L'acquisition d'un lot par celle-ci se fait par une entente directe ou un contrat de partenariat entre elle et la DREFO. L'initiative revient à la coopérative qui se manifeste soit auprès du chef de secteur, soit auprès de la direction provinciale. Dans tous les cas, la décision revient à la DREFO. Le prix à la tonne du lot renseigné lors d'une entente ou d'un contrat de partenariat est une moyenne des adjudications passées.

En plus du prix du lot, la coopérative doit s'acquitter d'une redevance annuelle calculée sur la valeur de la phytomasse annuellement récoltable, dont le prix est revu chaque année, et dont 80 % revient à la commune rurale et 20 % au fonds national forestier (FNF). Cette somme doit être réglée en deux fois : avant le 30 juin et avant le 30 octobre, afin de pouvoir suspendre le droit de récolte avant la fin de la campagne si ce n'est pas fait. Finalement, en plus des droits d'enregistrement et de timbrage du contrat de cession, il faut ajouter les taxes suivantes, calculées sur la redevance annuelle :

- la taxe FNF, à hauteur de 20 %,
- la taxe de mise en charge, variable, et
- la taxe sur la vente des produits forestiers de 10 %.

Ces obligations financières, reprises dans un contrat, s'accompagnent de conditions d'exploitation telles que :

- respecter la mise en repos des parcelles pour la régénération (coupe triennale),

- couper avec un sécateur ou une faucille bien aiguisée pour éviter d'endommager les touffes,
- couper jusqu'à 50 % maximum de la touffe,
- ne pas couper le romarin à proximité des habitations et des douars et
- couper l'ensemble des touffes sur la parcelle, y compris les vieilles touffes (dans ce cas coupe de rajeunissement à 10 cm du sol). Les vieilles touffes ont un tronc lignifié et une masse foliaire apparente inférieure à 50 % du volume global de la couronne de la touffe (HCEFLCD, 2017).

Finalement, surveillance et gardiennage du lot doivent être exécutés (payés par les coopératives), la coopérative étant tenue responsable des délits, infractions et anomalies constatées à l'intérieur et à proximité du lot cédé.

La collecte du romarin est autorisée du 1er mai au 30 novembre. Les coopératives procèdent ensuite à une première transformation des matières premières selon les équipements et les moyens dont elles disposent. (Zrira, s. d.) L'écoulement des produits nécessite un permis de l'administration (DREFO), délivré sur le tonnage (en prenant pour base 1000 t récoltées donnant 1/3 de feuilles séchées), afin d'effectuer un suivi. Ces permis sont demandés tout au long de la saison de coupe pour permettre une sortie progressive des produits. Le forestier effectue des tournées régulières et vérifie à la fin la concordance entre la quantité exploitable estimée et les sorties de produits. Si ces quantités sont proches, on garde l'estimation initiale sinon celle-ci est recalculée. Dans tous les cas, le forestier du secteur fait une sortie de récolement à la fin de la saison pour vérifier l'état de la parcelle et le respect des bonnes pratiques.



Photo 1-6 Stockage des feuilles de romarin tamisées à la coopérative

Une fois coupés, les produits issus de la coupe sont en général séchés à l'air libre sur le lieu de récolte, souvent en plein soleil, pendant 3 à 4 jours. La matière est ensuite battue pour séparer les feuilles des poussières et des rameaux, puis tamisée et nettoyée (gros débris). (HCEFLCD, 2013) Les feuilles sont alors emballées dans des sacs en polypropylène et envoyées à la coopérative dont les cueilleurs dépendent (Photo 1-6). Les produits commercialisés par les coopératives restent les feuilles séchées. La coopérative de Béni Yaâla Zkara est la seule

dans la province de Jerada à commercialiser de l'huile essentielle de romarin, rejointe par la coopérative d'Al Oufok de Figuig au niveau régional (Blali, 2017). La coopérative de Béni Yaâla envisage également d'autres débouchés pour les produits issus du romarin comme la production de savons, d'infusions de romarin et de shampooings; produits transformés qui permettront de dégager une valeur ajoutée plus élevée.

Alors que le matériel est rudimentaire et que les techniques sont traditionnelles (séchage et battage sur le sol ou sur des bâches, tamis grossier, distillation artisanale à faible rendement [Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement [CNUCED], 2017]), le HCEFLCD, et la DREFO en l'occurrence, tentent de moderniser le processus pour gagner en qualité et en rendement, répondre aux normes internationales et ainsi fidéliser une clientèle et augmenter la valeur marchande (taux d'impureté plus bas et conservation d'une belle couleur verte des feuilles de romarin séchées notamment). A cet égard, des partenariats se créent avec l'Université d'Oujda (mémoires, thèses), par exemple pour la détermination des conditions optimales de séchage ou la conception de tamiseur efficace à bas coût. De même, des organismes internationaux viennent soutenir la région; en témoignent les équipements modernes de la coopérative de Béni Yaâla Zkara (Jerada) Photo 1-7, issus de la coopération avec l'Agence Américaine pour le Développement International (USAID) en 2006 et en 2011.



Photo 1-7 De gauche à droite : séchoir, tamiseur et cuve à distillation

Enfin, il convient de mentionner les contestations récurrentes relatives aux estimations de phytomasse, sur lesquelles se base l'établissement de la redevance : les volumes récoltés annuellement sont souvent inférieurs à ceux estimés, cette différence atteignant plus de 27 % dans certains cas. Si les modèles utilisés ne sont pas optimaux, ils ne sont pas les seules raisons : le non respect des clauses des contrats d'exploitation concourt également à cet écart entre estimations et volumes effectivement récoltés. (Karimi, 2014)

1.5 Valorisation de *Rosmarinus officinalis*

Le romarin est considéré comme un produit forestier non ligneux et offre des usages variés. Les feuilles séchées peuvent être valorisées telles quelles ou en poudre pour le secteur agroalimentaire, ou être utilisées pour la distillation afin de produire l'huile essentielle de romarin. Celle-ci est alors destinée au secteur des cosmétiques. Le secteur pharmaceutique s'intéresse quant à lui aux propriétés anticancéreuses du romarin, notamment aux polyphénols acide carnosique et acide rosmarinique, qui sont de puissants antioxydants (Moore, Yousef et Tsiani, 2016). Pour ses propriétés antioxydantes, le romarin intéresse également le secteur agroalimentaire (antioxydants naturels). Les feuilles séchées de romarin sont vendues entre 7 et 10 dirhams (dhs) le kilo, mais le prix descend entre 3 et 4 dhs/kg lors de la vente à un intermédiaire. Avec une certification biologique, le produit est d'autant plus attractif sur le marché international et le prix est aussi plus élevé. Si les huiles essentielles et les antioxydants ont une valeur ajoutée plus grande, avec des prix de vente supérieurs à 300 dhs pour 1 kg d'huile essentielle depuis 2014 (CNUCED, 2017) et 25 000 à 45 000 dhs pour 100 mg d'antioxydant (Karimi, conversation, 16 avril 2018), la valorisation par les coopératives reste très limitée.

L'indication géographique est une initiative lancée par la DREFO afin d'offrir un produit de meilleure qualité et relativement homogène à travers la région, dans le but de fidéliser les clients et d'augmenter les revenus des coopératives (donc des adhérents). L'obtention requiert le respect d'un cahier des charges, qui devrait uniformiser les manières de travailler dans la région et assurer la traçabilité des produits dans un souci d'assurance qualité. La certification biologique pourrait être obtenue étant donné le caractère sauvage de la récolte mais elle suscite encore trop peu d'intérêt au niveau local.

Le caractère aromatique et médicinal du romarin officinal lui a bien sûr assuré sa place dans la pharmacopée traditionnelle. Mais le romarin n'est pas seulement exploité pour ses feuilles et ses dérivés (huile essentielle, antioxydants). Lors de la floraison, il est butiné par les abeilles qui s'en nourrissent : le romarin est classé comme principale espèce productrice de nectar dans l'Orient (Blali, 2017). Cet usage apicole conditionne d'ailleurs le début de la période de coupe du romarin, malgré de meilleurs rendements en huile essentielle pendant la floraison (DREFO, 2016). En été, bien qu'il soit peu appétant, il peut servir de plante fourragère au bétail lorsqu'il y a peu d'alternatives. Finalement, les tiges lignifiées et racines



Photo 1-8 Récolte des parties lignifiées du romarin (tiré de HCEFLCD, 2017)

peuvent être ramassées par les populations locales en tant que bois de chauffage, tel que représenté par la Photo 1-8. (HCEFLCD, 2013)

Comme le montre la Figure 1-1, depuis 2002, les quantités exportées de feuilles de romarin montrent une tendance à la hausse, passant de 2286 t à 7797 t en 2014 tandis que le prix moyen à l'exportation a atteint un maximum à 12,49 dhs/kg en 2014 et un minimum d'environ 8,15 dhs/kg en 2003. Concernant les huiles essentielles (HE), l'exportation en poids montre des valeurs fluctuantes avec une tendance à la baisse de 2002 à 2008 (78 à environ 18 t), puis de 2013 à 2015 (environ 56 t à 26 t) (Figure 1-2). Sur le plan des prix, on retrouve un minimum d'environ 185 dhs/kg en 2005 et un maximum de presque 350 dhs/kg en 2014. L'année 2015 se distingue avec un prix moyen de vente atteignant presque 500 dhs/kg. Alors que la France et l'Espagne sont les principaux importateurs d'HE de romarin, l'Allemagne et les États-Unis sont les principaux demandeurs en feuilles de romarin séché. (CNUCED, 2017)

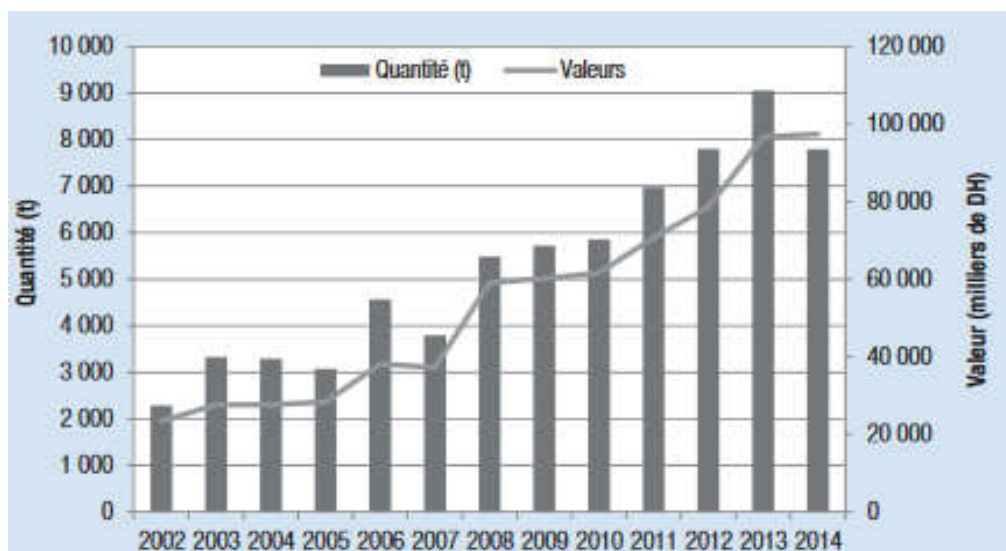


Figure 1-1 Évolution des exportations de feuilles de romarin (tiré de CNUCED, 2017)

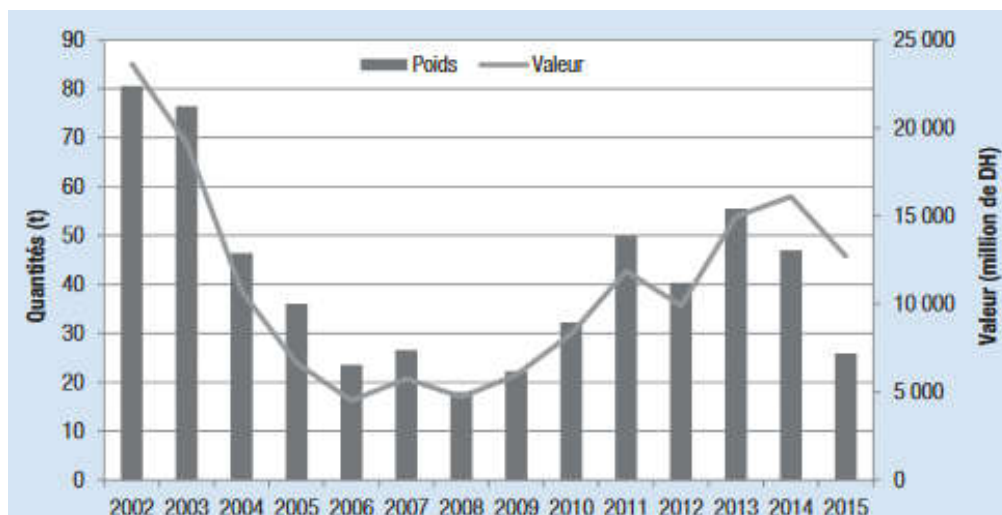
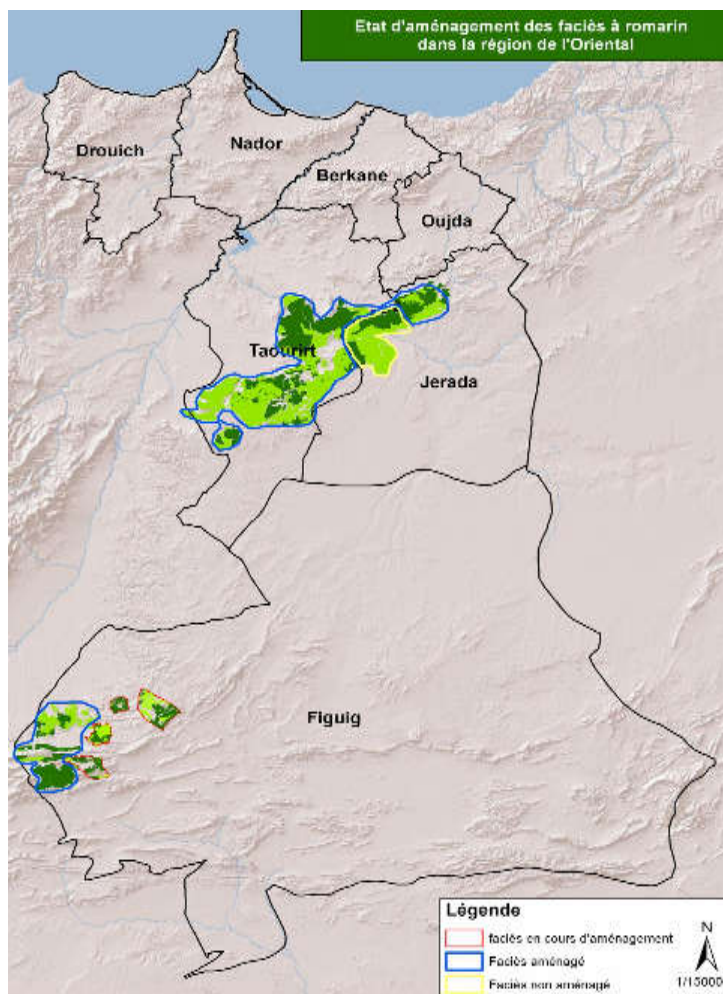


Figure 1-2 Évolution des exportations d'HE de romarin (tiré de CNUCED, 2017)

Au niveau local, plus de 500 000 journées de travail par an sont générées à travers la valorisation de cette ressource, concernant environ 5700 personnes (Karimi, conversation, 4 mai 2018). Cependant, le manque d'organisation de la filière et les lacunes au niveau de la commercialisation, constatés par des produits peu valorisés (peu de transformation, de conditionnement, pas ou peu de labels alors que les faciès sont naturels), se fait au bénéfice des industriels qui effectuent les transformations et profitent de la valeur ajoutée des produits issus du romarin. Dans tous les cas, les nappes de romarin à l'état naturel représentent une richesse pour le Maroc, surtout pour la région de l'Oriental. Afin de continuer à profiter de ces bénéfices, il s'avère nécessaire de gérer cette ressource durablement pour en assurer la conservation tout en pratiquant les activités de valorisation citées ci-dessus.

1.6 État des nappes de romarin et pressions sur la ressource

La province de Figuig concentre 57 % des ressources en romarin (280 000 ha) suivie par Taourirt (148 000 ha) et Jerada (63 000 ha). 55 % de ces nappes de romarin dispose d'un plan d'aménagement et de gestion, comme mentionné dans la partie 1.1, visible sur la Carte 1-4 (Naggar et Iharchine, 2015).



Carte 1-4 État d'aménagement des faciès à romarin dans la région de l'Oriental (tiré de Naggar et Iharchine, 2015)

Bien que le romarin y pousse naturellement, la DREFO n'a pas répertorié de territoire où il y est l'espèce dominante. On peut le trouver associé à la strate arborée, comme dans la forêt de Béni Yaâla, avec les espèces suivantes : genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*), thuya (*Tetraclinis articulata*), chêne vert (*Quercus rotundifolia*) et pin d'Alep (*Pinus halepensis*). Dans les cantons de Lebkhata, il accompagne davantage d'autres espèces de la strate herbacée notamment : le ciste (*Cistus libanitus*), le thym (*Thymus ciliatus*), le genêt (genre *Genista*) et bien sûr l'alfa (*Stipa tenacissima*). On retrouve

également de nombreuses plantes annuelles en dehors de la saison chaude (annexe 2).

Les principaux problèmes rencontrés au niveau des nappes de romarin sont les suivants :

— le vieillissement des touffes (Photo 1-9), du en partie à une exploitation non homogène et sélective de la part des collecteurs, qui laissent de côté les touffes moins bien accessibles ou déjà dans un état de lignification avancé. Ce problème peut mener à la mort des touffes.



Photo 1-9 Grandes touffes en cours de lignification (absence de feuilles à la base des branches)

- le non-respect des pratiques de coupe, notamment la hauteur de coupe (limitée normalement à 50 % de la partie aérienne, tolérée à 75 %), le matériel utilisé (sécateur ou faucille bien aiguisée) et la taille des parties lignifiées pour permettre la régénération;
- une période de coupe mal adaptée, puisqu'elle permet la coupe pendant les mois d'été, durant lesquels règne une forte chaleur, alors que la perte en eau provoquée par la coupe ne peut pas être compensée par la plante, ce qui augmente les risques de mortalité;
- des attaques cycliques de chrysomèles dorées (*Chrysolina americana*), qui défolient les plantes de romarin;
- des coupes illégales, qui perturbent le cycle de repos de la plante;
- finalement, des sécheresses prolongées et récurrentes dans certaines régions qui aggravent le taux de mortalité.

La DREFO tente donc de minimiser les risques sur la ressource. Ainsi, elle prévoit de décaler la période de coupe : commencer plus tôt dans l'année et finir plus tard en évitant la coupe pendant les mois de juillet et août. Pour lutter contre la chrysomèle dorée, c'est la lutte biologique qui est privilégiée avec des lâchers de perdrix lorsque des attaques sont notifiées. Quant au respect des bonnes pratiques, la Direction Régionale organise des formations et édite des guides de bonne pratique à l'attention des coopératives et collecteurs. Les vieilles touffes font parfois l'objet de campagnes de coupes de rajeunissement, tout comme des campagnes de régénération (plantation de boutures de romarin) peuvent être menées pour régénérer certaines parcelles. Finalement, la lutte contre les coupes illégales est davantage déléguée aux coopératives qui doivent employer des guetteurs.

Selon une étude menée en 2017 par le HCEFLCD sur 6 coopératives (85 618 ha) dans le cadre du projet AZIR-O (Tableau 1-1), les mauvaises pratiques seraient responsables de 10 à 60 % des sujets morts. Le plus inquiétant est le taux de régénération de 7 à 12 %, calculé à partir des jeunes plants dont la circonférence moyenne de la couronne est inférieure ou égale à 10 cm, toujours inférieur à celui de mortalité (12 à 19 %), qui rend des mesures de régénération nécessaires. Enfin, les taux de lignification observés confirment la nécessité de prendre des mesures comme les coupes de rajeunissement pour prévenir le vieillissement des nappes (Figure 1-3).

Tableau 1-1 Coopératives concernées par l'étude portant sur l'évaluation de l'état des nappes de romarin (adapté de HCEFLCD, 2017)

Coopérative	Province	Forêt	Date de création	Nombre d'adhérents
Al Islah	Taourirt	El Ayate	2/05/2009	20
Al Amal			05/12/2008	136
Annamâa		Debdou	07/07/2015	52
Béni Yaâla Zkara	Jerada	El Aouinet	30/10/1996	52
Skandiss	Figuig	Ait Serghouchen	13/05/2016	238
Tamslamte			09/09/2016	420

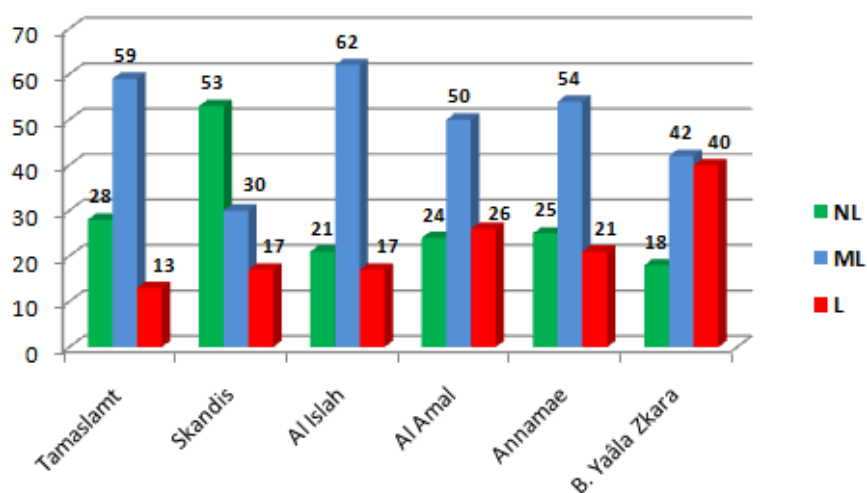


Figure 1-3 Degré de lignification des nappes étudiées (tiré de HCEFLCD, 2017)
NL : non lignifiée, masse foliaire (MF) > 75 % volume de la touffe; ML : moyennement lignifiée, 50 < MF < 75 % et L : lignifiée, MF < 50 %

2 OBJECTIFS ET PROBLEMATIQUES

L'objectif à terme pour la DREFO est d'être en capacité de suivre la dynamique des nappes de romarin à distance, tant la répartition géographique que l'état de la ressource (vieillesse, vitalité) et de prévoir la phytomasse récoltable à l'aide d'un ou de plusieurs modèles (pour différents sites), intégrant des variables que l'on peut obtenir facilement, ou dont l'obtention est automatisable, avec une erreur d'au plus 15 %.

De manière globale, cela participe à la bonne élaboration des plans d'aménagement et de gestion des forêts. Plus spécifiquement, les connaissances sur les potentialités du territoire permettraient de cibler d'autres zones adaptées à l'exploitation du romarin tandis que celles sur l'état de la ressource permettraient de cibler les zones où effectuer des actions correctrices (coupes de rajeunissement, repeuplement), de surveiller les coupes illégales et le respect des mises en repos. L'estimation plus précise de la phytomasse de manière rapide et à distance permettrait de réduire les coûts (chauffeur, matériel, temps) et de répondre correctement aux contestations émises sur la phytomasse estimée des parcelles.

L'atteinte de ces objectifs de suivi géographique et sanitaire des nappes et d'estimation plus précise de la phytomasse est à jalonner par des objectifs intermédiaires. Ce premier travail sur ces questions a pour but de répondre aux objectifs spécifiques suivants :

- cartographier la présence de nappes de romarin grâce à des données secondaires et
- explorer la couverture végétale (CV) comme nouvelle variable dans des modèles d'estimation de la phytomasse de romarin,

Tout en relevant les difficultés auxquelles ces objectifs feront face.

L'étude s'est concentrée sur la province de Jerada afin de réduire la zone d'étude.

2.1 Cartographie des nappes de romarin

Des cartes de peuplements existent mais leur actualisation nécessite du travail de terrain et la méthodologie ne permet pas une grande précision (zones d'échantillonnage et extrapolation). L'idée est d'utiliser la télédétection, ici les images SENTINEL-2, mises à disposition gratuitement, pour cartographier le romarin. Cette technique relativement récente, en expansion depuis le lancement du premier satellite de télédétection ERTS (Landsat 1) en 1972, permet de couvrir de vastes zones à des fréquences rapprochées, variable selon les satellites, en s'affranchissant des contraintes de terrain associées (Institut

Numérique, 2014). Cette acquisition d'information sur l'espace terrestre dans le domaine du visible et de l'infrarouge, voire du radar, permet une utilisation dans de multiples domaines.

Cet objectif fait cependant face à des problématiques, comme l'état de la ressource : couleur des feuilles (du jaune au vert foncé), état sanitaire, hauteur variable des touffes, nappes plus ou moins denses. Cet aspect, de même que la topographie et les conditions météorologiques (présence de nuages, position et intensité du soleil) influent sur la réflectance des images obtenues par télédétection; ce qui nécessite des corrections (donc des connaissances) pour le travail avec des séries d'images ou des comparaisons à différentes périodes. Les ressources à disposition indiquant des densités de romarin inférieures à 10 %, comprises entre 10 et 30 % et 30 et 50 % selon les zones, la répartition du romarin dans l'espace représente un obstacle en télédétection. De plus, la présence d'autres espèces végétales, pérennes et annuelles, s'ajoute à cette hétérogénéité spatiale. Puisqu'il n'y a pas de zones de romarin pur, cela entraîne le travail avec des pixels mixtes, aussi appelés mixels : c'est-à-dire plusieurs occupations du sol différentes dans un pixel (ici plusieurs espèces végétales). Cet obstacle est néanmoins relatif et peut être levé en parti avec l'augmentation de la résolution spatiale. Finalement, l'opération de cartographie réalisée ici consiste à distinguer le romarin du reste de la végétation, ce qui nécessite, en plus d'une certaine résolution spatiale, une résolution spectrale adéquate et constitue un des défis de ce travail.

2.2 Estimation de la phytomasse de romarin par la couverture végétale

Au cours de son activité, la DREFO a déjà pu réaliser des modèles allométriques pour l'estimation de la phytomasse, propres à certains sites et requièrent un test avant une nouvelle utilisation pour voir si le modèle est toujours d'actualité (erreur $\leq 15\%$). Les paramètres classiques d'intervention sont le diamètre et la hauteur, ce qui nécessite des mesures sur le terrain.

Les attentes quant à l'exploration de la couverture végétale des touffes de romarin comme nouvelle variable dans les modèles d'estimation sont donc d'améliorer les estimations et de les simplifier. En effet, la couverture végétale peut être obtenue par analyse de photographies au nadir et si ce processus est automatisé (drone, sélection automatique des touffes de romarin), et que la corrélation est suffisante entre phytomasse récoltable et CV de romarin, alors les sorties terrain seraient au moins réduites et les estimations actualisées plus souvent.

Si cette variable permettra de résoudre le problème des formes atypiques des touffes, difficile à prendre en compte lors de la prise des diamètres, des difficultés risquent d'être rencontrées lors de l'automatisation du traitement par logiciel notamment dues à la variation de la couleur des feuilles du romarin et à la présence de végétation autre que le romarin, faussant le taux de CV du romarin.

3 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette section non exhaustive reprend des études pertinentes sur les sujets traités ici et donne des indications sur la méthodologie à adopter et les pistes à suivre pour de futurs travaux. Malheureusement, le romarin ne fait que très peu l'objet de publications en ce qui concerne la classification d'images et les modèles de phytomasse.

3.1 Cartographie du romarin

Le travail de cartographie de Younis, Melía, Gilabert, García-Haro, et Bastida (s. d.), dont le but est d'actualiser les cartes de végétation grâce à la télédétection, est très similaire au premier objectif de cette étude. Mené dans le sud-est de l'Espagne, au climat semi-aride comparable à celui de notre zone d'étude (été chaud et sec, précipitations annuelles moyennes de 300 mm), on y retrouve l'alfa et le romarin : ces 2 espèces constituent 2 des 8 classes de végétation pour la classification supervisée selon le maximum de vraisemblance. Celle-ci a été effectuée sur une image multitemporale (avril et septembre 1993) de résolution 30 m (Landsat 5 Thematic Mapper) en utilisant les bandes TM2 (vert), TM5 (moyen infra-rouge) et les images NDVI, où les signatures spectrales des classes montrent des différences. Le choix de la date des images vise à maximiser la différence entre les classes de végétation pour améliorer la séparabilité spectrale. Les images ont été corrigées géométriquement et normalisées atmosphériquement selon une méthode basée sur un modèle de transfert radiatif atmosphérique. Les sites d'entraînement présentaient un faible relief, une couverture végétale homogène et une superficie supérieure à 200 pixels. Ils ont été sélectionnés à l'aide des cartes de végétation (1:25 000 et 1:50 000) et vérifiés grâce à des images aériennes (1:18 000) et des sorties terrain. Les données de validation ont également été choisies selon les cartes de végétation dans des zones représentatives. La précision globale de la classification atteint 89 %.

Les résolutions spatiales des satellites Landsat Thematic Mapper et SPOT (respectivement 30 et 20 m) et la largeur des bandes spectrales capturées ne permettraient pas de détecter une espèce particulière, à moins que la population soit dense et répandue (Carson, Lass et Callihan, 1995).

Dans les environnements arides et semi-arides (couvert végétal inférieur à 50 %), Okin, Roberts, Murray et Okin (2001) ont conclu que les techniques d'analyse de mélange spectral, qui consistent à retrouver la composition de l'occupation du sol de chaque pixel selon les signatures spectrales renseignées pour chaque classe, ne permettent pas de retrouver les

différents types de végétation, même avec des données hyperspectrales (signatures spectrales collectées de 350 à 2500 nm). Les raisons en sont entre autres la variabilité spectrale au sein d'une espèce et le potentiel de mélange non linéaire dans ce type de région dû à la dispersion des rayons lumineux. Cette variabilité spectrale au sein d'une espèce est confirmée par Mahyou pour l'alfa (2012). Dans le même ordre d'idée, Price rapporte que même une résolution spectrale de l'ordre de 0,01 μm ne permet pas de distinguer dans tous les cas différents types de végétation (2012). En plus de l'état de la plante, l'angle des feuilles et les effets de topographie (ombre) ont aussi une grande incidence dans ces variations (Kizel, Shoshany, Netanyahu, Even-Tzur et Benediktsson, 2017).

3.2 Estimation de la biomasse aérienne

Les questions d'estimation de biomasse sont très présentes en recherche, que ce soit pour l'estimation des stocks de carbone, déterminer la productivité ou quantifier la réponse physiologique d'une plante aux conditions environnementales (Tackenberg, 2007; Vashum et Jayakumar, 2012). Ces estimations peuvent faire appel à des méthodes directes (destructives) ou indirectes. Étant donné les inconvénients que présentent les premières, les méthodes indirectes sont de plus en plus utilisées. Ces dernières se basent sur des relations allométriques entre différents paramètres d'un même individu. Les paramètres testés, de plus en plus, s'obtiennent par analyse d'images de la végétation. Par exemple, Tackenberg (2007) utilise la surface projetée calculée à partir de photos de la silhouette verticale de graminées pour expliquer à plus de 90 % la variance du logarithme de la biomasse fraîche, la transformation en logarithme servant à normaliser les données. Chen et al. (2018) ont également testé une palette de variables obtenues à partir de photos latérales et vues de dessus de plants d'orge, classés en 4 catégories : caractéristiques géométriques, liées au proche infrarouge (PIR), liées à la fluorescence et liées à la couleur. Trois variables géométriques ressortent quant à leur corrélation avec la biomasse : le volume numérique, l'aire latérale projetée (projected side area) et l'aire projetée vue du dessus (projected top area). Dans le cas de l'if du Canada, Quint et Dech (2003) ont trouvé une corrélation entre biomasse aérienne et couvert végétal de 75 % (couvert végétal déterminé à partir d'images numériques) et de 85 % (estimation visuelle du couvert) que ce soit pour des modèles linéaires ou de puissance. Des équations allométriques pour 14 espèces spécifiques d'arbustes et de petits arbres ont été décrites par Ali et al. (2015). Parmi les variables et les modèles étudiés, le modèle intégrant le diamètre de la tige la plus longue et la hauteur

permet d'expliquer entre 76 et 99 % de la variance de la biomasse aérienne pour 6 des 14 espèces étudiées. C'est le logarithme népérien des variables qui a été utilisé, pour stabiliser la variance des résidus.

Pour le calcul de la variable couverture végétale, de nombreuses études se servent d'images numériques au nadir, traitées différemment (Dietz et Steinlein, 1996; Chen, Chen, Leblanc, Henry, et Chen, 2010; Macfarlane et Ogden, 2012; Chianucci, Lucibelli et Dell'Abate, 2018).

Au final, la littérature présente une multitude de variables, prises sur le terrain ou en laboratoire, et de modèles, linéaires et non linéaires, généraux et spécifiques à des sites, pour estimer la biomasse.

L'analyse de photos, utilisée dans les études présentées, peut se heurter à des obstacles (Zhao, Xie, Zhou, Jiang et An, 2012; Salas-Aguilar et al., 2017). Les caractéristiques de la photo peuvent plus ou moins influencer la valeur de certains paramètres, par exemple les indices basés sur le spectre du visible. Ainsi Yang, Wang, Zhao, Zhang et Feng (2015) confirment que l'identification de verdure dans une photo dépend de sa qualité, que l'on peut résumer par l'illumination (affecté par les conditions météorologiques et le moment de capture dans la journée), la couleur des feuilles (santé, carences, sécheresse, ect) et l'arrière-plan (type de sol, éléments de composition). Ce premier facteur peut être écarté en convertissant l'image RGB en HSV (hue, saturation, value ou teinte, saturation et valeur en français), système de codage des couleurs insensible aux variations d'illumination. Ce système permettrait aussi de discriminer la végétation de la paille et de sols rouges, jaunes ou noirs par exemple. L'utilisation du système IHS (intensity, hue, saturation) en plus du RGB permettrait quant à lui de distinguer la couverture végétale de différentes espèces, comme réalisé en Arctique par Chen et al. (2010).

Pour le romarin, un travail de modélisation a déjà été effectué sur le romarin. Dans sa thèse, Karimi explore quelques relations entre phytomasse récoltable (ou BVE, biomasse verte exploitable) et certaines variables pour les forêts d'El Ayate dans la province de Taourirt et d'Ait Serghouchen dans la province de Figuig. Il trouve ainsi une forte corrélation entre le diamètre (D) moyen et la BVE, telle que $R^2 = 0,82$ et $0,91$ respectivement dans le cas d'un modèle linéaire. Le nombre de brins a également fait l'objet de modèles et bien qu'associé au D moyen dans un modèle linéaire le R^2 soit de $0,88$ et $0,91$, cette variable s'avère moins intéressante étant donné les efforts à fournir par rapport aux gains en précision. Le taux de recouvrement calculé dans les placettes (100 m^2) présente également une très bonne

corrélation avec la BVE : $R^2 = 0,96$ (El Ayate) et $0,84$ (Ait Serghouche), mais la méthodologie d'obtention de cette variable n'est pas explicitée. La variable hauteur n'a été évaluée que pour la forêt d'Ait Serghouchen et, entrée dans un modèle linéaire avec la hauteur, le R^2 obtenu est de $0,92$. Ainsi les paramètres facilement mesurables sur le terrain (D, hauteur et taux de recouvrement) sont retenus pour expliquer la variabilité de la BVE. La différence entre les sites peut provenir de leur situation géographique mais également de la répartition des touffes par catégorie illustrée par le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 Répartition des touffes par catégorie (adapté de Karimi, 2014)

Forêt	El Ayate	Ait Serghouchen
Catégorie : % dans le peuplement		
Petite (0 – 30 cm)	28,7 %	18,63 %
Moyenne (30 – 50 cm)	44 %	26,17 %
Grande (> 50 cm)	27,3 %	55,19 %

4 MATERIELS ET METHODES

Cette partie reprend pour chacun des deux objectifs poursuivis le matériel et la méthode utilisés en présentant la méthodologie pour l'obtention des résultats, la source des données et leurs caractéristiques.

4.1 Cartographie du romarin selon la carte des peuplements simplifiés

Cette section reprend les étapes de la cartographie du romarin dans les cantons de Béni Yaâla, Guefait et Lebhkata Est (province de Jerada) à partir de données secondaires. Le domaine forestier étudié couvre plus de 37 000 ha et est compris entre les limites 34° 27.24' et 34° 05.72' Nord et 2° 24.01' et 2° 02.23' Ouest.

4.1.1 Méthodologie

La méthode suivie est de classier de manière supervisée deux images satellites, représentant la même zone, mais à des saisons différentes : printemps, correspondant à la période de croissance du romarin et de la végétation en général, due à la pluviométrie et aux températures plus clémentes, et été, pour éviter la végétation annuelle, brûlée par le soleil et le manque d'eau.

Étant donné la disponibilité de données secondaires que constitue la carte de peuplements, celle-ci se substitue aux régions d'intérêt (ROI) habituellement prises sur le terrain pour calibrer l'image. La complexité de ces cartes (4 niveaux de densité : < 10 %, 10-30 %, 30-50 % et > 50 %; espèces herbacées et forestières combinées différemment) a nécessité une simplification afin de réaliser la classification sur base de ces informations, chaque classe devant correspondre à un des six faciès identifiés (plus le faciès sol nu). Puisque le but n'est pas de classier les images satellite en utilisant les données de la carte (ce qui reproduirait une carte), la première étape est d'effectuer une classification des deux images en utilisant les ROI sélectionnés dans les faciès identifiés. Les cartes générées seront alors comparées à celle, simplifiée, de la DREFO (chaque faciès transformé en vecteur) à l'aide des matrices de confusion.

A des fins de comparaison entre les 2 périodes, les ROI sont identiques pour les deux images. La cartographie est générée par classification supervisée selon le maximum de vraisemblance.

Au vu du type de données utilisé, la séparabilité des classes sera également évaluée par l'indice de Jeffries-Matusita, ce qui permettra de commenter les résultats des matrices de confusion.

4.1.2 Données utilisées

Les données qui ont servi à la cartographie sont les suivantes :

— images satellites Sentinel-2 L2A, orthoimages en réflectances de surface corrigées atmosphériquement, pour les mois d'avril et d'août 2017 (tuiles T30 SWC et SWD pour couvrir la zone). Ces images ont une résolution de 10 m pour les trois bandes du visible (496,6 nm, 560 nm et 664,5 nm pour le satellite Sentinel-2A) et pour une bande du proche infrarouge (835,1 nm), ce qui a permis un rééchantillonnage à 10 m par interpolation bilinéaire (European Space Agency [ESA], s. d.). Ces images ont ensuite subi une coupure spatiale et spectrale pour les alléger et raccourcir le temps d'enregistrement avant d'être assemblées (mosaïquage) (Figure 4-1). Lors de la classification, un masque a été appliqué pour ne traiter que la zone étudiée, dans le but de ne pas fausser les résultats de la matrice de confusion.

— carte de peuplements à l'échelle 1/25 000, disponibles à la Direction Régionale. Le shapefile associé pour la forêt de Béni Yaâla est le plus vieux : il date de décembre 2012. La simplification de ces cartes a rassemblé les différentes espèces d'arbres sous la mention « espèces forestières » et n'a pas tenu compte de la densité (uniquement présence/absence). Ainsi pour le code St3 (*Stipa tenacissima*, alfa, densité entre 10 et 30 %) Jo2 (*Juniperus oxycedrus*, oxycèdre, densité comprise entre 30 et 50 %) et Ta4 (*Tetraclinis articulata*, thuya, densité inférieure à 10 %) le faciès devient alfa et essences forestières. Six faciès sont ainsi retrouvés : alfa dense; alfa et romarin; alfa et essences forestières; essences forestières; alfa, romarin et essences forestières; et romarin et essences forestières.

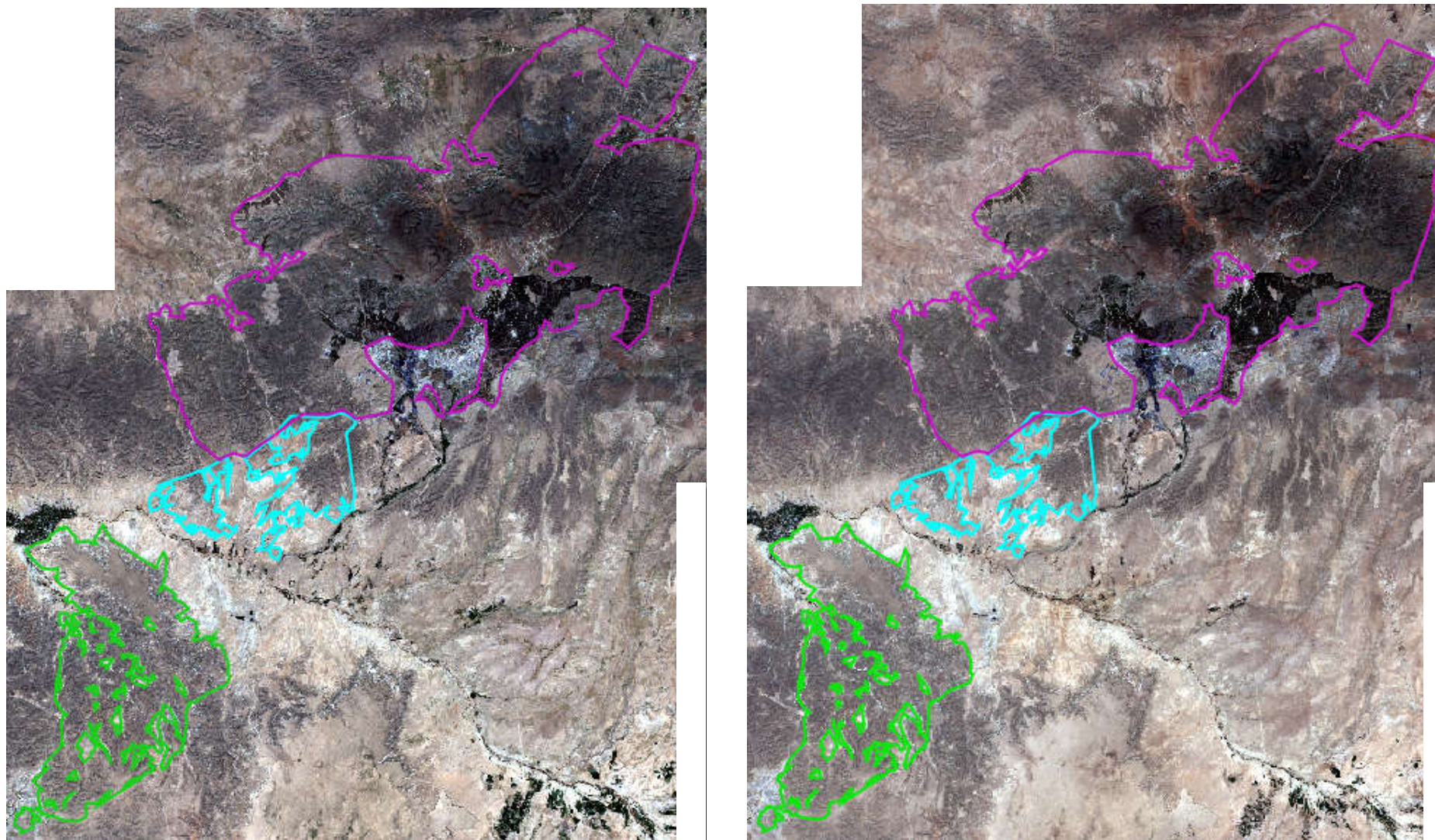
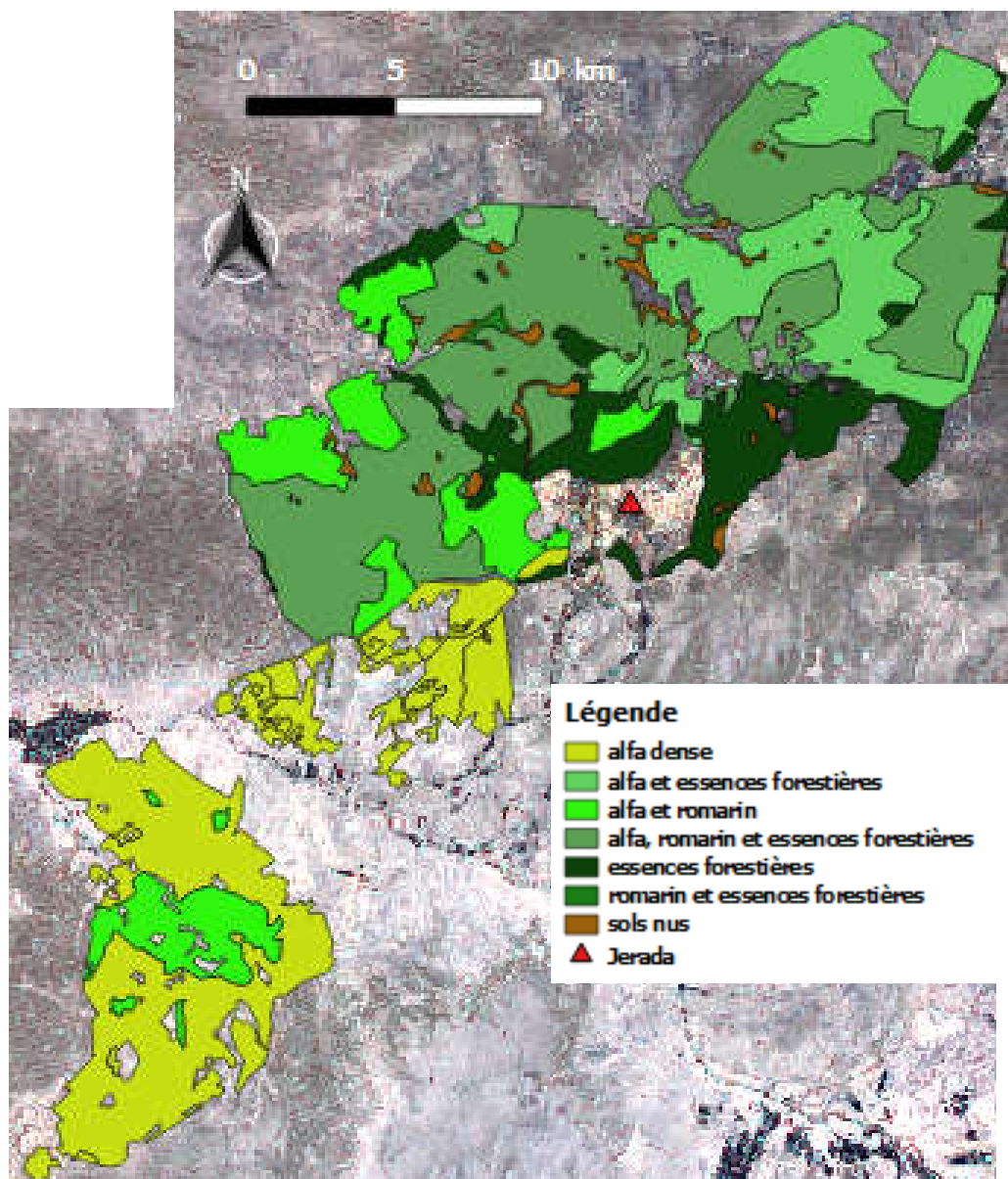


Figure 4-1 Images satellites SENTINEL-2 de la zone d'étude, 6 avril 2017 (gauche) 14 août 2017 (droite)



Carte 4-1 Carte des peuplements simplifiés (fond : image Sentinel-2 du 6 avril 2017, projection : EPSG 32630, auteur : Masure)

4.1.3 Logiciels utilisés

Le traitement des images satellites, mentionné ci-dessus, a été réalisé avec le logiciel gratuit SNAP (Sentinel Application Platform). QGIS, également gratuit, a permis d'« empiler » les bandes (band stack) des images enregistrées avec SNAP grâce au plugin Semi-automatic classification. Finalement, le logiciel ENVI a permis de réaliser la classification supervisée et d'obtenir les informations nécessaires à l'analyse des résultats.

4.2 Exploration d'une nouvelle variable pour l'estimation de phytomasse de romarin

Cette section présente le processus d'obtention de modèles allométriques faisant intervenir la couverture végétale pour estimer la quantité de phytomasse récoltable. Ces modèles sont

basés sur des échantillonnages réalisés dans les cantons de Béni Yaâla, dont les limites sont 34° 27.24' et 34° 15.76' N et 2° 19.74' et 2° 02.23' O, et de Lebkhata Ouest, compris entre les coordonnées 34° 13.95' et 34° 07.15' N et 2° 27.30' et 2° 22.31' O.

4.2.1 Méthodologie

La première étape est d'obtenir la couverture végétale pour un échantillon aléatoire de touffes de romarin, en plus des variables morphométriques usuellement mesurées par les Eaux et Forêts (E&F). Cette variable est obtenue par analyse de photos au nadir de touffes de romarin avec un logiciel spécialisé. Compte tenu de la hauteur variable des clichés, il faut ajouter une étape de calcul de la dimension des images (règle sur les photos pour référence) pour exprimer cette variable en cm². Outre la raison du choix de cette variable (prendre en compte les formes atypiques des touffes), son calcul est rendu possible et pertinent par une végétation non saturée et peu stratifiée due au type de milieu (subhumide à semi-aride).

La génération de modèles de régression linéaire, simple et multiple, intègre cette nouvelle variable ainsi que d'autres plus classiques : petit et grand diamètre (seules et combinées pour donner le diamètre moyen), et hauteur dominante des touffes, mesurés sur le terrain. Deux modèles de régression non linéaire simples sont également explorés.

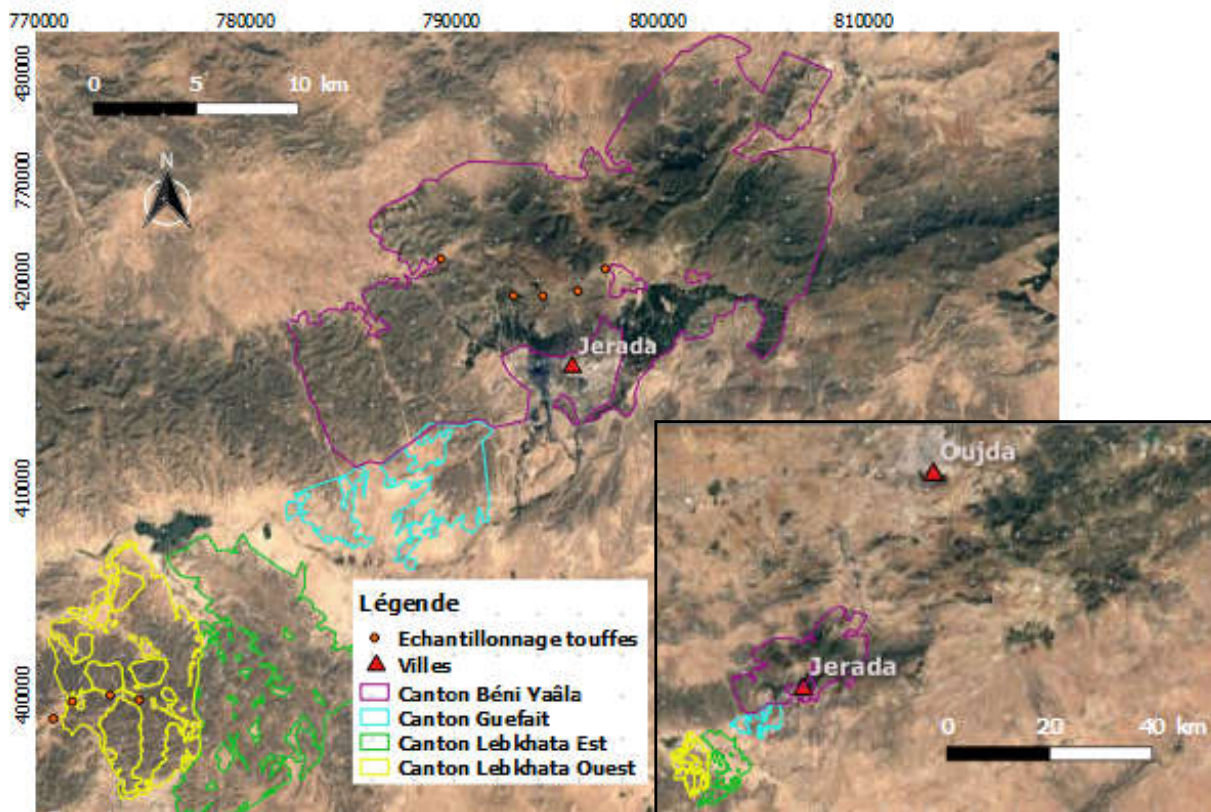
80 % des touffes échantillonnées serviront à la calibration des modèles et la comparaison entre eux et le choix du modèle le plus performant s'effectueront sur base des critères donnés par le logiciel JMP, à savoir :

- le coefficient de détermination R^2 , qui indique le pourcentage de variabilité du poids expliqué par le modèle;
- l'erreur type RMSE (root mean square error, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne), à minimiser;
- le critère d'information d'Akaike corrigé AICc, plus faible pour un modèle plus performant, et
- le critère d'information Bayésien BIC, dont la valeur est également à minimiser.

Les 20 % restants permettront la validation du modèle choisi, en regardant le R^2 et le RMSE pour ce set de valeurs. La séparation des données pour la calibration ou la validation s'est faite de manière randomisée selon la catégorie des touffes, de sorte que 9 touffes de chaque catégorie ont été utilisées pour la validation.

4.2.2 Données utilisées

— les caractéristiques de 134 touffes de romarin, acquises sur 2 jours à une semaine d'intervalle en mai 2018 et prises sur 9 sites différents répartis dans la forêt de Béni Yaâla et le canton de Lebkhata Ouest, le long des routes.



Carte 4-2 Carte d'échantillonnage des touffes de romarin (fond : Google Satellite, projection : EPSG 26191, coordonnées décimales, auteure : Masure)

Ces relevés comprennent : le grand diamètre, qui correspond au diamètre maximal de la couronne de la touffe, le petit diamètre, mesuré perpendiculairement à celui du grand diamètre, la hauteur dominante, le poids de la phytomasse récoltable (feuilles et tiges) et



Photo 4-1 Coupe de romarin (phytomasse récoltable)

une photo à la verticale de résolution 2736 * 3648 pixels. Les mesures ont été prises avec un mètre ruban. La phytomasse, coupée à la faucille (Photo 4-1), a été pesée un jour après la récolte avec une balance de précision au gramme près : une fois coupée sur le terrain, les touffes étaient attachées en bouquet avec de l'alfa et le numéro référence de chaque touffe.

Puisque la DREFO catégorise les touffes de romarin selon leur diamètre, 5 touffes de chaque catégorie ont

été échantillonnées sur chaque site (et 7 sur le dernier) afin d'avoir une bonne représentativité de toutes les catégories. Les petites touffes ont un diamètre moyen D_m ((petit D + grand D)/2) inférieur à 25 cm, les moyennes un D_m compris entre 25 et 50 cm et les grandes un D_m supérieur à 50 cm.

Sur les 145 échantillons, 11 ont été supprimés pour les raisons suivantes : absence du poids (perte du papier référence), doublons (même référence trouvée 2 fois), absence de photo ou photo non verticale.

— la CV de chaque touffe de romarin, analysée par le logiciel CAN-EYE (Figure 4-2), et ramenée en cm^2 grâce à une règle présente sur chaque photo, au sol près de la touffe de romarin.

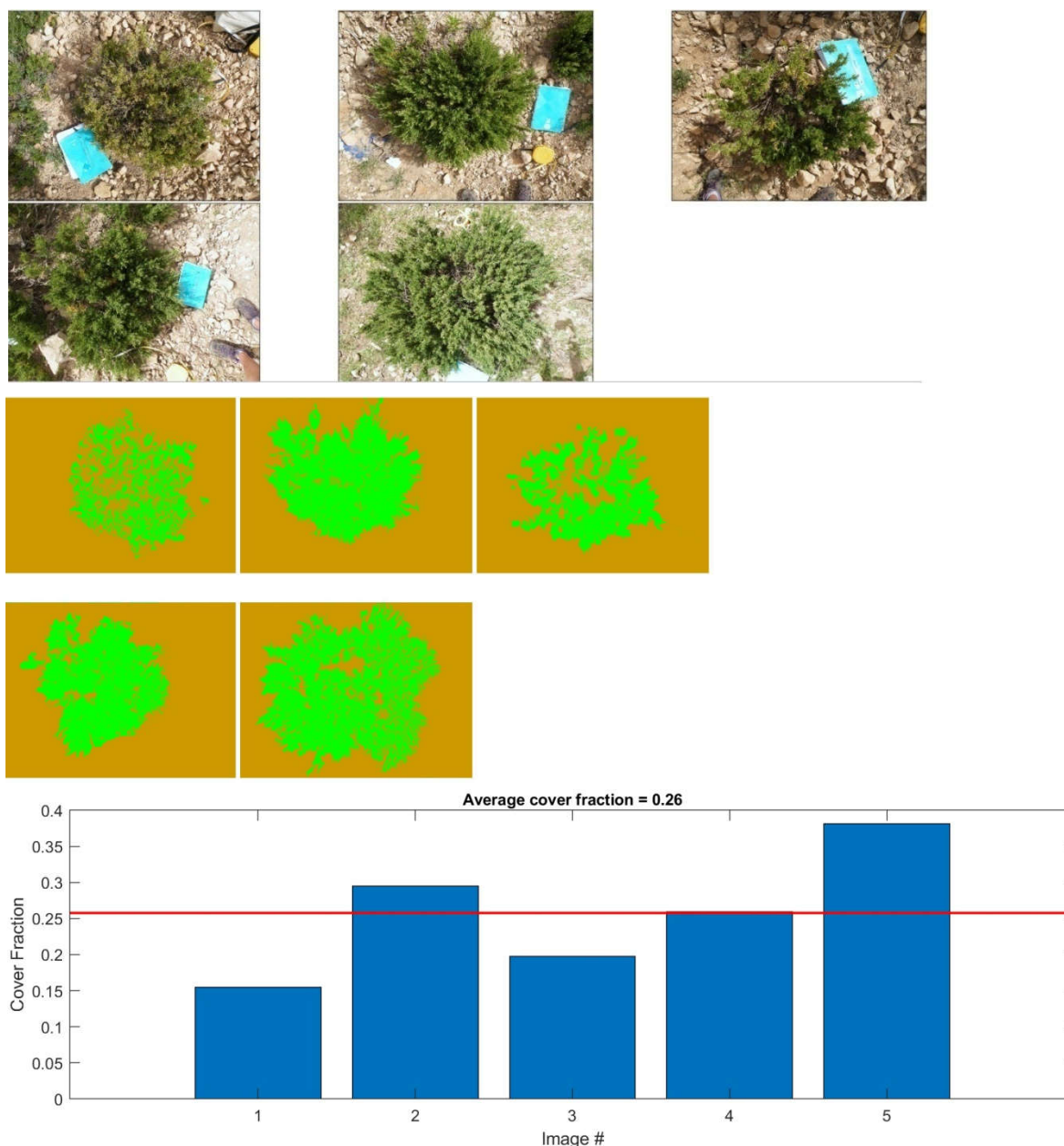


Figure 4-2 Analyse de la couverture végétale des photos prises au nadir (touffes G1 à G6). De haut en bas : photos sélectionnées; séparation binaire de l'image entre pixels de végétation verte (ici seulement ceux qui correspondent au romarin) et pixels de sol (ici tout ce qui n'est pas de la matière verte de romarin) et pourcentage de couverture végétale pour chaque image, avec la moyenne des photos analysées.

4.2.3 Logiciels et matériel utilisés

Les photos ont été prises à l'aide d'un appareil photo Fujifilm FinePix S8100fd avec une taille de capteur de 1/2,3 pouces et une résolution de 10 millions de pixels.

Le logiciel gratuit CAN-EYE, développé par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) en 2003 pour extraire des informations sur la structure de la couverture végétale à partir d'images vraie couleur, a été employé pour l'analyse de la couverture de romarin sur chaque photo. L'analyse se fait selon 2 classes : sol et végétation, ce qui donne des images binaires. Le traitement a dû se faire de manière individuelle pour ne sélectionner que la végétation du romarin (les autres pixels étant arbitrairement classés dans l'autre classe). Les paramètres renseignés pour chaque traitement sont la dimension du capteur de l'appareil photo (1/2,3 pouces, 6,16 mm de largeur et 4,62 mm de hauteur) et la distance focale (4,7), toutes deux dépendantes de l'appareil photo. L'indice de vert (excess green index), compris entre -1 (tous les pixels font partie de la végétation) et 2 (tous les pixels correspondent à la classe sol) est basé sur les canaux rouge-bleu-vert comme suit (Yang et al., 2015) :

$$\text{Excess green index} = 2 \frac{\text{vert} - \text{rouge}}{\text{bleu}}$$

Il est calculé automatiquement par CAN-EYE pour chaque photo. A des fins de comparaison, celui-ci a été fixé à 0,150 pour toutes les photos car c'est la valeur qui semblait donner les meilleurs résultats en termes de reconnaissance des pixels de végétation du romarin comme tels. La couverture végétale est exprimée par le logiciel en pourcentage.

Le logiciel ImageJ, également gratuit, a servi à retrouver la dimension des photos grâce à la présence du double décimètre, et par la suite la CV en cm². Le tableur Excel a permis d'organiser les données et de produire les modèles non linéaires. Enfin, JMP a été utilisé pour la recherche, la comparaison et la sélection de modèles linéaires.

5 RESULTATS ET DISCUSSION

5.1 Cartographie des nappes de romarin

Suite à la classification supervisée par maximum de vraisemblance menée sur ENVI, voici Figure 5-1 les résultats de cartographie obtenus ainsi que les matrices de confusion Tableau 5-1 et 5-2 générées par la comparaison avec la carte des peuplements utilisée (p. 33).

Les résultats sont très mitigés. Les cases en jaunes représentent le pourcentage de pixels correctement classifiés des zones sélectionnés dans les faciès de la carte (ROI), par rapport à cette carte. Si les meilleures performances se retrouvent pour les classes alfa dense (A), romarin et essences forestières (REF) et sols nuls (SN) pour les deux mois, les précisions d'utilisation pour ces deux dernières sont presque nulles (2,18 et 6,14 % pour avril respectivement et 2,13 et 5,76 % pour août). D'autres classes ont des précisions d'utilisation plus élevées comme celle des essences forestières, EF, (63,81 et 75,48 % pour avril et août) mais des erreurs d'omission également élevées : 71,24 et 60,75 %. Au final, les erreurs sont très grandes ce qui donne une précision globale de la classification de 39,2 et 43,6 % pour avril et août respectivement. Le coefficient Kappa, compris entre -1 et 1 résume également la précision de la classification, ici 0,2821 et 0,3271 respectivement, ce qui correspond d'après l'échelle proposée par Landis et Koch (1977) à un accord faible entre la carte et les ROI sélectionnés.

Examinons à présent l'indice de séparabilité des classes de Jeffries-Matusita; vérification qui s'avère d'autant plus pertinente que les classes sont dures à distinguer (distinction entre espèces végétales) et que les informations utilisées sont des données secondaires. Cet indice, compris entre 0 et 2, indique une bonne séparation entre deux classes pour une valeur supérieure à 1,9. (Denis, 2016) En comparant les 7 faciès entre eux (incluant le sol nu), soit 21 comparaisons, le mois d'août compte 8 comparaisons avec un indice inférieur à 1,9 contre 14 pour le mois d'avril (Figure 5-2). Ces résultats découlent sans doute de la simplification de la carte des peuplements effectuée qui provoque une perte d'information et du manque de précision des données secondaires (résolution). Les différences observées semblent tout de même indiquer que la période d'été est plus adéquate pour réaliser une classification, les images étant débarrassées de la végétation annuelle, brûlée par le soleil, qui modifie la réflectance des pixels.

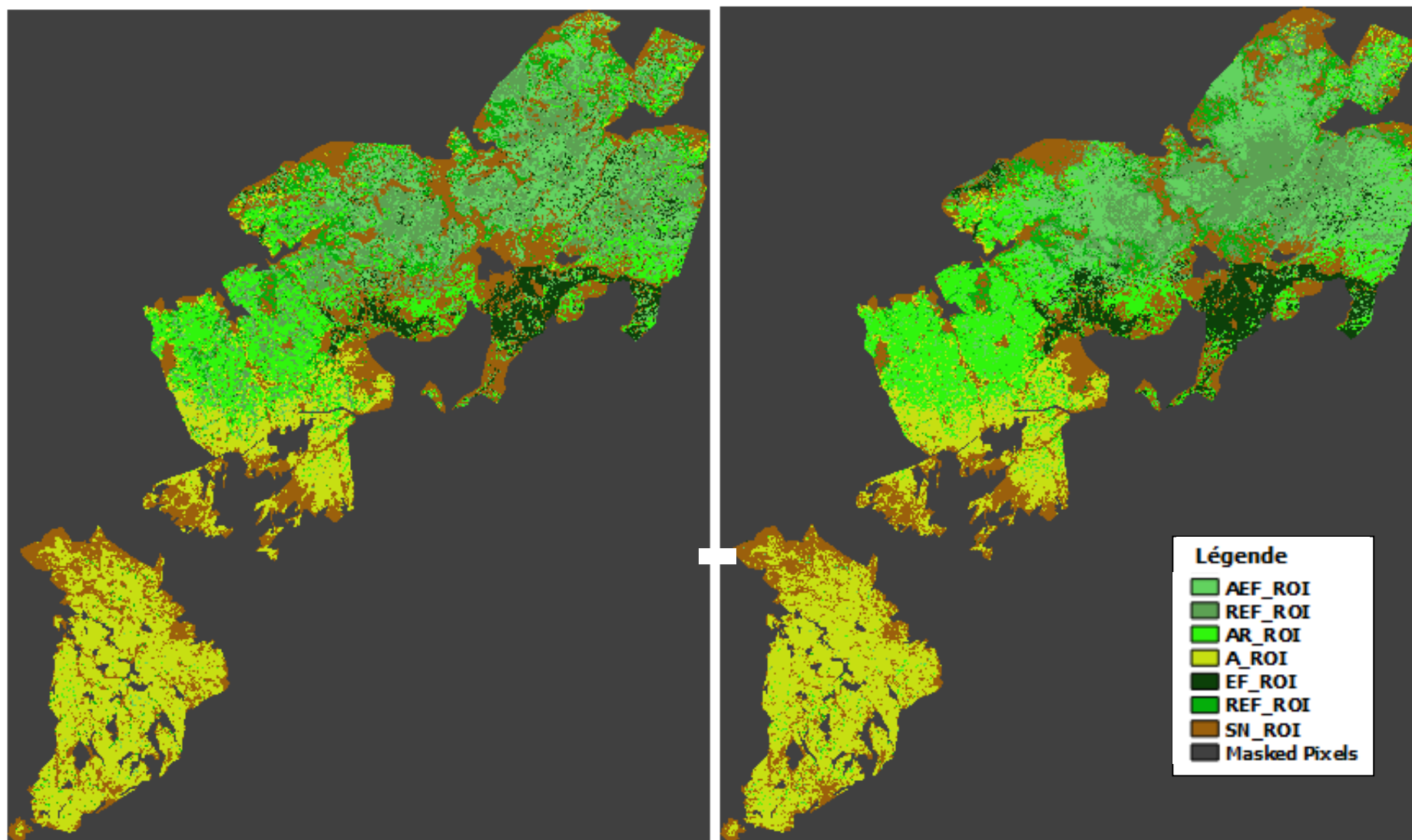


Figure 5-1 Résultats de la classification supervisée pour avril (gauche) et août (droite) 2017. AEF : alfa et essences forestières; REF : romarin et essences forestières; AR : alfa et romarin; A : alfa dense; EF : essences forestières; REF : romarin et essences forestières et SN : sols nus

Tableau 5-1 Matrice de confusion associée à la classification de l'image d'avril 2017

Kappa : 0,2821		Vérité (carte) %								Erreurs de commission	Précision d'utilisation
		AEF	AREF	AR	A	EF	REF	SN	TOTAL		
Classification (ROI sélectionnés) %	AEF	31,76	19,96	5,67	0,51	9,24	12,3	7,15	13,91	63,29	36,71
	AREF	23,27	24,69	6,67	0,12	7,89	2,52	5,12	13,95	38,16	61,84
	AR	9,46	19,49	32,47	1,36	11,45	3,49	3,13	12,68	79,49	20,51
	A	1,11	6,93	19,59	65,81	1,91	0,31	1,87	22,32	19,85	80,15
	EF	4,06	3,08	0,83	0,01	28,76	0,38	2,9	5,14	36,19	63,81
	REF	6,71	8,82	10,72	1,51	3,7	68,4	6,44	6,13	97,82	2,18
	SN	23,63	17,03	24,04	30,68	37,05	12,6	73,38	25,86	93,86	6,14
	TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100		
	Erreurs d'omission	68,24	75,31	67,53	34,19	71,24	31,7	26,62			Précision globale
	Précision de production	31,76	24,69	32,47	65,81	28,76	68,4	73,38			39,2331

Tableau 5-2 Matrice de confusion associée à la classification de l'image d'août 2017

Kappa : 0,3271		Vérité (carte) %								Erreurs de commission	Précision d'utilisation
		AEF	AREF	AR	A	EF	REF	SN	TOTAL		
Classification (ROI sélectionnés) %	AEF	37,84	17,04	1,25	0,27	6,11	20,46	9,72	13,15	53,78	46,22
	AREF	23,35	29,31	5,06	0,5	8,13	5,18	7,39	15,63	34,49	65,51
	AR	7,75	23,98	42,24	2,38	13,62	2,62	5,47	15,32	77,94	22,06
	A	1,65	7,29	20,17	66,22	1,54	0,04	3,33	22,71	20,57	79,43
	EF	1,89	2,7	1,29	0,01	39,25	0,04	4,6	5,92	24,52	75,48
	REF	5,95	9,43	6,98	0,51	5,07	64,46	12,75	5,93	97,87	2,13
	SN	21,58	10,25	23,02	30,12	26,28	7,2	56,74	21,33	94,24	5,76
	TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100		
	Erreurs d'omission	62,16	70,69	57,76	33,78	60,75	35,54	43,26			Précision globale
	Précision de production	37,84	29,31	42,24	66,22	39,25	64,46	56,74			43,5664

Pair Separation (least to most):

EVF: AlfaEssencesfo_shp [Red] 13772 points and EVF: AlfaRomarinEssfo_shp [Blue] 13168 points - 0.66287417
 EVF: AlfaRomarin_shp [White] 5897 points and EVF: AlfaRomarinEssfo_shp [Blue] 13168 points - 1.05934311
 EVF: AlfaRomarin_shp [White] 5897 points and EVF: AlfaEssencesfo_shp [Red] 13772 points - 1.47163953
 EVF: AlfaEssencesfo_shp [Red] 13772 points and EVF: Essencesfo_shp [Green] 5456 points - 1.51500537
 EVF: AlfaEssencesfo_shp [Red] 13772 points and EVF: RomarinEssfo_shp [Yellow] 930 points - 1.58531269
 EVF: Essencesfo_shp [Green] 5456 points and EVF: AlfaRomarinEssfo_shp [Blue] 13168 points - 1.71553580
 EVF: alfadense_shp [Red] 9040 points and EVF: AlfaRomarin_shp [White] 5897 points - 1.71604774
 EVF: AlfaRomarin_shp [White] 5897 points and EVF: RomarinEssfo_shp [Yellow] 930 points - 1.75702306
 EVF: AlfaRomarinEssfo_shp [Blue] 13168 points and EVF: RomarinEssfo_shp [Yellow] 930 points - 1.78165209
 EVF: solsnus_shp [Maroon] 4678 points and EVF: RomarinEssfo_shp [Yellow] 930 points - 1.81693732
 EVF: solsnus_shp [Maroon] 4678 points and EVF: AlfaEssencesfo_shp [Red] 13772 points - 1.84101622
 EVF: solsnus_shp [Maroon] 4678 points and EVF: alfadense_shp [Red] 9040 points - 1.85995541
 EVF: alfadense_shp [Red] 9040 points and EVF: AlfaEssencesfo_shp [Red] 13772 points - 1.89157764
 EVF: alfadense_shp [Red] 9040 points and EVF: AlfaRomarinEssfo_shp [Blue] 13168 points - 1.89919220
 EVF: alfadense_shp [Red] 9040 points and EVF: RomarinEssfo_shp [Yellow] 930 points - 1.93056016
 EVF: solsnus_shp [Maroon] 4678 points and EVF: AlfaRomarin_shp [White] 5897 points - 1.94589794
 EVF: AlfaRomarin_shp [White] 5897 points and EVF: Essencesfo_shp [Green] 5456 points - 1.94844389
 EVF: solsnus_shp [Maroon] 4678 points and EVF: AlfaRomarinEssfo_shp [Blue] 13168 points - 1.95007168
 EVF: Essencesfo_shp [Green] 5456 points and EVF: RomarinEssfo_shp [Yellow] 930 points - 1.99366362
 EVF: solsnus_shp [Maroon] 4678 points and EVF: Essencesfo_shp [Green] 5456 points - 1.99477500
 EVF: alfadense_shp [Red] 9040 points and EVF: Essencesfo_shp [Green] 5456 points - 1.99902782

Pair Separation (least to most):

AlfaEssencesfo [Blue] 13772 points and AlfaRomarinEssfo [Purple] 13168 points - 0.97339814
 AlfaRomarin [Green] 5897 points and AlfaRomarinEssfo [Purple] 13168 points - 1.44351598
 AlfaEssencesfo [Blue] 13772 points and RomarinEssfo [Aquamarine] 930 points - 1.68571228
 Alfadense [Yellow] 9040 points and AlfaRomarin [Green] 5897 points - 1.73127110
 Solsnus_cal [Maroon] 4678 points and Alfadense [Yellow] 9040 points - 1.81971838
 AlfaRomarinEssfo [Purple] 13168 points and RomarinEssfo [Aquamarine] 930 points - 1.84201636
 AlfaRomarin [Green] 5897 points and AlfaEssencesfo [Blue] 13772 points - 1.86557959
 Solsnus_cal [Maroon] 4678 points and RomarinEssfo [Aquamarine] 930 points - 1.86575371
 Solsnus_cal [Maroon] 4678 points and AlfaEssencesfo [Blue] 13772 points - 1.90082937
 Alfadense [Yellow] 9040 points and AlfaRomarinEssfo [Purple] 13168 points - 1.90424638
 AlfaRomarin [Green] 5897 points and RomarinEssfo [Aquamarine] 930 points - 1.93010387
 Solsnus_cal [Maroon] 4678 points and AlfaRomarin [Green] 5897 points - 1.95809136
 AlfaEssencesfo [Blue] 13772 points and Essencesfo [Magenta] 5456 points - 1.96318317
 Essencesfo [Magenta] 5456 points and AlfaRomarinEssfo [Purple] 13168 points - 1.97055448
 Alfadense [Yellow] 9040 points and AlfaEssencesfo [Blue] 13772 points - 1.97323763
 Alfadense [Yellow] 9040 points and RomarinEssfo [Aquamarine] 930 points - 1.97594438
 Solsnus_cal [Maroon] 4678 points and AlfaRomarinEssfo [Purple] 13168 points - 1.98184156
 AlfaRomarin [Green] 5897 points and Essencesfo [Magenta] 5456 points - 1.99881818
 Essencesfo [Magenta] 5456 points and RomarinEssfo [Aquamarine] 930 points - 1.99898735
 Solsnus_cal [Maroon] 4678 points and Essencesfo [Magenta] 5456 points - 1.99995291
 Alfadense [Yellow] 9040 points and Essencesfo [Magenta] 5456 points - 1.99999535

Figure 5-2 Séparabilité des classes pour la classification de l'image d'avril 2017 (haut) et d'août 2017 (bas)

Cette mauvaise précision obtenue peut être reliée à la différence de résolutions entre la carte des peuplements utilisée et les images satellites (250 contre 10 m). Le protocole de réalisation de la carte (échantillonnage systématique à distance régulière, puis extrapolation, zones de peuplement inférieures à 5 ha non répertoriées) génère également des pertes d'information par rapport à la réalité terrain, ces dernières étant encore accentuées par la simplification des faciès. En effet, le pourcentage des espèces (par exemple le romarin) dans les faciès n'a pas été pris en compte : ainsi un faciès alfa-romarin contenant moins de 10 % de romarin fait partie de la même classe que le même faciès contenant entre 30 et 50 % de romarin. Les ROI pour une même classe peuvent donc être assez hétérogènes, ce qui nuit à la séparabilité des classes et finalement à la précision de la classification. Enfin, il faut se rendre compte de la limitation causée par les résolutions spatiale et spectrale des images satellites pour distinguer le romarin des autres espèces végétales : la présence de mixels est un frein à la bonne classification et la distinction entre espèces végétales (ici 6 faciès) est d'autant plus ardue avec une faible résolution spectrale. Cependant, il n'aurait servi à rien de travailler avec des images à classer de plus haute résolution étant donnée la précision non adaptée des données secondaires disponibles.

Cet exercice remet donc en cause la simplification de données secondaires dans la classification d'images satellites, voire de données secondaires elles-mêmes. Afin d'obtenir de meilleurs résultats, la première chose est de travailler avec de meilleures résolutions spatiales (inférieures au mètre) pour l'image à classer de manière à limiter la présence de mixels et la problématique des densités. La prise de ROI se ferait alors de manière visuelle sur les images, étant donné les limites de précision des GPS lors des relevés terrain (+/- 3 mètres, ce qui n'aurait plus d'intérêt de travailler avec des résolutions spatiales inférieures à cette précision). Les données secondaires à partir de relevés terrain seraient donc également obsolètes pour cette raison. Une analyse multitemporelle permettrait de mieux distinguer les espèces végétales (diversité végétale et état de la ressource) en évitant peut-être d'utiliser une résolution spectrale plus élevée.

5.2 Estimation de la phytomasse de romarin par la couverture végétale

Avant de parler des modèles en eux-mêmes, les résultats obtenus pour les variables sont repris brièvement.

5.2.1 Caractéristiques des variables étudiées

Le Tableau 5-3 résume l'étendue des données inventoriées. La distribution de l'ensemble des variables peut être retrouvée à l'annexe 3.

Tableau 5-3 Moyenne et étendue des variables inventoriées sur les 134 touffes de romarin, dans chaque canton et globalement

Variables	Béni Yaâla			Lebkhata Ouest			Global		
	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum
petit D (cm)	41,27	5,00	117,00	45,65	8,00	144,00	43,08	5,00	144,00
grand D (cm)	52,62	6,00	150,00	53,25	9,00	130,00	52,67	6,00	150,00
D moyen (cm)	46,95	5,50	133,50	49,45	8,50	137,00	47,88	5,50	137,00
H dom (cm)	31,52	7,00	94,00	36,92	9,00	90,00	33,85	7,00	94,00
CV (cm ²)	2383,47	19,09	12316,13	2457,92	40,95	14120,93	2401,25	19,09	14120,93
Poids (g)	412,29	4,00	2280,00	445,85	4,00	2463,00	424,56	4,00	2463,00

L'analyse de la CV s'est faite à partir d'images vraie couleur, avec une certaine illumination due à la présence du soleil. Les photos ayant été prises pendant 2 journées, cet effet a été plus grand sur une partie des photos (Photo 5-1). Malheureusement, le logiciel CAN-EYE, très facile de prise en main, ne permet pas de travailler avec des images RGB converties en HSV (teinte, saturation, valeur en français). Également, la couleur jaunâtre de certaines feuilles a posé problème et ces valeurs n'ont pas pu être paramétrées pour faire partie de la végétation au risque de transformer d'autres pixels n'appartenant pas au romarin en couverture végétale. Le traitement manuel n'a pas pu être poussé à ce point.



Photo 5-1 Différence d'illumination entre deux photos (grandes touffes)

De plus, l'ombre dans les touffes a aussi pu être mal classifiée : cachant parfois du romarin, parfois le sol ou des branches. Ces observations lors de l'analyse n'ont pas pu être traitées manuellement puisque cela exige beaucoup de temps (en plus de la sélection des touffes de

manière manuelle pour chaque photo). A l'avenir, le traitement automatique sur des séries d'images serait également confronté à ces obstacles.

5.2.2 Modèles allométriques d'estimation de phytomasse de romarin

La génération de modèles de régression avec à disposition les cinq variables explicatives entrées (petit, grand et moyen D, H dominant et CV) donne des résultats satisfaisants pour expliquer le poids de phytomasse récoltable lors de la calibration. Les modèles linéaires les plus pertinents sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5-4 Sélection de modèles linéaires générés par JMP

	Variables	R ²	RMSE	AICc	BIC
1	- CV	0,8762	190,378	1431,16	1438,94
	- D moyen	0,8126	234,194	1475,48	1483,27
2	- CV - petit D	0,8922	178,456	1418,45	1428,75
	- CV - D moyen	0,8919	178,764	1418,82	1429,12
3	- CV - H dom - D moyen	0,9015	171,442	1411,04	1423,81
	- CV - H dom - petit D	0,9001	172,663	1412,56	1425,33
4	- CV - D moyen - H dom - grand D	0,9019	171,955	1412,88	1428,08
	- CV - D moyen - H dom - petit D	0,9019	171,955	1412,88	1428,08

Selon les critères de sélection, le modèle linéaire le plus précis pour l'estimation de la phytomasse est celui intégrant la CV, la hauteur dominante et le diamètre moyen. Il est tout de même intéressant de relever le modèle faisant intervenir la CV seule, puisque cela pourrait faciliter l'estimation de la phytomasse de romarin une fois l'automatisation de l'obtention de la CV (prise de photos et analyse par logiciel).

Quant au modèle avec le D moyen comme variable unique, il rejoint l'un des résultats trouvés par Mohammed Karimi dans sa thèse, à savoir que le diamètre de la touffe parvient à expliquer entre 82 % de la variabilité de la phytomasse récoltable (dans notre cas, 81 %). Les deux premiers modèles sont détaillés dans les parties suivantes.

5.2.2.1 Modèle de régression linéaire à 3 variables : couverture végétale, diamètre moyen et hauteur dominante

L'expression du modèle est la suivante :

$$26,88596641 + 6,0288361128 \text{ } D \text{ moy} + 4,074745605 \text{ } H \text{ dom} + 0,1233080225 \text{ } CV$$

Le graphique ci-dessous représente les résidus (poids observé – poids prévu par le modèle) en fonction des valeurs prévues selon les données de calibration.

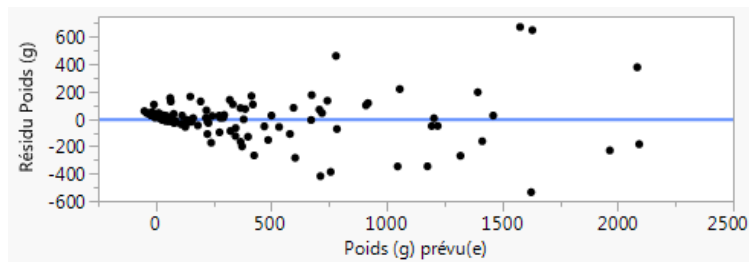


Figure 5-3 Modèle linéaire à 3 variables : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de calibration)

Les variables sélectionnées ont toutes de petites P-valeurs (<0,0001 pour le D moy et la CV, 0,002 pour la H dom), démontrant leur contribution significative à la prévision du poids. Le profileur de prévision ci-dessous permet d'étudier l'impact des facteurs sur la variable à expliquer.

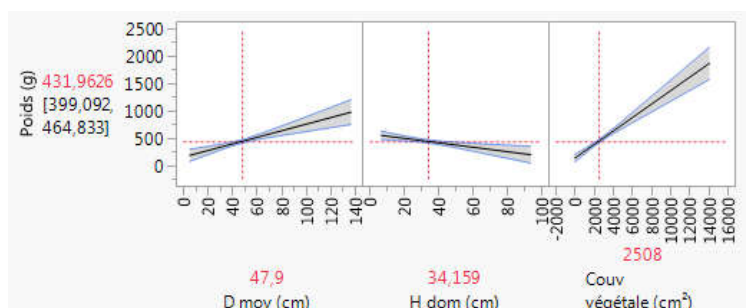


Figure 5-4 Profileur de prévision : plus la droite d'une variable est inclinée, plus son impact sur la variable à expliquer est fort (en rouge : valeurs moyennes)

Ainsi, si les 3 variables contribuent à expliquer le poids, nous observons que la CV joue un rôle plus important que les 2 autres variables. De manière plutôt surprenante, la hauteur est inversement corrélée au poids. Ceci peut s'expliquer, d'après les observations sur le terrain, par le fait que les touffes plus hautes paraissent plus lignifiées donc produisent moins de feuilles et sont moins denses.

Afin de vérifier l'exactitude du modèle de régression, l'expression a été appliquée aux données de validation et a fourni les résultats suivants :

RMSE = 163,61 g et

$R^2 = 0,8492$.

Le graphique des résidus en fonction des valeurs prévues permet finalement de visualiser la performance de prévision du modèle.

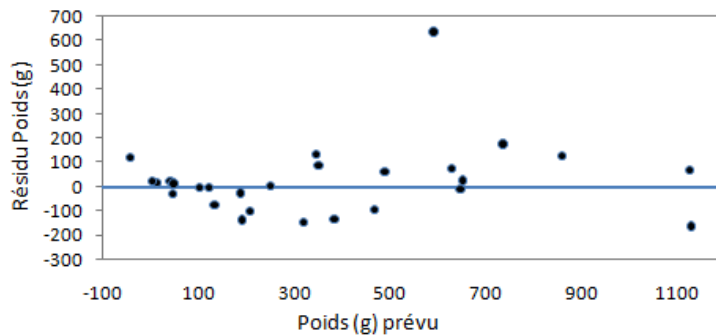


Figure 5-5 Modèle linéaire à 3 variables : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de validation)

5.2.2.2 Modèle de régression linéaire à 1 variable : couverture végétale

L'expression du modèle est la suivante :

$$28,303950378 + 0,1609466919 \text{ CV}$$

Le graphique des résidus en fonction des valeurs prévues associé est représenté ci-dessous.

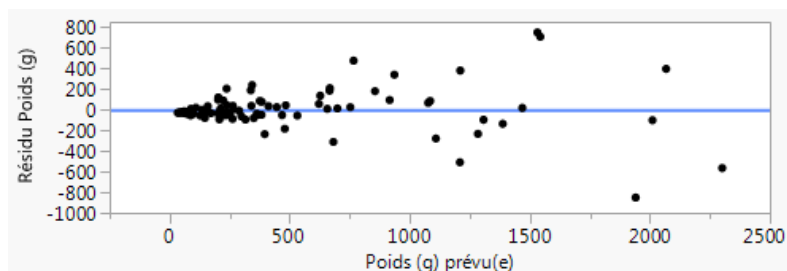


Figure 5-6 Modèle linéaire à 1 variable : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de calibration)

La CV a une P-valeur inférieure à 0,0001, ce qui confirme sa significativité.

L'application de l'expression de la prévision aux données de validation donne les résultats suivants :

RMSE = 164,70 g et

$R^2 = 0,8677$.

Le graphique des résidus en fonction des valeurs prévues permet à nouveau de visualiser la performance de prévision du modèle.

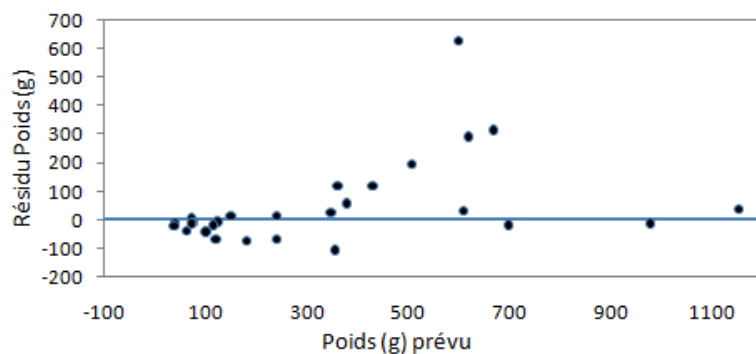


Figure 5-7 Modèle linéaire à 1 variable : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de validation)

5.2.2.3 Modèles de puissance à une variable

Au vu de la distribution des D moyens et des CV par rapport aux poids récoltés, la relation de ces variables avec le poids a également été modélisée selon une fonction puissance (Figure 5-8).

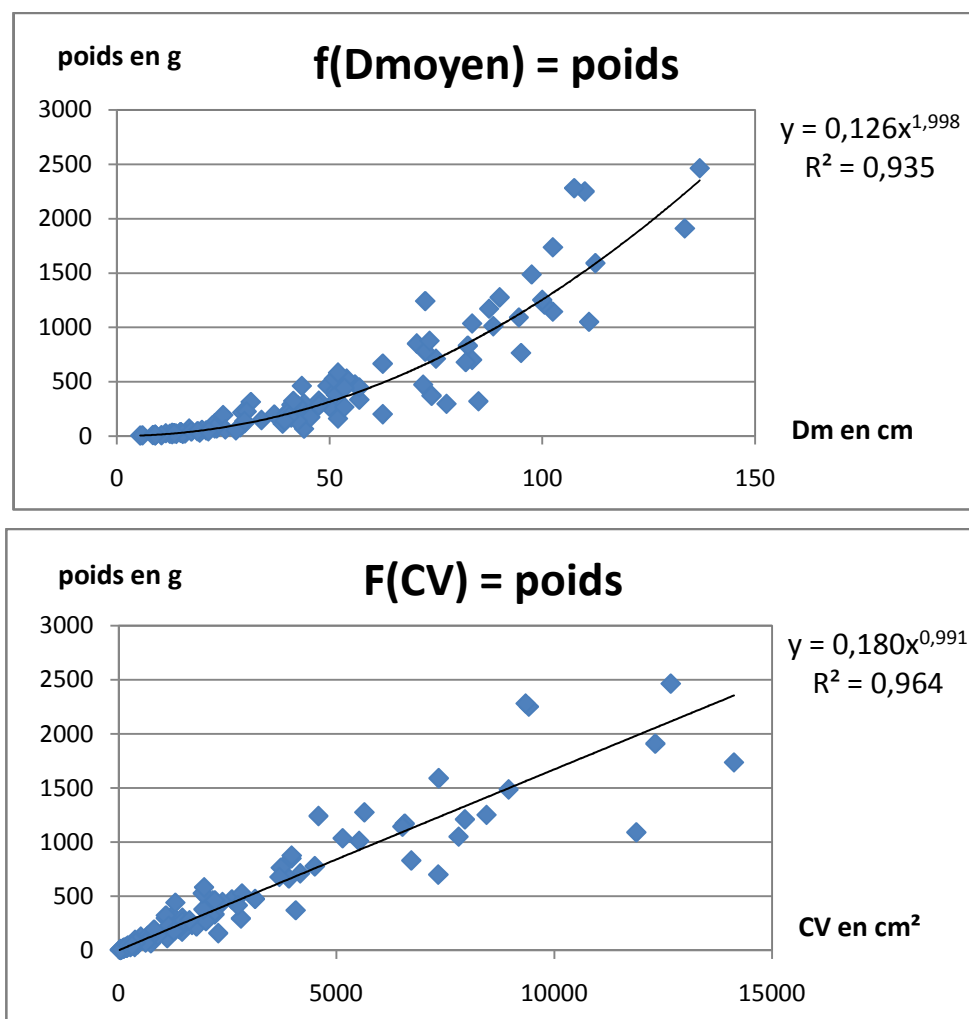


Figure 5-8 Relation entre le poids et le diamètre moyen (haut) ou la couverture végétale (bas) selon une fonction puissance (données de calibration)

Les résidus en fonction du poids prévu pour ces 2 modèles sont visibles à la Figure 5-9.

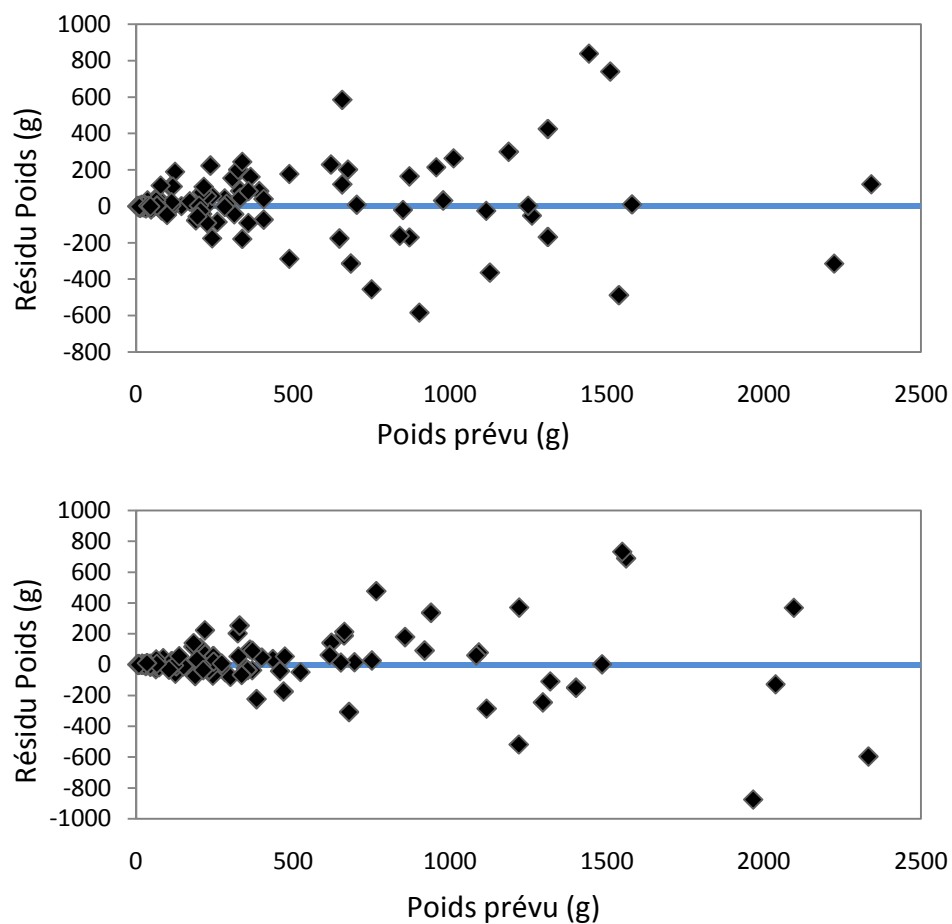


Figure 5-9 Modèle de puissance à 1 variable : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de calibration), selon la variable diamètre moyen (haut) et couverture végétale (bas)

Ces modèles de régression non linéaires, rapides à générer, montrent une corrélation plus forte qu'avec une fonction linéaire simple : 0,935 et 0,964 pour le D moyen et la CV respectivement.

Sur les données de validation, les résultats sont les suivants :

Variable	R ²	RMSE
D moyen	0,7419	209,91
CV	0,8685	166,39

Les graphiques des résidus en fonction du poids prévu associés sont présentés ci-dessous.

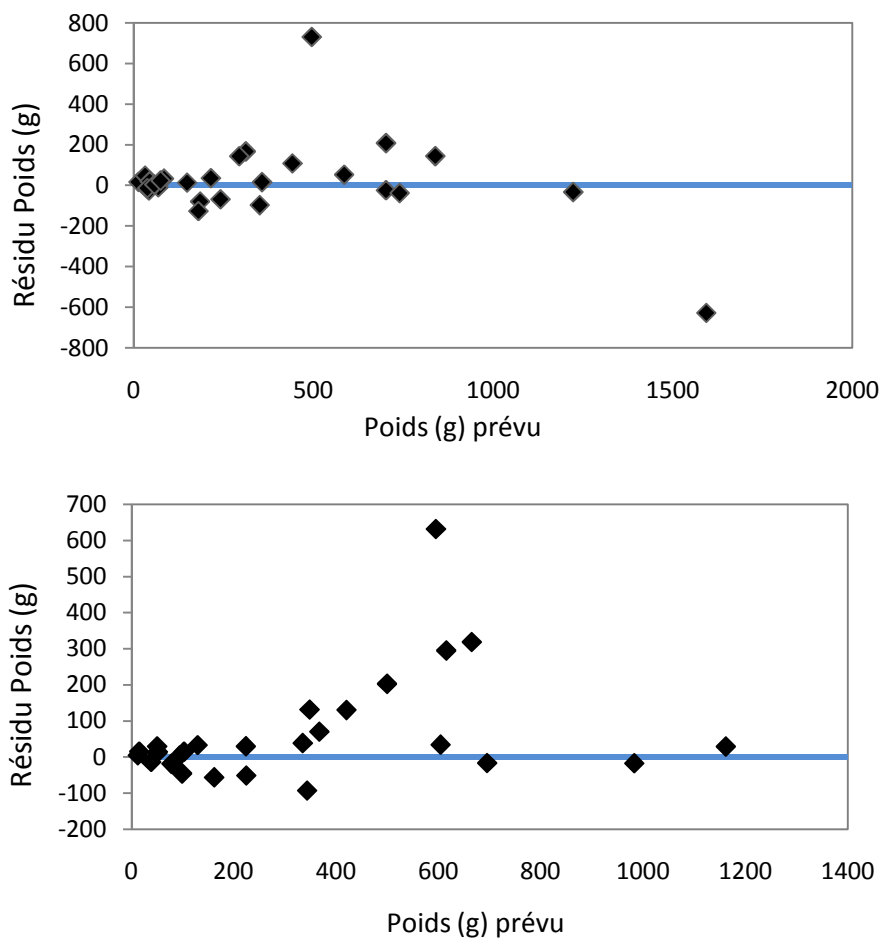


Figure 5-10 Modèle de puissance à 1 variable : résidus en fonction des valeurs prévues du poids (données de validation), selon la variable diamètre moyen (haut) et couverture végétale (bas)

L'exploration de modèles pour l'estimation de phytomasse de romarin montre que la variable couverture végétale permet une bonne précision, que ce soit seule ou en combinaison avec ces variables. Intégrée dans un modèle linéaire ou non linéaire simple, la CV explique presque 87 % de la variabilité du poids d'une touffe. Seule ou associée à la hauteur dominante et le diamètre moyen, l'erreur type de prévision varie entre 163, 61 et 166,39 g.

L'utilisation seule de la couverture végétale dans des modèles allométriques offre de nouvelles potentialités quant à la fréquence de réalisation des estimations, rendue possible par les techniques de traitement d'images. Possible à distance, d'un avion ou d'un drone, la prise de photo est une technique flexible et peu coûteuse. La limite serait le temps de traitement : sélection spécifique des touffes de romarin pour le calcul de la CV dans le logiciel CAN-EYE et éventuellement calcul de la surface photographiée des clichés pour obtenir la CV en cm^2 si la hauteur est variable.

Cette limite de reconnaissance du romarin par rapport aux autres espèces végétales dans les clichés empêche l'automatisation du traitement et représente donc un frein à l'utilisation de cette variable, surtout vu la quantité de photos à traiter pour une parcelle.

Si l'objectif à terme était de photographier intégralement (à la verticale) les parcelles des coopératives à l'aide de drones, à une hauteur d'environ 2 mètres, idéalement à la fin de l'été pour minimiser la végétation autre que le romarin pour calculer la couverture végétale occupée par ce dernier, cette limite doit être franchie.

L'indice de vert dans CAN-EYE n'est pas suffisant pour discerner le romarin d'autres plantes (informations insuffisantes dans les photos vraie couleur) et cette problématique rejoint celle de la cartographie du romarin : trouver des valeurs du spectre de réflectance du romarin qui le distinguent du spectre de réflectance des autres espèces dans une même gamme de longueurs d'onde. Dans un premier temps, il faudrait s'intéresser au romarin sain uniquement, pour réduire la variabilité du spectre de réflectance. Si des gammes de longueurs d'onde permettent de distinguer le romarin du reste de la végétation rencontrée, les drones pourraient alors embarquer des capteurs spécifiques et le tri des clichés (romarin/pas de romarin) ainsi que le calcul de la CV pourraient s'effectuer grâce à un classificateur en utilisant par exemple le langage python (Salas-Aguilar et al., 2017). Une alternative au travail avec les réflectances serait d'analyser des photos de romarin sain et des espèces qui l'accompagnent habituellement en système de codage des couleurs IHS. Si ce système permet la discrimination du romarin, alors l'approche du classificateur pourrait être appliquée pour ne sélectionner dans chaque photo que les pixels correspondant aux gammes de valeurs spécifiques du romarin pour l'intensité, la teinte et la saturation.

CONCLUSION

Le suivi du romarin dans la région de l'Oriental au Maroc est un aspect clé de la gestion de cette ressource. Le stage auprès de la DREFO sur cette thématique et le TFE en découlant font partie des moyens de coopération à disposition entre cette institution et l'ULg. Ce travail a permis de passer une première étape dans la cartographie à partir de la télédétection même si l'objectif de cartographie du romarin n'a pas été atteint avec les données à disposition et la méthodologie proposée. En effet, la précision de la classification est très insuffisante et la séparabilité des classes mauvaise. La faute est à attribuer majoritairement à la résolution spatiale insuffisante et à la simplification non judicieuse des données secondaires. Pour de futurs essais, la littérature semble pointer vers des résolutions inférieures au mètre pour les images satellites à classer, étant donné l'absence de nappes de romarin pur ou dominant. La précision des données de validation est à accorder : celles-ci pourraient consister en de la reconnaissance visuelle sur les images si la résolution le permet. Si non, la prise de ROI sur le terrain doit intégrer une erreur de ± 3 m. Conformément au deuxième objectif, la couverture végétale des touffes est une variable prometteuse pour l'estimation de phytomasse dans le sens où son acquisition à partir de photos au nadir, qui peuvent être prises à distance, permettrait d'actualiser les estimations annuellement plus rapidement, sans besoin de sortir sur le terrain de manière systématique. Les résultats obtenus indiquent des corrélations de 87 % entre la CV et le poids récolté dans le cas de modèles simples, linéaire et non linéaire et de 85 % pour un modèle linéaire intégrant le D moyen et la hauteur dominante en plus de la CV, avec des erreurs types comprises entre 163,61 g (3 variables) et 166,39 g. La limite à franchir reste l'automatisation du traitement des photos pour ne sélectionner que la couverture végétale des touffes de romarin. Les pistes à explorer sont l'analyse du spectre de réflectance du romarin et des espèces qui l'accompagnent (sujets sains), par exemple pour le mois où les photos seraient prises chaque année en vue d'actualiser les estimations, pour mettre en évidence les gammes de longueurs d'onde qui permettraient de distinguer le romarin, ou les images en IHS.

La poursuite de ce travail par la DREFO avec la collaboration de l'ULg permettra de renforcer les compétences de la DREFO dans le domaine de la télédétection et de l'analyse d'images et surtout de répondre, à court terme, aux contestations relatives aux surestimations de phytomasse. De plus, ces compétences transversales pourront trouver des applications dans

d'autres domaines relevant de la responsabilité des Eaux et Forêts, permettant ainsi d'optimiser leur gestion.

REFERENCES

- Ali, A., Xu, M.-S., Zhao, Y.-T., Zhang, Q.-Q., Zhou, L.-L., Yang, X.-D. et Yan, E.-R. (2015). Allometric biomass equations for shrub and small tree species in subtropical China. *Silva Fennica*, 49(4). doi : 10.14214/sf.1275
- Carson, H. W., Las, L. W. et Callihan, R. H. (1995). Detection of Yellow Hawkweed (*Hieracium pratense*) with High Resolution Multispectral Digital Imagery. *Weed Technology*, 9(3), 477-483. Repéré à https://www.jstor.org/stable/3987659?newaccount=true&read-now=1&seq=1#page_scan_tab_contents
- Chen, D., Shi, R., Pape, J.-M., Neumann, K., Arend, D., Graner, A., Chen, M. et Klukas, C. (2018). Predicting plant biomass accumulation from image-derived parameters. *Gigascience*, 7(2), 1-13. doi : 10.1093/gigascience/giy001
- Chen, Z., Chen, W. E., Leblanc, S. G., Henry, G. H.-R. et Chen, W (2010). Digital Photograph Analysis for Measuring Percent Plant Cover in the Arctic. *Arctic*, 63(3), 315-326. Repéré à https://www.jstor.org/stable/20799599?seq=1#page_scan_tab_contents
- Chianucci, F., Lucibelli, A. et Dell'Abate, M. T. (2018). Estimation of ground canopy cover in agricultural crops using downward-looking photography. *Biosystems Engineering*, 169, 209-216. doi : 10.1016/j.biosystemseng.2018.02.012
- Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement (CNUCED) (2017). *Examen national de l'export vert du Maroc : produits oléicoles, romarin et thym*. Repéré sur le site du CNUCED : http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/ditcted2017d1drev1_fr.pdf
- Denis, A. (2016). *Travaux pratiques de télédétection spatiale*. Repéré à <https://orbi.uliege.be/handle/2268/143553>.
- Dietz, H. et Steinlein, T. (1996). Determination of plant species cover by means of image analysis. *Journal of Vegetation Science*, 7(1), 131-136. doi : 10.2307/3236426
- Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de l'Orientale (DREFO) (1996). Chapitre 6 : Biomasse du romarin. *Aménagement de la forêt domaniale d'El Ayat – Résultats de l'inventaire* (p. 16).
- DREFO (1998). Chapitre 4.3 : Phytomasse du romarin. *Étude d'aménagement de la forêt de Debdou – Résultats des inventaires* (p. 53).
- DREFO (2012). Étude de la filière du romarin dans la région de l'Orientale. État des lieux, diagnostic, stratégie de développement de la filière et plan d'action.
- DREFO (2016). Cahier des charges Indication Géographique « huile essentielle du romarin de l'Orientale »

- Direction Régionale d'Oujda (2012). *La Région de l'Oriental : Disparités intra-régionales et développement contrasté*. Repéré sur le site du Haut Commissariat au Plan – Direction Régionale de l'Oriental, section Publications : http://www.hcp.ma/region-oriental/docs/ETUDESREGIONALES/disparites_intra_regionales.pdf
- European Space Agency [ESA] (s. d.). Spatial resolution. Repéré sur le site de l'ESA, section User guides – Sentinel-2 MSI – Resolution – Spatial : <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>
- EWI-MAROC/EWI-ZURICH (s. d.). *Monographie régionale de l'environnement : Région de l'Oriental. Rapport de synthèse*. Repéré sur le site du Haut-Commissariat au Plan, section Maalama Textuelle – Développement Durable – Economie Durable – Economie de l'environnement – Evaluation écologique : http://www.oriental.ma/upload/MoDUle_1/File_1_101.pdf
- Fellah Trade (s. d.). Les plantes aromatiques et médicinales au Maroc. Repéré sur le site de Fellah Trade, section Développement Durable – Plantes aromatiques et médicinales au Maroc : <https://www.fellah-trade.com/fr/developpement-durable/plantes-medicinales>
- Gamm vert (s. d.). Romarin. Repéré sur le site de Gamm vert, section Conseils de jardinage – fiches plantes et maladies : <http://www.gammvert.fr/conseils/conseils-de-jardinage/romarin>
- Haut Commissariat au Plan (2016a). Monographies de la Région. Repéré sur le site du *Haut Commissariat au Plan*, section Publications : https://www.hcp.ma/region-oriental/Publications-de-la-DRO_r1.html
- Haut Commissariat au Plan (2016 b). Activité, emploi et chômage, premiers résultats (annuel), 2016. *Haut Commissariat au plan*, section Publications. Repéré à <https://www.hcp.ma/downloads/>
- HCEFLCD (s. d. a). Institution. Repéré sur le site du HCEFLCD, section Présentation : <http://www.eauxetforets.gov.ma/fr/text.aspx?id=990&uid=19>
- HCEFLCD (s. d. b). Direction Régionale de l'Oriental — Oujda. Repéré sur le site du HCEFLCD, section Présentation – Organigramme : <http://www.eauxetforets.gov.ma/fr/text.aspx?id=991&uid=20>
- HCEFLCD (2009). *Ressources – Bulletin d'information semestriel*. Repéré à http://www.eauxetforets.gov.ma/files/editor_upload//Bulletin_information_1.pdf

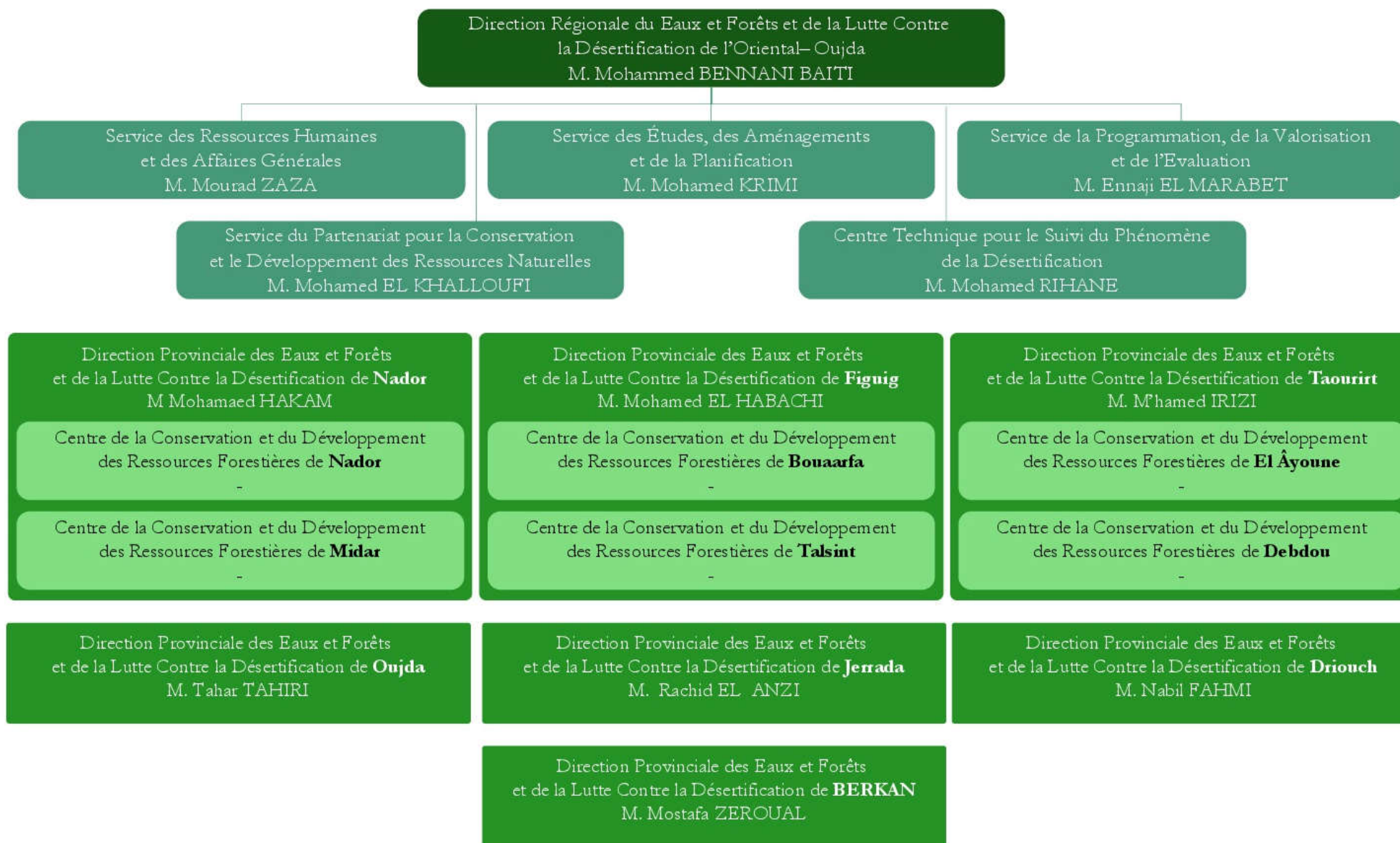
- HCEFLCD (2013). *Projet PAM : intégration de la biodiversité dans la chaîne de valeurs des plantes aromatiques et médicinales méditerranéennes au Maroc – Monographie des Plantes Aromatiques et Médicinales du Maroc. Rosmarinus officinalis L.* Repéré à http://www.fellah-trade.com/ressources/pdf/Monographie%20Rosmarinus_officinalis_Com.pdf
- HCEFLCD (2014). *Projet PAM : intégration de la biodiversité dans la chaîne de valeurs des plantes aromatiques et médicinales méditerranéennes au Maroc – Manuel des bonnes pratiques de collecte du romarin « Rosmarinus officinalis ».* Repéré à http://www.fellah-trade.com/ressources/pdf/MBPC_Romarin_Francais.pdf
- HCEFLCD (2017). Analyse et évaluation du système de gestion de la ressource naturelle romarin dans la région de l'Oriental. Projet AZIR-O.
- Institut Numérique (2014). 2.2. Historique de la télédétection. Repéré à <http://www.institut-numerique.org/22-historique-de-la-teledetection-52eca9e7582a9>
- Inter-réseaux Développement rural (2016). *Plan Maroc Vert : les grands principes et avancées de la stratégie agricole marocaine – Bulletin de Synthèse de souveraineté alimentaire n° 20.* Repéré à <http://www.fao.org/family-farming/detail/fr/c/416258/>
- Jacob, S. (2017, 5 avril). Plantes aromatiques et médicinales : Tout pour l'export! *L'Économiste.com*. Repéré à <https://www.leconomiste.com/article/1010601-plantes-aromatiques-et-medicinales-tout-pour-l-export>
- Karimi, M. (2014). *Les plantes aromatiques et médicinales du Maroc Oriental. Phytoécologie – Ethnobotanique – Modélisation – Phytochimie.* Université Mohammed Premier, Oujda, Maroc.
- Kizel, F., Shoshany, M., Netanyahu, N., Even-Tzur, G. et Benediktsson, J. A. (2017). A Stepwise Analytical Projected Gradient Descent Search for Hyperspectral Unmixing and Its Code Vectorization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, PP(99), 1-19. doi : 10.1109/TGRS.2017.2692999
- Landis, J. R. et Koch, G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. Doi : 10.2307/2529310
- Macfarlane, C. et Ogden, G. N. (2012). Automated estimation of foliage cover in forest understorey from digital nadir images. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), 405-415. doi : 10.1111/j.2041-210X.2011.00151.x
- Mahyou, H. (2012). *Application of geomatics for the assessment of pastoral resources in Morocco.* Université de Liège, Liège, Belgique. Repéré à https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/135060/2/These_mahyou_acc%C3%A8s%20ouvert%20%282%29.pdf

- Moore, J., Yousef, M. et Tsiani, E. (2016). Anticancer Effects of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Extract and Rosemary Extract Polyphenols. *Nutrients*, 8(11), 731. doi : 10.3390/nu8110731
- Naggar M. et Iharchine K. (2015). Pour une valorisation durable des produits forestiers non ligneux : Cas des faciès à romarin de l'Orient du Maroc. *XIVeme CONGRES FORESTIER MONDIAL*. Durban, Afrique du Sud. Repéré à : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01208545/document>
- Okin, G. S., Roberts, D.A., Murray, B. et Okin, W. J. (2001). Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments. *Remote Sensing of Environment*, 77(2), 212-225. doi : 10.1016/S0034-4257(01)00207-3
- Quint, C. T. et Dech, J. P. (2003). Allometric models for predicting the aboveground biomass of Canada yew (*Taxus canadensis* Marsh) from visual and digital cover estimates. *Canadian Journal of Forest Research (Revue canadienne de recherche forestière)*, 40(10), 2003-2014. doi:10.1139/X10-146
- Salas-Aguilar, V., Sánchez-Sánchez, C., Rojas-Garíá, F., Paz-Pellat, F., Valdez-Lazalde, J. R. et Pinedo-Alvarez, C. (2017). Estimation of vegetation cover using digital photography in a regional survey of Central Mexico. *Forests*, 8(10), 392. doi : 10.3390/f8100392
- Tackenberg, O. (2007). A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rates, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis. *Annals of Botany*, 99(4), 777–783. doi : 10.1093/aob/mcm009
- Vashum, K. T. et Jayakumar, S. (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests – A review. *Journal of Ecosystem and Ecography*, 2(4). doi : 10.4172/2157-7625.1000116
- Yang, W., Wang, S., Zhao, X., Zhang, J. et Feng, J. (2015). Greenness identification based on HSV decision tree. *Information Processing in Agriculture*, 2(3-4), 149-160. doi : 10.1016/j.inpa.2015.07.003
- Younis, M. T., Melía, J., Gilabert, M. A., García-Haro, F. J. et Bastida, A. J. (s. d.). Lithology and vegetation cover mapping in the Guadalentín Basin as interpreted through remote sensing data. Dans N.A.Geeson, C.J. Brandt, and J.B. Thornes. *Mediterranean Desertification: A Mosaic of Processes and Responses* (p. 277-288). Londres, Royaume-Uni : John Wiley & Sons Ltd.
- Zhao, D., Xie, D., Zhou, H., Jiang, H. et An, S. (2012). Estimation of leaf area index and plant area index of a submerged macrophyte canopy using digital photography. *PLoS One*, 7(12). doi : 10.1371/journal.pone.0051034
- Zrira (s. d.). *La filière des PAM au Maroc*. Repéré à http://www.ardna.org/ardna_member_access/uploads/files/publications/p_aeec6e0e1d.pdf

ANNEXE 1 – ORGANIGRAMME DE LA DREFO (HCEFLCD, s. d. b)



Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de l'Oriental - Oujda



ANNEXE 2 – VEGETATION ANNUELLE RENCONTREE LORS DES SORTIES TERRAIN





ANNEXE 3 – DISTRIBUTION DES VARIABLES INVENTORIEES SUR LES 134 TOUFFES DE ROMARIN SELON LA CATEGORIE (dans l'ordre : grande [44], moyenne [44], petite [45])

