



Organisation des Nations Unies
pour l'alimentation
et l'agriculture



RAPPORT TECHNIQUE

Optimiser la production des
biens et services par les
écosystèmes boisés
méditerranéens
dans un contexte de
changements
globaux

Novembre 2015



**Analyse de vulnérabilité au
changement climatique
du couvert forestier**

La forêt de Siliana (Tunisie)

Ce rapport a été rédigé dans le cadre du projet «Optimiser la production de biens et services par les écosystèmes boisés méditerranéens dans un contexte de changements globaux» financé par le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) sur la période 2012-2016, sous la maîtrise d'ouvrage du Plan Bleu et du Secrétariat du Comité Silva Mediterranea



FONDS FRANÇAIS POUR
L'ENVIRONNEMENT MONDIAL



Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) ou le Plan Bleu pour l'Environnement et le Développement en Méditerranée (Plan Bleu) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. La mention de sociétés déterminées ou de produits de fabricants, qu'ils soient ou non brevetés, n'entraîne, de la part de la FAO ou du Plan Bleu aucune approbation ou recommandation desdits produits de préférence à d'autres de nature analogue qui ne sont pas cités.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles du/des auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement les vues ou les politiques de la FAO ou du Plan Bleu.

La FAO encourage l'utilisation, la reproduction et la diffusion des informations figurant dans ce produit d'information. Sauf indication contraire, le contenu peut être copié, téléchargé et imprimé aux fins d'étude privée, de recherches ou d'enseignement, ainsi que pour utilisation dans des produits ou services non commerciaux, sous réserve que la FAO soit correctement mentionnée comme source et comme titulaire du droit d'auteur et à condition qu'il ne soit sous-entendu en aucune manière que la FAO approuverait les opinions, produits ou services des utilisateurs.

Toute demande relative aux droits de traduction ou d'adaptation, à la revente ou à d'autres droits d'utilisation commerciale doit être présentée au moyen du formulaire en ligne disponible à www.fao.org/contact-us/licence-request ou adressée par courriel à copyright@fao.org.

Les produits d'information de la FAO sont disponibles sur le site web de la FAO (www.fao.org/publications) et peuvent être achetés par courriel adressé à publications-sales@fao.org.

ISBN 978-92-5-209567-5 (FAO)

© FAO, 2016

Publié par

l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

et

le Plan Bleu pour l'Environnement et le Développement en Méditerranée



AUTEURS DU RAPPORT

Ali Aloui, Expert forestier en évaluation des productions forestières (Tunisie)

Contact : alialoui169@gmail.com

Kamel Tounsi, Expert forestier en systèmes d'information géographiques (Tunisie)

Contact : tounsikamel59@gmail.com

ÉQUIPE NATIONALE

Saleh El Mensi, Point focal, Ingénieur principal, Direction Générale des Forêts, Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche

Contact : s_elmensi@yahoo.fr

Ameur Mokthar, Référent thématique, Sous Directeur des Aménagements Forestiers, Direction Générale des Forêts

Contact : ameur59@yahoo.fr

Ali Aloui, Expert national en évaluation des productions forestières,

Contact : alialoui169@gmail.com

Kamel Tounsi, Expert national en systèmes d'information géographiques

Contact : tounsikamel59@gmail.com

APPUI TECHNIQUE ET RELECTURE

Nicolas Picard, Secrétaire du Comité *Silva Mediterranea*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Département Forêts, Division des politiques et des ressources forestières

Contact : Nicolas.Picard@fao.org

Valentina Garavaglia, Consultante, Comité *Silva Mediterranea*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Département Forêts, Division des politiques et des ressources forestières

Contact : Valentina.Garavaglia@fao.org

Francesco de Luca, Comité *Silva Mediterranea*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Département Forêts, Division des politiques et des ressources forestières

Contact : Francesco.DeLuca@fao.org



COORDINATION ET MAÎTRISE D'OUVRAGE

Christophe Besacier¹, Secrétaire du Comité *Silva Mediterranea*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Département Forêts, Division des politiques et des ressources forestières

Contact : Christophe.Besacier@fao.org

Nicolas Picard, Secrétaire du Comité *Silva Mediterranea*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Département Forêts, Division des politiques et des ressources forestières

Contact : Nicolas.Picard@fao.org

Valentina Garavaglia, Comité *Silva Mediterranea*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Département Forêts, Division des politiques et des ressources forestières

Contact : Valentina.Garavaglia@fao.org

1. position actuelle : Mécanisme de restauration des forêts et des paysages, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Département Forêts, Division des politiques et des ressources forestières

Table des matières

Contexte : présentation du site pilote et du gouvernorat de Siliana	9
Le gouvernorat de Siliana.....	9
Le site pilote et les nouvelles limites de la zone d'étude.....	9
L'occupation des sols	9
La population.....	11
Le couvert forestier de la zone d'étude : une description détaillée.....	19
Délits forestiers entre 2011 et 2014 sur le site pilote de Siliana.....	24
Feux de forêt dans le site pilote de Siliana.....	27
Le climat actuel et les scénarios futurs.....	29
Le climat actuel et passé.....	29
Les scénarios climatiques aux horizons 2035 et 2065 : les modèles "Representative Concentration Pathways"	31
Évaluation des dynamiques spatiotemporelles des occupations forestières et non forestières et projections	34
Cadre temporel.....	34
Méthodes d'évaluation	34
Documents cartographiques employés pour le suivi de l'évolution des couverts forestiers et non forestiers.....	35
Suivi des dynamiques spatiotemporelles : méthodologie.....	36
Les dynamiques observées entre 1990-2000 (comparaison des deux inventaires).....	40
Les dynamiques observées entre 1963 et 2000 (carte phytoécologique et inventaire forestier).....	41
Les dynamiques observées entre 1963 et 2014.....	41
Synthèse des comparaisons et tendances évolutives	43
Les dynamiques des occupations du sol dans le site pilote du bassin versant de Siliana et projections à l'horizon 2036	47
Évaluation de la vulnérabilité des occupations forestières au changement climatique et autres facteurs.....	55
Unité spatiale de référence.....	55
Cadre temporel.....	55
Approche méthodologique : l'approche spatiale multifactorielle	55
Les vulnérabilités synthétiques : situation de référence et projections futures	62
Autres variables supplémentaires pour évaluer la vulnérabilité.....	63
Vulnérabilités de la forêt de la zone d'étude et effets sur les arbres	72
Formes et niveaux de vulnérabilités actuelles et futures dans la zone d'étude.....	72
Vulnérabilité aux facteurs anthropiques	72
Vulnérabilité aux facteurs climatiques	73
Effets de la vulnérabilité climatique sur la forêt de la zone d'étude : répercussions sur la croissance en épaisseur des arbres	76



Effets du changement climatique sur les biens et services fournis par les écosystèmes boisés au niveau du site pilote	81
Conclusions	83
Annexes	85

Figures et tableaux

Figure 1.1 : Situation du gouvernorat de Siliana.....	11
Figure 1.2 : Délégations du gouvernorat de Siliana.....	12
Figure 1.3 : Limites de la zone d'étude et du bassin versant de Siliana.....	13
Figure 1.4 : Carte des secteurs de la zone d'étude.....	13
Figure 1.5 : Carte de l'occupation des sols dans la zone d'étude.....	14
Figure 1.6 : Classement des secteurs de la zone d'étude en fonction des surfaces en pin d'Alep.....	23
Figure 1.7 : Carte des formations forestières de la zone d'étude.....	24
Figure 1.8 : Taux de recouvrement des forêts de pin d'Alep dans la zone d'étude.....	25
Figure 1.9 : Distribution des forêts aménagées dans la zone d'étude.....	25
Figure 1.10 : Fréquence relative (%) des feux de forêt par classe de surface brûlée (1985-2012).....	27
Figure 1.11 : Nombre cumulé des feux de forêt entre 1985 et 2012.....	27
Figure 1.12 : Surface brûlée cumulée des feux de forêt entre 1985 et 2012.....	28
Figure 2.1 : Précipitations de la station de Siliana entre 1954 et 2006.....	30
Figure 2.2 : Températures maximales et minimales de la station de Siliana entre 1954 et 2006.....	30
Figure 2.3 : Correspondances RCP/SRES.....	32
Figure 3.1 : Changement d'affectation des forêts entre 1990 et 2000.....	40
Figure 3.2 : Changement d'affectation des garrigues non arborées entre 1990 et 2000.....	41
Figure 3.3 : Changement d'affectation des garrigues non arborées entre 1990 et 2000.....	43
Figure 3.4 : Changement d'affectation des formations ripicoles entre 1990 et 2000.....	44
Figure 3.5 : Comparaison des occupations des sols selon quatre dates et lecture des tendances.....	45
Figure 3.6 : Évolution des surfaces des trois occupations dans le premier groupe de secteurs.....	45
Figure 3.7 : Évolution des surfaces des trois occupations dans le deuxième groupe de secteurs.....	46
Figure 3.8 : Évolution des surfaces des trois occupations dans le troisième groupe de secteurs.....	46
Figure 3.9 : Évolution des surfaces des trois occupations dans le quatrième groupe de secteurs.....	47
Figure 3.10 : Évolution des surfaces des trois occupations dans le cinquième groupe de secteurs.....	47
Figure 3.11 : Évolution des surfaces des trois occupations dans la zone d'étude.....	48
Figure 4.1 : Schéma conceptuel de l'approche spatiale multifactorielle employée.....	56
Figure 4.2 : Variables employées et procédés d'exploitation.....	57
Figure 4.3 : Carte de la vulnérabilité biophysique de la zone d'étude en 2000.....	63
Figure 4.4 : Carte de vulnérabilité au déficit hydrique (exprimé en nombre de mois successifs) de la zone d'étude en 2000.....	64
Figure 4.5 : Carte de la vulnérabilité anthropique de la zone d'étude en 2000.....	65
Figure 4.6 : Carte de la vulnérabilité synthétique : situation de référence 2000.....	66
Figure 4.7 : Carte de la vulnérabilité synthétique : horizon 2016-2035 RCP4.5.....	67
Figure 4.8 : Carte de la vulnérabilité synthétique : horizon 2016-2035 RCP8.5.....	67

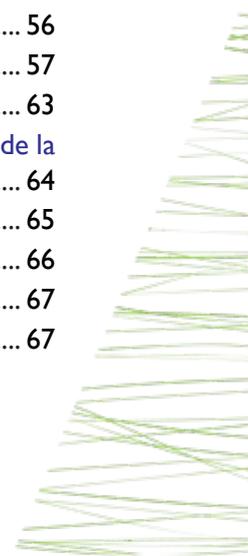


Figure 4.9 : Carte de la vulnérabilité synthétique : horizon 2046-2065 RCP4.5.....	68
Figure 4.10 : Carte de la vulnérabilité synthétique : horizon 2046-2065 RCP 8.5	68
Figure 4.11 : Coefficient d'Emberger calculé pour Siliana	69
Figure 4.12 : Représentation spatial du coefficient d'Emberger calculé sur la base de la donnée du CCR MARS WGS84 pour la période 1979-2013 sur toute la Tunisie	70
Figure 4.13 : Représentation spatiale des niveaux de Vegetation Health Index calculés pour la Tunisie entre 1979 et 2013. Les années en gras et soulignées sont des années particulières à cernes minces	71
Figure 5.1 : Région du Kef-Tunisie : forêt de Saddine – versant nord de Djebel Tarrabia – vue générale sur le dépérissement du pin d'Alep. À droite : vue de près de la mortalité sur le versant nord de Djebel Tarrabia. Latitude 36°,16'N et longitude 8° 24'E (Photo A. Aloui).....	77
Figure 8.1 : Carte des classes de pente des forêts de pin d'Alep ramenées à l'échelle du secteur	85
Figure 8.2 : Carte des classes d'exposition des forêts de pin d'Alep ramenées à l'échelle du secteur	86
Figure 8.3 : Carte de la profondeur des sols des forêts de pin d'Alep dans les secteurs.....	86
Figure 8.4 : Carte de la nature des sols pour les forêts de pin d'Alep dans les secteurs	87
Figure 8.5 : Carte de la texture des sols pour les forêts de pin d'Alep de la zone d'étude ramenée à l'échelle du secteur.....	87
Figure 8.6 : Carte de la réserve utile des sols occupés en pin d'Alep ramenée à l'échelle du secteur	88
Figure 8.7 : Carte des changements d'affectation des sols.....	89
Figure 8.8 : Carte de la pression pastorale.....	89
Figure 8.9 : Carte de la pression sur le bois.....	90
Figure 8.10 : Carte des incendies.....	90
Figure 8.11 : Carte du statut foncier	91
Tableau 1.1 : Secteurs de la zone d'étude et superficies totales en hectares.....	10
Tableau 1.2 : Indicateurs socio-économiques de la population forestière du gouvernorat de Siliana	15
Tableau 1.3 : Populations totales, communales et rurales dans les secteurs de la zone d'étude (source INS)	17
Tableau 1.4 : Répartition des populations et des ménages habitant dans les forêts de la zone d'étude	19
Tableau 1.5 : Répartition des populations et des ménages habitant à 5 km des forêts de la zone d'étude.....	20
Tableau 1.6 : Surfaces forestières par secteur dans la zone d'étude	21
Tableau 1.7 : Massifs aménagés de la zone d'étude.....	23
Tableau 1.8 : Délits forestiers constatés et verbalisés entre 2011 et 2014 sur le site pilote de Siliana	26
Tableau 2.1 : Forçage radiatif, concentration en CO ₂ et forme du profil selon les modèles RCP	31
Tableau 2.2 : Augmentation moyenne des températures mensuelles (en °C, entre 0°C et 2,5°C) et diminution des pluviométries en pourcentage (entre 5% (-0,05) et 15% (-0,15)) par modèle climatique (RCP4.5 et RCP8.5) et par période (2016-2035 et 2046-2065)	33

Tableau 3.1 : Regroupement en trois classes de l'inventaire forestier et pastoral de 1990	36
Tableau 3.2 : Regroupement en trois classes de l'inventaire forestier et pastoral de 2000	37
Tableau 3.3 : Schéma général du processus de suivi de la dynamique des occupations des sols....	38
Tableau 3.4 : Évolution des occupations entre 1963 et 2000	42
Tableau 3.5 : Stabilité des affectations des sols et des pertes par type d'occupation.....	42
Tableau 3.6 : Stabilité des affectations des sols et des pertes par type d'occupation.....	42
Tableau 3.7 : Évolution des occupations entre 1963 et 2014	42
Tableau 3.8 : Pertes et gains d'une affectation à l'autre entre 1963 et 2014 (ha) pour 100 ha de chaque affectation de 1963.....	43
Tableau 3.9 : Stabilité des affectations des sols et des pertes par type d'occupation.....	44
Tableau 3.10 : Évolution des forêts naturelles entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana	48
Tableau 3.11 : Évolution des plantations artificielles entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana	49
Tableau 3.12 : Évolution des plantations pastorales entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana	50
Tableau 3.13 : Évolution des superficies en hectares des formations forestières linéaires entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana	51
Tableau 3.14 : Évolution de la superficie des garrigues arborées entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana	51
Tableau 3.15 : Évolution de la superficie des garrigues arborées entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana	53
Tableau 3.16 : Évolution des superficies (ha) de l'arboriculture fruitière dans le site pilote du bassin versant de Siliana entre 2001 et 2014 et projection sur la période 2015-2036	53
Tableau 3.17 : Terres agricoles converties en forêts (ha) entre 2000 et 2014 et projection entre 2015 et 2020 dans le site pilote du bassin versant de Siliana	54
Tableau 4.1 : Seuils retenus pour toutes les variables thématiques employées, les coefficients de pondération retenus et les méthodes de croisement des produits sur le plan cartographique	58
Tableau 4.3 : Regroupement des années 1985 à 2013 selon les niveaux de VHI pour la Tunisie ..	66
Tableau 5.1 : Superficie (ha) des formations forestières des secteurs plus vulnérables aux facteurs biophysiques.....	73
Tableau 5.2 : Secteurs à forte vulnérabilité aux facteurs anthropiques	74
Tableau 5.3 : Superficies (ha) des formations forestières très vulnérables aux facteurs climatiques. État de référence et projections	75
Tableau 5.4 : Cernes minces observés pour trois espèces de pins et dans six régions tunisiennes	78
Tableau 5.5 : Caractéristiques climatiques moyennes des années sèches 1985, 1995 et 2002 (à cernes minces) dans le site pilote.....	80
Tableau 6.1 : Valeur économique totale de la pinède de Siliana avec et sans changement climatique	82
Tableau 6.2 : Pertes probables en valeur dues au changement climatique selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 du GIEC	82



Acronymes

- CCR** Centre Commun de Recherche. 60, 66
- DGF** Direction générale des forêts. 5, 7, 30, 45
- GES** gaz à effet serre. 48
- GIEC** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 27, 30, 31, 78
- IDH** Indice de Développement Humain. 12
- IFN** Inventaire Forestier National. 32, 33
- INS** Institut National des Statistiques. 7, 13
- PFNL** Produits Forestiers Non Ligneux. 12, 78
- RCP** Representative Concentration Pathways. 27, 28
- REDD** Réduction des Émissions provenant de la Déforestation et de la Dégradation des forêts.
5
- RNDB** Revenu national disponible brute. 11
- SMAG** Salaire Minimum Agricole Garanti. 11
- SMIG** Salaire Minimum Interprofessionnel Garanti. 11
- SRES** Special Report on Emissions Scenarios. 27, 28
- VHI** Vegetation Health Index. 61, 62, 76, 80
- VITO** Institution flamande pour la recherche technologique. 60

Contexte : présentation du site pilote et du gouvernorat de Siliana

Le gouvernorat de Siliana

Le site pilote retenu est celui du bassin versant de Siliana (figure 1.1). Le gouvernorat auquel il appartient, et dont il porte le nom, s'étend sur une surface totale de 464 200 ha. Ce gouvernorat est situé dans la partie sud-est de la région nord-ouest de la Tunisie qui englobe les quatre gouvernorats du Kef, Jendouba, Siliana et Béja. Le gouvernorat est allongé nord-sud et a des limites avec sept gouvernorats : le gouvernorat de Béja au nord, le gouvernorat de Jendouba au nord-ouest sur une petite portion, le gouvernorat du Kef à l'ouest, le gouvernorat de Zaghouan à l'est (en haut), le gouvernorat de Kairouan à l'est (en bas), le gouvernorat de Kasserine au sud, le gouvernorat de Sidi Bouzid au sud-est sur une petite portion. La ville de Siliana, qui constitue le chef-lieu du gouvernorat, est située à environ 110 km au sud-ouest de Tunis.

Le gouvernorat de Siliana est composé de 11 délégations et 86 secteurs dont la répartition est présentée dans la carte administrative 1.2.

Le site pilote et les nouvelles limites de la zone d'étude

Les limites du site étaient au départ fixées sur les contours géographiques du bassin-versant de l'Oued Siliana. Ces limites excluaient automatiquement des ensembles importants appartenant à des unités forestières aménagées ou des massifs forestiers homogènes. On a préféré travailler sur des unités homogènes et complètes, les secteurs administratifs, même si les limites dépassaient celles du bassin-versant (figure 1.3). Ainsi, les nouvelles limites de la zone d'étude regroupent 41 secteurs ayant des couverts forestiers plus ou moins importants. Ce choix est aussi motivé par le souci de pouvoir exploiter les données et les résultats de l'expérience pour établir des projets REDD qui pourraient s'intégrer dans les plans de développement communautaires de ces secteurs. Le site intègre en partie la moitié sud du gouvernorat et en partie la zone montagneuse et boisée. La zone d'étude ainsi définie couvre 191 517 ha soit 41% du gouvernorat (tableau 1.1 et figure 1.4).

L'occupation des sols

Les occupations forestières et non forestières dans la zone d'étude varient selon le caractère rural ou communal du secteur, sa taille, son relief et aussi les activités économiques et sociales qui y sont pratiquées, même si ces dernières demeurent faibles pour l'ensemble du gouvernorat. Selon les résultats du dernier inventaire forestier et pastoral tunisien publié par la Direction générale des forêts (DGF) en 2010 et qui est réalisé sur la base de prises de vues aériennes haute résolution de l'année 1998, la zone d'étude présente divers types de couverts qui sont représentés sur la carte suivante et que nous avons regroupés par mesure de simplification, en forêts, garrigues arborées et non arborées, agriculture et agroforesterie et d'autres espaces non productifs (regroupant les carrières, les routes et pistes, les escarpements rocheux,...) (figure 1.5).



Tableau I.1 – Secteurs de la zone d'étude et superficies totales en hectares

Nom du secteur	Surface du secteur en ha	Nom du secteur	Surface du secteur en ha
Semirat Sud	3 388,448	Sidi Mansour	4 797,288
Semirat Nord	6 863,329	El Kabel	7 710,002
El Messahla	4 923,317	Ouled Zenag	6 602,752
El Louza	7 892,714	Sidi Morched	5 373,431
El Mansoura Nord	4 621,721	Sidi Hmada	4 091,847
Bou Abdallah	4 665,270	Sejja	7 340,270
Kesra	6 419,162	El Behirin	4 400,876
El Hammam	7 872,754	Ain Bousaadia	6 559,567
Soualem	7 376,824	Ouled Fredj	6 169,211
Makthar Sud	256,917	Bargou	390,707
Makthar Nord	345,392	Banlieue Bargou	8 330,914
Sayar	1 946,451	Ain Dissa	3 566,700
El Garaa	2 421,515	El Khalsa	4 450,347
Sened El Haddad	2 538,493	Massouj	3 772,196
Chouarnia	1 981,800	El Jouii	5 922,965
Bez	4 817,024	Jema	13 615,000
Ras El Oued	2 850,790	El Arab	5 293,138
Beni Hazem	3 986,322	Siliana Sud	327,729
Saddine	4 361,799	Siliana Nord	520,150
Es-Sefina	7 343,373	Siliana Ville	293,359
Marj Mokaddem	5 115,129	Total	191 517



Figure I.1 – Situation du gouvernorat de Siliana en Tunisie

La population

Selon les recensements de l'Institut National des Statistiques (INS) de 2004, parmi les 41 secteurs de la zone d'étude, cinq agglomérations sont peuplées par une population entièrement citadine : il s'agit de Siliana sud, Siliana nord, Makthar sud, Makthar nord et Bargou. Les populations des autres secteurs sont toutes rurales. Quant à la proximité des forêts des zones d'habitation, seules les forêts de la Kesra sont très proches du village du même nom. L'agglomération de Kesra est occupée par 78% de citoyens contre 22% de ruraux. Les autres forêts sont éloignées des grandes agglomérations. Ces recensements font état d'une population totale dans les 41 secteurs de la zone d'étude de 109 975 habitants pour 22 705 ménages. La population rurale est de 65 753 avec 12 854 ménages. Une étude récente réalisée par la DGF en 2012 visant à recenser et caractériser la population forestière de Tunisie sur le plan social et économique a permis d'estimer certains indicateurs pour le gouvernorat de Siliana (tableau I.2). Ramenée à l'échelle des secteurs de la zone d'étude, cette population forestière est composée de 429 personnes (soit 88 ménages) habitant la forêt et de 13 937 personnes (soit 2 878 ménages) qui habitent à 5 km de celle-ci (tableaux I.3, I.4





Figure 1.2 – Délégations du gouvernorat de Siliana

et 1.5). La population forestière est composée selon le code forestier des habitants qui habitent la forêt et ceux qui en sont à 5 km et qui de ce fait sont considérés comme des usagers disposant d'un droit d'accès et d'utilisation à but non commercial des ressources forestières. Le nombre total de ménages et d'habitants usagers dans la zone d'étude s'élève respectivement à 3 125 ménages et 14 025 usagers avec un nombre moyen de personnes par ménage de 4. La population usagère représente 21,3% de la population rurale des secteurs de la zone d'étude alors que les ménages représentent 25,01% soit le quart.

**Limites de la zone d'étude
Cas du Bassin Versant de SILIANA - Tunisie**

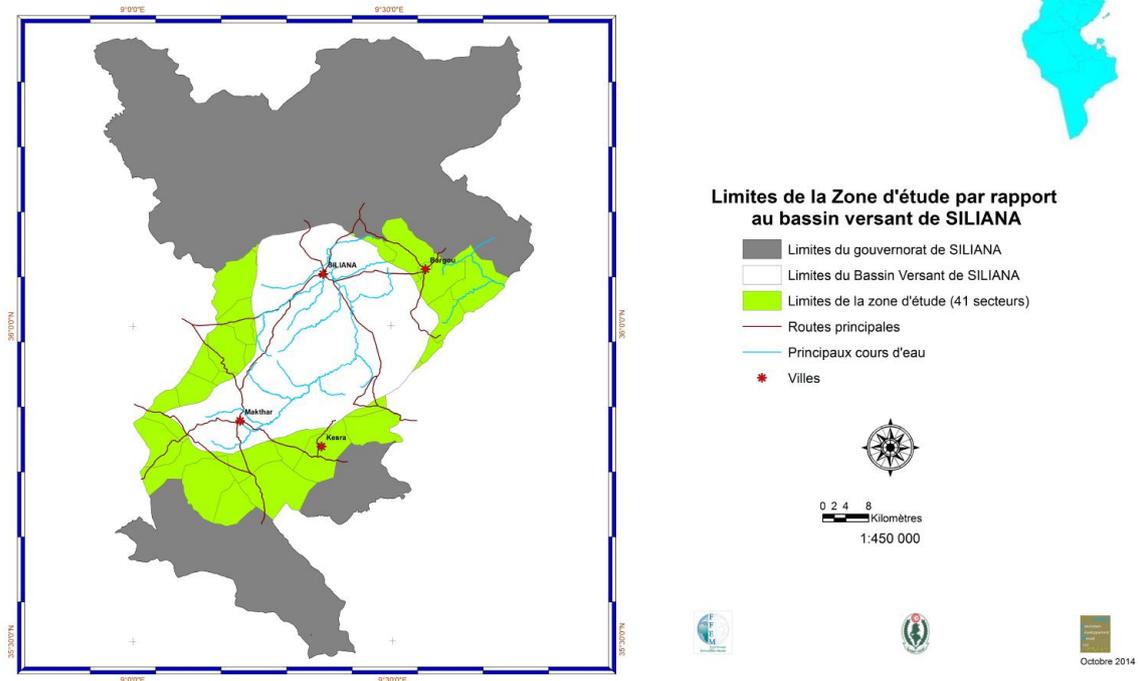


Figure 1.3 – Limites de la zone d'étude et du bassin versant de Siliana

**Carte des secteurs de la zone d'étude
autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie**

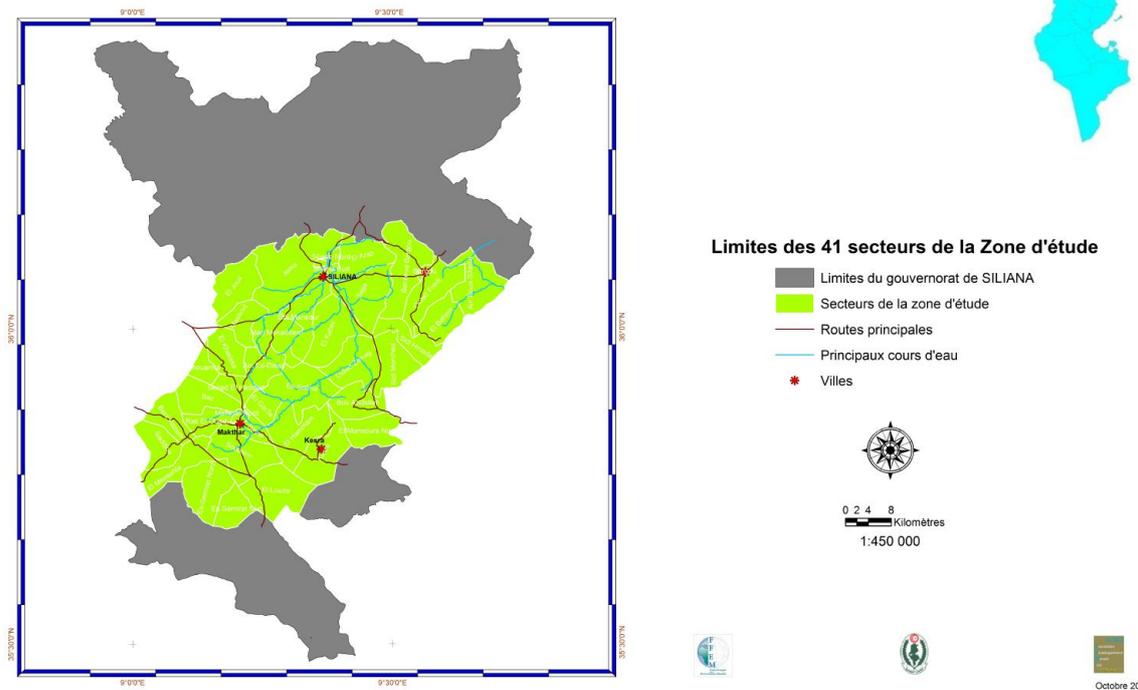


Figure 1.4 – Carte des secteurs de la zone d'étude (41 secteurs)

Carte d'occupation forestière et position des forêts aménagées dans la zone d'étude
autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

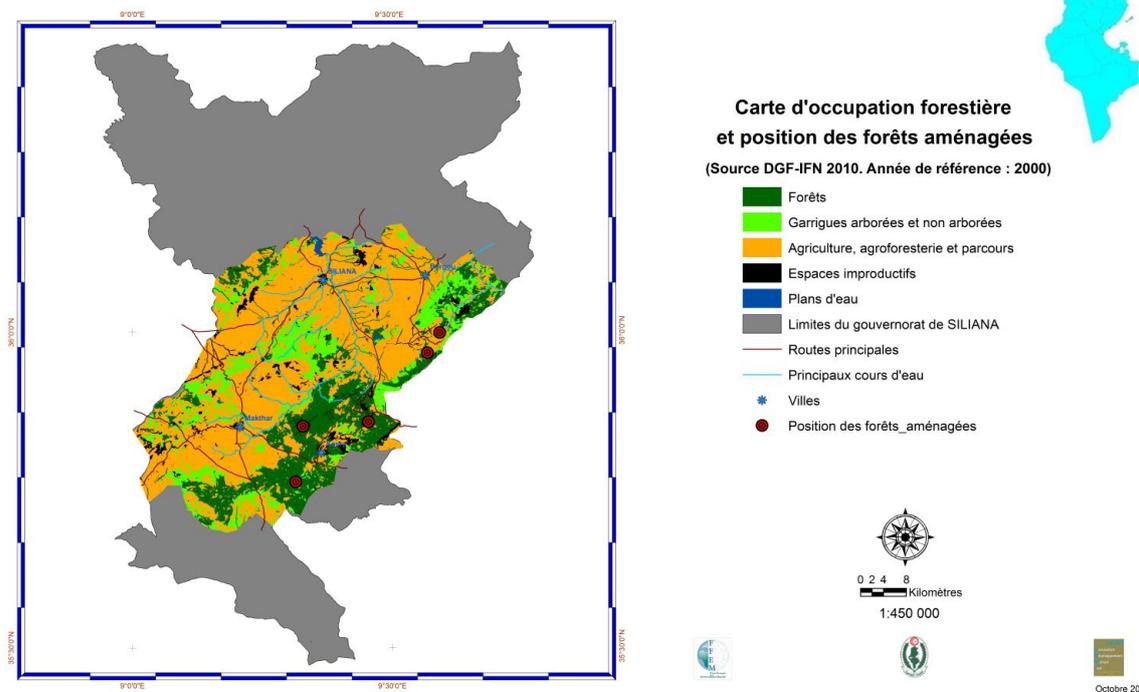


Figure I.5 – Carte de l'occupation des sols dans la zone d'étude

Tableau 1.2 – Indicateurs socio-économiques de la population forestière du gouvernorat de Siliana

Indicateurs	Catégories	Population forestière totale	Population habitant dans la forêt	Population habitant à 5 km de la forêt	Moyenne nationale	Moyenne nord-ouest	Moyenne centre-ouest
Nombre de personnes par ménage		4,12	4,18	4,04	4,53	4,50	5,15
Population active (%)		75	76	74	67	65	62
Niveaux d'Instruction (%)	Analphabète/Kouteb	32	33	30	19	32	34
	Primaire	33	33	34	33	36	36
	Secondaire	29	29	28	36	27	25
	Supérieur	6	5	8	12	5	5
Taux d'électrification (%)		98	98	98	98	98	98
Taux de desserte en eau potable (%)		24	25	22	83	63	57
Taux de chômage (%)		29	32	25	19	23	27
Part en % des chefs de ménages développant une activité secondaire		54	56	51			
Part en % des chefs de ménages migrants pour le travail		10	2	20			
Part en % des chefs de ménages ouvriers		28	34	20			
Répartition des ménages selon les classes de revenu (%)	<=1000 DT	16	17	15			
	1001 – 2000 DT	7	11	2			
	2001 – 5000 DT	5	46	44			
	5001 – 10000 DT	22	24	19	Moyenne nationale		
	>10000 DT	10	2	21			
Revenu moyen par tête d'habitant (DT)		1 169	939	1 471	Revenu national disponible brute (RNDB) (2010) 6 038	SMAG (2011) 3 285	SMIG (2011) 3 432
Part du revenu forestier (%)		58	61	55			

Structure du revenu forestier (%)	Élevage	37	41	33		
	Chantiers forestiers	22	24	19		
	Charbons	15	14	16		
	Autres PFNL	26	21	32		
Ménages développant de l'élevage (%)		62	65	59		
Structure moyenne du cheptel par ménage (Unité)	Ovins	23	19	27		
	Caprins	11	14	7		
	Bovins	4	4	2		
Indice de Développement Humain (IDH)		0,72	0,70	0,75	0,76	
Taux de pauvreté		27	32	21	27	
Profondeur de la pauvreté		0,13	0,14	0,11	0,03	
Sévérité de la pauvreté		0,09	0,09	0,08	0,01	

Tableau 1.3 – Populations totales, communales et rurales dans les secteurs de la zone d'étude (source INS)

Nom du secteur	Population totale	Population communale	Population rurale	Total ménages	Total ménages communaux	Total ménages ruraux
Es-Semirat Sud	1 104	0	1 104	178	0	178
Es-Semirat Nord	2 210	0	2 210	394	0	34
El Messahla	1 572	0	1 572	257	0	257
El Louza	1 369	0	1 369	274	0	274
El Mansoura Nord	1 748	0	1 748	375	0	375
Bou Abdallah	1 891	0	1 891	361	0	361
Kesra	3 191	2 490	701	687	550	137
El Hammam	1 065	0	1 065	214	0	214
Soualem	2 902	0	2 902	500	0	500
Makthar Sud	6 057	6 057	0	1 344	1 344	0
Makthar Nord	6 885	6 885	0	1 452	1 452	0
Sayar	2 180	0	2 180	374	0	374
El Garaâ	1 368	0	1 368	249	0	249
Sened El Haddad	2 310	0	2 310	386	0	386
Chouarnia	1 335	0	1 335	243	0	243
Bez	2 581	0	2 581	481	0	481
Ras El Ouedi	1 950	0	1 950	342	0	342
Beni Hazem	1 550	0	1 550	309	0	309
Saddine	2 021	0	2 021	340	0	340
Es-Sefina	2 492	0	2 492	528	0	528
Marj Mokaddem	1 538	0	1 538	324	0	324
Sidi Mansour	1 592	0	1 592	320	0	320
El Kabel	4 018	0	4 018	830	0	830
Ouled Zenag	2 766	0	2 766	578	0	578
Sidi Morched	5 579	0	5 579	1 116	0	1 116
Sidi Hmada	1 048	0	1 048	258	0	258
Sejja	2 636	0	2 636	537	0	537

El Behirin	1 070	0	1 070	247	0	247
Ain Bous Saâdia	1 052	0	1 052	235	0	235
Ouled Fredj	1 497	0	1 497	314	0	314
Bargou	4 547	4 547	0	1 015	1 015	0
Banlieue Bargou	1 132	0	1 132	216	0	216
Ain Ed-Dissa	740	0	740	162	0	162
El Khalissa	1 059	0	1 059	229	0	229
Massouj	1 600	0	1 600	332	0	332
El Jouii	1 330	0	1 330	261	0	261
Jema	2 344	0	2 344	487	0	487
El Arab	2 403	0	2 403	466	0	466
Siliana Sud	7 617	7 617	0	1 666	1 666	0
Siliana Nord	5 657	5 657	0	1 310	1 310	0
Siliana Ville	10 969	10 969	0	2 514	2 514	0
Total	109 975	44 222	65 753	22 705	9 851	1 854

Tableau I.4 – Répartition des populations et des ménages habitant dans les forêts de la zone d'étude

Nombre de ménages et d'habitants vivant dans les forêts des secteurs de la zone d'étude				
Nom du secteur	Habitations dans forêt	Nbre de ménages calculé	Nbre d'habitants	Nbre habitants/ménage
El Louza	2	2	9	4,996
El Behirin	2	2	8	4,332
Ain Bous Saâdia	15	14	64	4,477
El Khalissa	12	12	58	4,624
Massouj	8	9	41	4,819
El Jouii	50	49	250	5,096
Total	89	88	429	4,885

Le couvert forestier de la zone d'étude : une description détaillée

La zone d'étude présente une couverture forestière de l'ordre de 65 978 ha, soit 34,45% de la surface des secteurs de la zone d'étude. Les parts attribuées au pin d'Alep et les autres formations forestières en majorité de feuillus divers sont presque égales (35 306 ha de pin d'Alep et 30 672 ha d'autres formations forestières) (tableau I.66, figures I.6 et I.7). Ces formations forestières ont des taux de recouvrement variables. L'inventaire forestier et pastoral national de 2010 distingue cinq taux de recouvrement (5 à 10%, 10 à 25%, 25 à 50%, 50 à 75% et >75%). La majorité des formations forestières de la zone d'étude ont des taux de recouvrement soit de 25 à 50% ou alors supérieurs à 75% (figure I.8).



Tableau I.5 – Répartition des populations et des ménages habitant à 5 km des forêts de la zone d'étude

Nombre de ménages et d'habitants vivant à 5 km des forêts des secteurs de la zone d'étude				
Nom du secteur	Habitations à 5 km des forêts	Nbre de ménages	Nbre d'habitants	Nbre habitants/ménage
Ain Bous Sâadia	27	26	115	4,5
Ain Ed-Dissa	120	109	496	4,6
Banlieue Bargou	64	60	314	5,2
Beni Hazem	88	86	429	5
Bez	65	71	380	5,4
Bou Abdallah	81	80	419	5,2
El Arab	413	385	1 985	5,1
El Behirin	23	22	98	4,5
El Garra	39	38	208	5,5
El Hammam	78	77	403	5,2
El Jouii	73	72	365	5,1
El Kabel	112	110	534	4,8
El Louza	122	110	549	4,9
El Messahla	13	14	81	5,8
Es-Sefina	31	31	144	4,7
Es-Semirat Nord	83	75	406	5,4
Jema	105	101	85	4,8
Marj Mokaddem	160	151	715	4,7
Massouj	116	124	599	4,8
Ouled Fredj	27	26	122	4,8
Ouled Zenag	228	230	1 103	4,8
Ras El Ouedi	42	46	246	5,4
Sayar	39	38	208	5,5
Sened El Haddad	88	86	429	5
Sidi Hmada	13	7	28	4,1
Sidi Mansour	468	454	2 258	4,9
Sidi Morched	133	133	664	4,9
Soualem	29	28	155	5,5
Total	2 879	2 786	1 937	5

Tableau I.6 – Surfaces forestières par secteur dans la zone d'étude

Nom du secteur	Surface secteur (ha)	Surface pin d'Alep (ha)	Surface autres formations forestières (ha)	Surface totale forêts (ha)	% pin d'Alep	% autres forêts	% autres occupations
Semirat Sud	3 388,448	1 059	803	1 862	31	24	45
Semirat Nord	6 863,329	2 409	1 277	3 686	35	19	46
El Messahla	4 923,317	14	724	738	0	15	85
El Louza	7 892,714	4 611	845	5 456	58	11	31
El Mansoura Nord	4 621,721	2 498	316	2 814	54	7	39
Bou Abdallah	4 665,270	3 363	165	3 528	72	4	24
Kesra	6 419,162	3 202	797	3 999	50	12	38
El Hammam	7 872,754	4 746	835	5 581	60	11	29
Soualem	7 376,824	383	455	838	5	6	89
Makthar Sud	256,917	47	33	80	18	13	69
Makthar Nord	345,392	50	50	100	14	14	71
Sayar	1 946,451	129	245	374	7	13	81
El Garaa	2 421,515	0	72	72	0	3	97
Sened El Haddad	2 538,493	21	510	531	1	20	79
Chouarnia	1 981,800	25	321	346	1	16	83
Bez	4 817,024	576	1 414	1 990	12	29	59
Ras El Oued	2 850,790	54	577	631	2	20	78
Beni Hazem	3 986,322	449	682	1 131	11	17	72
Saddine	4 361,799	255	571	826	6	13	81
Es-Sefina	7 343,373	1 679	902	2 581	23	12	65
Marj Mokaddem	5 115,129	18	1 778	1 796	0	35	65
Sidi Mansour	4 797,288	4	1 184	1 188	0	25	75
El Kabel	7 710,002	692	1 701	2 393	9	22	69
Ouled Zenag	6 602,752	1 346	625	1 971	20	9	70
Sidi Morched	5 373,431	531	1 552	2 083	10	29	61
Sidi Hmada	4 091,847	781	684	1 465	19	17	64

Sejja	7 340,270	108	900	1 008	1	12	86
El Behirin	4 400,876	757	1 972	2 729	17	45	38
Ain Bousaadia	6 559,567	2 884	1 159	4 043	44	18	38
Ouled Fredj	6 169,211	337	2 163	2 500	5	35	59
Bargou	390,707	0	18	18	0	5	95
Banlieue Bargou	8 330,914	90	902	992	1	11	88
Ain Dissa	3 566,700	113	589	702	3	17	80
El Khalsa	4 450,347	10	746	756	0	17	83
Massouj	3 772,196	9	196	205	0	5	95
El Jouii	5 922,965	1 150	1 111	2 261	19	19	62
Jema	13 615,000	852	1 275	2 127	6	9	84
El Arab	5 293,138	54	486	540	1	9	90
Siliana Sud	327,729	0	17	17	0	5	95
Siliana Nord	520,150	0	19	19	0	4	96
Siliana Ville	293,359	0	1	1	0	0	100
Total	191 517	35 306	30 672	65 978			

Tableau 1.7 – Massifs aménagés de la zone d'étude

Nom de la série aménagée	Superficie en ha	1000 m ³ /an	Durée de l'aménagement
Kesra I	7 223	0,750	1968-1987
Kesra II	3 748	0,150	1972-1991
Kesra II (Louza)	5 802	-	1994-2017
Kesra III (Bou Abdellah)	2 005	0,524	1994-2017
Jeljel et Gsaïria	5 370	-	2001-2020
Kesra – El Garia	14 208	0,860	2001-2020
Boukhil et Rous Louzet	7 140	0,680	2001-2020
Parc national de djebel Serj	1 720	-	2014
Total	47 216	2,964	

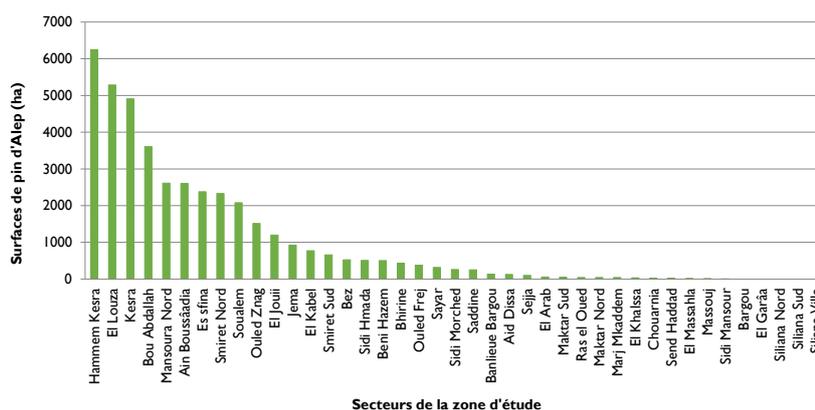


Figure 1.6 – Classement des secteurs de la zone d'étude en fonction des surfaces en pin d'Alep

Dans la zone d'étude, les forêts couvrent 65 978 ha, soit presque la moitié du total des forêts du gouvernorat, sont généralement regroupées en massifs dont certains sont aménagés. La superficie totale des forêts et de leurs formations de dégradation à Siliana est estimée par le dernier inventaire de 2000 à 128 362 ha (forêts et garrigues).

La superficie des massifs forestiers aménagés dans tout le gouvernorat est de 58 000 ha. Dans la zone d'étude cinq massifs d'une superficie totale de 32 222 ha sont aménagés, soit 50% de la superficie forestière totale du site. Le reste des massifs est soit non aménageable soit avec un aménagement actuellement périmé (figure 1.9). Dans la zone, un parc national vient d'être créé remplaçant l'ancienne réserve naturelle : il s'agit du Parc National de Jbel Esserj (tableau 1.7). L'aménagement du parc est actuellement terminé et entré en application.

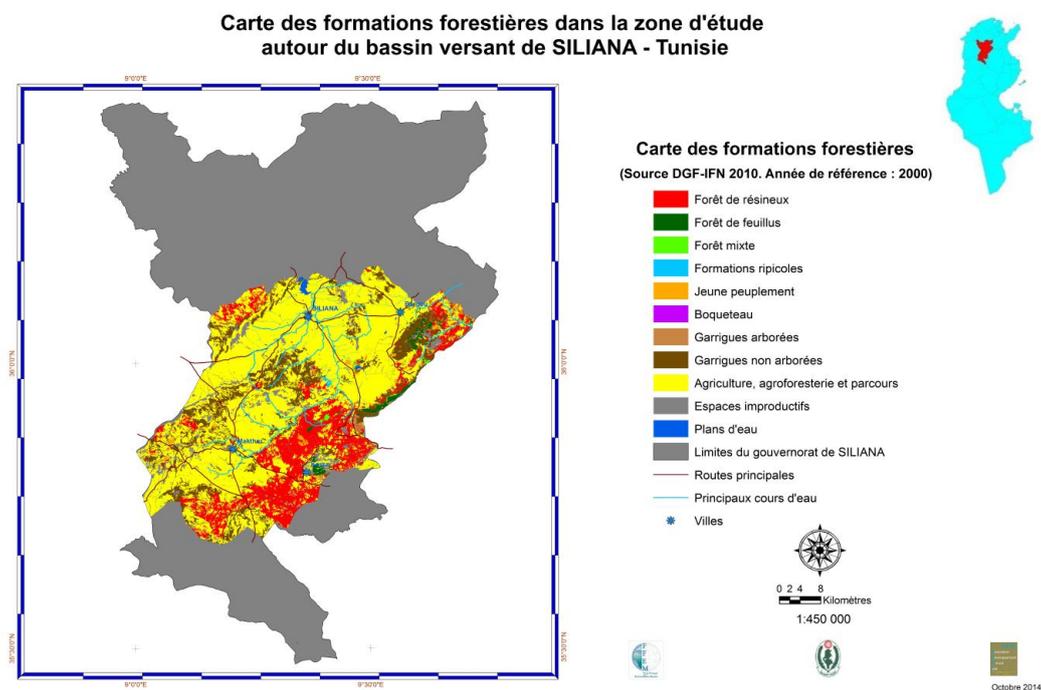


Figure I.7 – Carte des formations forestières de la zone d'étude

Délits forestiers entre 2011 et 2014 sur le site pilote de Siliana

Les délits forestiers constatés et verbalisés entre 2011 et 2014 sur le site pilote du bassin versant de Siliana sont résumés dans le tableau I.8. Les délits graves de défrichements et de coupes d'arbres correspondent en moyenne à une perte annuelle au profit de l'agriculture estimée à 236 ha par an au moins sur la totalité du Site pilote du bassin versant de Siliana.

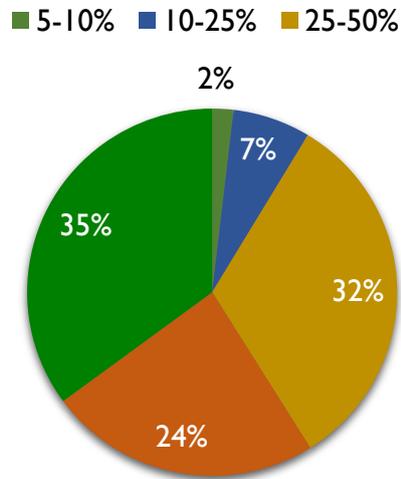


Figure I.8 – Taux de recouvrement des forêts de pin d'Alep dans la zone d'étude

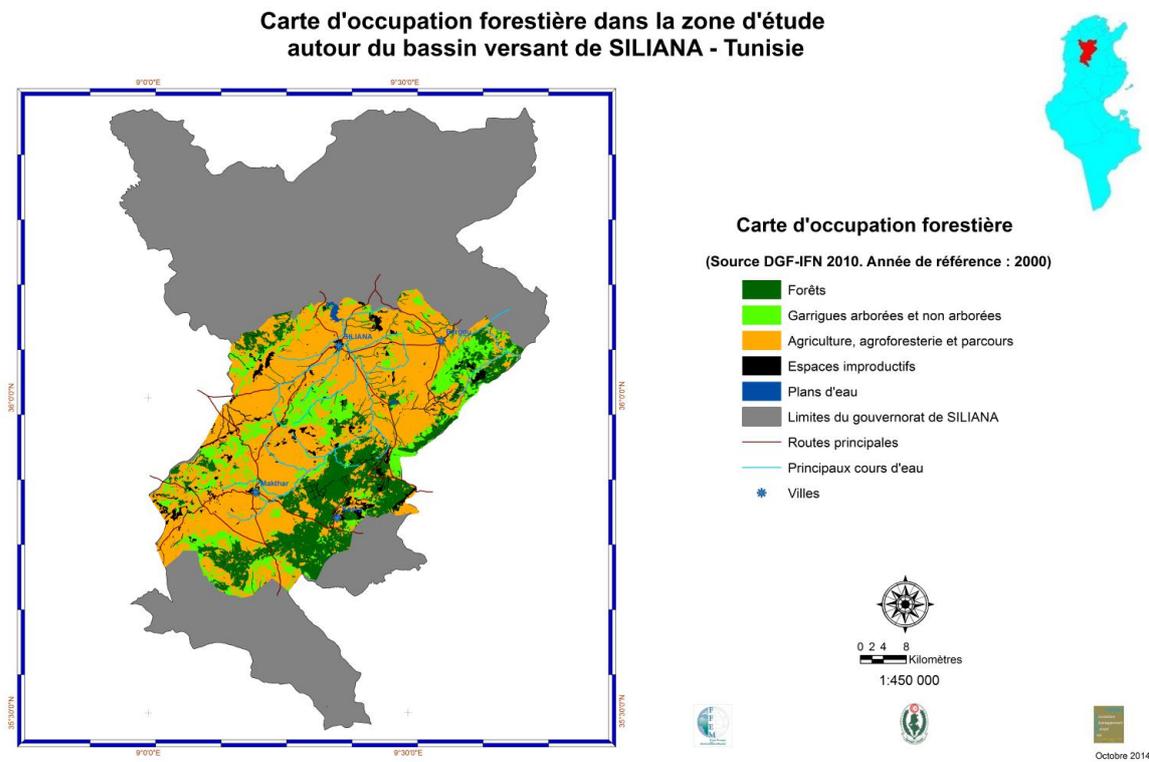


Figure I.9 – Distribution des forêts aménagées dans la zone d'étude

Tableau 1.8 – Délits forestiers constatés et verbalisés entre 2011 et 2014 sur le site pilote de Siliana

	Rouhia	Kessera Mansoura	Hamman kessera	Kessera	Kessera Bouabd	Siliana sud	Siliana nord	Bargou	Total
Défrichements (ha)	45,8	28,6	29,5	101,6	6	33,4	0,22	30,5	275,6
N d'arbres coupés	232	54819	783	20249	1400	15350	520	1430	94783
Superficie moyenne défrichée (ha/an)	11,45	7,15	7,375	25,4	1,5	8,35	0,055	7,625	68,9
N d'arbres coupés/an	58	13 704	195	5062	350	3 837	130	357	23 695

Références : archives des délits forestiers de l'arrondissement forestier de Siliana.

Feux de forêt dans le site pilote de Siliana

La donnée disponible sur les feux de forêt en 1985 et 2012 montre que la superficie moyenne des feux est 4,6 ha et que le nombre moyen de feux par an est 6,3. Quatre-vingt pour cent des feux de forêt ont une superficie inférieure à 1 ha (figure 1.10) et la tendance évolutive est stable tant pour le nombre que pour la surface affectée par les incendies (figures 1.11 et 1.12).

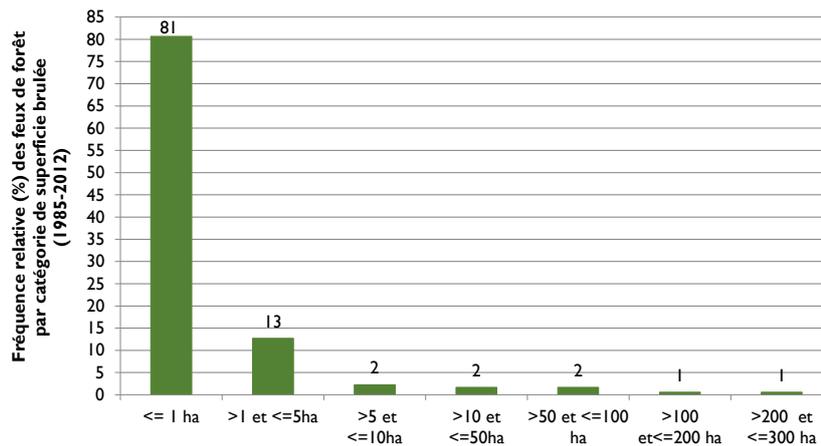


Figure 1.10 – Fréquence relative (%) des feux de forêt par classe de surface brûlée (1985-2012)

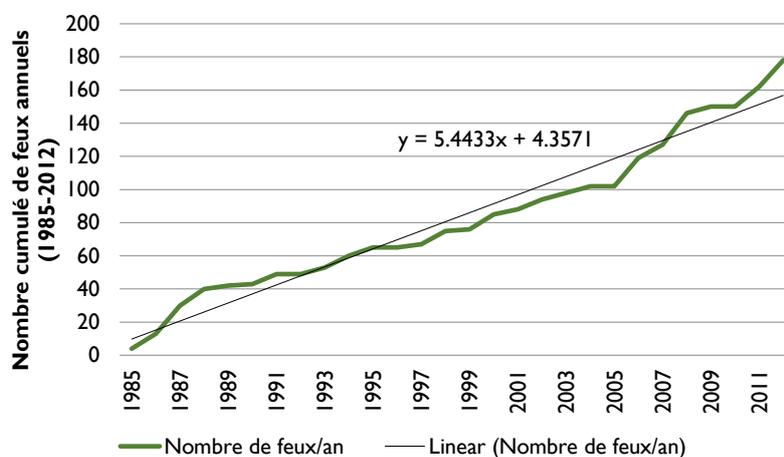


Figure 1.11 – Nombre cumulé des feux de forêt entre 1985 et 2012



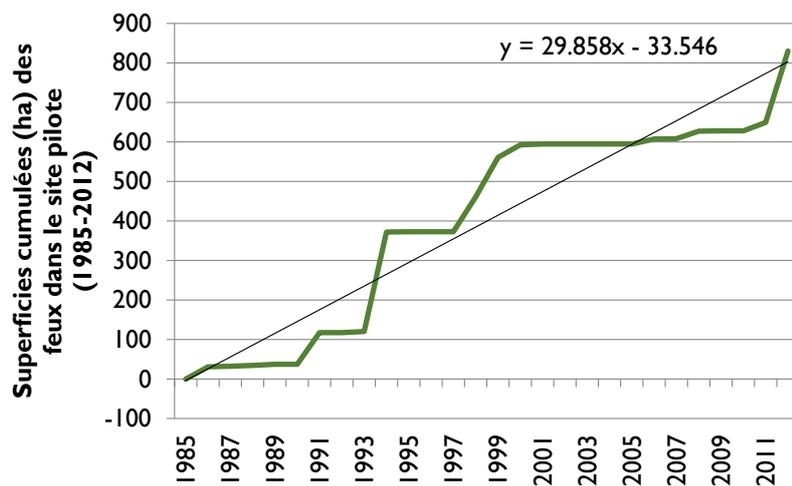


Figure I.12 – Surface brûlée cumulée des feux de forêt entre 1985 et 2012

Le climat actuel et les scénarios futurs

Le climat actuel et passé

L'analyse des données climatiques dans le bassin-versant de Siliana est basée sur les données collectées à la station météorologique de Siliana ville dont l'emplacement est considéré comme central pour toute la région. Les données collectées sont comprises entre 1954 et 2006 comportant quelques vides comme ceux de 1956-1968 et 1975-1979.

Les précipitations

Les précipitations annuelles moyennes sont estimées à 426,3 mm avec un écart à la moyenne de 122,5 mm. Sur cette période la tendance de la courbe marque une augmentation légère estimée à 1,3 mm/an entre 1954 et 2006 (figure 2.1). Sur la période observée on relève trois grandes périodes sèches où les précipitations tombent au-dessous de la moyenne avec une différence proche ou supérieure à un écart type de la moyenne. La période sèche la plus longue correspond à 1983-1989, soit sept années successives sèches entrecoupée par 1986 considérée proche de la normale annuelle. La deuxième période sèche est de trois années consécutives : 1993-1994-1995 suivies des deux années les plus sèches de la période qui sont 1993 et 1994.

La dernière période sèche de trois années consécutives est celle de 2000 à 2002. Ces résultats confirment les affirmations de Bargaoui et Alouini [2] qui considèrent que «dans le bassin versant de Siliana, la sécheresse est un phénomène récurrent. La méthode des écarts à la moyenne donne un pourcentage de 60% d'années sèches. L'analyse fréquentielle montre que la sécheresse est de classe modérée et le pourcentage se trouve réduit à 35%. La fréquence d'apparition d'années successives sèches est relativement élevée : 55% d'années sèches sont formées de deux, trois ou cinq années sèches consécutives».

Les températures

Les températures annuelles moyennes analysées entre 1954 et 2006 (températures maximales, minimales et moyennes) ne montrent pas une tendance marquée à l'augmentation. Les moyennes thermiques de la période sont :

- Moyenne des minima du mois le plus froid : 3,6°C avec un écart à la moyenne de 1,2°C ;
- Moyenne des maxima du mois le plus chaud : 35,6 °C avec un écart de 1,7°C ;
- Moyenne annuelle : 19,6°C avec un écart à la moyenne de 1°C.

Les températures moyennes maximales montrent une tendance à l'augmentation très marquée par rapport aux deux autres températures. Cette augmentation est estimée à 3,8°C pour 100 ans ou 0,38°C par dix ans. Les températures moyennes montrent une très légère tendance à l'augmentation estimée à 0,3°C par 100 ans ou 0,03°C par 10 ans. Les températures minimales moyennes paraissent stables. Des pics aigus de températures sont enregistrés aux années 1971, 1994, 1999 et 2003. La dernière période 1995-2006 est considérée comme celle la plus chaude entre 1954 et 2006 (figure 2.2).



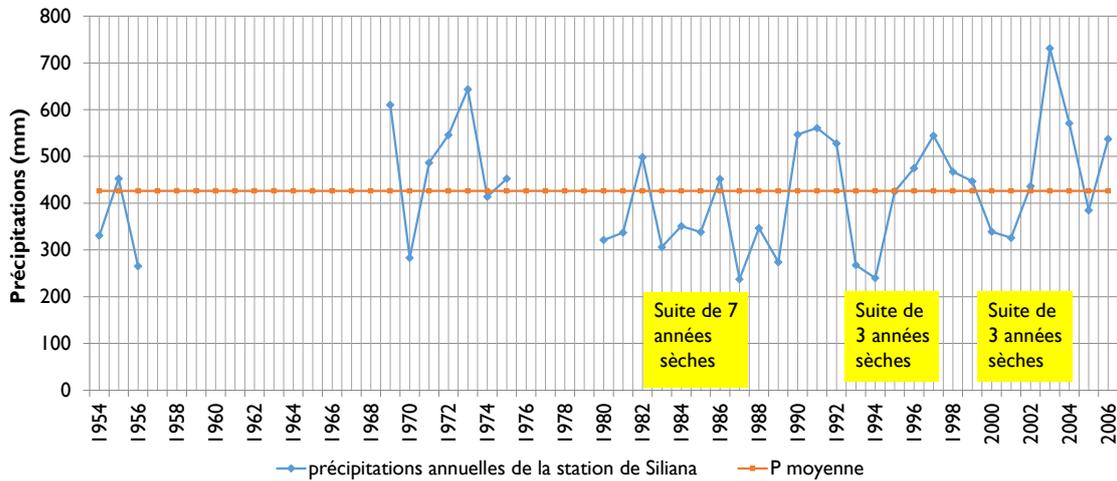


Figure 2.1 – Précipitations de la station de Siliana entre 1954 et 2006

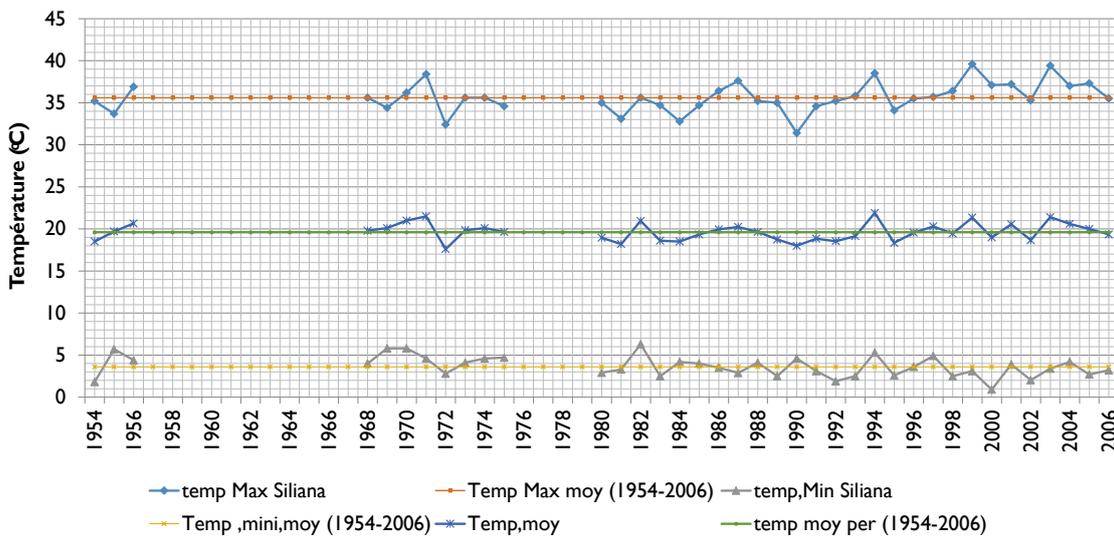


Figure 2.2 – Températures maximales et minimales de la station de Siliana entre 1954 et 2006

Tableau 2.1 – Forçage radiatif, concentration en CO₂ et forme du profil selon les modèles RCP

Désignation	Forçage radiatif	Concentration	Forme du profil
RCP8.5	>8,5 W/m ² en 2100	>~1 370 équiv.CO ₂ en 2100	Hausse
RCP6	~6W/m ² au niveau de stabilisation après 2100	~850 équiv.CO ₂ (au niveau de stabilisation après 2100)	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4,5 W/m ² au niveau de stabilisation après 2100	~650 équiv.CO ₂ (au niveau de stabilisation après 2100)	Stabilisation sans dépassement
RCP3-PD	Pic à ~3 W/m ² avant 2100 puis déclin	Pic à ~490 équiv.CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Les scénarios climatiques aux horizons 2035 et 2065 : les modèles "Representative Concentration Pathways"

Les scénarios **Representative Concentration Pathways (RCP)** produits par le **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** sont de trois types : scénarios de «forçage radiatif», scénarios socio-économiques et des scénarios climatiques. Au-delà de leur conception, ces scénarios correspondent à un véritable virage méthodologique qu'opère la communauté scientifique. Auparavant et lors de la réalisation des **Special Report on Emissions Scenarios (SRES)** (GIEC), l'analyse était menée en suivant une logique linéaire. La réflexion partait d'un faisceau de «futurs possibles» pour nos sociétés, intégrant une vaste palette de déterminants - évolutions des économies nationales, offre technologique, choix énergétiques, démographie, changements dans les comportements individuels... Ces scénarios **SRES** étaient organisés en quatre familles : A1, A2, B1, B2. Traduits en émissions de gaz à effet de serre, ils alimentaient une chaîne de modèles pour aboutir à des projections d'évolution climatique globales ou régionales. Désormais, la communauté scientifique applique une méthode différente qui vise à gagner en rapidité et en réactivité. Pour cela, les experts ont défini a priori quatre scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, les **Representative Concentration Pathways (RCP)**. Ces **RCP** sont des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300. Ils sont au nombre de quatre et ont été sélectionnés par les scientifiques sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature. Associés à des trajectoires d'évolution des concentrations des différents gaz à effet de serre et de l'occupation des sols, ils ont été décrits par Moss et al. [7] (tableau 2.1).

Par ailleurs, une comparaison avec les anciens scénarios **SRES** (figure 2.3) montre que le **RCP8.5**, scénario extrême, est un peu plus fort que le **SRES A2** – il aboutirait à un réchauffement global pouvant atteindre 12°C en 2300 (selon une projection climatique récente). Le **RCP 6** est proche du **SRES A1B**, tandis que le **RCP 4.5** est proche du **SRES B1**. «Le seul scénario sans équivalent est le **RCP2.6**», souligne Serge Planton : il intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C.

Dans notre cas, le choix s'est porté sur deux scénarios : **RCP8.5** qui est jugé pessimiste et le **RCP4.5** qui est qualifié d'optimiste. Les augmentations de températures et baisses de précipitations estimées par ces modèles aux horizons 2035 et 2065 ont été appliqués pour chacun des 41 secteurs de la



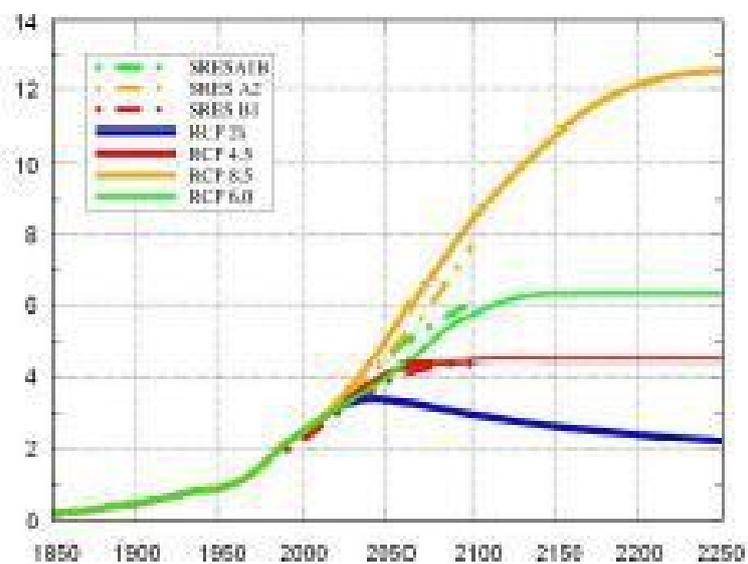


Figure 2.3 – Correspondances RCP/SRES

zone d'étude selon les normes citées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Augmentation moyenne des températures mensuelles (en °C, entre 0°C et 2,5°C) et diminution des pluviométries en pourcentage (entre 5% (-0,05) et 15% (-0,15)) par modèle climatique (RCP4.5 et RCP8.5) et par période (2016-2035 et 2046-2065)

	Températures				Précipitations			
	2016-2035		2046-2065		2016-2035		2046-2065	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Janvier	0,75	1,2	1,2	2,5	-0,05	-0,05	-0,15	-0,15
Février	0,75	1,2	1,2	2,5	-0,05	-0,05	-0,15	-0,15
Mars	0	1,2	0	1,7	-0,05	-0,05	-0,15	-0,15
Avril	0	1,2	0	1,7	-0,15	-0,15	-0,25	-0,25
Mai	0	1,2	0	1,7	-0,15	-0,15	-0,25	-0,25
Juin	1,2	1,75	2,5	2,5	-0,15	-0,15	-0,25	-0,25
Juillet	1,2	1,75	2,5	2,5	-0,15	-0,15	-0,25	-0,25
Aout	1,2	1,75	2,5	2,5	-0,15	-0,15	-0,25	-0,25
Septembre	0	0,75	0	2,5	-0,15	-0,15	-0,25	-0,25
Octobre	0	0,75	0	2,5	-0,05	-0,05	-0,15	-0,15
Novembre	0	0,75	0	2,5	-0,05	-0,05	-0,15	-0,15
Décembre	0,75	1,2	1,2	2,5	-0,05	-0,05	-0,15	-0,15



Évaluation des dynamiques spatiotemporelles des occupations forestières et non forestières et projections

Cadre temporel

Cette analyse visant le suivi de la dynamique des territoires et la réaffectation des sols a été réalisée dans un intervalle temporel de cinquante-deux années 1963-2014. Dans cet intervalle quatre états d'occupations forestières relatives à quatre dates sont comparés. Il s'agit des années 1963, 1990, 2000 et 2014. L'année de référence est 1963 car elle correspond à l'occupation forestière la plus ancienne dont nous disposons. Entre ces deux dates limites 1963 et 2014, nous avons procédé au suivi des changements survenus pendant la décade 1990-2000 pour lesquelles nous disposons de deux inventaires forestiers et pastoraux nationaux qui, malgré les différences d'échelles, de classification des couverts forestiers et des méthodes d'inventaire employées demeurent exploitables, ne serait-ce que pour vérifier les résultats fournis par l'analyse 1963-2014.

Méthodes d'évaluation

Définition des occupations considérées pour le suivi des dynamiques et leur regroupement en trois classes

Définition des occupations considérées

Les changements dans les affectations des terres et leur projection aux horizons temporels choisis pour l'étude sont estimés seulement pour les catégories de terres suivantes :

- Les forêts naturelles, y compris les anciennes plantations artificielles inventoriées à l'année 2000 [6]. Dans la classification du GIEC [3] ces couverts sont considérés comme «Forêts». L'inventaire forestier national considère comme forêt une formation végétale composée d'espèces végétales ligneuses capables d'atteindre à l'état adulte 4 mètres de hauteur avec un diamètre de 7 cm à 1.30 m donnant un recouvrement minimal de 10% ou d'une densité minimale de jeunes plants de 250 pieds/ha sur une superficie minimale de 4 ha.
- Les plantations forestières artificielles remplaçant la garrigue après l'année 2000 (rapports internes de la DGF sur les plantations forestières et pastorales entre 2001 et 2013). Dans la classification du GIEC [3] ces plantations, désignées par le terme «Reboisement», sont considérées comme des terres non forestières converties en «forêts».
- Les plantations d'arbustes fourragers pour constituer des réserves fourragères sur pieds entre 2000 et 2013 (rapports internes de la DGF sur les plantations forestières et pastorales entre 2001 et 2013). Ces plantations sont réservées aux terres agricoles marginales ou à l'amélioration pastorale des garrigues dans le domaine forestier. Ces plantations classées par l'inventaire forestier national comme des boqueteaux ayant la même définition que celle attribuée à la forêt mais occupant un espace minimal de 0,5 ha. La classification du GIEC les considèrerait comme «forêt».

- Les boqueteaux d'espèces ligneuses forestières, les brise-vents et haies d'espèces forestières, les plantations d'alignement d'espèces forestières, les plantations de berges d'Oueds ou de ravins et la végétation arborée ligneuse ripicole en 2000 [6]. Selon la classification des terres du GIEC elles peuvent appartenir à la classe «établissement».
- Les garrigues arborées inventoriées en 2000 [6]. Ce sont des garrigues ligneuses basses sous une forêt, composées d'espèces forestières dont le recouvrement est inférieur à 10%. Ce sont des forêts dégradées qui pourraient après densification par des plantations forestières intégrer la classe des terres forestières. Selon la classification des terres du GIEC elles peuvent appartenir à la classe «prairies» mais aussi à la classe «forêt» si on considère que le recouvrement est provisoirement inférieur à 10%.
- Les garrigues non arborées inventoriées en 2000 [6]. Ces formations constituées de végétation ligneuse pérenne basse ne répondant pas aux critères de hauteur et de forme des espèces ligneuses forestières. Dans la nomenclature du GIEC elles sont classées en «prairies».
- Les plantations fruitières dans les terres agricoles (rapports internes des services agricoles du Commissariat Régional au Développement Agricole de Siliana et enquête auprès de ces services).

Regroupement des classes d'occupation en trois catégories

Les objectifs de comparaison des différents produits réalisés aux quatre dates retenues pour l'étude nous ont contraint à choisir le niveau de précision le plus faible fourni par les cartes à disposition afin que la comparaison puisse avoir un sens et que les résultats obtenus puissent traduire la réalité des formes et importance des dynamiques ayant concerné les occupations des sols et, en particulier les forêts, pendant cette longue période. Ceci est d'autant plus important que les résultats ainsi obtenus devraient servir à projeter les dynamiques futures aux horizons temporels qui sont fixés pour l'étude. À ce propos, le niveau de précision le plus faible est celui proposé par la carte phytoécologique qui nous a permis de classer les occupations en trois catégories : i) Forêts, ii) Agriculture et iii) Mosaiques forêts + Agriculture. Les résultats fournis par les deux inventaires de 1990 et 2000 étant plus précis, ont subi des regroupements (tableaux 3.1 et 3.2) afin de s'adapter à cette classification en trois catégories.

Documents cartographiques employés pour le suivi de l'évolution des couverts forestiers et non forestiers

Les documents cartographiques qui ont servi au suivi de la dynamique des couverts forestiers dans la zone d'étude sont :

- Une carte thématique décrivant le couvert végétal (y compris forestier) dans la zone d'étude en 1963. Il s'agit de la carte phytoécologique de la Tunisie centrale – feuille de Makthar. Cette carte est certes imprimée à l'échelle 1/200 000 mais les photographies aériennes ayant servi à sa réalisation sont à l'échelle 1/20 000. Cette carte qui est disponible au format analogique a été numérisée afin d'intégrer la base de données géoréférencées qu'il est nécessaire de créer pour les besoins de l'étude ;
- Le premier inventaire forestier et pastoral national de 1995 qui a été réalisé sur la base de cartes à l'échelle 1/50 000 ;
- Le deuxième inventaire forestier et pastoral national de 2000 qui a été réalisé sur la base de photographies aériennes à l'échelle 1/20 000 ;



Tableau 3.1 – Regroupement en trois classes de l’inventaire forestier et pastoral de 1990

Occupation des sols IFN 1990 dans la zone d'étude	Regroupement en trois classes
Forêts	FORÊTS
Garrigues arborées	
Garrigues non arborées	
Formations milieux ripicoles	
Autres formations végétales	
Boqueteau	
Terres de culture	AGRICULTURE
Petites enclaves (clairières)	
Formations steppiques	MOSAÏQUE FORÊTS + AGRICULTURE + AUTRES OCCUPATIONS
Mosaïque steppe + agriculture	
Terrains déboisés	
Terrains rocheux	
Tranchées pare feu	
Pépinière forestière	
Retenue eau	
Sebkhas	
Carrières	

- Une image satellite *Google Earth* de février 2014 ;
- Une image satellite Landsat TM de juin 2014 qui a été classée selon les procédés de classification supervisée par le maximum de vraisemblance.

Suivi des dynamiques spatiotemporelles : méthodologie

Trois types de comparaison des occupations forestières ont été effectués dans la zone d'étude. Les tendances évolutives ont été basées sur les résultats des comparaisons des deux inventaires de 1990 et 2000 (figure 3.3) :

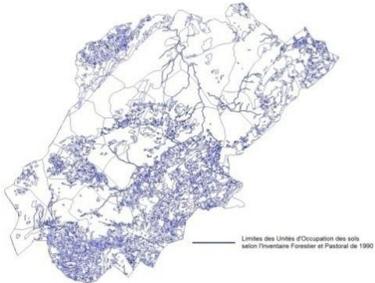
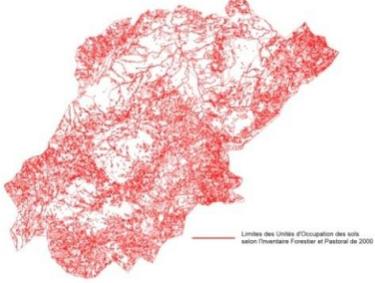
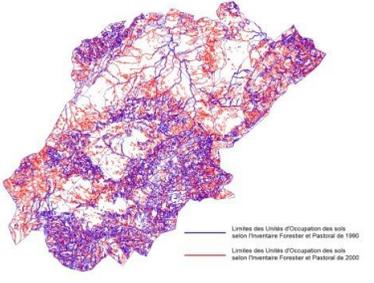
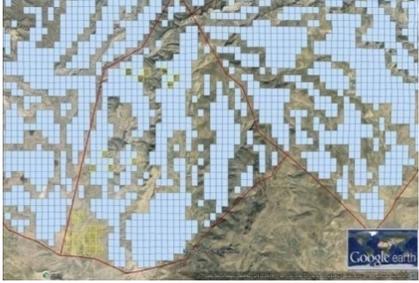
- La première a consisté à comparer les résultats des deux inventaires dans le but d'en extraire les changements d'affectation observés pendant la décennie 1990-2000 ;
- La deuxième comparaison a concerné la période 1963-2014. Elle nous a permis d'évaluer les dynamiques survenues pendant un peu plus de cinq décades. La carte de référence de 1963 décrit l'occupation forestière telle que reportée sur la carte phyto-écologique de Makthar que nous avons cherché à comparer à l'image *Google Earth* de 2014. Pour cela, nous avons procédé par un échantillonnage tiré au hasard à partir d'une population au sens statistique composée de placettes régulières de forme carré réparties sur la zone d'étude. Le choix de la taille de la placette de 4 ha correspond à la taille minimale d'une forêt telle qu'employée pour réaliser le deuxième inventaire forestier. Un échantillon de 30 placettes est tiré au hasard dans chacune des trois occupations retenues que sont : les forêts, les mosaïques forêts et agriculture, et l'agriculture, et ce pour chacun des 41 secteurs. Ces placettes échantillons ont été visionnées sur *Google Earth* puis photo-interprétées ;
- La troisième comparaison est effectuée entre l'inventaire forestier de 2000 et l'image Landsat de juin 2014 classée.

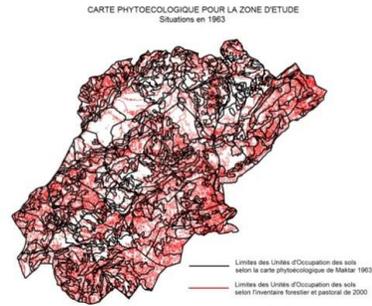
Tableau 3.2 – Regroupement en trois classes de l’inventaire forestier et pastoral de 2000

Occupation des sols IFN 1990 dans la zone d'étude	Regroupement en trois classes
Forêts de feuillus	FORÊTS
Forêts de résineux	
Forêt mixte	
Jeune peuplement	
Arboretum	
Plantations berges et dunes	
Garrigues arborées	
Garrigues non arborées	
Formations milieux ripicoles	
Boqueteau	
Réserves	
Zones incendiées	
Plantations d'alignement	
Cultures annuelles en sec	
Parcours steppiques d'alfa	AGRICULTURE
Autres parcours steppiques	
Prairies naturelles	
Zones agro- forestières	
Terrains nus	
Brises vents	
Escarpements rocheux	
Infrastructures	
Plans d'eau	
Carrières, mines, ...	
Espaces construits	
Espaces urbains	
Espaces verts artificialisés	
Cours et voies d'eau	

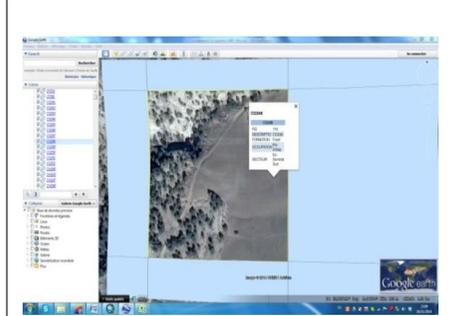


Tableau 3.3 – Schéma général du processus de suivi de la dynamique des occupations des sols

1963	1990	2000	2014
<p>CARTE PHYTOECOLOGIQUE POUR LA ZONE D'ETUDE Situations en 1963</p>  <p>Occupation des sols selon carte phytoécologique de 1967 (référence 1963)</p>	<p>INVENTAIRE FORESTIER ET PASTORAL NATIONAL DANS LA ZONE D'ETUDE Situation en 1990 (source DGF-1995)</p>  <p>Occupations des sols selon inventaire de 1995 (référence 1990)</p>	<p>INVENTAIRE FORESTIER ET PASTORAL NATIONAL DANS LA ZONE D'ETUDE Situation en 2000 (source DGF-2010)</p>  <p>Occupations des sols selon inventaire de 2010 (référence 2000)</p>	 <p>Découpage de la zone d'étude en placettes</p>
	<p>SUPERPOSITION DES INVENTAIRES FORESTIERS ET PASTORAUX DANS LA ZONE D'ETUDE Situations en 1990 et 2000 (source DGF-1995 et 2010)</p>  <p>Superposition puis comparaison entre unités d'occupation des sols sur l'ensemble du territoire de la zone d'étude entre 1990 et 2000</p>		 <p>Zoom sur les placettes</p>



Superposition puis comparaison entre unités d'occupation des sols sur l'ensemble du territoire de la zone d'étude entre 1963 et 2000



Procédé de vérification des occupations en 2014 et comparaison avec 1963



Superposition puis comparaison entre placettes échantillon de la zone d'étude entre 1963 et 2014 (encadrées en jaune)



Les dynamiques observées entre 1990-2000 (comparaison des deux inventaires)

Les deux inventaires forestiers et pastoraux de 1990 et 2000 sont difficilement comparables compte tenu des approches qui ont permis de les réaliser, de la précision des données employées pour chacun d'entre eux et d'autres considérations non thématiques. Il n'empêche, que nous avons essayé d'exploiter ces deux sources de données en essayant d'éviter les détails de classification fournis par chacun de ces inventaires pour ne retenir que des formations végétales. Dans certains cas, nous avons procédé à des regroupements de classes pour trouver une certaine concordance entre les deux classifications. Aussi, nous avons fait le choix de ne retenir que les unités géographiques dont la surface minimale est supérieure ou égale à 4ha (qui est la surface de l'unité forestière minimale considérée par l'inventaire forestier national tunisien) (figure 3.1). Dans le cas du couvert forestier, les changements ont affecté 13% des surfaces observées en 1990. Ainsi, ces surfaces forestières ont évolué essentiellement vers des terres de culture, des garrigues arborées (figure 3.2), des garrigues non arborées et des jeunes plantations. De façon accessoire et moins prononcées, ces forêts ont été substituées par des zones agroforestières, d'autres occupations ou bien incendiées.

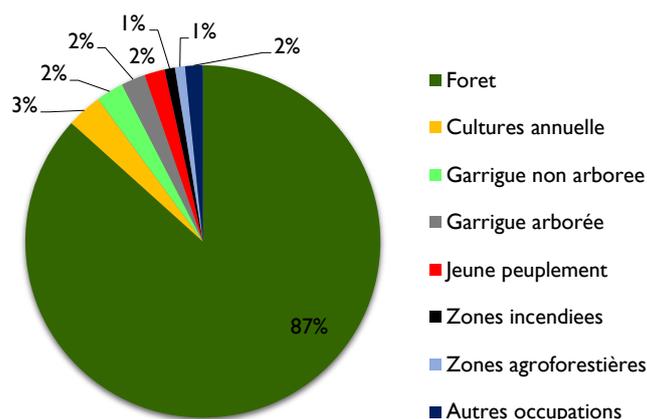


Figure 3.1 – Changement d'affectation des forêts entre 1990 et 2000

Dans le cas des anciennes garrigues arborées (situation de 1990), les changements ont été plus importants. Seulement 7% de ces surfaces ont gardé leur vocation. Pour le 93% restant, elles ont été remplacées par ordre d'importance par des forêts, des garrigues non arborées, des jeunes peuplements, des cultures annuelles ou incendiées. Le cas de l'évolution des garrigues arborées vers des forêts peut avoir plusieurs explications : changement de méthode de classification, meilleure précision des photographies aériennes,.... Les garrigues non arborées ont, elles aussi, subi quelques changements d'affectation au cours de la décennie qui sépare les deux inventaires (figure 3.3).

Les garrigues non arborées n'ont été affectées par des changements que pour 32% de leurs surfaces de 1990. Les principales modifications observées ont été effectuées vers l'agriculture, les forêts, les jeunes peuplements (reboisements). Au même titre que les autres occupations forestières, les formations des milieux ripicoles ont subi quelques changements d'affectation pour presque la moitié de sa surface de 1990. Les terres reprises sont affectées essentiellement à l'agriculture (35% terres

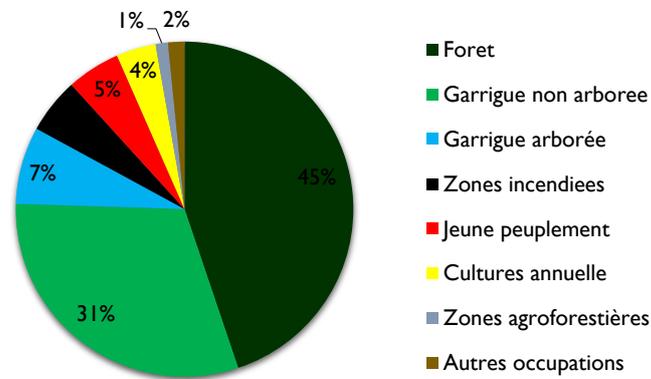


Figure 3.2 – Changement d’affectation des garrigues non arborées entre 1990 et 2000

agricoles et 6% agriculture hétérogène). Aussi, 58 ha de ces surfaces ont été transformés en périmètre irrigué (figure 3.4).

Les dynamiques observées entre 1963 et 2000 (carte phytoécologique et inventaire forestier)

L’analyse de la dynamique des affectations des sols est analysée sur deux périodes : 1963-2000 et 1963-2014. La première analyse est effectuée sur la totalité (175 231,9 ha) des affectations des sols classées comme suit :

- agriculture (92 894,2 ha) ;
- mosaïque forêt et agriculture (19 864,5 ha) ;
- forêts (62 473,2 ha),

en comparant les affectations de la carte phytoécologique aux résultats de l’inventaire de 2000. Les résultats de ce premier essai comparant les mêmes occupations entre 1963 et 2000 font état d’un gain moyen en forêts de l’ordre de 0,85 ha/100 ha de forêts provenant de l’agriculture ou des mosaïques et d’une perte de 0,66 ha/100 ha de forêts transformées en mosaïques et en agriculture (tableaux 3.4, 3.5 et 3.6).

Les dynamiques observées entre 1963 et 2014

Cette analyse est faite à partir d’un échantillon tiré au hasard dans chacun des trois types d’occupations à partir d’un découpage de la zone d’étude en placettes régulières de forme carré et de 4 ha de surface. Cet échantillon est composé de 30% du total des placettes composées uniquement par une des trois occupations considérées. Il s’agit de 952 placettes d’agriculture, 185 placettes de forêts et 130 placettes de mosaïques agriculture et forêts. L’opération a consisté à exporter la carte contenant les placettes échantillons de 1963 sur une image de 2014 de *Google Earth*. Connaissant le contenu de chacune de ces placettes en 1963, il a suffi de reconnaître par photo-interprétation le nouveau contenu après une période de cinquante et deux années (tableaux 3.7, 3.8 et 3.9).



Tableau 3.4 – Évolution des occupations entre 1963 et 2000

	Agriculture	Forêt	Mosaïque	Occupation de 1963
Agriculture	80 405	10 996,11	1 493	92 894
Forêt	19 683	41 503,54	1 287	62 473
Mosaïque	11 937	7 391,34	536	19 864
Superficie totale analysée				175 232

Tableau 3.5 – Stabilité des affectations des sols et des pertes par type d'occupation

Gain des forêts issues de l'agriculture	Gain des mosaïques issues de l'agriculture	Perte des forêts transformées agriculture	Perte des forêts transformées mosaïques	Perte des mosaïques transformées	Gain des forêts issues des mosaïques
0,23	0,03	0,62	0,04	1,18	0,73

Tableau 3.6 – Stabilité des affectations des sols et des pertes par type d'occupation

	Occupations stables en %	Pertes annuelles moyennes en ha/100 ha
Agriculture	86,6	0,26
Forêts	31,5	1,34
Mosaïques agriculture + forêts	60,1	0,78

Tableau 3.7 – Évolution des occupations entre 1963 et 2014

	Agriculture 2014	Forêt 2014	Mosaïque 2014	Occupation de 1963
Agriculture	1 584	72	167	1 823
Forêt	272	456	740	1468
Mosaïque	196	64	260	520
Superficie totale analysée				3811

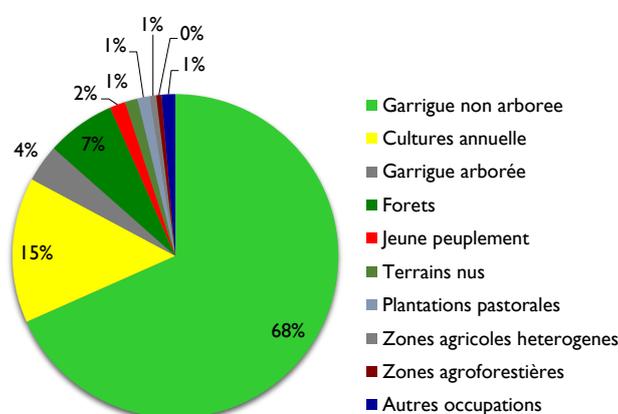


Figure 3.3 – Changement d’affectation des garrigues non arborées entre 1990 et 2000

Tableau 3.8 – Pertes et gains d’une affectation à l’autre entre 1963 et 2014 (ha) pour 100 ha de chaque affectation de 1963

Gain des forêts issues de l’agriculture	Gain des mosaïques issues de l’agriculture	Perte des forêts transformées agriculture	Perte des forêts transformées mosaïques	Perte des mosaïques transformées en agriculture	Gain des forêts issues des mosaïques
0,11	0,25	0,50	1,36	1,02	0,33

Synthèse des comparaisons et tendances évolutives

D’une manière globale et sur l’ensemble de la zone d’étude, la comparaison de la dynamique des affectations entre 1963-2000 et 1963-2014 exprimée en ha/100 ha de chacune des occupations montre une légère évolution progressive des occupations forestières au dépens de l’agriculture et des mosaïques. En revanche, les plus importantes régressions ont concerné les mosaïques dont la majeure partie a évolué vers l’agriculture (figure 3.5).

Les quatre dates traitées couvrent un intervalle temporel global de 52 ans allant de 1963 à 2014 avec deux dates intermédiaires : 1990 et 2000. À défaut de proposer une analyse par secteur, nous avons choisi de traiter les moyennes des évolutions observées pour les cinq groupes de secteurs définis selon la surface des occupations en forêt et les niveaux de vulnérabilité synthétiques les concernant. Le **premier groupe** rassemble les secteurs où la surface forestière est inférieure ou égale à 100 ha. Il inclut des agglomérations importantes et où le caractère citadin domine celui de la campagne. Il s’agit des villes de Siliana Ville, Siliana Nord et Sud, Makthar Nord et Sud,... soit sept secteurs au total. Dans ces secteurs, c’est l’agriculture qui domine les occupations même si, depuis 1995, elle observe une tendance générale à la baisse qui n’a pas atteint le niveau de 1963 mais la régression de ces surfaces semble bien engagée. En revanche, les surfaces en mosaïques ont



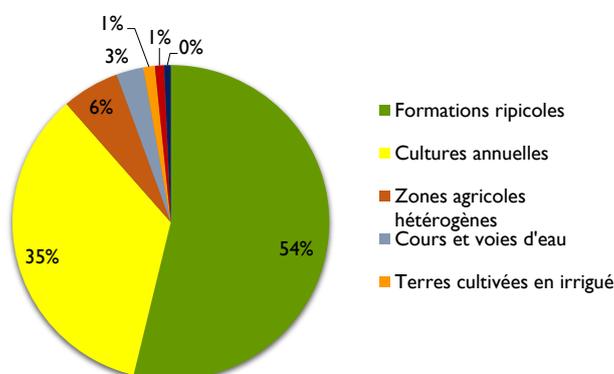


Figure 3.4 – Changement d’affectation des formations ripicoles entre 1990 et 2000

Tableau 3.9 – Stabilité des affectations des sols et des pertes par type d’occupation

	Occupations stables en %	Pertes annuelles moyennes en ha/100 ha
Agriculture	87	0,35
Forêts	31	1,9
Mosaïques agriculture + forêts	50	1,3

subi une chute importante entre 1963 et 1995 qui explique presque exclusivement les évolutions des surfaces de l’occupation agricole. Depuis 1995, les surfaces de cette occupation ont augmenté légèrement d’année en année traçant presque la même tendance que les occupations forestières qui n’ont jamais occupé de grandes surfaces dans ces secteurs (figure 3.6).

Le **deuxième groupe** de secteurs concerne ceux où la surface forestière est supérieure à 100 ha et inférieure ou égale à 1000 ha. Il regroupe une douzaine de secteurs, à savoir : Massouj, Chouarnia, Sayar, Sened El haddad, El Arab, Ras El Oued, Ain Dissa, El Msehla, El Khalsa, Saddine, Soualem et la banlieue de Bargou. Dans cette catégorie, les surfaces occupées par l’agriculture ont subi une régression progressive et continue. Les surfaces totales agricoles en 2014 sont plus faibles que celles de 1963 (figure 3.7). Ceci explique une certaine déprise agricole déjà amorcée depuis 1990 et qui s’est prolongée avec la même allure jusqu’en 2014. Ceci est-il expliqué sur les territoires par une augmentation des surfaces en mosaïque de forêts et agriculture ? Les forêts, en revanche, ont vu leurs surfaces progresser de manière significative entre 1990 et 2000, puis elles ont stagné jusqu’en 2014. Est-ce le fruit d’une politique de reboisement engagée par l’administration forestière ou les résultats des modifications méthodologiques effectuées entre les deux inventaires forestiers de 1990 et 2000 ?

Le **troisième groupe** de secteurs regroupe ceux contenant une surface en formations forestières comprises entre 1000 ha et 2000 ha. Il s’agit des secteurs de Sejja, Beni Haezm, Sidi Mansour, Sidi

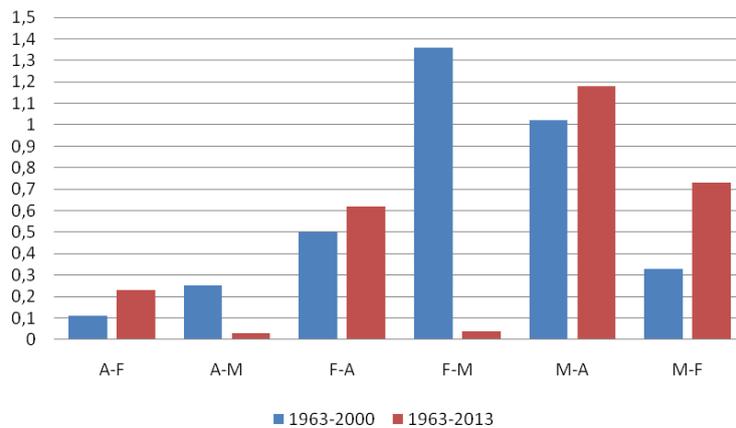


Figure 3.5 – Comparaison des occupations des sols selon quatre dates et lecture des tendances

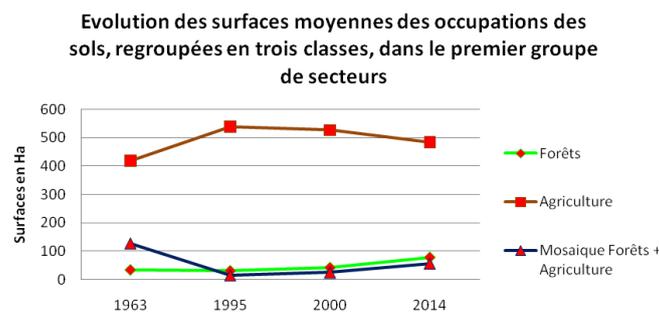


Figure 3.6 – Évolution des surfaces des trois occupations dans le premier groupe de secteurs

Hmada, Marj Mokaddem, Semirat Sud, Ouled zenag et Bez. Dans ce groupe la déprise agricole est confirmée. Elle suit d'ailleurs la même tendance que le groupe précédent avec une baisse continue et régulière depuis 1990. Par ailleurs les occupations forestières ont observé une hausse légère mais irrégulière entre 1990-2000 et 2000-2014. Les surfaces en mosaïques de forêts + agriculture sont en augmentation depuis 1990. Les surfaces reprises à l'agriculture semblent évoluer lentement vers une forme intermédiaire conduisant à terme vers des formations forestières (figure 3.8).

Le **quatrième groupe**, comprenant les secteurs de Sidi Morched, Jema, El joui, El Kabel, Ouled Fedj, Es Sfina, El Bhirin et El Mansoura Nord, a une surface moyenne en formations forestières comprise entre 2000 ha et 3000 ha. Ces secteurs que nous qualifions de forestiers comparés aux autres secteurs du bassin versant voire même du gouvernorat de Siliana, même si les surfaces agricoles ont toujours dépassé les surfaces forestières, ont une surface forestière qui n'a ont cessé de baisser depuis 1990. Ils sont, en 2014, nettement en deçà des niveaux de 1963. En revanche, les surfaces forestières ont diminué entre 1963 et 1990 puis ont repris vers une hausse continue mais nettement plus forte entre 1990 et 2000 qu'entre 2000 et 2014. Les autres surfaces occupées par des mosaïques de forêts et agriculture ont suivi une tendance inverse à celle des surfaces agricoles. Globalement, les surfaces agricoles délaissées par une déprise agricole confirmée évoluent spontanément vers une formation intermédiaire de mosaïque (figure 3.9).



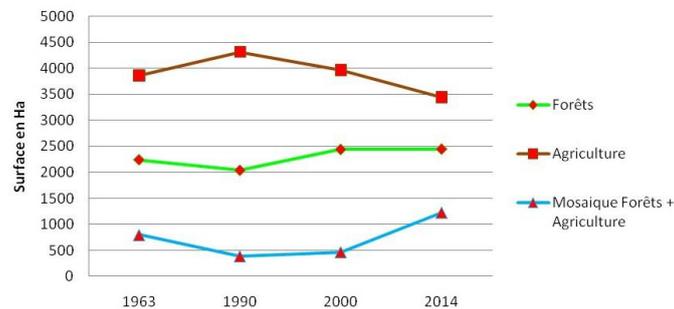


Figure 3.7 – Évolution des surfaces des trois occupations dans le deuxième groupe de secteurs

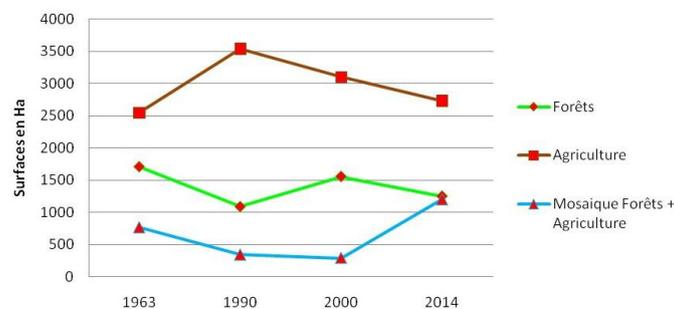


Figure 3.8 – Évolution des surfaces des trois occupations dans le troisième groupe de secteurs

Le **cinquième groupe** de secteurs qui ont la réputation d’être des secteurs franchement forestiers est composé de Bou Abdallah, Semiret Nord, Kesera, Ain Boussadia, El Louza et El Hammam. Ils ont des surfaces forestières comprises entre 3000 ha et 5000 ha. Dans cette catégorie de secteurs où les occupations forestières dépassent largement les deux autres occupations, celles-ci ne cessent de régresser, de manière légère certes mais progressive. La catégorie des occupations agricoles a subi un bond entre 1963 et 1995 qui s’est estompé depuis jusqu’en 2000, date à laquelle une tendance régressive s’est engagée. Paradoxalement, les occupations en mosaïque ont subi une tendance inverse à celle des surfaces agricoles. Dans ces secteurs les dynamiques semblent affecter les surfaces agricoles et les mosaïques alors que les occupations forestières n’ont subi aucun changement significatif (figure 3.10).

La zone d’étude est caractérisée par une domination de l’agriculture au dépens de la forêt et des mosaïques forêts / agriculture. Les dynamiques observées pendant les 52 années qui séparent les deux dates limites (1963 et 2014) ainsi que les situations intermédiaires réalisées en 1990 et 2000 ont fait état d’une augmentation significative des surfaces agricoles entre 1963 et 1995 puis d’une baisse légère mais progressive de ces surfaces ayant atteint en 2014 des surfaces presque équivalentes à celles de 1963. Une déprise agricole semble être amorcée à partir de 1990. Elle est confirmée par une hausse équivalente des surfaces en mosaïques de forêts/ agriculture. Par ailleurs, les surfaces forestières semblent se stabiliser depuis 2000 (figure 3.11).

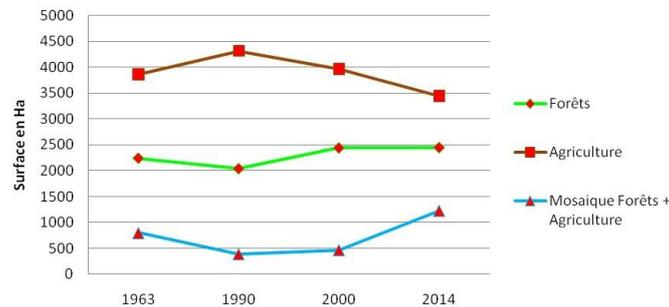


Figure 3.9 – Évolution des surfaces des trois occupations dans le quatrième groupe de secteurs

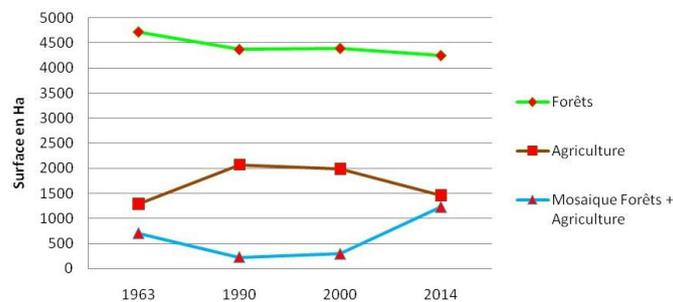


Figure 3.10 – Évolution des surfaces des trois occupations dans le cinquième groupe de secteurs

Les dynamique des occupations du sol dans le site pilote du bassin versant de Siliana et projections à l' horizon 2036

Les comparaisons des occupations des sols entre 1963-1990, 1990-2000 et 2000-2014 et surtout la comparaison des deux derniers inventaires forestiers décrivant les situations forestières de 1990 et 2000 nous ont permis de retenir les taux de régression moyens suivants :

- taux annuel de régression des forêts naturelles et artificielles, de la garrigue arborée, des plantations pastorales et des formations linéaires ou en bosquets : 0,08%. Les incendies des forêts sont intégrés dans cette dynamique en supposant que les peuplements incendiés sont régénérés naturellement une année après les feux ;
- taux de régression annuel de la garrigue non arborée : 0,07%.

Pour la projection entre 2015 et 2036 des plantations forestières, pastorales et de l'arboriculture fruitière on a retenu, après analyse des réalisations effectuées par les services forestiers entre 2000 et 2013, les hypothèses suivantes :

- les feux des forêts ne dépasseraient pas la moyenne annuelle observée entre 1985 et 2012 dans le site à raison de 30 ha/an. Les superficies brûlées sont rajeunies naturellement après exploitation des arbres incendiés une année après ;
- Les plantations forestières annuelles seront réalisées avec la cadence de 600 ha/an et elles remplaceraient progressivement les garrigues à l'intérieur des forêts domaniales ;
- Les plantations pastorales annuelles continueraient à la cadence moyenne de 175 ha/an, dont 80% sur les terres agricoles marginales et 20% sur les garrigues forestières ;



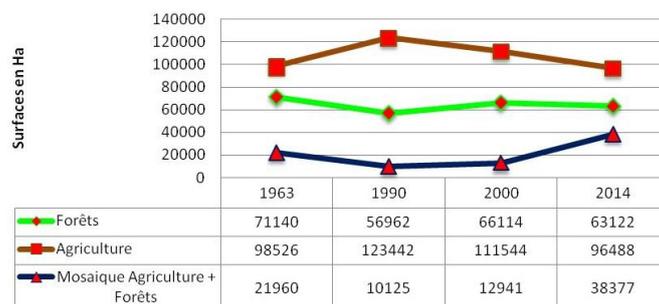


Figure 3.11 – Évolution des surfaces des trois occupations dans la zone d'étude

- Les plantations annuelles d'oliviers se maintiennent à la cadence de 300 ha/an sur les terres agricoles peu adaptées aux cultures annuelles et les plantations de fruitiers, autres que l'olivier, continueraient à la cadence de 200 ha/an.

Évolution des forêts naturelles

Les forêts naturelles inventoriées en 2000 couvrent une superficie totale de 26 928 ha dominées essentiellement par le pin d'Alep (23 495 ha), soit 87% de la superficie forestière totale. Pendant la période 2000-2014, les feux ont brûlés 1 299 ha de forêt. La régression moyenne, par changement d'affectation, sur la période 2000-2015 est estimée à 219 ha/an soit une régression totale sur cette durée de 3 289 ha. Cette régression entame un changement d'affectation des sols vers une possible occupation agricole transitoire qui risque d'être définitive. Cette régression pourrait atteindre 7 218 ha en 2036 (tableau 3.10).

Tableau 3.10 – Évolution des forêts naturelles entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2036
Superficies en ha	26 929	25 869	24 850	23 640	22 680	21 787	21 209	20 034	19 711
Pertes cumulées de superficies en ha		1 060	2 072	3 289	4 249	5 142	5 720	6 895	7 218
Régression moyenne annuelle périodique en ha/an		12	202,4	243,4	192	78,6	115,6	235	323

Les délits graves constatés et verbalisés pendant les quatre dernières années 2011-2012-2013 et 2014 portent en moyenne sur :

- 69 ha/an défrichés ;
- 23 696 arbres coupés pouvant correspondre à la destruction de 236 ha/an de forêt. Les

Tableau 3.11 – Évolution des plantations artificielles entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2036
Superficies cumulées réellement plantées en ha		1 770	5 728	8 798	11 798	14 798	17 798	20 798	21 398
Superficies probables après perte de terres		1 750	5 576	8 420	10 720	13 250	15 681	18 769	19 249
Régression moyenne annuelle en ha/an		4	15,2	25,2	53,9	61,9	70,5	57,9	59,6

délits forestiers de défrichement et de coupes d'arbres constatés et verbalisés expliquent à eux seuls la totalité de la régression des terres forestières, en sachant que les délits constatés ne reflètent qu'une partie des dégâts subis par les formations forestières naturelles du site.

Cette régression aurait pour conséquences :

- Une perte annuelle moyenne de l'équivalent en biomasse de 193,6 ha de forêt naturelle, et leur équivalent CO₂ séquestré dans le stock total sur pieds et leurs séquestrations annuelles ;
- Une perte de matière carbonée du sol de l'équivalent 1,6 tonnes par ha/an sur une vingtaine d'années ;
- Une perte de revenus directs et indirects estimés à 197 DT/ha/an.

Évolution des plantations artificielles

Ces plantations sont installées principalement à la place de la garrigue. Les superficies plantées entre 2000 et 2014 dans le site de Siliana ont atteint 8 198 ha (rapports internes de la DGF entre 2000 et 2014 avec une cadence moyenne annuelle de 585 ha). Comme pour les forêts naturelles, les plantations artificielles perdent annuellement 0,8% de leurs superficies en moyenne de 25 ha par an sur la période 2000-2015 et 59,6 ha/an sur la totalité de la période 2000-2036. Les causes de ces pertes pourraient provenir de délits de défrichement et de labour des terres forestières comme ceux constatés dans les forêts naturelles. Les délits de pacage constatés sont relativement faibles par rapport aux dégâts constatés (tableau 3.11).

Avec une cadence annuelle de plantation de 600 ha/an entre 2015 et 2036 les plantations atteindraient 19 249 ha dépassant par leurs superficies les forêts naturelles qui occuperaient en 1936 19 711 ha. Si cette cadence annuelle de reboisement est maintenue, les garrigues non arborés occupant 25 361 ha en 2000 n'occuperaient en 2036 que 445 ha qui seraient occupées par des plantations pastorales. Cette action rajeunirait la moitié de la superficie des forêts domaniales dans le site pilote et améliorerait la productivité de la pinède et sa capacité de séquestration de CO₂. Les bénéfices directs et indirects estimés à 197 DT par ha de forêts augmenteraient sensiblement par rapport



Tableau 3.12 – Évolution des plantations pastorales entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2036
Superficies conservées pour cet usage	0	1 627	3 858	4 317	5 009	5 674	6 312	7 092	7 211
Superficies réalisées cumulées en ha	0	1 647	3 982	4 601	5 476	6 351	7 226	8 101	8 276
Superficies reconverties à d'autres usages	0	20	124	284	467	677	914	1 009	1 065
Conversion en agriculture ha/an		4	20,8	32	36,6	42	47,4	19	65
Conversion en plantations ha/an		329,4	467	123,8	175	175	175	175	175

aux bénéfiques de l'année de référence.

Évolution des plantations pastorales d'arbustes fourragers

Cette action touche principalement les terres agricoles marginales très affectées par l'érosion et vient souvent compléter les travaux de fixation physique du sol par confection de terrasses ou banquettes visant à limiter le ruissellement et la perte conséquente des sols. N'ayant pas exactement les superficies traitées par cette action dans le domaine forestier, on a supposé que 20% des superficies traitées sont sur ce domaine dans le cadre de l'amélioration pastorale des forêts. Cette action entame une conversion de terres agricoles marginales en terres portant une couverture arborée durable servant comme réserves fourragères sur pieds. Indirectement, elles contribuent à l'amélioration de la production ligneuse à usages domestiques, à la fixation des sols et à la séquestration du carbone par les arbustes pérennes. Comme pour les forêts naturelles, les plantations pastorales perdent annuellement 0,8% de leurs superficies, soit en moyenne 25 ha par an sur la période 2000-2015 et 59,6 ha/an sur la totalité de la période 2000-2036 (tableau 3.12). Cette régression des superficies des plantations pastorales et leurs conversions à d'autres usages n'a pas d'explication rationnelle vu que ces plantations concernent surtout les terres privées, se font à la demande du propriétaire et sont en partie subventionnées par l'état.

Évolution des boqueteaux et des autres formations forestières

Cette forme de végétation ligneuse a été regroupée parce qu'elle occupe des terres à affectations diverses. Les deux inventaires forestiers nationaux de 1990 et 2000 l'ont distingué des autres formations forestières occupant principalement les forêts domaniales. La superficie totale de cette

Tableau 3.13 – Évolution des superficies en hectares des formations forestières linéaires entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2036
Superficie en ha	2 038	1 957	1 880	1 806	1 735	1 667	1 601	1 538	1 525
Régression totale cumulée en ha		1	158	232	303	371	437	500	513
Régression moyenne annuelle périodique en ha/an		6,2	15,4	4,8	4,2	3,6	3,2	2,6	3

Tableau 3.14 – Évolution de la superficie des garrigues arborées entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2036
Superficie en ha arborée	3 255	3 127	3 003	2 885	2 772	2 663	2 558	2 457	2 437
Pertes cumulées en ha		128	251	369	483	592	697	798	817
Régression moyenne annuelle périodique (ha/an)		25,6	24,6	23,6	22,8	21,8	21	20,2	19

formation au dernier inventaire de 2000 est de 2 037 ha dont 1 774 ha (soit 87%) de formations ripicoles et le reste (sur 263 ha) composé d'une multitude d'espèces ligneuses arborées différentes (tableau 3.13). Au taux annuel de régression moyen de 0,8%, la superficie totale de cette formation sera de 1 806 ha en 2015 et de 1 526 ha en 2036.

Évolution des garrigues arborées

Les garrigues arborées occupaient en 2000 une superficie de 3 254 ha. À la cadence estimée de régression actuelle, sa superficie sera de 2 885 ha en 2015 et de 2 437 ha en 2036. La régression moyenne annuelle de la superficie de la garrigue au profit d'usages agricoles est estimée en moyenne sur toute la période 2000-2036 à 24 ha/an (tableau 3.15).



Évolution des garrigues non arborées

La superficie des garrigues non arborées en 2000 est de 25361 ha. Le taux annuel de régression au profit d'autres occupations non forestière selon l'analyse des derniers inventaires est de 0,7%. Sur la base de ce taux, on estime que la garrigue occuperait 22 825 ha en 2015 et 19 694 ha en 2036. Les plantations forestières dans la garrigue ont réduit sa superficie à 15 102 ha en 2014. Avec une cadence annuelle de 600 ha/an les plantations forestières réduiraient la garrigue à 445 ha en 2036 (tableau 3.15).

Évolution des surfaces en arboriculture fruitière

L'arboriculture fruitière est traitée ici seulement en termes de superficie pour en déduire la production de biomasse ligneuse provenant essentiellement des produits de la taille annuelle des arbres. Les produits de la taille des oliveraies et des autres fruitiers sont considérés comme une production annuelle de biomasse renouvelable. Les inventaires des gaz à effet serre (GES) en Tunisie ont comptabilisé l'absorption de CO₂ de l'oliveraie sur la base moyenne de 1,3 tCO₂eq/ha/an et 0,65 tCO₂eq/ha/an pour les autres fruitiers (tableau 3.16).

Conversion des terres agricoles en occupations forestières

Le taux annuel de conversion des terres agricoles en occupations forestières est de 0,31 ha pour 100 ha de terre agricole. Par rapport à la superficie totale des occupations agricoles du site la conversion annuelle est de 250 ha. Ces conversions des terres agricoles sont soit des plantations pastorales sur des terres agricoles marginales ou sous forme de plantations linéaires de fixations de ravins, de brise-vents ou de haies. Une partie de ces conversions a été traitée dans le paragraphe relatif aux plantations pastorales. Le reste des conversions s'ajoute aux plantations linéaires sous plusieurs formes dont essentiellement les brise-vents, les haies et la fixation des berges de ravins ou la consolidation de banquettes pour la conservation des eaux et des sols (tableau 3.17).

Tableau 3.15 – Évolution de la superficie des garrigues arborées entre 2000 et 2036 dans le site de Siliana

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2036
Superficies intégrant la régression au profit de l'agriculture (ha)	25 361	24 486	3 641	22 825	22 037	21 276	20 542	19 833	19 694
Superficies intégrant la régression au profit des plantations forestières (ha)	25 361	22 735	18 065	14 404	11 317	8 026	4 861	1 064	445
Régression moyenne annuelle périodique au profit de l'agriculture (ha)		-175	-169	-163	-158	-152	-147	-142	-139
Régression moyenne annuelle au profit des plantations forestières (ha)		-525	-934	-732	-617	-658	-633	-759	-619

Tableau 3.16 – Évolution des superficies (ha) de l'arboriculture fruitière dans le site pilote du bassin versant de Siliana entre 2001 et 2014 et projection sur la période 2015-2036

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2036
Superficies de l'oliveraie (ha)		14 611	16 328	17 850	19 350	20 850	22 350	23 850	24 150
Superficies des autres fruitiers (ha)		6 179	7 407	8 504	9 504	10 504	11 504	11 704	11 904

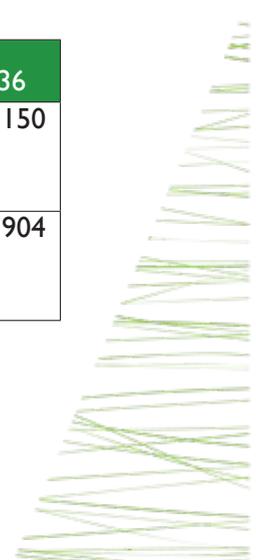


Tableau 3.17 – Terres agricoles converties en forêts (ha) entre 2000 et 2014 et projection entre 2015 et 2020 dans le site pilote du bassin versant de Siliana

	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2036
Occupations agricoles converties en forêts (ha)	250	1 647	3 982	4 601	5 476	6 351	7 226	8 101	8 276
Terres converties en plantations pastorales (ha)		1 627	3 858	4 317	5 009	5 674	6 312	7 092	7 211
Terres converties en plantations linéaires (ha)		20	124	284	467	677	914	1 009	1 065

Évaluation de la vulnérabilité des occupations forestières au changement climatique et autres facteurs

Unité spatiale de référence

L'unité spatiale de référence qui est considérée pour cette étude est le secteur, qui correspond au découpage administratif le plus fin adopté en Tunisie. La zone d'étude est composée de 41 secteurs. Les limites de la zone d'étude dépassent celles du bassin versant de Siliana mais tous les secteurs sont en partie ou en totalité contenus dans le bassin versant.

L'évaluation a porté sur les ressources forestières de la zone d'étude et en particulier la pinède. C'est un choix qu'ont défendu les responsables forestiers tunisiens qui désirent ainsi compléter la base de connaissance sur la vulnérabilité des écosystèmes forestiers qui est déjà initiée pour le cas de la subéraie. Ceci est d'autant plus justifié que la pinède est le principal écosystème forestier du pays en termes de surfaces.

Cadre temporel

Deux intervalles temporels sont retenus pour les projections climatiques. Il s'agit des échéances 2015-2036 et 2046-2065. Ce sont des projections réalisées par le GIEC et publiées officiellement dans le cinquième rapport. Parmi les scénarios produits, le RCP4.5 qui est considéré comme optimiste et le RCP8.5 qui est jugé pessimiste ont été choisis.

Approche méthodologique : l'approche spatiale multifactorielle

Schéma conceptuel de l'approche

L'approche méthodologique employée (voir détails en annexes) est fortement inspirée de l'approche spatiale multifactorielle développée par la GIZ [5] et préconisée pour tous les pays partenaires du projet. C'est une approche à cinq étapes (figure 4.1) qui passe du choix des facteurs explicatifs de la vulnérabilité liée au climat à leur intégration pour évaluer une vulnérabilité synthétique en passant par des procédés techniques et thématiques de seuillage et d'intégration (voir les détails méthodologiques en annexes). Les choix thématiques effectués lors de l'application de cette méthode sont effectués de manière préférentielle sur la base des résultats de la recherche sinon, à défaut, à partir des évaluations d'expert.

Les variables employées, les traitements et les analyses effectuées

Les variables thématiques employées pour l'analyse de la vulnérabilité de la forêt dans la zone d'étude sont regroupées en trois grandes classes : variables biophysiques, climatiques et humaines. Chacune de ces classes est composée d'un nombre de variables qui sont exprimées par des cartes qui sont combinées de manières différentes afin de répondre aux exigences de l'approche spatiale multifactorielle préconisée (figure 4.2).



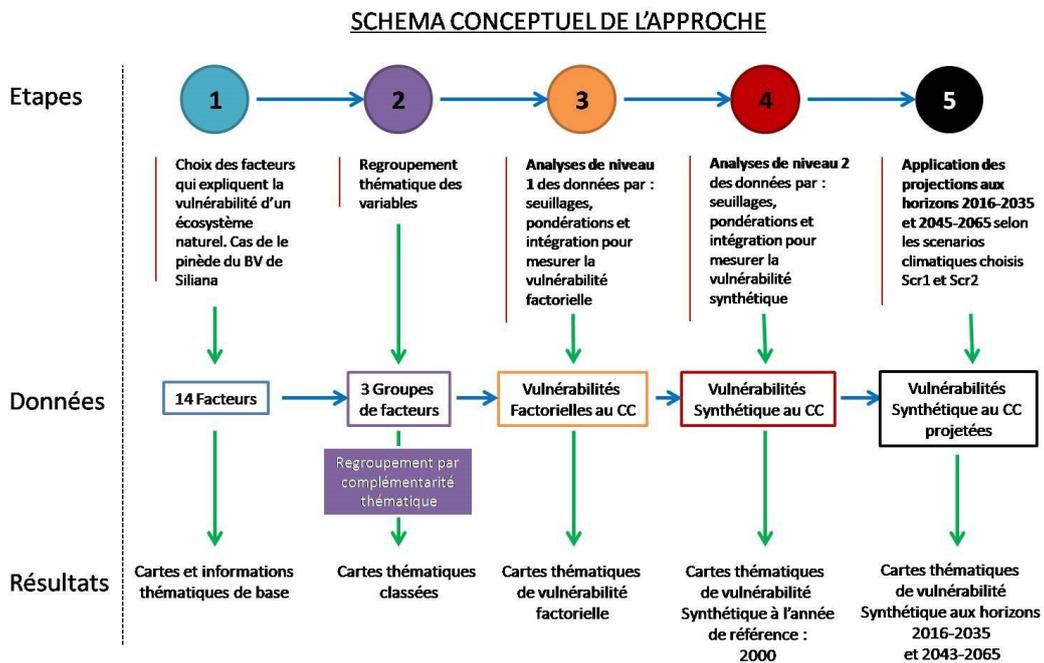


Figure 4.1 – Schéma conceptuel de l'approche spatiale multifactorielle employée

Parmi les étapes techniques, les plus déterminantes concernent les seuillages, les pondérations et l'intégration ou le croisement des variables explicatives. Ces étapes sont répétées au moins à deux niveaux de l'analyse : au moment de préparer les variables thématiques originelles ou de base afin de les combiner pour générer une variable synthétique unique telles que les pentes, les expositions, les profondeurs des sols et les natures des sols qui ont été seuillées, pondérées et intégrées pour créer le facteur biophysique de synthèse. Le deuxième niveau de l'analyse où ces procédés techniques ont été répétés c'est au moment de vouloir générer le deuxième facteur de synthèse qui intègre à la fois le climat, l'action anthropique et les informations stationnelles et qui décrit ainsi le niveau de vulnérabilité de la pinède au climat mais aussi aux autres facteurs analysés pour la situation de référence (période 1985-2006). Ces processus, qui a priori paraissent purement techniques, sont en réalité basés sur des choix et des décisions qui sont prises à partir de connaissances et d'informations scientifiques analysées et qui portent sur les variables introduites et leur liaison avec la forêt et le climat. Le tableau 4.2 indique en particulier les seuils retenus pour toutes les variables thématiques employées, les coefficients de pondération retenus et les méthodes de croisement des produits sur le plan cartographique.

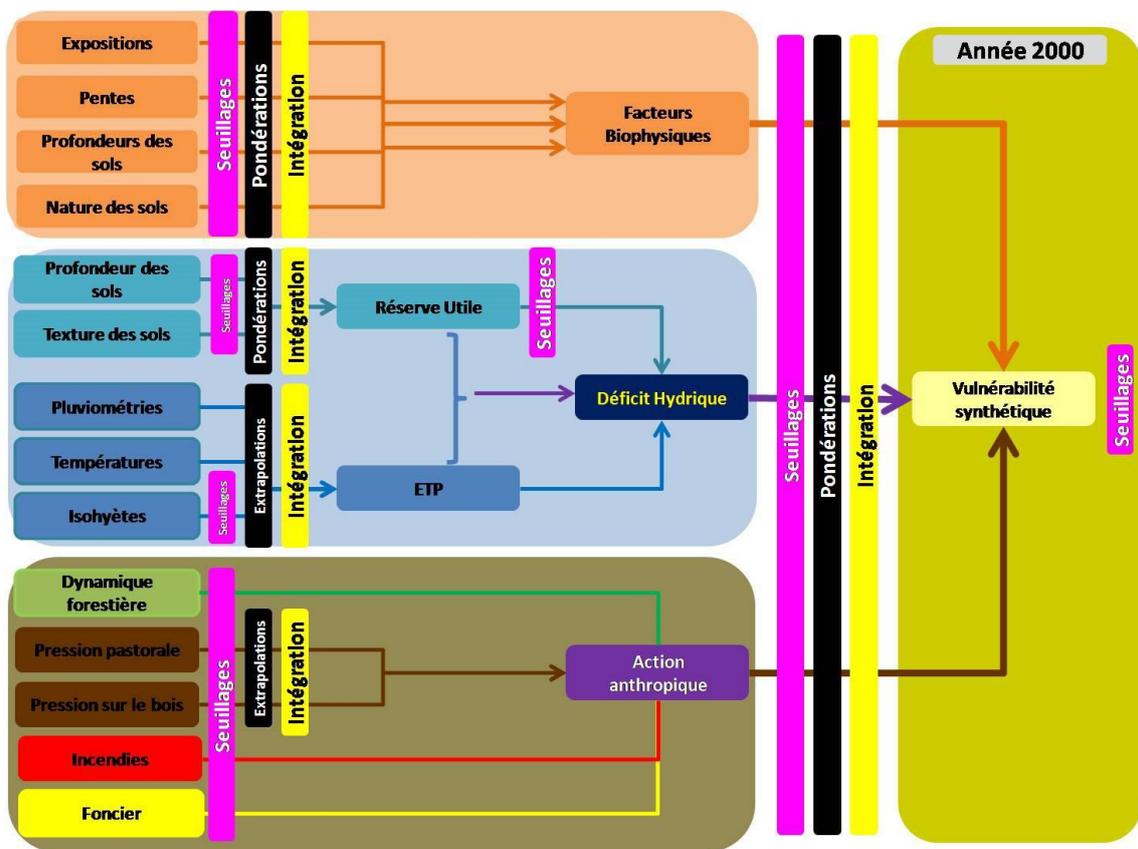


Figure 4.2 – Variables employées et procédés d'exploitation



Tableau 4.1 – Seuils retenus pour toutes les variables thématiques employées, les coefficients de pondération retenus et les méthodes de croisement des produits sur le plan cartographique

1		2			3		4	5	6	
Variables	Seuil I	Signification thématique	Note	Arguments	Coeff. de pondérations	Arguments	Intégrations	Cartes intermédiaires	Carte de synthèse niveau I	
A	Expositions	nord/nord-ouest est/nord-est	Favorable à la forêt	1	-Effet de l'exposition et de l'ensoleillement sur l'évapotranspiration	4	-Les coefficients de pondération sont justifiés par le niveau de précision de l'information employée aux dépens de facteurs thématiques	Calcul et classement des secteurs selon la note générale des facteurs biophysiques combinés. Les calculs sont effectués selon la requête ¹ suivante.	Carte des facteurs biophysiques intégrés	Carte de vulnérabilité aux facteurs biophysiques
		ouest/sud-ouest	Moyenn. favorable à la forêt	2	-Effet de l'exposition sur la pluviométrie, l'ambiance et la fraîcheur					
		sud/sud-est	Défavor. à la forêt	3						

1. $((\text{Note exposition} \times 4) + (\text{Note pente} \times 3) + (\text{Note profondeur des sols} \times 2) + \text{Note type de sol} \times 1) / 10$

Pentes	<10%	Favorable à la forêt	1	-Effet de la pente sur l'infiltration de l'eau dans les sols	3	<p>-Les cartes de pente et d'exposition ont des facteurs de pondération élevés car elles sont générées de manière automatique à partir de données numériques fournies par les satellites d'observation de la terre (modèle numérique de terrain)</p> <p>-La communauté des forestiers conviennent dans leur majorité que les cartes pédologiques sont nettement moins précises sur le domaine forestier que pour les terres à vocations agricoles</p>	<p>Les valeurs obtenues oscillent entre 1 et 4,4. Plus la valeur est faible et moins est importante la vulnérabilité de la pinède du bassin versant de Silihana aux facteurs biophysique et inversement.</p> <p>Quatre seuils ont été retenus correspondant à autant de classes de vulnérabilité factorielle biophysique :</p> <p>i) facteurs biophysiques favorables au pin d'Alep si inférieur à 1 ; ii) facteurs biophysiques moyennement favorables au pin d'Alep si entre 1 et 2 ; iii) facteurs biophysiques peu favorables au pin d'Alep si entre 2 et 3 ; iv) facteurs biophysiques défavorables au pin d'Alep si supérieur à 3</p>
	10-25%	Moyenn. favorable à la forêt	2	-Effet de la pente sur la perte des sols par érosion			
	>25%	Défavor. à la forêt	3				



Profondeur des sols	>120 cm	Très favorable à la forêt	1	-Effet de la profondeur du sol sur la capacité de stockage de l'eau -Effet de la profondeur du sol sur l'activité racinaire des arbres	2				
	90-120 cm	Favorable à la forêt	2						
	60-90 cm	Moyenn. favorable à la forêt	3						
	30-60 cm	Peu favorable à la forêt	4						
	<30 cm	Défavor. à la forêt	5						
Nature des sols	Vertisols, sols brunifiés et sols peu évolués d'apport, sols iso-humiques	Favorable à la forêt	1	-Effet de la nature du sol sur la capacité de stockage de l'eau -Effet de la nature du sol sur l'activité racinaire des arbres	1				
	Rendzines, sols bruns calcaires	Moyenn. favorable à la forêt	2						

1		2			3		4	5	6	
Variables		Seuil I	Signification thématique	Note	Arguments	Interpolations	Arguments	Intégrations	Cartes intermédiaires	Carte de syn-thèse niveau I
B	Profondeur des sols	>120 cm	Très favorable à la forêt	1	-Effet de la profondeur du sol sur la capacité de stockage de l'eau -Effet de la profondeur du sol sur l'activité racinaire des arbres	RU= 153 - 330	La combinaison de la texture et de la profondeur des sols détermine la Reserve Utile : outil capital pour calculer le bilan hydrique d'un sol	Intégration spatiale par croisement de l'information	Reserve Utile (R.U.) = Texture x Profondeur	Carte de vulnérabilité au déficit hydrique
		90 - 120 cm	Favorable à la forêt	2		RU= 107 - 230				
		60 - 90 cm	Moyenn. favorable à la forêt	3		RU= 76 - 165				
		30 à 60 cm	Peu favorable à la forêt	4		RU= 46 - 99				
		< 30 cm	Défavor. à la forêt	5		RU= 5 - 45				
	Texture des sols	Fine	Favorable à la forêt	1	Effets sur l'infiltration et la rétention de l'eau	RU= 46 - 99				
		Moyenne	Moyenn. favorable à la forêt	2		RU= 5 - 45				
		Grossière	Défavor. à la forêt	3		RU= 5 - 45				

Les variables biophysiques

Les variables biophysiques sont représentées par les cartes thématiques des pentes, de l'exposition, de la profondeur des sols et de la nature des sols. Ces cartes sont employées pour en générer une carte synthétique de la réserve utile. La vulnérabilité factorielle de la forêt du site pilote vis-à-vis des facteurs biophysiques en 2000 est exprimée par la carte suivante (figure 4.3).

Les variables climatiques

Les variables climatiques sont représentées par la carte de la profondeur des sols, la carte de la texture des sols (voir détails en annexes) et une représentation spatialisée des facteurs climatiques : températures (maximales et minimales) et les pluviométries annuelles. L'intégration de ces facteurs nous a permis de produire une carte du déficit hydrique en nombre de jours transformé en nombre de jours secs pouvant causer un stress hydrique à la forêt. La figure 4.4 suivante traduit les niveaux de vulnérabilité de la forêt du site pilote vis-à-vis du climat exprimé par le stress édaphique.

Les variables anthropiques

Les variables anthropiques sont représentées par la carte des dynamiques forestières (qui expriment en grande partie les délits de coupe et de défrichement—voir synthèse en annexes sur la période 2011-2014), la pression pastorale, pression sur le bois énergie, les incendies (voir en annexes la synthèse sur les feux observés dans le site pilote entre 1985 et 2012) et la situation foncière des occupations forestière. La combinaison de ces cartes thématiques de base nous ont permis d'estimer les niveaux de vulnérabilité anthropique exercée sur les couverts forestiers de la zone d'étude (figure 4.5).

Les vulnérabilités synthétiques : situation de référence et projections futures

Carte de la vulnérabilité synthétique (année de référence 2000)

La carte de vulnérabilité synthétique en 2000 (figure 4.6) montre que la région sud-ouest du bassin versant de Siliana est moins vulnérable aux changements globaux par rapport à d'autres secteurs plus centraux. En comparant avec la figure 1.5, il est possible de noter que ces secteurs sont tous occupés par des forêts de résineux, des garrigues arborées/non arborées et des zones agricoles/parcours. En même temps certains de ces secteurs sont les plus vulnérables aux facteurs biophysiques (figure 4.3) et les moins vulnérables au stress hydrique (figure 4.4).

Cartes de la vulnérabilité synthétique aux horizons 2016-2035

La projection selon le model RCP4.5 à l'horizon 2016-2035 (figure 4.7) montre que, exception faite pour deux secteurs au sud-ouest de la zone d'étude, les secteurs au nord-est dominés par zones agricoles, agroforesterie et parcours (figure 1.7) vont être les moins vulnérables aux changements globaux. Comme pour la situation de référence du 2000, cette projection ne montre aucun secteur fortement vulnérable aux changements globaux. La projection selon le modèle RCP8.5 pour l'horizon 2016-2035 montre un seul secteur au centre-ouest de la zone d'étude très vulnérable au climat et affecté par une forte pression humaine. Les autres secteurs moyennement vulnérables sont concentrés au nord-ouest du bassin versant, autour de la ville de Siliana (figure 4.8).

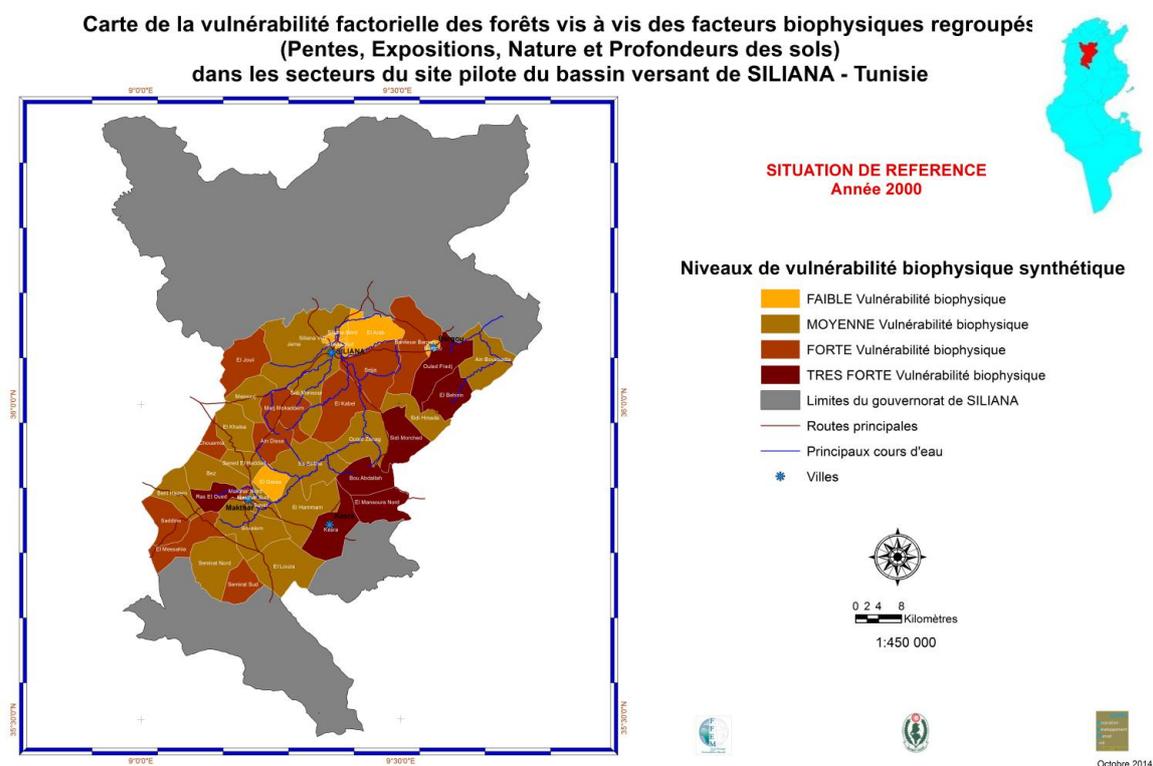


Figure 4.3 – Carte de la vulnérabilité biophysique de la zone d'étude en 2000

Cartes de la vulnérabilité synthétique aux horizons 2046-2065

La carte de vulnérabilité synthétique à l'horizon 2016-2035 selon le modèle RCP4.5 montre que les secteurs les plus vulnérables sont concentrés autour de la ville de Siliana et le plus vulnérable au centre-est du bassin versant (figure 4.9). Cette vulnérabilité augmente si le modèle plus pessimiste RCP8.5 est appliqué : des secteurs plus vulnérables apparaissent aussi au sud-ouest de la zone d'étude (figure 4.10). Les secteurs au nord-est du bassin versant sont les moins vulnérables aux changements globaux pour les différentes projections et modèles appliqués.

Autres variables supplémentaires pour évaluer la vulnérabilité

Coefficient d'Emberger calculé à partir des données de la station de Siliana

Ce coefficient a été calculé d'une part à partir des données climatiques de la période analysée de la station de Siliana et d'après les données climatiques historiques de la région.

Indices calculés selon la station de Siliana

Sur les 38 années de la période 1954-2006, sur lesquelles on a des données excepté les années 1957 à 1967 et 1976 à 1979, le coefficient moyen d'Emberger est de 45,4. La station est classée en bioclimat semi-aride dont la limite inférieure la séparant du bioclimat aride est 35 et la limite supérieure la séparant du subhumide est de 70. Les années particulièrement arides qui sortent de la limite inférieure du bioclimat semi-aride sont de la plus aride à la moins aride classées ainsi : 1987

Carte de la vulnérabilité factorielle des forêts vis à vis du climat (stress hydrique) au cours de la période 1985-2004 (période de référence) dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

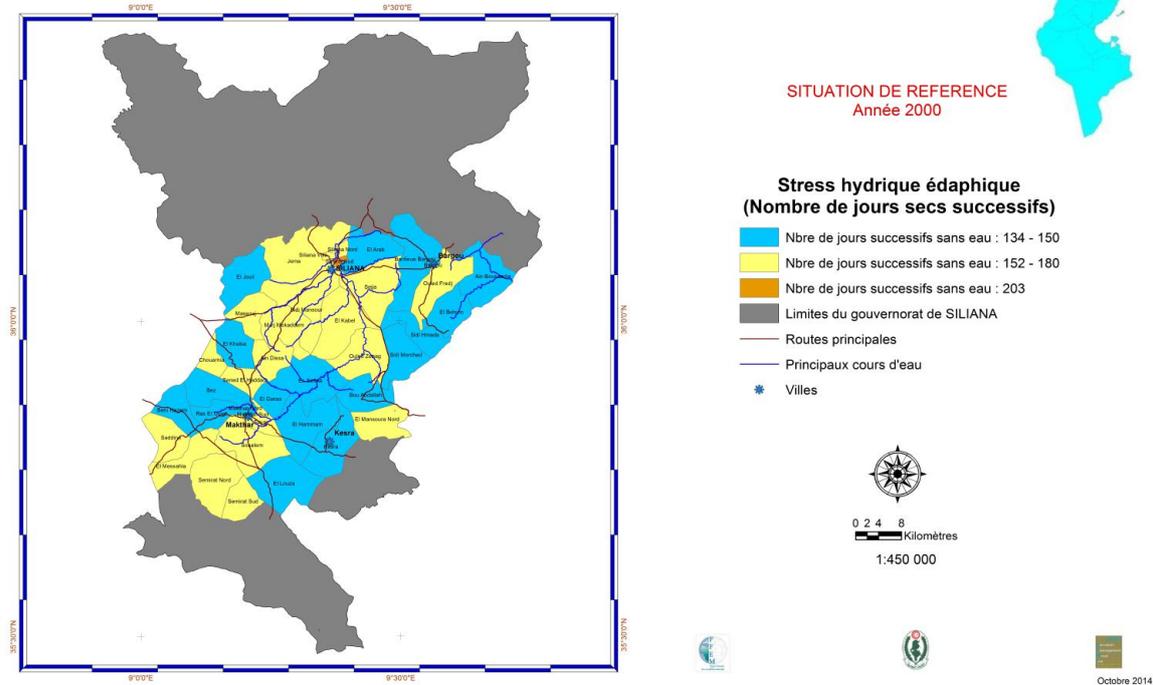


Figure 4.4 – Carte de vulnérabilité au déficit hydrique (exprimé en nombre de mois successifs) de la zone d'étude en 2000

(23)-1994 (24)-1993 (27)-1956 (27)-1989 (28)-1968 (31)-1970 (31)-2000 (32)-1983 (32)-2001 (33) et 1954 (33) (figure 4.11). Les périodes marquées par cette aridité correspondent aux périodes sèches mentionnées dans l'analyse des précipitations : 1986-1989 ; 1993-1994 ; 1999-2003.

Les coefficients annuels d'Emberger calculés par l'Institution flamande pour la recherche technologique (VITO) et dérivés des données du Centre Commun de Recherche (CCR) MARS WGS84 pour la période de 1979 à 2013 ont une moyenne de 48 sur la totalité de la période et ne diffèrent pas beaucoup de ceux calculés sur la période 1956-2006 à partir de la station météorologique de Siliana. Les années extrêmement sèches qui sont classées comme arides sont : 1981-1985-1993 et 2001. Les périodes restent les mêmes que celles estimées à partir des données de la station de Siliana. Les années particulièrement arides qui sortent de la limite inférieure du bioclimat semi-aride sont de la plus aride à la moins aride classées ainsi : 1987 (23)-1994 (24)-1993 (27)-1956 (27)-1989 (28)-1968 (31)-1970 (31)-2000 (32)-1983 (32)-2001 (33) et 1954 (33) (figures 4.12 et ??38). Les périodes marquées par cette aridité correspondent aux périodes sèches mentionnées dans l'analyse des précipitations : 1986-1989, 1993-1994, 199-2003.

Indice de stress agricole appliqué au couvert forestier

Un deuxième indice de stress agricole a été utilisé pour classer géographiquement la végétation selon un gradient de stress. Il est mesuré à travers la réponse des végétaux à l'aridité climatique qui est exprimée par la couleur de leur feuillage et l'intensité lumineuse réfléchi qui est transmise

Carte de la vulnérabilité factorielle des forêts vis à vis des facteurs anthropiques regroupés (pression pastorale, bois énergie, feux de forêts et réaffectation des sols) dans les secteurs du site pilote du bassin versant de SILIANA - Tunisie

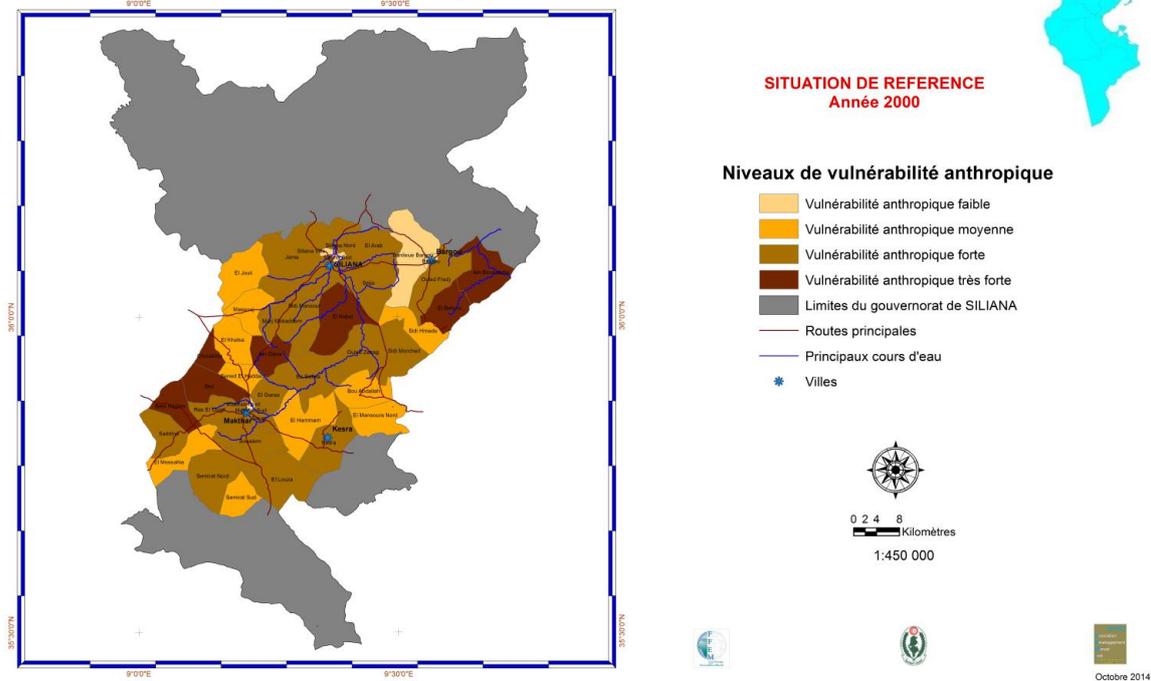


Figure 4.5 – Carte de la vulnérabilité anthropique de la zone d'étude en 2000

et enregistrée par des capteurs réagissant à l'intensité des ondes lumineuses émises par le couvert végétal. L' *Agricultural Stress Index* est basé sur le *Vegetation Health Index (VHI)* qui peut identifier condition de stress hydrique pendant tout l'année. Cet indice analysé géographiquement permet de lier les observations climatiques produisant du stress à son effet sur la végétation, en enregistrant leurs réflectances, en supposant que les bois morts et les feuilles sèches des arbres souffrants ou dépérissants absorbent différemment la lumière et donc la réfléchissent différemment relativement aux arbres en bonne santé. Le *VHI* est déterminé et analysé au niveau du site de Siliana sur la base que toute situation de stress est caractérisée par un *VHI* inférieur à 35. Cet indice calculé pour les années de la période 1984-2013 permet ainsi de classer les années selon leur *VHI* du plus faible (stress fort) au plus fort (pas de stress ou stress faible) (tableau 4.3 et figure 4.13).



Carte de la vulnérabilité synthétique des forêts vis à vis du climat, de l'action anthropique et des conditions stationnelles dans les secteurs du site pilote du bassin versant de SILIANA - Tunisie

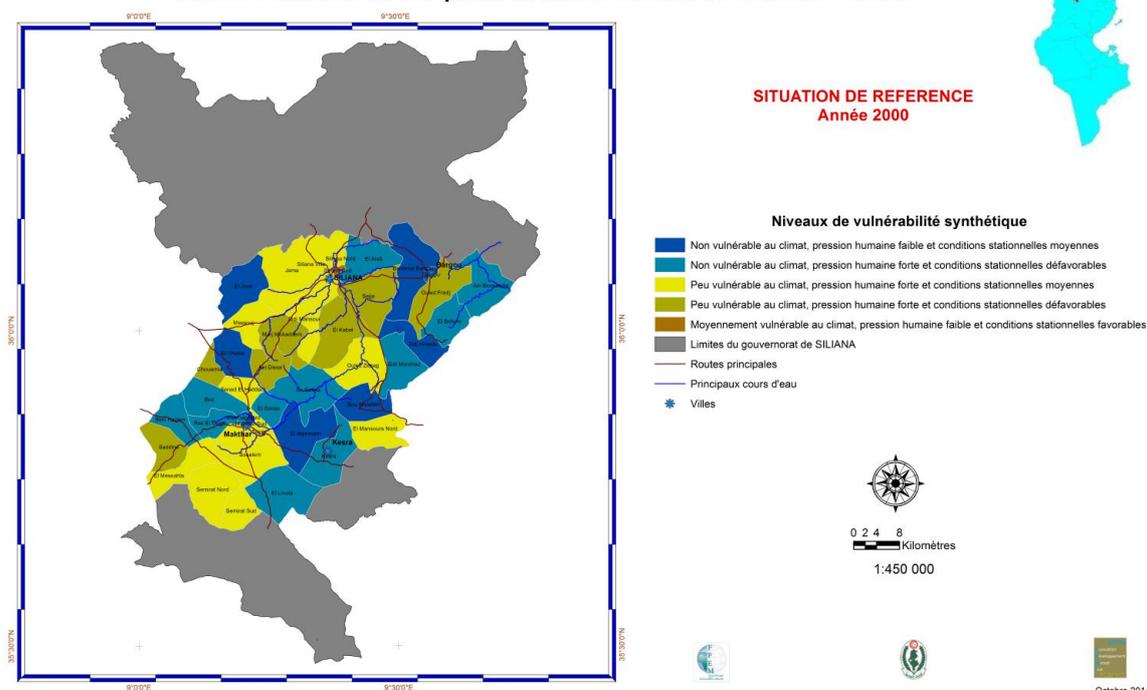


Figure 4.6 – Carte de la vulnérabilité synthétique : situation de référence 2000

Tableau 4.3 – Regroupement des années 1985 à 2013 selon les niveaux de VHI pour la Tunisie

VHI	Années
0,26-0,35	1985-1986-1987-1989
0,36-0,45	1988-2001
0,46-0,55	1990-1991-1992-1995-1996- 2000-2002-2003-2004-2006- 2007
0,56-0,65	1993-1994-1997-1998-1999- 2005-2008-209-2010-2011- 2012-2013

**Carte de la vulnérabilité synthétique des forêts
vis à vis du climat, de l'action anthropique et des conditions stationnelles
dans les secteurs du site pilote du bassin versant de SILIANA - Tunisie**

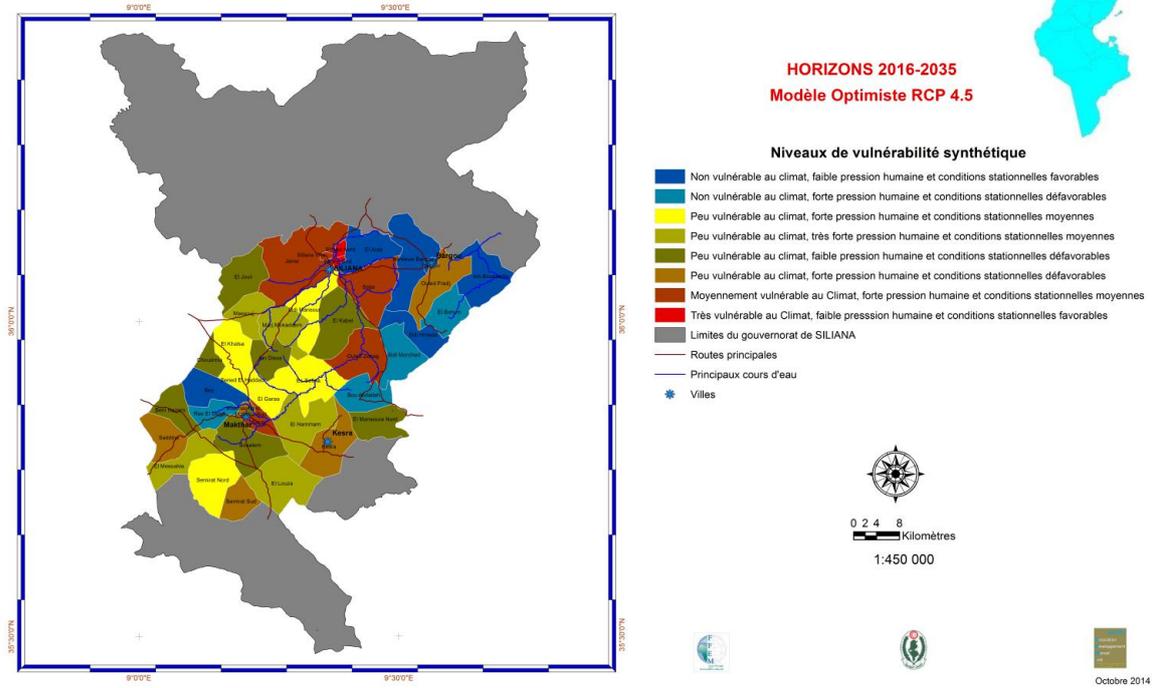


Figure 4.7 – Carte de la vulnérabilité synthétique : horizon 2016-2035 RCP4.5

**Carte de la vulnérabilité synthétique des forêts
vis à vis du climat, de l'action anthropique et des conditions stationnelles
dans les secteurs du site pilote du bassin versant de SILIANA - Tunisie**

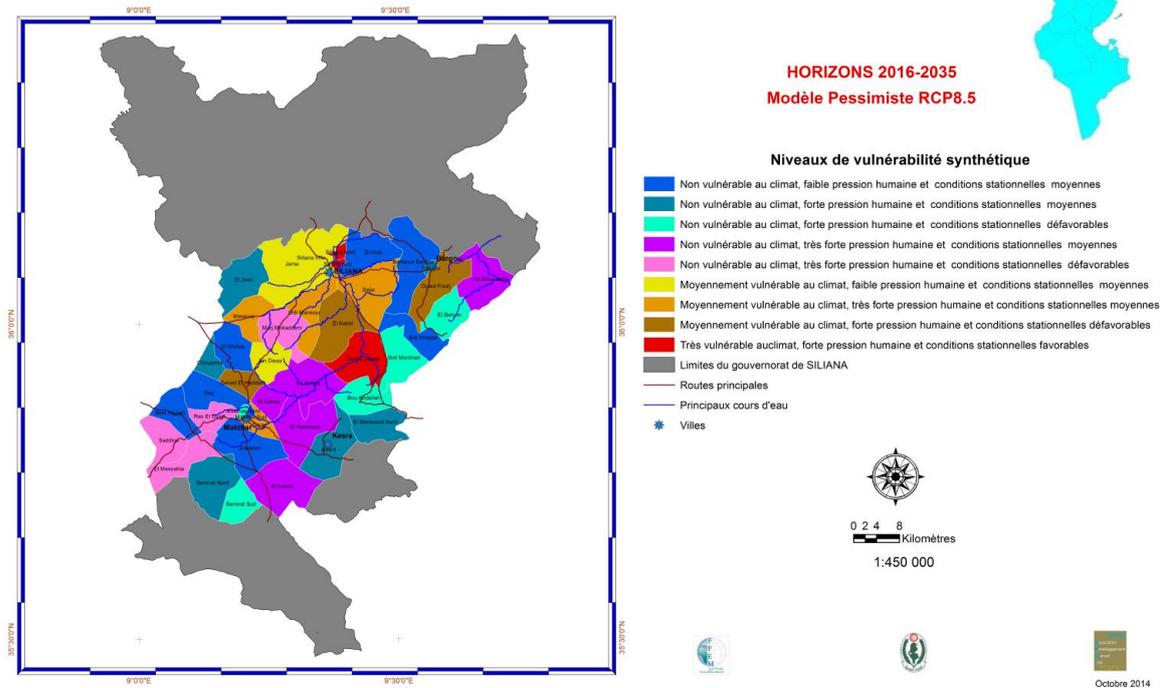


Figure 4.8 – Carte de la vulnérabilité synthétique : horizon 2016-2035 RCP8.5

Carte de la vulnérabilité synthétique des forêts vis à vis du climat, de l'action anthropique et des conditions stationnelles dans les secteurs du site pilote du bassin versant de SILIANA - Tunisie

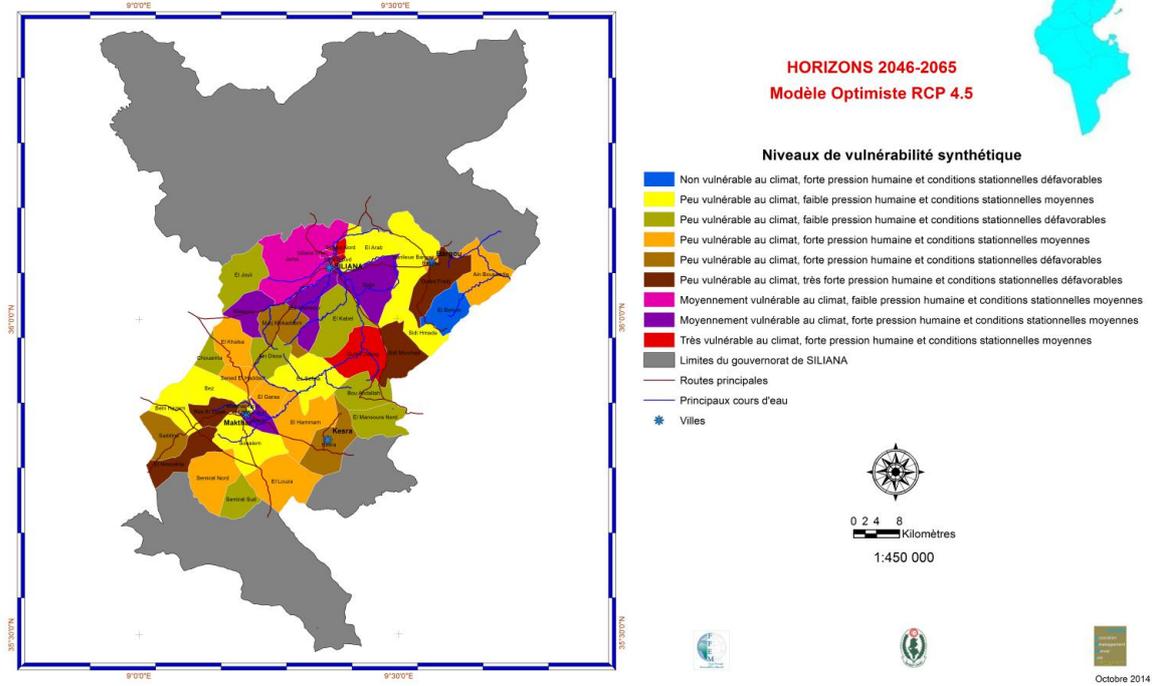


Figure 4.9 – Carte de la vulnérabilité synthétique : horizon 2046-2065 RCP4.5

Carte de la vulnérabilité synthétique des forêts vis à vis du climat, de l'action anthropique et des conditions stationnelles dans les secteurs du site pilote du bassin versant de SILIANA - Tunisie

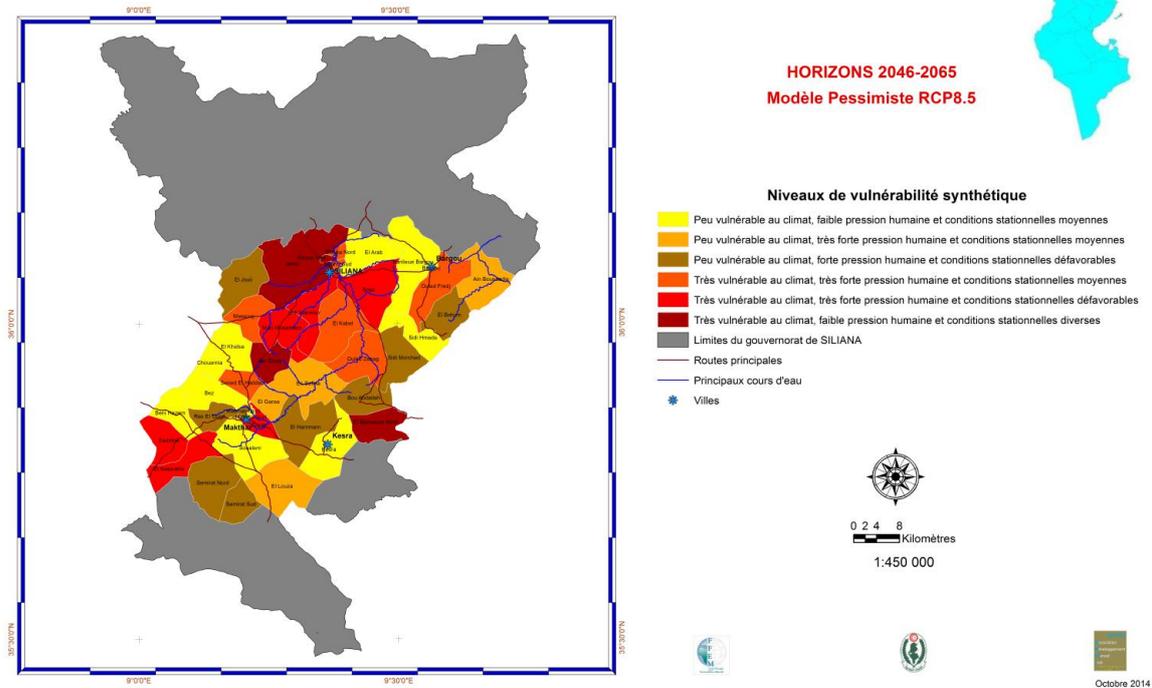


Figure 4.10 – Carte de la vulnérabilité synthétique : horizon 2046-2065 RCP 8.5

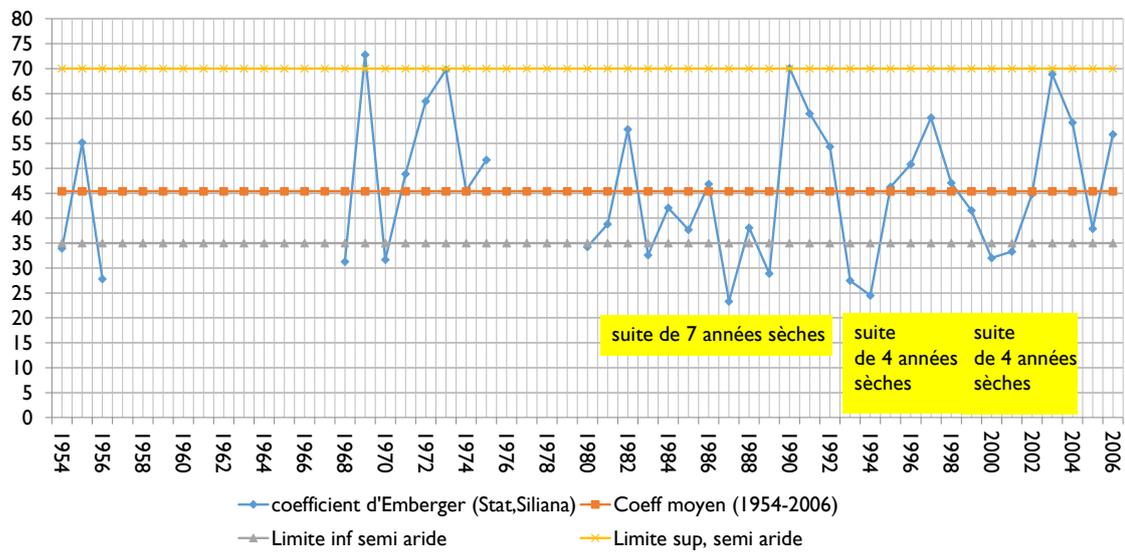


Figure 4.11 – Coefficient d’Emberger calculé pour Siliana



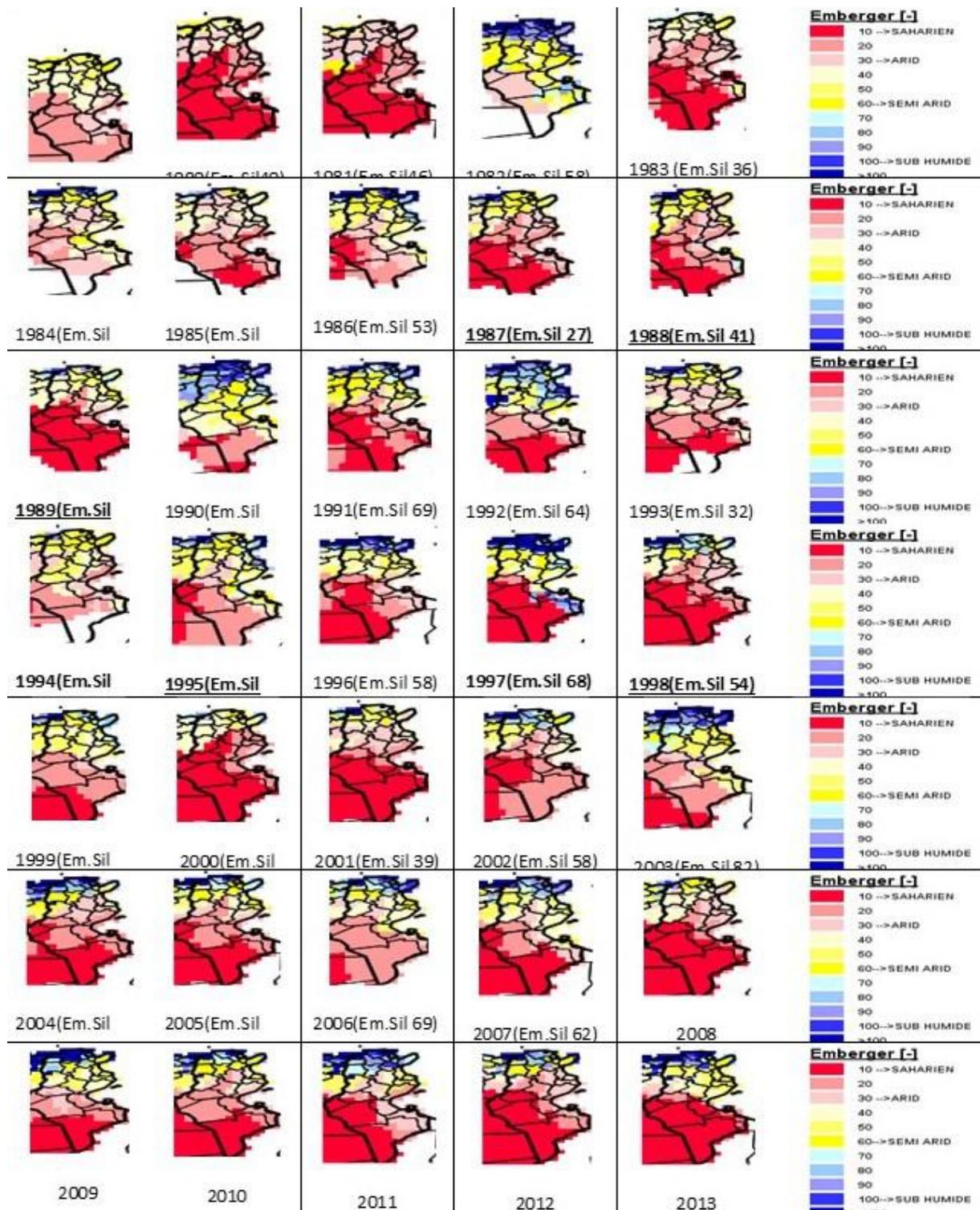


Figure 4.12 – Représentation spatiale du coefficient d’Emberger calculé sur la base de la donnée du CCR MARS WGS84 pour la période 1979-2013 sur toute la Tunisie. Entre parenthèse : coefficient d’Emberger calculé avec les données climatiques de la station météo de Siliana. Les années marquées en gras et soulignées sont des années particulières à cernes minces

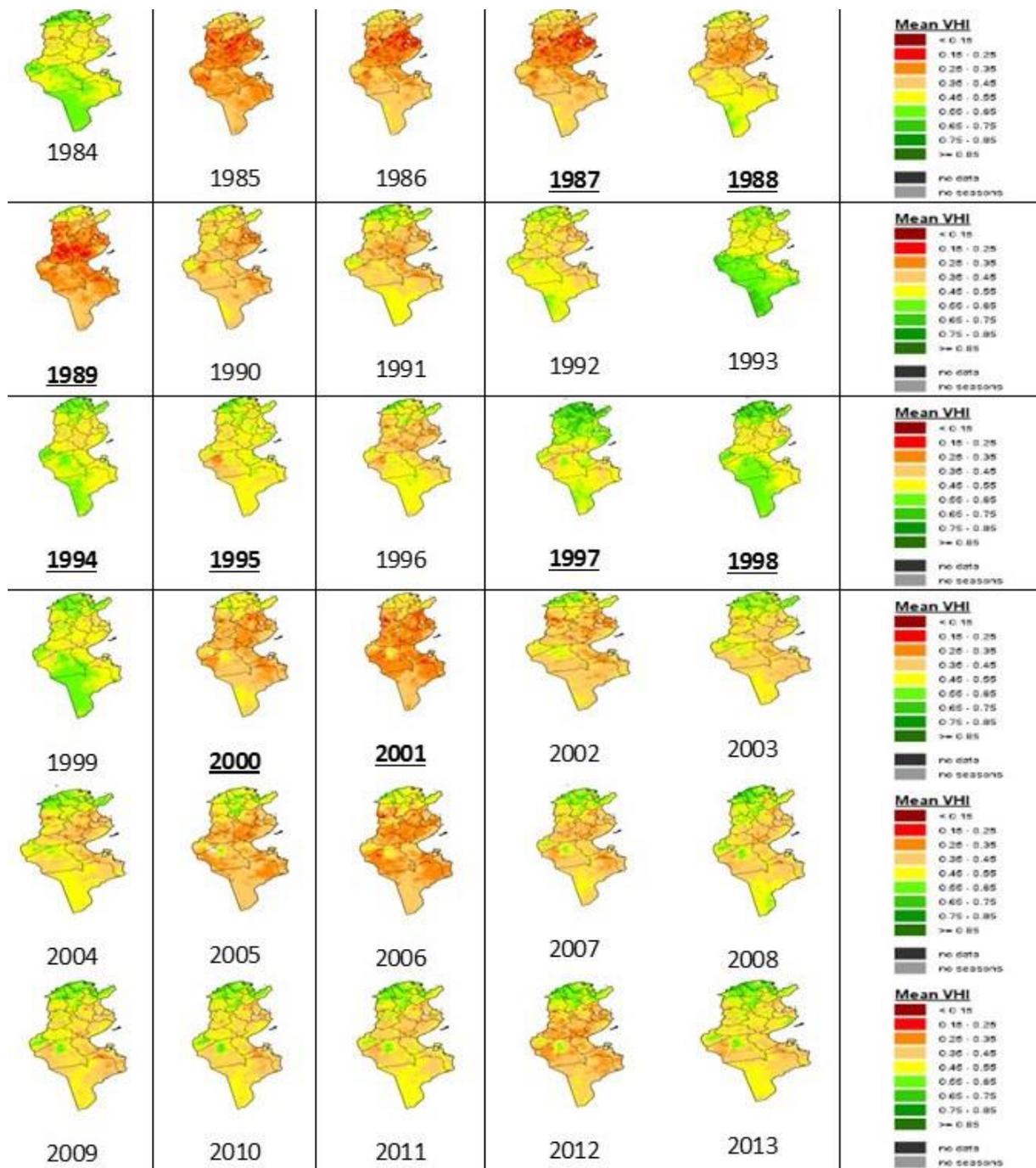


Figure 4.13 – Représentation spatiale des niveaux de Vegetation Health Index calculés pour la Tunisie entre 1979 et 2013. Les années en gras et soulignées sont des années particulières à cernes minces



Vulnérabilités de la forêt de la zone d'étude et effets sur les arbres

Formes et niveaux de vulnérabilités actuelles et futures dans la zone d'étude

Vulnérabilité aux facteurs biophysiques

La vulnérabilité aux facteurs biophysiques est stable dans le temps à cause de son lien à la situation géographique des forêts, des substrats sur lesquels les sols sont formés et des caractéristiques pédogénétiques et de profondeur des sols. L'analyse de cette vulnérabilité montre que sept secteurs sur 41 (tableau 5.1) portant 10 742 ha de forêts, soit 30% de la couverture forestière total, et 7 542 ha de garrigue, soit 25% de la superficie totale de la garrigue, sont dans une situation de très forte vulnérabilité. La productivité de ces forêts est déjà limitée sans l'intervention d'autres facteurs écologiques. D'après le dernier inventaire forestier la productivité moyenne des forêts sur tout le gouvernorat de Siliana est en moyenne de $0,653 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ avec un stock moyen sur pied très faible de $21,3 \text{ m}^3/\text{ha}$. Ce stock moyen sur pied et cette productivité très faibles des forêts expriment leur état de dégradation et aussi la faible fertilité des stations forestières à l'échelle de tout le gouvernorat de Siliana. À l'échelle du site pilote le stock moyen sur pieds en 2000 est de $21,6 \text{ m}^3/\text{ha}$ et la productivité moyenne est de $0,663 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$.

Vulnérabilité aux facteurs anthropiques

Cette vulnérabilité intègre plusieurs facteurs dont la consommation de bois domestique, la consommation fourragère liée au sylvo-pastoralisme, la situation foncière des formations forestières, les superficies moyennes incendiées par an et surtout la dynamique forestière exprimée en ha de déforestation par an. Cette vulnérabilité a été estimée à l'état de référence exprimant la situation en 2000 puis projetée sur la période 2016-2035 et la période 1946-1965 avec deux scénarios :

- Un scénario optimiste réduisant la déforestation à moins de $0,7\%/an$, réduisant la consommation de bois et de biomasse fourragère en fonction d'une réduction des populations usagère suite à l'exode rural, améliorant les statuts fonciers des terres forestières et réduisant les superficies incendiées en limitant la superficie moyenne incendié par feu de forêt à 1 ha ;
- Un scénario pessimiste maintenant le taux de déforestation actuel à plus de $0,7\%/an$, aggravant la situation foncière par des jugements en défaveur de l'administration forestière, maintenant la même intensité des feux actuels à plus d'1 ha par incendie donnant en moyenne une superficie brûlée annuelle au moins de 30 ha/an et maintenant la même pression actuelle sur les produits forestiers en maintenant un taux d'accroissement démographique moyen de $1,03\%$ comme sur toute la Tunisie.

Les résultats de l'analyse montrent par rapport aux superficies inventoriées en 2000 que les formations forestières très vulnérables aux facteurs anthropiques s'étendent sur 17 secteurs administratifs sur une superficie de 15 238 ha de forêt et 15 469 ha de garrigue (Tabelau 5.2). Cette dynamique serait complètement atténuée dans la projection optimiste et maintenue avec la même intensité dans la projection pessimiste sur les mêmes secteurs. Les taux de déforestation sur les secteurs

Tableau 5.1 – Superficie (ha) des formations forestières des secteurs plus vulnérables aux facteurs biophysiques

Délégation	Secteurs	Forêt (ha)	Garrigue (ha)
Siliana sud	Sidi Morched	531	1552
Makthar	Ras El Oued	54	577
Kessera	Bou Abdallah	3 363	165
Kessera	Kessera	3 202	797
Kessera	El Mansoura nord	2 498	316
Bargou	Ouled Fredj	337	2 163
Bargou	El Behirin	757	1 972
Total		10 742	7 542

les plus vulnérables sont deux fois plus élevés que dans la majorité des secteurs. Les changements d'affectation au profit de l'agriculture n'intéressent pas uniquement les secteurs les plus vulnérables mais touchent tous les secteurs avec un taux moyen de déforestation de 0,8%/an pour les forêts et 0,7%/an pour les garrigues occasionnant des pertes totales de 3 521 ha dans les formations forestières en 2015 et 7 218 ha en 2036.

Vulnérabilité aux facteurs climatiques

La vulnérabilité due aux changements climatiques a été estimée avec deux scénarios : un scénario optimiste avec le modèle RCP 4.5 et l'autre pessimiste avec le modèle RCP 8.5. La situation de référence bâtie sur les données climatiques 1985-2005 a été projetée sur la période 2016-2035 et la période 2046-2065. Le traitement des données climatiques et leur transformation en données de synthèses exprimant des stress édaphiques pouvant influencer la productivité des forêts nous a permis d'extraire de l'ensemble des secteurs ceux qui seraient les plus vulnérables aux changements climatiques sur la période de référence et les deux projections 2016-2035 et 2046-2065 (tableau 5.3).



Tableau 5.2 – Secteurs à forte vulnérabilité aux facteurs anthropiques

Délégation	Secteurs	Superficie en 2000 (ha)	
		Forêt	Garrigue
Siliana nord	El Arab	54	486
	Massouj	9	196
	Ain Ed Dissa	113	589
Siliana sud	El Kabel	692	1901
Makthar	Sayar	129	245
	El Gara	0	72
	Beni Hazem	449	682
	Ras El Ouedi	54	577
	Chouarnia	1 233	3 311
Er-Rouhia	Es Semiret nord	2 409	1 277
	Es Semiret sud	1 059	803
	El Messehla	14	724
Kessera	El Mansoura nord	2 498	316
Bargou	Ain Boussaidia	2 884	1 159
	El Bhirin	3641	3131
Total		15 238	15 469

Tableau 5.3 – Superficies (ha) des formations forestières très vulnérables aux facteurs climatiques. État de référence et projections

Délégation	Secteurs	État de référence		Scénario optimiste (RCP4.5)				Scénario optimiste (RCP8.5)			
		1985-2000		2016-2035		2046-2065		2016-2035		2046-2065	
		Forêt	Garrigue	Forêt	Garrigue	Forêt	Garrigue	Forêt	Garrigue	Forêt	Garrigue
Siliana nord	Siliana-Ville	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Siliana-Nord	0	0	0	19	0	19	0	19	0	19
	Jema	0	0	0	0	0	0	0	0	852	1275
	Massouj	0	0	0	0	0	0	0	0	9	196
	Ain Ed Dissa	0	0	0	0	0	0	0	0	113	589
Siliana sud	Siliana Sud	0	0	0	17	0	17	0	0	0	17
	Marj Mokad-dem	0	0	0	0	0	0	0	0	18	1778
	Sidi Mansour	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1184
	Ouled Zenag	0	0	0	0	1346	625	0	0	1346	625
	Sejja	0	0	0	0	0	0	0	0	108	900
Makhtar	Sayar	0	0	0	0	0	0	0	0	129	245
	Saddine	0	0	0	0	0	0	0	0	255	571
	Sened El Haddad	0	0	0	0	0	0	0	0	21	510
Er-Rouhia	El Messehla	0	0	0	0	0	0	0	0	14	724
Kessera	El Mansoura Nord	0	0	0	0	0	0	0	0	2498	316
	Bou Abdallah	0	0	0	0	0	0	0	0	3363	165
Bargou	Ain Boussaidia	0	0	0	0	0	0	0	0	2884	1159
	Ouled Frej	0	0	0	0	0	0	0	0	2498	316
Total		0	0	0	17	1346	661	0	19	14112	10690

La vulnérabilité aux facteurs climatiques n'affecte pas les forêts du site pilote du bassin-versant de Siliana pendant la période de référence 1985-2000. Cette vulnérabilité est négligeable dans le scénario optimiste pendant la période 2016-2035 et ne dépasse pas 17 ha de garrigue. Dans le même scénario et sur la période 2046-2065 la vulnérabilité climatique touche deux secteurs sur une superficie forestière de 1 346 ha et 661 ha de garrigues. Dans le scénario pessimiste et sur la période 2016-2035 les superficies forestières classées très vulnérables ne touchent qu'un secteur sur 19 ha de garrigue. Sur la période 2046-2065 des superficies forestières importantes deviennent très vulnérables aux changements climatiques. Cette vulnérabilité touche 18 secteurs administratifs sur 14 112 ha de forêts et 10 690 ha de garrigues.

Effets de la vulnérabilité climatique sur la forêt de la zone d'étude : répercussions sur la croissance en épaisseur des arbres

Pour calibrer l'effet du stress climatique sur la végétation naturelle dont les forêts il faut soit disposer d'archives qui décrivent dans le temps et dans l'espace la perte de vitalité des forêts ou des dépérissements de peuplements face à ces stress, soit des études chronologiques sur la production. Notre enquête auprès des services forestiers n'a pas permis de décrypter des phénomènes de ce type. Sur la base de nos observations on a enregistré des mortalités dans la subéraie en 1990 et 1991. Ces dépérissements observés sont le résultat de la période de sécheresse assez longue observée entre 1983 et 1989. Pour cette période nous ne disposons d'aucune information archivée concernant la pinède d'Alep. Par ailleurs, nous avons observé en 2003 des dépérissements de peuplements de pin d'Alep dans la réserve de Saddine au Kef à l'ouest de notre site et à 70 km à vol d'oiseau de Siliana (figure 5.1).

Des chronologies sur les pins ont été analysées [1] dans plusieurs régions forestières tunisiennes dont Siliana. On a distingué les années à cernes minces et les années à cernes épais. En considérant que le climat annuel est lié à la croissance en épaisseur des arbres des régions tempérées, des cernes minces pourraient indiquer des années climatiques exceptionnelles en termes de stress climatique. Les cernes exceptionnels distingués par région sont représentés dans le tableau 5.4.

Carte des pentes des forêts de Pin d'Alep dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

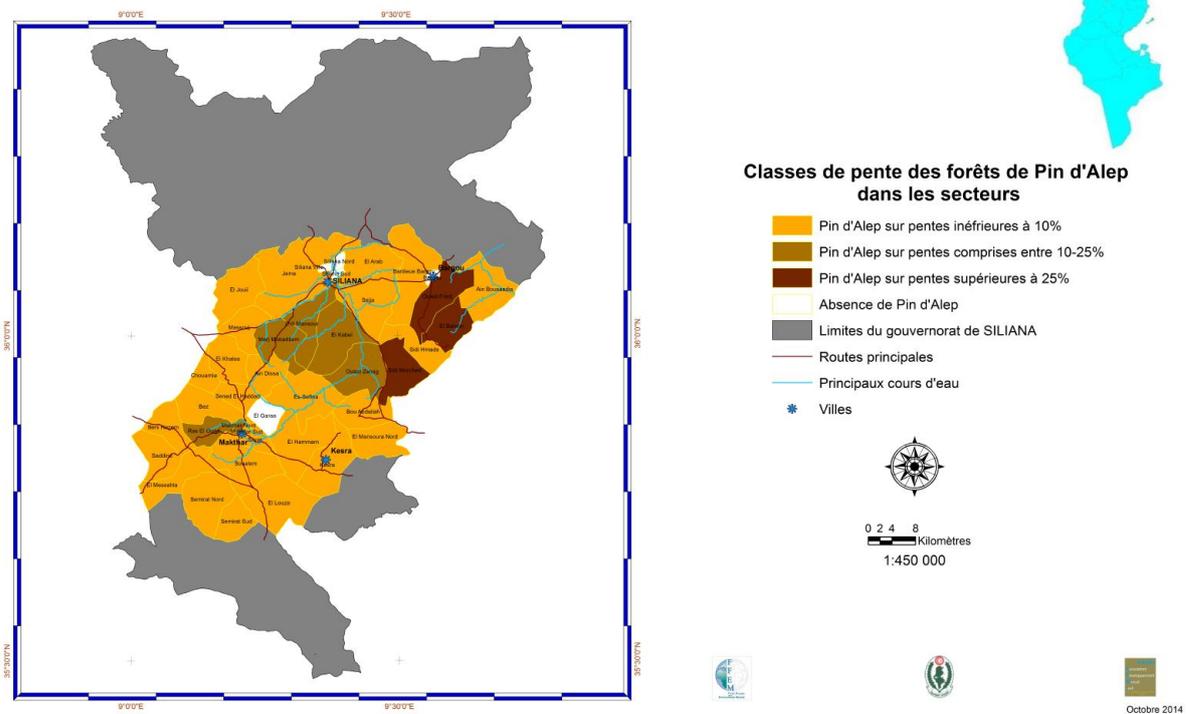


Figure 5.1 – Région du Kef-Tunisie : forêt de Saddine – versant nord de Djebel Tarrabia – vue générale sur le dépérissement du pin d'Alep. À droite : vue de près de la mortalité sur le versant nord de Djebel Tarrabia. Latitude 36°,16'N et longitude 8° 24'E (Photo A. Aloui)



Tableau 5.4 – Cernes minces observés pour trois espèces de pins et dans six régions tunisiennes

Région	Tabarka			Bizerte			Zaghouan	Sakiet	Siliana	Kasserine
Années	PA	PP	PM	PA	PP	PM	PA	PA	PA	PA
1954	M		M	L	L	L	L	L		
1955							M			
1956	L		L						M	M
1957						M	M			
1958	M	M	M		M			M	L	L
1959	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
1960	L	L		M					L	L
1961	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
1962	M		M			L		M	M	M
1963	L	L	L	L	L	L	L	L		
1964				L			L	L	L	L
1965	M	M	M	M						
1966	L	L			L	L	M		M	
1967				M	M	M	M	M	M	
1968	M	M		M		M	M			M
1969							M	M	M	M
1970		L						L	L	
1971				L	L					
1972	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
1973	M	M	M	L		L	L	L	L	L
1974		L	M	M			L	M		
1975		L		L		L		M		L
1976		L	L	L		M	L	L	L	L
1977		M		L			L		L	
1978	M		M	M			M	M	M	M
1979				M			M			
1980				L	L	L				

1981			M	M	M	M				M
1982	L	L		M						M
1983	M	M				M	L	M		M
1984				L		L	M		M	M
1985	M	M		L			L	L	L	
1986				M	M	M		M		M
1987		L	L		L	L	L	L		M
1988			M	M	M	M	M	M	M	M
1989	L	L		M	M	M	M	M	M	M
1990		M	M		M	M	L	M	L	L
1991	M	M		L	L	M		L	L	L
1992	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
1993	M	M	M		M	L			L	L
1994	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
1995		M		M	M	M	M	M	M	M
1996		L	L	L	L	L	L			L
1997	M	M	M	M		M	M	M	M	
1998	L	L	L	M			M		M	M
1999	M		M					L		
2000	M	M	M	M	L		M		M	L
2001	L			M		M	M		M	M

(PA : pin d'Alep, PP : pin pignon et PM : pin maritime. M : cerne mince ; L : cerne large)



Tableau 5.5 – Caractéristiques climatiques moyennes des années sèches 1985, 1995 et 2002 (à cernes minces) dans le site pilote

Mois	Température minimale (°C)	Température maximale (°C)	Précipitations mensuelles (mm)
1	1,79	12,7	16,1
2	3,49	16,2	10,6
3	4,88	17,6	38,5
4	7,05	20,6	29
5	11,04	25,9	6,3
6	14,7	30,8	20,3
7	17,4	33,4	16,2
8	18,6	33,4	33
9	15,9	28,2	36
10	11,8	23	45,8
11	8,1	18,5	21
12	5,9	16,1	42,2

Pour les forêts de Siliana sur l'ensemble des années à cernes minces, on relève déjà les années exceptionnelles 1985-1986-1987-1989, dont l'année 1989 à $VHI < 0,35$ et à cerne mince, l'année 1987 à $VHI < 0,35$ suivi de l'année 1988 à cerne mince et l'année 1986 à cerne mince précédée par l'année 1985 à $VHI < 0,35$. Les années particulièrement arides qui sortent de la limite inférieure du bioclimat semi-aride et qui correspondent à des cernes minces sont : 1994 (24), 1956 (27), 1989 (28), 2000 (32), 2001 (33). Sur l'ensemble des années particulières on a trié les années qui ne comportent pas de mois particulièrement humides et qui modifient les moyennes annuelles et on n'a gardé que les années 1989, 1995 et 2002. Les années les plus sèches (1989, 1995 et 2002) qui avaient produit des cernes minces ont les caractéristiques moyennes reportées dans le tableau 5.5. Ces années nous ont permis de faire la correspondance entre les années exceptionnelles et la production de cernes minces et le nombre de jours successifs à réserve en eau dans le sol nulle (169 jours et plus en moyenne).

Effets du changement climatique sur les biens et services fournis par les écosystèmes boisés au niveau du site pilote

On estime que les changements climatiques et globaux ne menacent pas l'existence de la forêt naturelle du bassin versant de Siliana mais ils peuvent influencer leur productivité. Effectivement cette analyse montre que les conditions de stress climatique pourraient toucher la production du bois. Des conditions de stress similaires avaient produits des cernes minces sur la majorité des espèces forestières dont le pin d'Alep. Les cernes minces, en général, perdent au moins la moitié de l'épaisseur produite dans des conditions normales. Cette perte de production de bois devrait diminuer au moins de moitié par rapport à la production normale. On estime que toutes les productions directes supportées par le bois des arbres ou du sous-bois devraient par conséquent diminuer au moins de moitié. La productivité pastorale liée à la production ligneuse du sous-bois diminuerait au moins de la même quantité. Indirectement la production cynégétique et la séquestration annuelle du carbone diminueraient au moins de moitié (tableau 6.1). Les pertes en valeurs monétaires dues aux changements climatiques ne seraient ressenties qu'à partir de la période 2046-2065 et sont estimées au minimum à 86 144 DT/an et au maximum à 906 168 DT/an pour toutes les forêts du bassin versant du site de Siliana (tableau 6.2).



Tableau 6.1 – Valeur économique totale de la pinède de Siliana avec et sans changement climatique

	Valeur économique totale par ha de forêt estimée en 2010 (DT) [6]	Valeur probable par ha influencée par les changements climatiques (DT)
Bois	9,9	4,9
Fourrage	112,3	56,1
PFNL	11,8	5,9
Chasse	2,0	1,0
Consevation des sols	51,2	51,2
Séquestration de carbone	7,8	3,9
Conservation de la biodiversité	2,0	2,0
Total	197	125

Tableau 6.2 – Pertes probables en valeur dues au changement climatique selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 du GIEC

	Scénario optimiste (RCP4.5)				Scénario pessimiste (RCP8.5)			
	2016-2035		2046-2065		2016-2035		2046-2065	
	Forêt	Gar-rigue	Forêt	Gar-rigue	Forêt	Gar-rigue	Forêt	Gar-rigue
Superficies impactées (ha)	0	17	1 346	661	0	19	14 112	10 690
Pertes totales (DT)	0	0	86	144	0	0	0	906 168

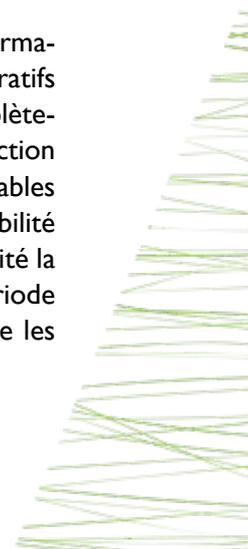
Conclusions

La détermination des niveaux de vulnérabilité, actuelle et future, aux changements globaux et climatiques des forêts des secteurs administratifs du site pilote de Siliana a été réalisée selon les principes de l'approche spatiale multifactorielle développée par la GIZ et préconisée pour tous les pays partenaires du projet. La vulnérabilité actuelle a pris pour situation de référence la période 1985-2005. La vulnérabilité future a été estimée avec deux scénarios : un optimiste avec le modèle RCP 4.5 et l'autre pessimiste avec le modèle RCP8.5. La même situation de référence (1985-2005) a été projetée sur la période 2016-2035 et la période 2046-2065. Les variables thématiques employées pour l'analyse de la vulnérabilité de la forêt dans la zone d'étude (quatorze variables) sont regroupées en trois grandes classes : des variables biophysiques, climatiques et humaines ou anthropiques. Le groupe des variables biophysiques est composé des variables pentes, exposition, profondeur des sols et nature des sols. Les variables climatiques regroupent la profondeur des sols, la texture des sols et des représentations spatialisées des températures (maximales et minimales) et de la pluviométrie annuelle. Les variables anthropiques regroupent les dynamiques forestières (qui expriment en grande partie les délits de coupe et de défrichement), la pression pastorale, la pression sur le bois énergie, les incendies et la situation foncière des surfaces occupées par la forêt. Les résultats obtenus suite à l'application de cette analyse ont permis de savoir que sept secteurs sur les 41 de la zone d'étude regroupant 10 742 ha de forêts (soit 30% de la couverture forestière totale) et 7 542 ha de garrigue (soit 25% de la superficie totale de la garrigue), sont dans une situation de très forte vulnérabilité aux facteurs biophysiques.

La vulnérabilité anthropique a été estimée à l'état de référence exprimant la situation en 2000 puis projetée sur les périodes 2016-2035 et 1946-1965 avec les deux scénarios retenus :

- Le scénario optimiste réduit la déforestation à moins de 0,7%/an ainsi que la consommation de bois et de biomasse fourragère en fonction d'une réduction des populations usagère suite à l'exode rural. Il améliore les statuts fonciers des terres forestières et réduit les superficies incendiées en limitant la superficie moyenne incendiée à 1 ha par feu de forêt ;
- Le scénario pessimiste maintient le taux de déforestation actuel à plus de 0,7%/an, aggrave la situation foncière par des jugements en défaveur de l'administration forestière, maintenant la même intensité des feux actuels à plus d'1 ha par incendie donnant en moyenne une superficie brûlée annuelle d'au moins 30 ha/an et maintenant la même pression actuelle sur les produits forestiers puisqu'il garde un taux d'accroissement démographique moyen de 1.03% (le taux moyen national).

Les résultats de l'analyse montrent par rapport aux superficies inventoriées en 2000 que les formations forestières très vulnérables aux facteurs anthropiques s'étendent sur 17 secteurs administratifs sur une superficie de 15 238 ha de forêt et 15 469 ha de garrigue. Cette dynamique serait complètement atténuée dans la projection optimiste et maintenue avec la même intensité dans la projection pessimiste sur les mêmes secteurs. Les taux de déforestation sur les secteurs les plus vulnérables sont deux fois plus élevés que dans la majorité des secteurs. Pour ce qui est de la vulnérabilité synthétique que nous qualifions de vulnérabilité au changement climatique mais qui est en réalité la résultante des vulnérabilités factorielles (climat, biophysique et anthropiques) et ce pour la période de référence (1985-2005), les résultats de cette analyse nous permettent de considérer que les



forêts de la zone d'étude ne sont pas vulnérables au changement climatique pour cette période. Cette vulnérabilité demeure négligeable dans le scénario optimiste pendant la période 2016-2035 puisque seulement 17 ha de garrigue paraissent affectés par les changements globaux. Dans le même scénario et sur la période 2046-2065 une superficie forestière de 1 346 ha et 661 ha de garrigues seront vulnérables aux changements globaux. Dans le scénario pessimiste et sur la période 2016-2035 les superficies forestières classées très vulnérables ne touchent qu'un secteur administratif et 19 ha de garrigue. Sur la période 2046-2065 des superficies forestières importantes deviennent très vulnérables aux changements climatiques : 18 secteurs administratifs sur 14 112 ha de forêts et 10 690 ha de garrigues. Parmi les réactions possibles des forêts aux effets conjugués de ces vulnérabilités factorielles, nous avons retenu et essayé d'estimer celui de la production en bois des arbres. En effet, des études antérieures ont montré que pendant les années sèches, l'arbre produit des cernes minces, comparées aux années normales [1]. Ces études ont permis de déterminer, sur l'ensemble du pays, les années climatiquement exceptionnelles suivantes : 1985, 1986, 1987 et 1989. L'année 1989 a été caractérisée par $VHI < 0,35$ et à cerne mince, l'année 1987 par $VHI < 0,35$ suivi de l'année 1988 à cerne mince et l'année 1986 à cerne mince précédée par l'année 1985 à $VHI < 0,35$. À partir des données climatiques de ces années de référence, nous avons déterminé un seuil de stress hydrique correspondant au nombre de jours successifs édaphiquement secs et caractérisant les conditions climatiques annuelles qui pourraient déterminer la production de cernes annuels minces. Ce seuil calculé est égal à 169 jours de sécheresse édaphique. À partir de ce seuil le pin d'Alep dans le bassin versant de Siliana est considéré comme très vulnérable au changement climatique et perd dans ces conditions au moins 50% de sa productivité ligneuse. Dans notre cas d'étude, nous avons considéré que :

- dans conditions de stress similaires à celles montrées dans cette étude et qui avaient produit des cernes minces sur la majorité des espèces forestières, la forêt considérée subira les mêmes effets y compris le pin d'Alep ;
- les cernes minces, en général, perdent au moins la moitié de l'épaisseur produite dans des conditions normales ;
- cette perte de production de bois devrait diminuer au moins de moitié par rapport à la production normale ;
- toutes les productions directes supportées par le bois des arbres ou du sous-bois pourraient par conséquent diminuer au moins de moitié ;
- la productivité pastorale liée à la production ligneuse du sous-bois pourrait diminuer au moins de la même quantité ;
- Indirectement, la production cynégétique sera impactée ;
- la séquestration annuelle du carbone pourraient diminuer au moins dans les mêmes proportions.

L'application de ces résultats a montré que les changements climatiques ne menacent pas l'existence de la forêt naturelle dans la zone d'étude mais ils peuvent influencer sa productivité en touchant, entre autres, la production du bois. Ainsi, les pertes en valeur monétaire dues au changement climatique ne seraient ressenties qu'à partir de la période 2046-2065 et sont estimées au minimum à 86 144 DT/an et au maximum à 906 168 DT/an pour toutes les forêts du bassin versant du site de Siliana.

Annexes

Les variables biophysiques

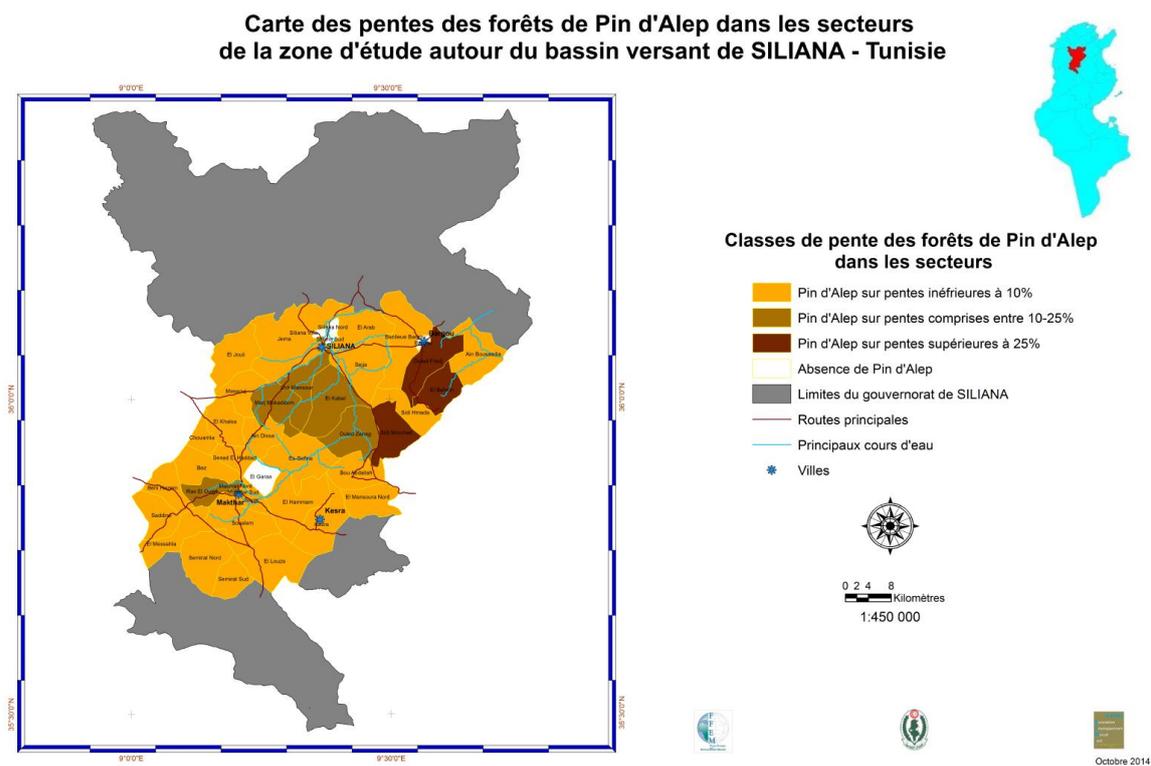
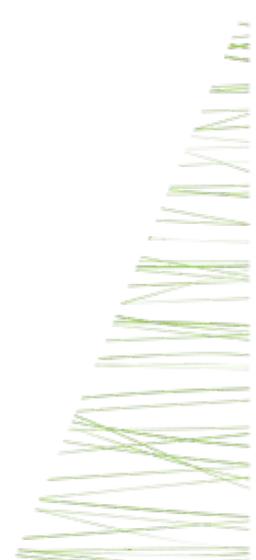


Figure 8.1 – Carte des classes de pente des forêts de pin d'Alep ramenées à l'échelle du secteur



Carte des forêts de Pin d'Alep en fonction des expositions dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

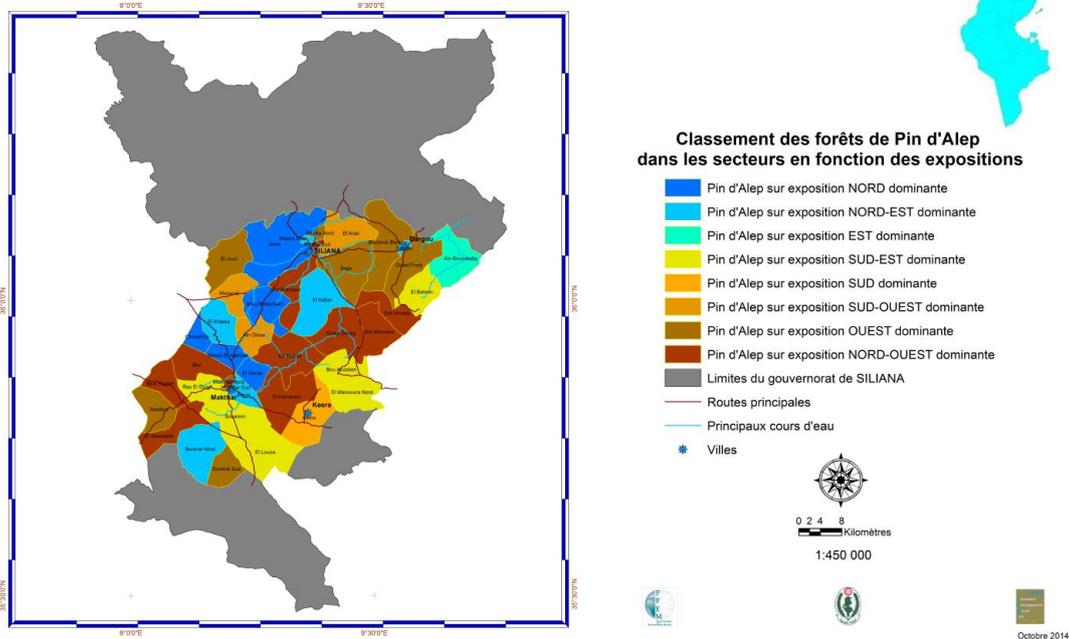


Figure 8.2 – Carte des classes d'exposition des forêts de pin d'Alep ramenées à l'échelle du secteur

Carte des profondeurs des sols des forêts de Pin d'Alep dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

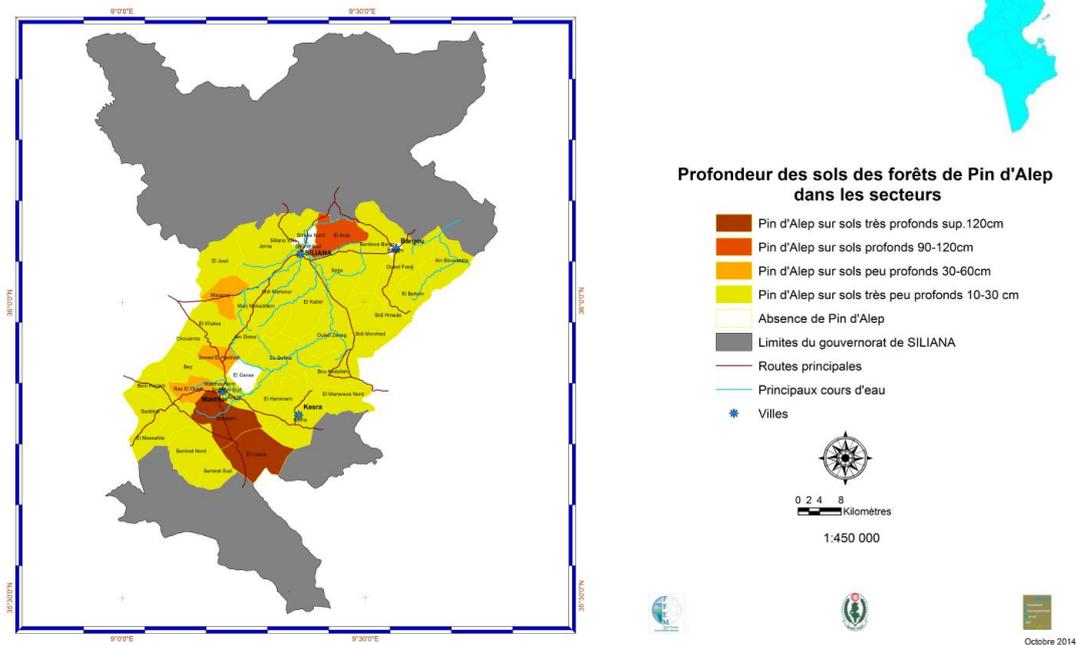


Figure 8.3 – Carte de la profondeur des sols des forêts de pin d'Alep dans les secteurs

Carte de la nature des sols des forêts de Pin d'Alep dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

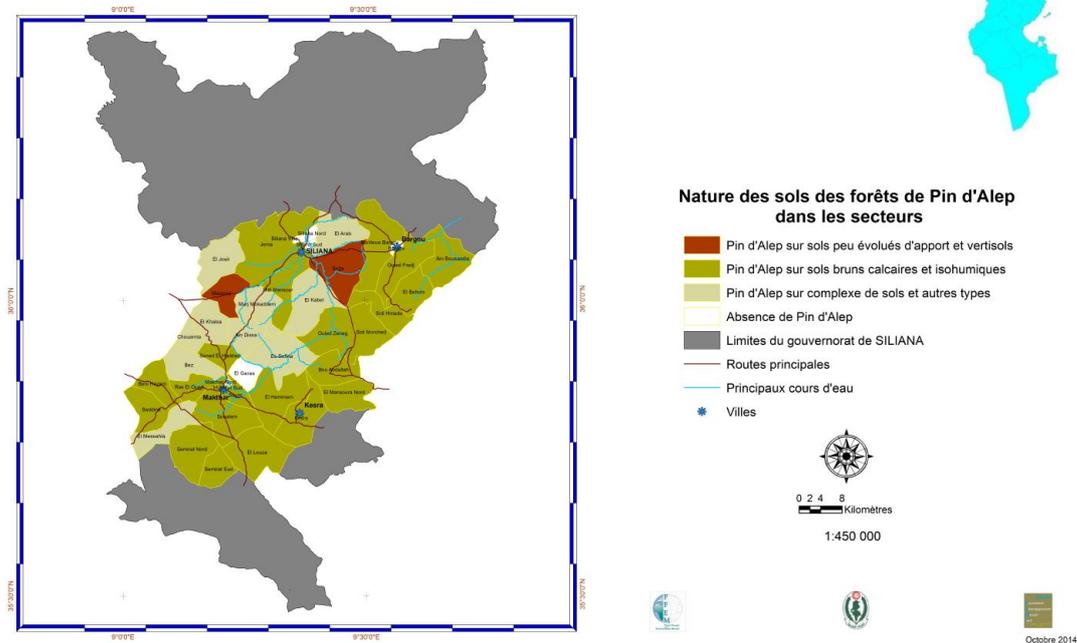


Figure 8.4 – Carte de la nature des sols pour les forêts de pin d'Alep dans les secteurs

Carte de la texture des sols des forêts de Pin d'Alep dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

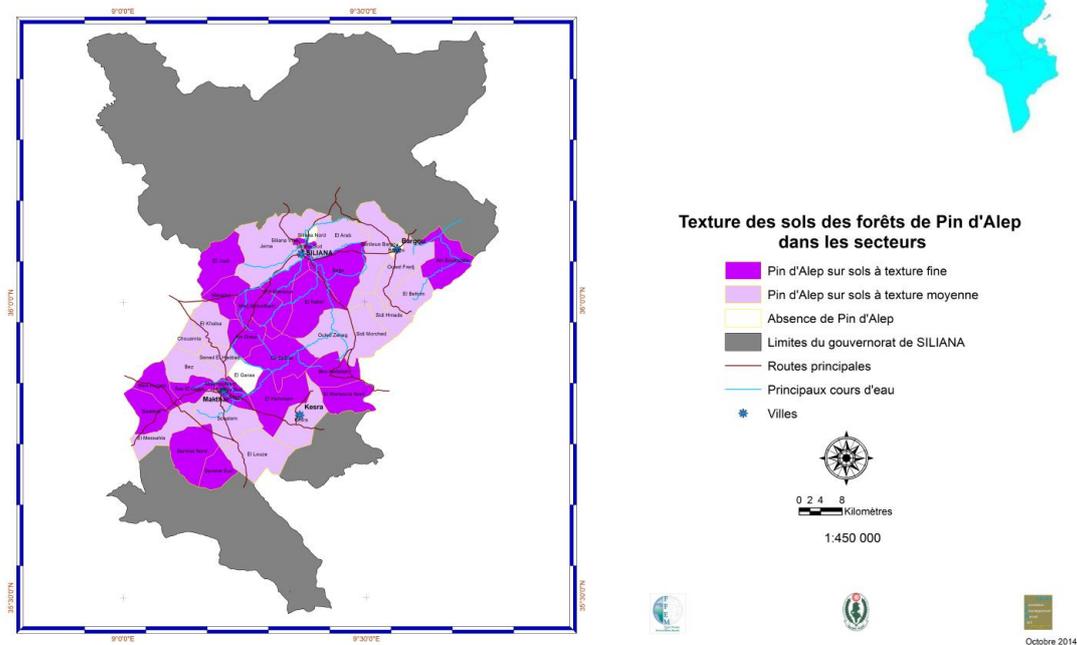


Figure 8.5 – Carte de la texture des sols pour les forêts de pin d'Alep de la zone d'étude ramenée à l'échelle du secteur



Les variables climatiques

Carte des forêts de Pin d'Alep en fonction de la Réserve Utile des sols dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

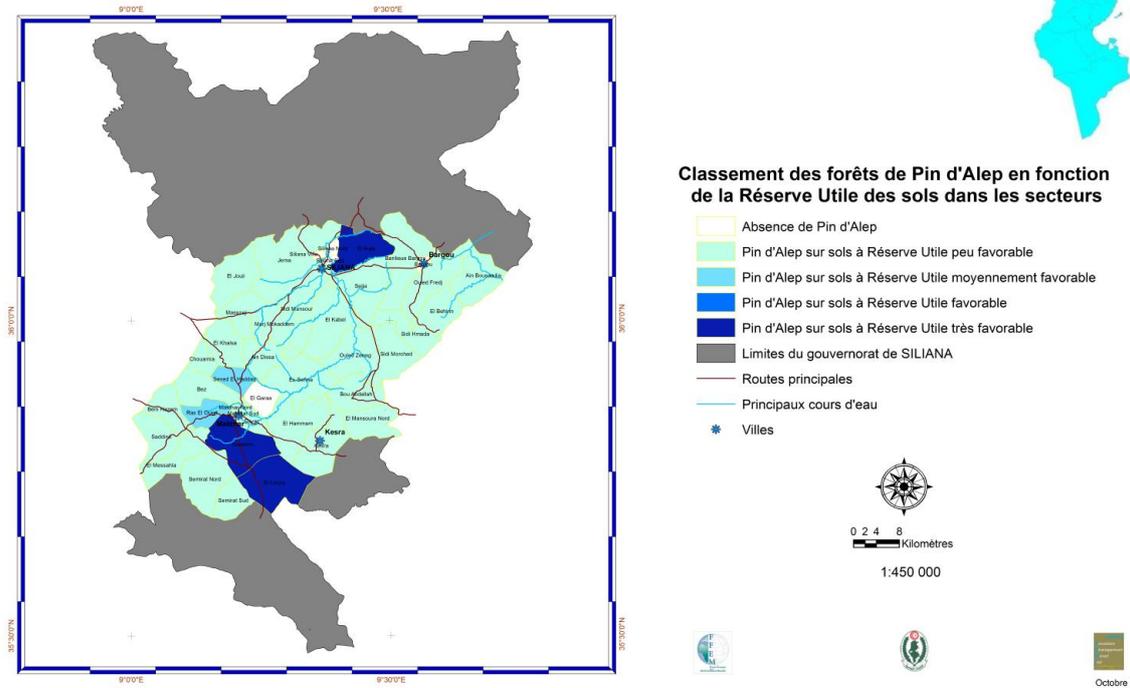


Figure 8.6 – Carte de la réserve utile des sols occupés en pin d'Alep ramenée à l'échelle du secteur

Les variables anthropiques

Carte de la Vulnérabilité aux changements d'affectation des sols couverts en forêts dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

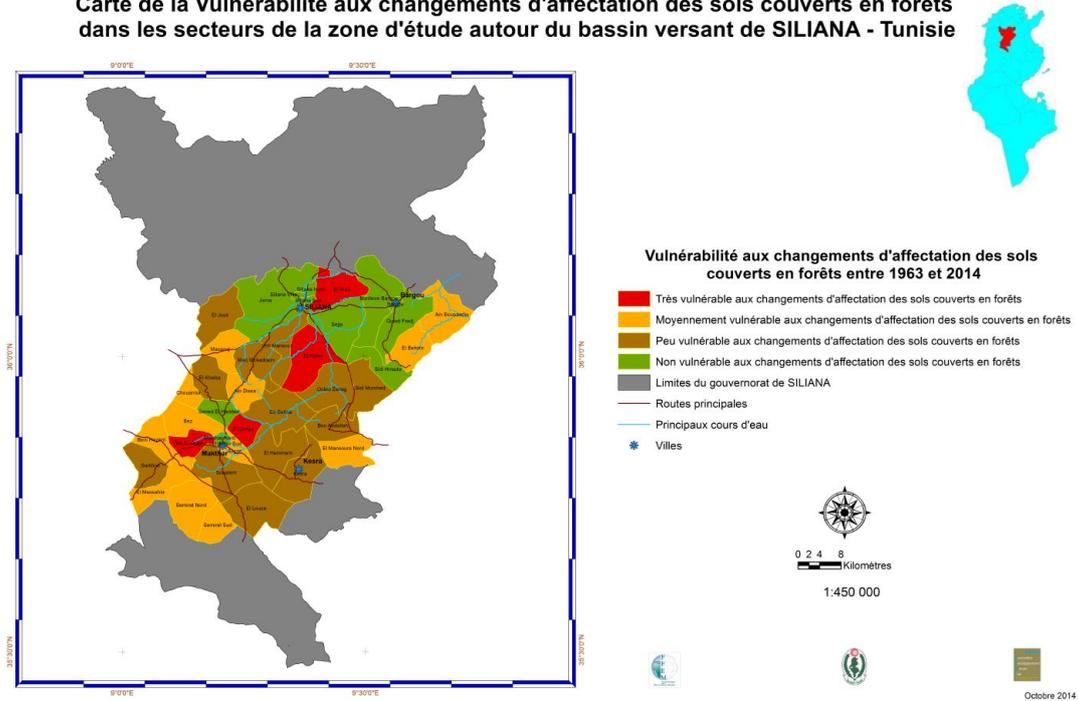


Figure 8.7 – Carte des changements d'affectation des sols

Carte de la vulnérabilité factorielle des forêts vis à vis de la pression pastorale dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

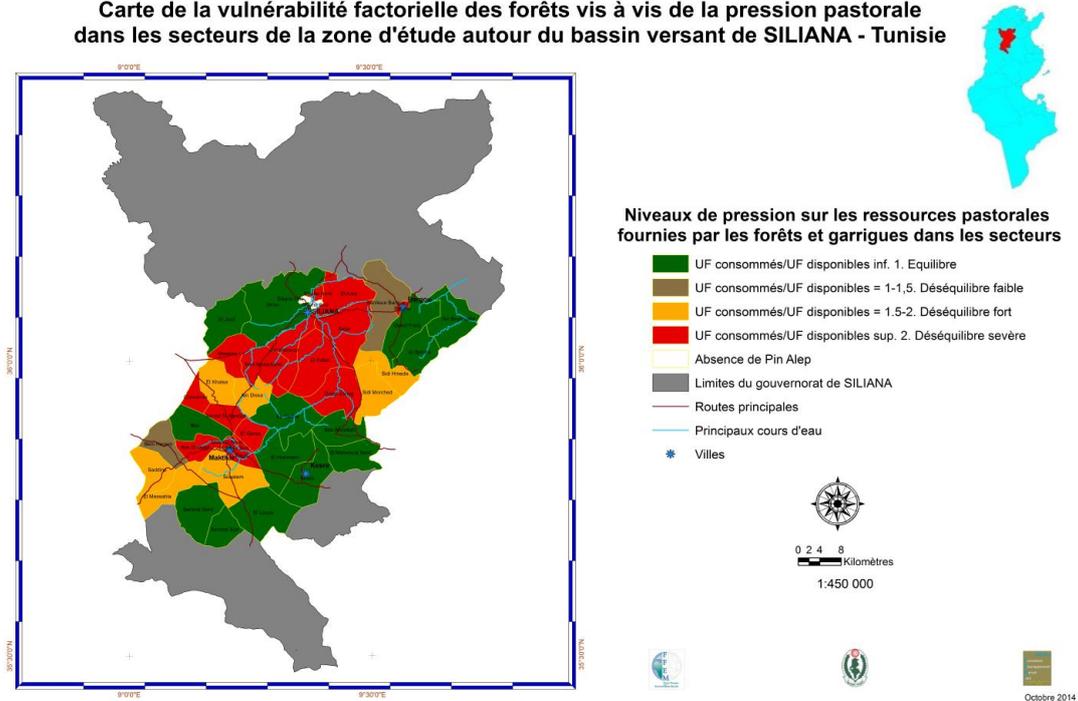


Figure 8.8 – Carte de la pression pastorale



Carte de la vulnérabilité factorielle des forêts vis à vis de la pression sur le bois dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

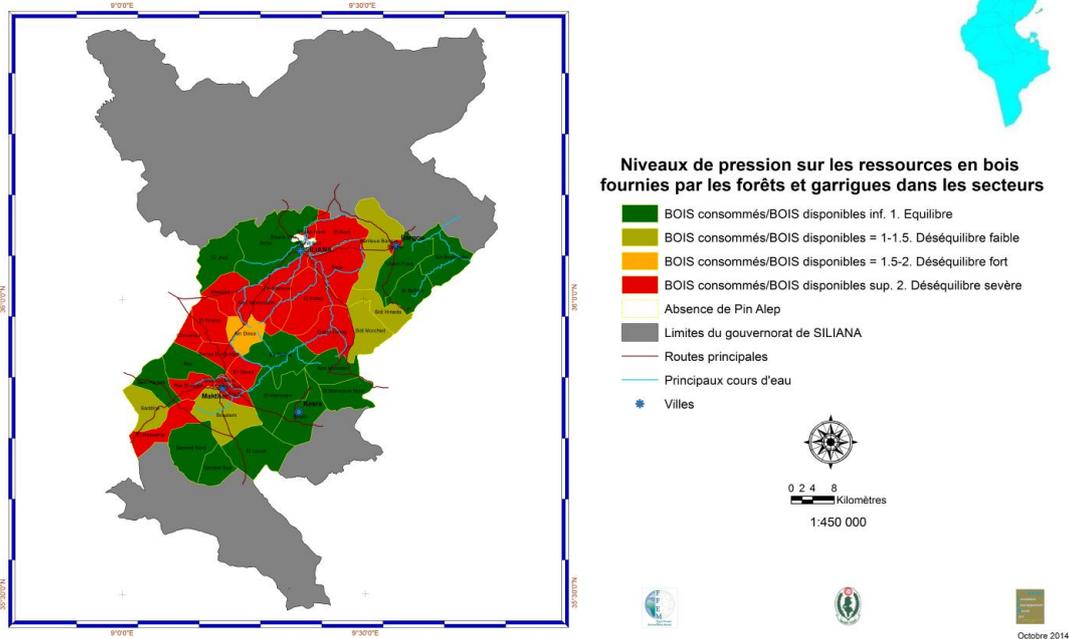


Figure 8.9 – Carte de la pression sur le bois

Carte de la vulnérabilité factorielle des forêts vis à vis des feux dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

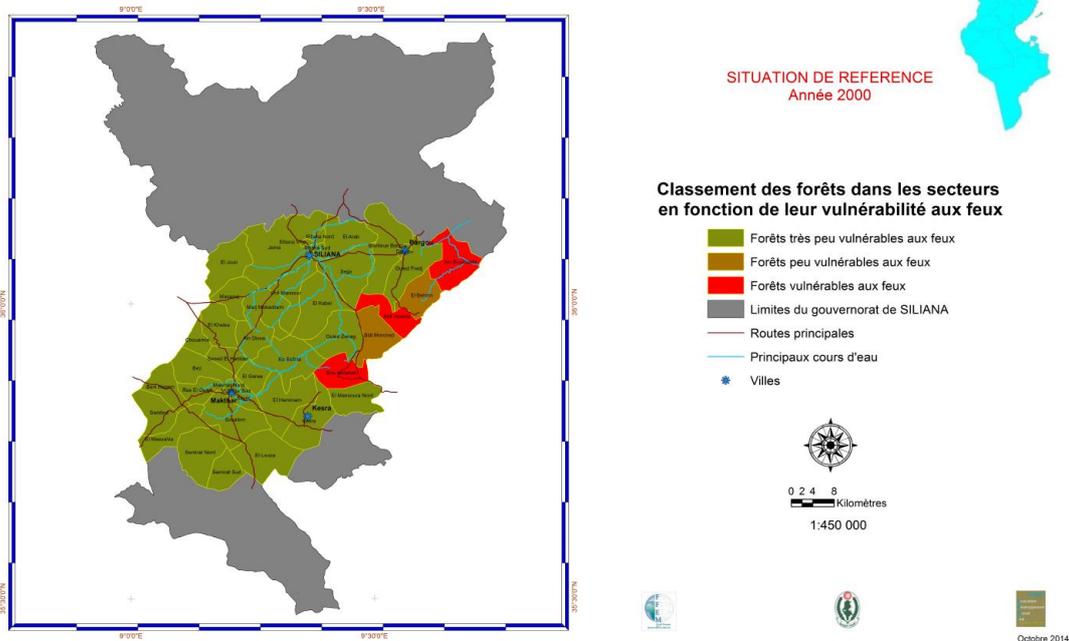


Figure 8.10 – Carte des incendies

Carte du statut foncier des forêts de Pin d'Alep dans les secteurs de la zone d'étude autour du bassin versant de SILIANA - Tunisie

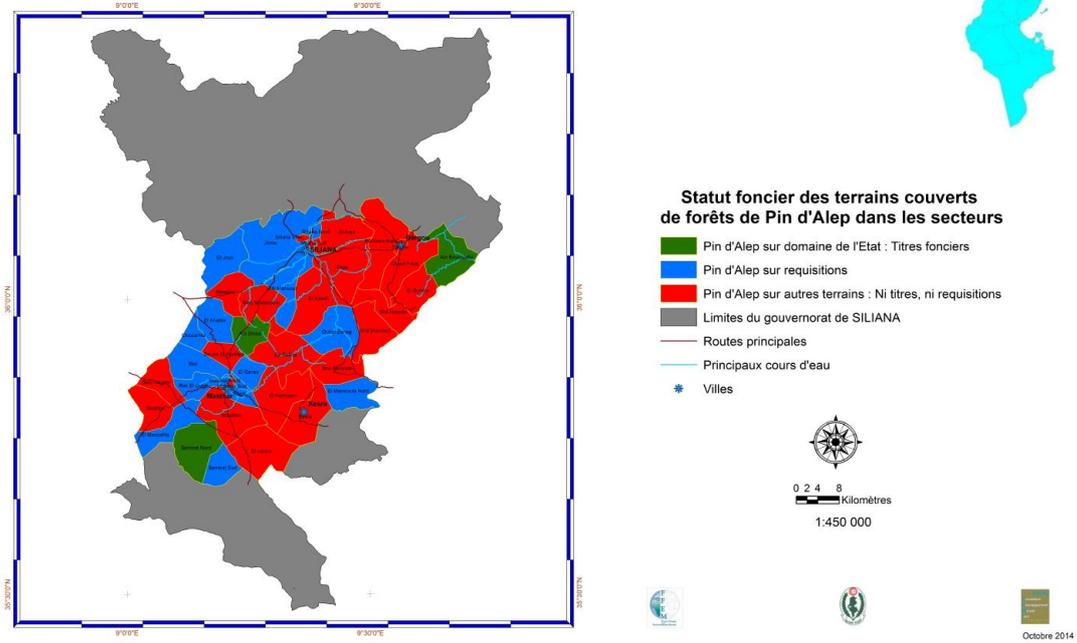
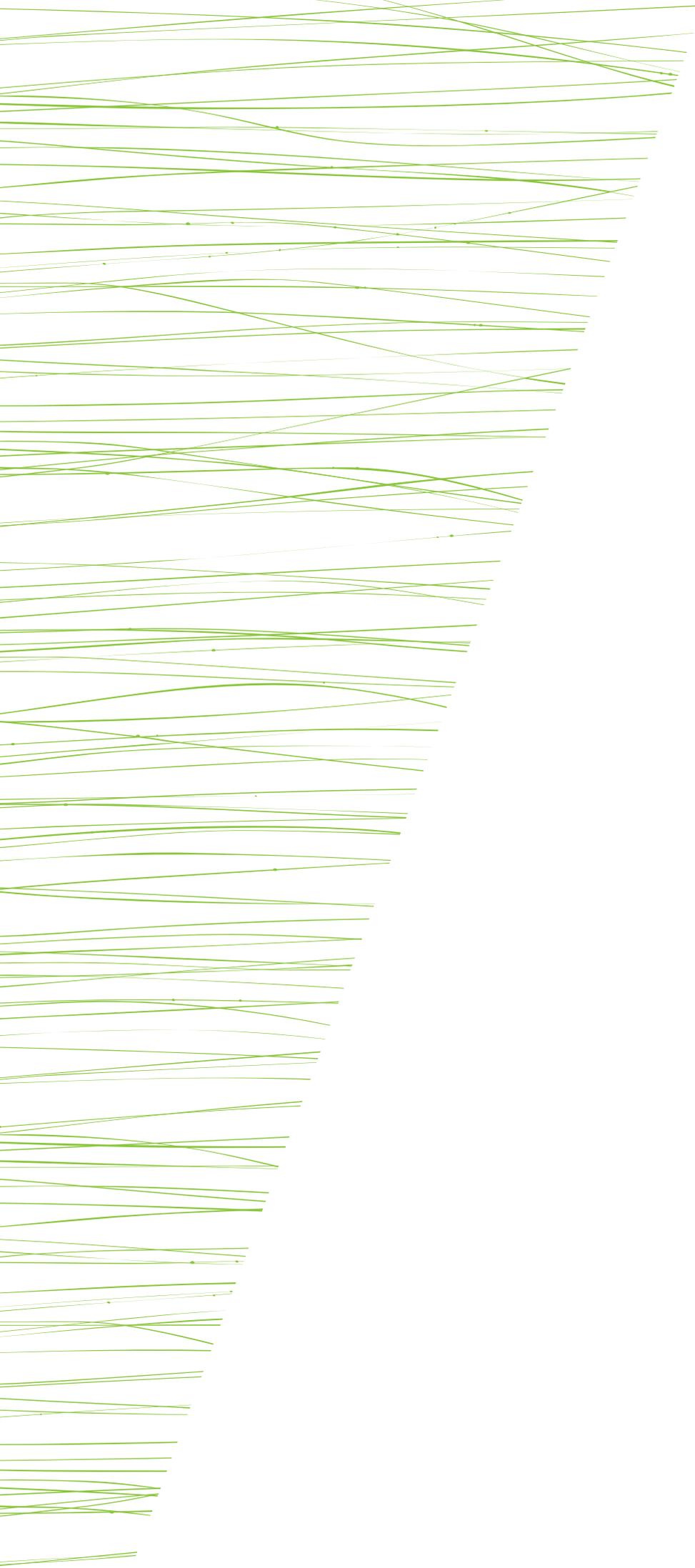


Figure 8.11 – Carte du statut foncier



Bibliographie

- [1] S. Bouzid A.Khorchani, C. Gadbin-Henry and A. Khaldi. Impact de la sécheresse sur la croissance de trois espèces forestières en Tunisie (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinea* L. et *Pinus pinaster* Sol.). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 18(2), 2007. 76, 84
- [2] M. Bargaoui and A. Alouini. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 12(4) :205–213, 2001. 29
- [3] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Élaboration de nouveaux scénarios destinés à analyser les émissions, les changements climatiques, les incidences et les stratégies de parade. Résumé technique. Rapport de la réunion d'experts du GIEC 19-2 Sept. 2007*Noordwijkerhont, Pays Bas. 2007. 34
- [4] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Les nouveaux scénarios utilisés par le GIEC : quelques clés pour comprendre. Synthèse du séminaire du 23 novembre 2011*, Paris. 2011.
- [5] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Guide méthodologique de l'approche spatiale multifactorielle d'analyse de vulnérabilité des écosystèmes face au changement climatique*. GIZ, 2013. 55
- [6] Direction générale des forêts. *Résultats du deuxième inventaire forestier et pastoral national*. Direction générale des forêts de Tunisie, 2010. 34, 35, 82
- [7] A.K. Hibbard M.R. Manning S.K. Rose D.P. van Vuuren T.R. Carter S. Emori M. Kainuma T. Kram G.A. Meehl J.F.B. Mitchell N. Nakicenovic K. Riahi S.J. Smith R.J. Stouffer A.M.Thomson J.P. Weyant R.H. Moss, J.A. Edmonds and J.T. Wilbanks. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463 :747–756, 2010. 31



ISBN 978-92-5-209567-5



9 789252 095675

I6640FR/1/01.17