

Une approche intégrée et un outil prototype pour un suivi opérationnel de la désertification en appui aux gestionnaires

M. Fetoui¹, M. Loireau², M. Sghaier¹, F. Chouikhi¹, A-E. Laques², B. Essifi¹, M. Tarhouni¹, P. Dérioz², M. Issaoui¹, M. Ouessar¹, H. Tâamallah¹

¹ Institut des Régions Arides (IRA), El Fjé 4119, Médenine Tunisie – e-mail : mondher_ga@yahoo.fr

² UMR Espace-Dev 228 Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Maison de la Télédétection, 500 Rue J.F. Breton, 34093 Montpellier CEDEX 05 France - e-mail : maud.loireau@ird.fr

Communication au Séminaire « Politiques, programmes et projets de lutte contre la désertification, quelles évaluations ? », CSFD, 29-30 juin 2011, Montpellier

Résumé

Les problématiques de développement durable des territoires sont en lien direct avec celles des changements environnementaux, comme le développement des zones arides en lien avec la progression/intensification de la désertification. Ceci justifie en grande partie l'émergence des observatoires de l'environnement depuis les années 90 (Loireau *et al.* 2009). Les processus de création de connaissances et d'informations au sein de ces observatoires sont généralement lourds et coûteux. Ils peuvent pénaliser la pérennisation des observatoires et mettre à mal leur capacité à être en prise avec le processus décisionnel de gestion des ressources et des territoires. Dans ce cadre, l'intérêt d'adosser à ces observatoires des outils complémentaires d'évaluation rapide et de surveillance quasi continue de l'environnement, est aujourd'hui exprimé par les gestionnaires et scientifiques, et ce notamment dans le domaine de la lutte contre la désertification.

Cet article décrit une approche intégrée et le prototype d'un système d'information décisionnel (SIELO v1.1) originaux dans le cadre de la problématique complexe « Climat - Homme-Espace-Ressource » de la désertification. Sur la base d'une compréhension et évaluation initiale du risque actuel et futur de la désertification (indicateurs spatialisés de connaissance), il permet de produire rapidement et à moindre coût des indicateurs standardisés d'évaluation et de suivi de la désertification (indicateurs de décision). Cet article montre l'intérêt et généricité de l'approche et la capacité de l'outil SIELO à s'articuler dans un dispositif durable de surveillance environnementale.

L'approche proposée repose sur une démarche intégratrice de spatialisation des connaissances avec l'implication conjointe des chercheurs multidisciplinaires et des acteurs du développement. Elle intègre des analyses spatiales de différentes natures, à partir du paysage, de la télédétection et de la modélisation environnementale SIEL (système d'information sur l'environnement à l'échelle locale ; Loireau *et al.* 2007), dans un outil dédié à la production rapide d'indicateurs de décision à l'échelle locale (SIELO v1.1). Ces indicateurs pointent la diversité sur le territoire de la vulnérabilité du milieu face aux pressions anthropiques en lien avec les stratégies/politiques d'occupation des terres et d'aménagement du territoire. SIELO est le fruit d'une collaboration étroite entre l'institut des régions arides (IRA) et l'institut de recherche pour le développement (UMR ESPACE-DEV). Il est un résultat majeur de la thèse de Mondher Fétoui (Fétoui, 2011).

Cet article présente un premier cas d'application sur le bassin de l'oued Oum Zessar dans les zones arides tunisiennes.

Mots clés : Désertification, zones arides tunisiennes, indicateurs spatialisés, système d'information, intégration, interdisciplinarité, observatoires, évaluation, suivi, aide à la décision.

1. Introduction

Les capacités productives des zones arides tunisiennes sont limitées compte tenu de la faiblesse du potentiel et de la fragilité des ressources (eau, sol et végétation naturelle), ainsi que de la vigueur des contraintes climatiques (aridité, sécheresses, etc.). Dans cet environnement fragile et contraignant, les mutations socio-économiques et institutionnelles ont augmentés/changés les besoins des populations rurales. Elles ont affecté sensiblement leurs modes de vie traditionnels, leurs modes d'usage et d'exploitation des ressources naturelles, ainsi que leurs formes d'adaptation aux contraintes environnementales. Les évolutions contemporaines se manifestent notamment par l'exploitation accrue de ressources naturelles de plus en plus vulnérables et par voie de conséquence le déclin continu des potentialités biophysiques et socioéconomiques et l'augmentation du risque de désertification. Ce processus représente au quotidien une contrainte majeure au développement des zones arides.

L'État tunisien s'est saisi du problème dès les années soixante-dix, et a commencé à intervenir de manière volontariste dans la lutte contre la désertification (Souissi, 2000). Il a inséré ses programmes dans le cadre de la mise en œuvre de l'ensemble des traités internationaux, en profitant des possibilités d'aide et d'assistance financière et technique mises à sa disposition. Ces programmes de préservation des ressources naturelles et de lutte contre la désertification déclinent un ensemble d'actions d'aménagement et de développement, qui s'inscrivent en parallèle aux programmes de développement rural mis en place. Ils sont intégrés et consolidés par le Plan d'Action National de Lutte Contre la Désertification (PANLCD), qui fait lui-même partie intégrante du programme national de développement durable (Agenda 21).

Dans le même temps, sans connexion directe avec l'État, la recherche s'est intéressée au processus. À travers plusieurs programmes de recherche (ROSELT/OSS, DESURVEY, etc.), elle a cherché à évaluer les formes, l'intensité et l'étendue du processus et à comprendre la complexité des éléments biophysiques et socio-économiques en interaction qui le génère ; les interventions de l'État s'ajoutant déjà à la complexité de l'analyse (Fetoui, 2011). Cette recherche a permis d'accumuler un corpus important de connaissances, et mis au point ou validé des méthodes d'analyse adaptées à l'étude des interactions entre des sociétés rurales et des milieux écologiques contraignants.

En dépit des efforts indéniables de l'État tunisien et des avancées de la recherche, les résultats n'ont pas été à la hauteur des attentes, y compris dans la compréhension du phénomène de désertification lui-même (Ouessar *et al.* 2006 ; Fetoui, 2011), et toutes les leçons n'ont pas été tirées des échecs des actions mises en œuvre ; Le bilan des programmes pointe bien pourtant dans certains cas les verrous qui n'ont pas été levés tel que la prise en compte de la diversité socioéconomique et biophysique sur un même territoire. Ainsi, la menace de désertification persiste dans les zones arides tunisiennes (Sghaier *et al.* 2007), comme le montrent de nombreux exemples de terrain (mouvements de sable) et plusieurs études (Ministère de l'agriculture, 1991 ; Khatteli, 1996 ; MEAT, 1996).

Les problématiques de développement durable des zones arides tunisiennes sont en lien direct avec cette persistance, voire aggravation du phénomène de désertification. Ceci explique en grande partie l'émergence des observatoires de l'environnement depuis les années 90. Ceci dit, les processus de création de connaissances et d'informations au sein de ces

observatoires sont généralement lourds et coûteux. Ils peuvent pénaliser la pérennisation des observatoires et mettre à mal leur capacité à être en prise avec le processus décisionnel de gestion des ressources et des territoires.

Cette persistance/aggravation de la désertification, ainsi que l'insuffisante connexion des observatoires de l'environnement avec le monde de la décision, ont fait émerger chez les acteurs du développement et les gestionnaires de ressources, une demande croissante en matière de développement d'outils opérationnels capables de produire des informations spatialisées adaptées à la prise en compte de la diversité des processus de désertification sur un même territoire. Le but est d'avoir accès à une évaluation rapide et reproductible (suivi) des risques de désertification, capables de suivre les changements qui s'opèrent parfois à un rythme accéléré dans le contexte de la mondialisation. Ces acteurs du développement et gestionnaires des ressources souhaitent participer d'avantage à cette production d'informations spatialisées qui doit pouvoir servir à évaluer l'impact des politiques publiques d'aménagement du territoire passées ou à venir et/ou orienter et cibler (nature et localisation) leurs actions. Ces outils, adossés aux observatoires existants, peuvent leur donner pleinement un rôle pour le développement local.

Notre recherche vise à répondre à ce besoin de nouveaux outils d'observation pourvoyeurs d'indicateurs spatialisés faciles à mettre à jour dans un contexte de suivi des changements au moindre coût, prêts des préoccupations des acteurs du développement et gestionnaires des ressources.

L'approche proposée repose sur une démarche intégratrice de spatialisation des connaissances avec l'implication conjointe des chercheurs multidisciplinaires et des acteurs du développement. Elle intègre des analyses spatiales de différentes natures, à partir du paysage, de la télédétection et de la modélisation environnementale SIEL (système d'information sur l'environnement à l'échelle locale ; Loireau *et al.* 2007), dans un outil dédié à la production rapide d'indicateurs standardisés d'évaluation et de suivi de la désertification (indicateurs de décision) à l'échelle locale : le SIELO, Système d'Information intégré pour le suivi rapide, Léger et peu coûteux de la désertification dans les Observatoires de développement durable.

Nous présentons ici le principe et la démarche de recherche générale, l'outil SIELO et le résultat de son application au cas du bassin versant de l'oued Oum Zessar, qui fait partie des zones arides tunisiennes.

2. Démarche intégratrice de spatialisation des connaissances et mise en œuvre dans un système d'information prototype : SIELO

La désertification résulte de mécanismes et de processus complexes et interactifs sur un territoire entre le climat, l'homme, l'espace et les ressources (Fetoui, 2011). Les dynamiques de ces interactions se manifestent par diverses formes de dégradation des ressources naturelles, observables ou non dans le paysage. Ce dernier est le produit des activités agricoles actuelles et passées, des mutations socioéconomiques contemporaines et de bien d'autres facteurs. En s'inscrivant dans le temps et dans l'espace, ces dynamiques prennent des sens précis et renvoient, ensembles, à différentes significations liées aux processus et aux risques de désertification. Ces formes de dynamique s'agencent entre elles en formant des combinaisons spécifiques, susceptibles de se répéter en divers secteurs du territoire, révélatrices d'expressions particulières du système territorial (Dérioz, 2008).

L'approche proposée valorise et articule dans un même système d'information, selon une chaîne d'opérations spécifique, les résultats i) d'une analyse paysagère de terrain (zonage du territoire en types de paysage, fonctionnel pour la prise de décision), ii) d'une modélisation spatiale intégrée (diagnostics paysagers du risque de désertification et scénarii) et iii) d'une analyse d'une série d'images satellites (dynamiques d'occupation du sol). L'objectif du système d'information est de proposer une méthode d'évaluation et suivi du risque de désertification par type de paysage, à partir de la mise en relation entre les évolutions d'occupation du sol télédétections et des indices standardisés de risque de désertification par type de paysage.

2.1. Description des trois approches de spatialisation mobilisées

L'analyse paysagère de terrain mobilise le paysage comme « résultante matérielle sur le territoire » d'un état du système interactif complexe « climat-homme-espace-ressources » de la désertification, directement observable. Le paysage est alors médiateur entre cette complexité et le « concret » du territoire, de ses acteurs et de la lutte contre la désertification. Les modes d'organisation et de répartition des facteurs du paysage (biophysiques et socioéconomiques) déterminent plusieurs types de paysages, au sein desquels la question de la désertification et des moyens de lutter contre elle se pose de manière spécifique. Avec l'analyse paysagère de terrain, il s'agit de réaliser un zonage des types paysagers (cartographie des entités paysagères) qui représentent les différents fonctionnements interactifs existants dans un espace d'étude (Barrue-Pastor, 1992 ; Fetoui, 2011). Pour ce faire, nous utilisons une grille d'analyse du paysage qui identifie des portions d'espace présentant une cohérence et une homogénéité physiologique, c'est-à-dire un même agencement, une même proportion des différents composants paysagers, un même usage socioéconomique et des dynamiques de désertification de même nature.

La modélisation spatiale intégrée mobilise le paysage comme résultante de la dynamique du système interactif complexe que l'on peut recréer et représentée spatialement à l'issue d'une formalisation et mise en équation des règles géospatiales des dynamiques interactives hommes/milieu. Le paysage est alors indicateur du risque potentiel de désertification. Pour ce faire, nous utilisons la modélisation environnementale SIEL (système d'information sur l'environnement à l'échelle locale) (Loireau, 1998 ; ROSELT/OSS, 2004 ; Loireau *et al.* 2007 ; Fetoui, 2011). Elle permet de structurer le territoire en unités de paysages dites « unités spatiales de référence : USR » sur lesquelles sont calculés des indicateurs de vulnérabilité des ressources (notamment la phytomasse épigée) face aux usages multiples de ces ressources. Ces indicateurs spatialisés sont ainsi construits à partir de l'intégration spatiale des règles de répartition des pratiques et des usages des ressources avec les conditions biophysiques locales et la disponibilité des ressources. Les USR sont issues de l'intersection entre deux plans géographiques construits préalablement. L'un cartographie (télédétection, SIG) les ressources dans des unités pédo-paysagères (Land Cover); l'autre délimite (modèles de spatialisation) des unités sur lesquelles s'associent plusieurs pratiques d'exploitation, les unités de pratiques combinées (Land Use). L'un exprime le fonctionnement des systèmes écologiques en place à travers leurs niveaux de production des ressources (inventaire au sol et images satellitaires). L'autre exprime les stratégies des sociétés à travers leurs niveaux d'intervention (artificialisation) sur les ressources (enquêtes). Les USR font ainsi « référence » aux systèmes écologiques et socio-économiques, producteurs des paysages.

La télédétection permet d'analyser des séries d'images satellites et donc analyser les évolutions sur un même territoire. Nous considérons que l'évolution des paysages peut être

observée à travers l'évolution des structures paysagères et donc des objets paysagers qui les composent. L'analyse de ses structures paysagères peut être basée notamment sur les formes de l'occupation du sol (Bourget et Le Dû-Blayo, 2010). Dans le but de réduire les coûts de l'évaluation de ces changements, nous utilisons des images Landsat gratuites, sur lesquelles nous opérons une classification.

2.2. Articulation des trois approches de spatialisation mobilisées

Nous nous basons sur le postulat de base qui consiste à mettre en relation l'évolution de l'occupation du sol avec la disponibilité de la phytomasse épigée de la végétation naturelle, considérant que le passage d'un type d'occupation du sol à un autre correspond à un changement de phytomasse produite (soit une diminution suite à un défrichement dans la plupart des cas, soit une augmentation suite à un repos de la terre ou à une mise en jachère). Si la quantité de végétation naturelle diminue, alors que la pression anthropique via les prélèvements reste équivalente, voire augmente, cette évolution peut augmenter le risque potentiel de désertification.

Chaque unité de paysage produite par voie de modélisation est caractérisée, de par son mode de construction, par des pourcentages surfaciques d'occupation du sol ; et chaque type d'occupation du sol est lui-même caractérisé par une phytomasse épigée de végétation naturelle. Un type de paysage délimité par l'analyse paysagère de terrain (entités paysagères) comprend plusieurs unités de paysage issues de la modélisation, chacune caractérisée par un risque potentiel de désertification. Ainsi, chaque type de paysage peut être caractérisé soit par un indice moyen de risque de désertification (moyenne pondérée par la surface), soit par un indice moyen par classe de niveau de risque (par exemple : faible à moyen, moyen à fort, fort à très fort).

Avec toute cette information de base, nous valorisons la capacité prospective des modèles, et c'est là tout l'intérêt de la modélisation, pour simuler des changements d'occupation du sol, qui engendrent du coup des changements de phytomasse épigée par unité de paysage et par voie de conséquence, des changements du risque potentiel de désertification par type de paysage, selon la chaîne de traitement explicité ci-dessus. Dans chaque entité paysagère et pour chaque type de changement d'occupation du sol (par exemple de steppe vers culture), le pourcentage surfacique (planimétrie) des zones à risque fort à très fort¹ engendré par ce changement d'occupation du sol est calculé pour différentes tranches de surface concernées par ce changement: par exemple 10% de surface de steppe change en culture, ou 20%, etc. Le choix des proportions de changements est fonction du niveau de précision souhaité. Nous prenons l'exemple des intervalles de 0 à 40 %, de 40 à 80 % et plus de 80 % de changements. Nous affectons ainsi à chaque classe de changement, une « note » du niveau de risque, dit niveau de risque standard. Cette note sera spécifique à chaque territoire d'étude. La note la plus forte correspond, pour un type de paysage donné au plus grand pourcentage surfacique de zones à risque fort à très fort affectée par ce changement. À titre d'exemple (tableau 1), pour une proportion du changement Steppe vers Culture (défrichement) entre 0 à 40 %, nous avons 45 % de la superficie du type de paysage n°1 sous risque fort à très fort, de 40 à 80 % nous en avons 38 % et pour plus de 80 % de changement nous en avons 27 % (tableau 1). La note maximum de 3 est affectée au premier cas de figure, la note de 2 au deuxième cas, et la note de 1 au troisième cas.

Paysages	Classes de changements Steppe vers culture	Proportion de superficie (%) correspondante aux risques forts à	Niveau de risque de désertification
----------	---	--	--

¹ En considérant que ces zones sont prioritaires d'un point de vue prise de décision au moins à court terme.

		très forts (RFTF)	(NRD)
Paysage 1	0-40 %	45 %	3
	40-80 %	38 %	2
	> 80 %	27 %	1

Tableau 1 : Exemple de calcul, pour le paysage de type 1, des niveaux standards des risques de désertification par tranche de surfaces concernées par le changement d'occupation du sol des steppes vers les cultures

Passage obligé de la démarche d'évaluation, ce travail de calibrage des normes par voie de modalisation (diagnostic territorial initial) se fait **une seule fois**. Nous ne pouvons pas en faire l'économie et il valorise les observations collectées dans le cadre des observatoires de l'environnement.

Le lien est ensuite établi entre ces valeurs normées au préalable de risque de désertification (diagnostic) et les changements d'occupation du sol télédétektés (réels et localisés) sur une période déterminée qui intéresse le scientifique et/ou le gestionnaire. Rappelons que l'objectif d'établir ce lien est **le suivi à moindre coût des risques de désertification** pour répondre en temps et en lieu aux demandes d'informations des scientifiques et/ou gestionnaires...**l'acquisition d'une image Landsat gratuite peut se faire par exemple sur un pas de temps d'une semaine, quand il faut généralement plusieurs années pour établir le diagnostic de risque via les méthodes classiques de relevés de terrain et analyses scientifique dans le cadre des dispositifs d'observatoire de l'environnement** (cf. phase diagnostic suscitée)!

Pour établir ce lien, nous calculons le pourcentage surfacique réel des types de changements d'occupation du sol à partir des classifications supervisées d'une série d'images satellites couvrant la période qui nous intéresse pour chaque type de paysage. Le niveau standard de désertification préalablement établi (état de référence) pour la classe de changement correspondante lui est ensuite attribué (tableau 2). Nous parlons alors d'indice spécifique de désertification par type de changement d'occupation du sol et par type de paysage.

Type paysager (TP)	Classes de changements (TC) Steppe vers culture	RFTF	NRD	Proportion de changement (PC)	ISD
Paysage 1	0-40 %	45 %	3	43 %	2
	40-80 %	38 %	2		
	> 80 %	27 %	1		
Paysage 3	0-40 %	43 %	2	86 %	3
	40-80 %	32 %	1		
	> 80 %	56 %	3		

Tableau 2 : Exemple de calcul des indices spécifiques de désertification pour les types de paysage n° 1 et 3, et le type de changement d'occupation du sol de steppe vers culture

RFTF : Proportion de superficie correspondante aux risques forts à très forts (%)

NRD : Niveau de risque de désertification

ISD : Indice spécifique de désertification

Une fois que les ISD sont calculés et dans l'objectif d'avoir l'information sur les risques potentiels de désertification par type paysager, nous pouvons déterminer les **niveaux de risques globaux de désertification (IGDp)** par type paysager pour tous les types de changements. Les IGDp sont calculés à l'aide de la formule suivante :

y : Nombre des types paysagers
n : Nombre des types de changements
NRD_{max} : Valeur maximale attribuée aux Niveaux des Risques de Désertification (NRD) par type de changement

$$IGD_{p_1 \rightarrow y} = \frac{\sum ISD_{11 \rightarrow nv}}{n * NRD_{max}}$$

Sur la base des connaissances du terrain, mais aussi des plans stratégiques et politiques nationales, régionales et locales, les acteurs de développement et les gestionnaires des ressources peuvent intégrer notre démarche pour l'élaboration des scénarios de changements d'occupations du sol selon un pas de temps identifié. Selon ces scénarios, des IGD peuvent être calculés et peuvent aider ces acteurs à évaluer (ex-ante) leurs projets et les stratégies de développement dans un observatoire donné.

La figure 1 résume les étapes de la démarche présentée. Elle est également l'ossature conceptuelle sur laquelle nous avons construit le prototype logiciel du modèle environnemental proposé. La démarche repose sur la valorisation de la matérialité du paysage (étape 1), la capacité prospective du SIEL (étapes 2 et 3) et la capacité de spatialisation des dynamiques via la télédétection (étape 4) pour produire des indices de risques de désertification (étapes 5, 6 et 7).

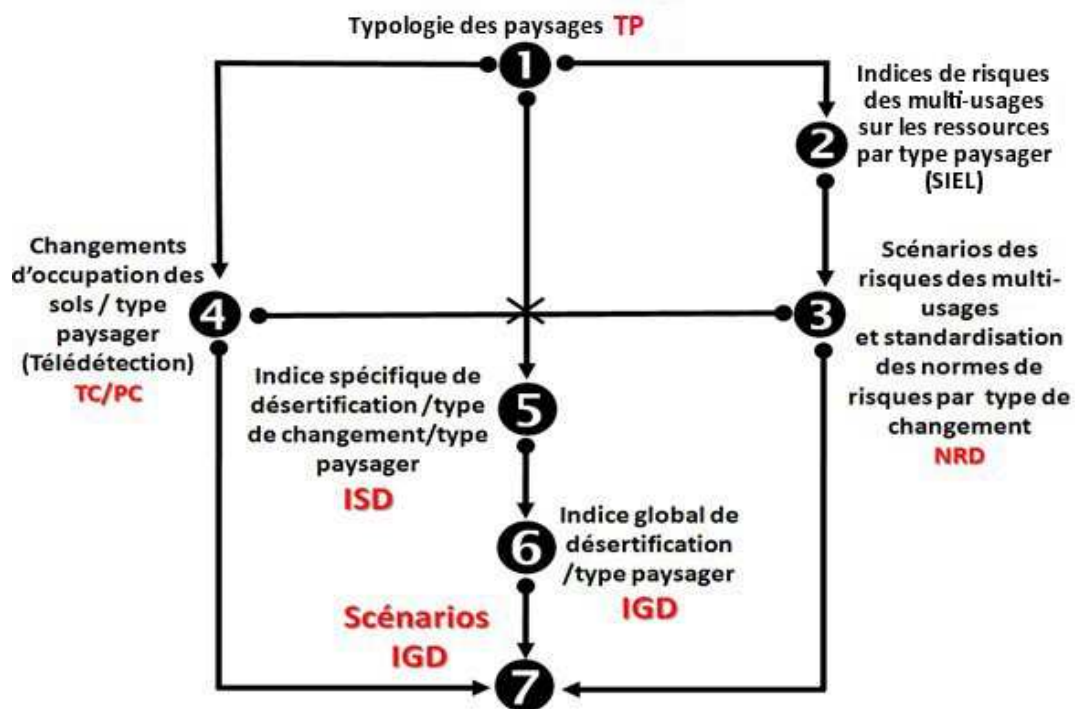


Figure 1 : Démarche globale pour le suivi rapide, léger et à moindre coût de la désertification : approche conceptuelle du SIELO

2.3. Développement du prototype logiciel « SIELO v1.1 »

L'idée du développement d'un prototype logiciel SIELO avait comme ambition principale de faire la démonstration de son intérêt auprès des chercheurs et des acteurs de développement, afin qu'ils s'approprient ensemble cet outil d'aide à la décision, peu coûteux et facile à manipuler, qui tient compte des spécificités des zones arides tunisiennes, mais qui a vocation à être générique et applicable sur toute zone aride, semi-aride ou subhumide sèche. Ce critère de reproductibilité (généricité/modularité) de la chaîne d'opérations de la collecte des données jusqu'à la production d'informations utiles aux décideurs sur un même territoire à

des dates différentes (analyse diachronique) ou dans d'autres territoires en tenant compte des spécificités locales (analyse synchronique) a été parmi les qualités et fonctionnalités visées dès sa conception.

La programmation s'est effectuée sur Visual Basic 6. Une base de données sur Access est élaborée au fur et à mesure de l'évolution de la programmation. La spécification technique et les étapes de la modélisation sont décrites en détail dans Fetoui (2011). Les résultats, pour cette première version (SIELO v1.1), sont des tableaux avec des données de sortie, pouvant être exportés vers Excel, mais aussi des histogrammes qui montrent les ISD et les IGD. Les résultats des scénarios sont représentés aussi par des histogrammes. L'interface de ce prototype logiciel SIELO v1.1 est présentée par la figure ci-dessous.



Figure 2 : Interface du prototype logiciel SIELO v1.1 (Fetoui, 2011)

3. Résultats d'une première application du SIELO au cas du bassin versant de l'oued Oum Zessar

3.1. Présentation du territoire du bassin versant de l'oued Oum Zessar

Ce territoire fait partie de la grappe d'Observatoires des Zones Arides tunisiennes pour le Développement Durable (OZADD). Il est situé entre les parallèles de 33° et 33° 10' Nord, et les méridiens de 10° et 10°30' Est (figure 3). Il draine un bassin versant de 350 Km² de superficie et de 151 Km de périmètre (Ouessar *et al.* 2006). Dans cette forme étendue plus ou moins rectangulaire, se déploient des paysages variés. Des variations significatives du couvert végétal et des géofaciès peuvent être observées sur une courte distance : elles résultent de la diversité des influences climatiques (littorales, continentales, désertiques) liées à la situation géographique de ce territoire, mais aussi de celle des influences anthropiques sur le milieu, qui découlent de la variété des activités mais aussi de l'intensité plus ou moins forte des mutations socioéconomiques récentes (sédentarisation, privatisation des terres, recul de l'agro-pastoralisme et mise en valeur agricole, stratégies et programmes de lutte contre la désertification, libéralisation de l'économie, modernisation de l'agriculture et changements

des modes d'usage et d'exploitation de l'espace pastoral, modes d'accès et d'usages des ressources naturelles...).

La zone est caractérisée par des sols généralement pauvres en matières organiques, dont la texture et la structure sont dans la plupart des secteurs sensibles à l'érosion éolienne et hydrique. La végétation naturelle est généralement de type chaméphyte. Elle est souvent épars, rabougrie et clairsemée. La population de cette zone est estimée, d'après le recensement de 2004, à 24188 habitants. Le nombre des familles est de 4728 avec une taille de famille moyenne de 5,11. La vulnérabilité des ressources et les risques de désertification dans ce territoire sont attestés par des formes d'érosion, aussi bien hydrique qu'éolienne.

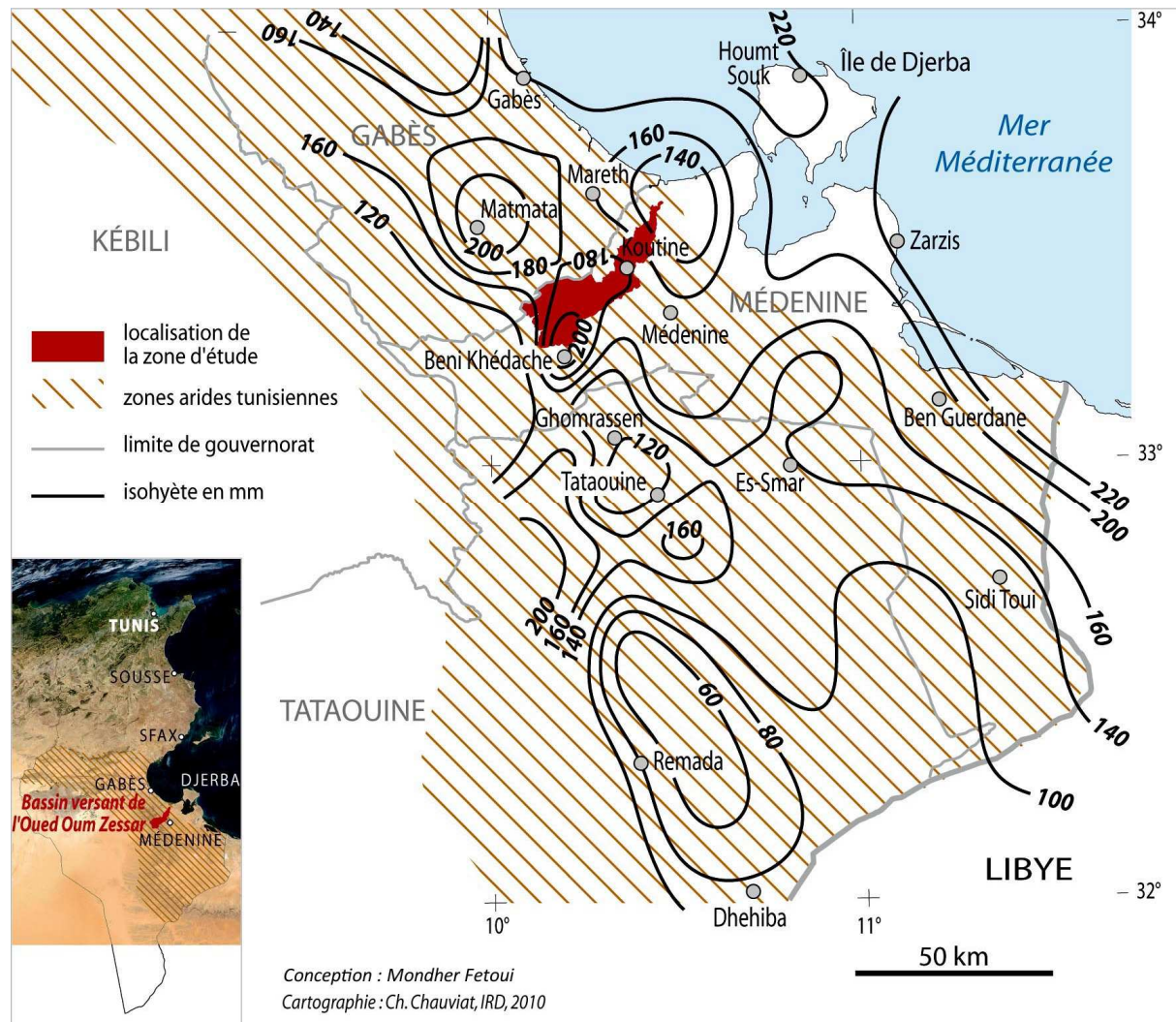


Figure 3 : Localisation géographique du bassin versant de l'oued Oum Zessar

3.2. Modélisation SIELO pour le suivi rapide, léger et à moindre coût de la désertification dans le bassin versant de l'oued Oum Zessar

Les méthodes et travaux de typologie paysagère, de modélisation SIEL et de traitement des données de télédétection, adoptés pour la classification et la spatialisation des dynamiques d'occupation du sol dans le territoire d'étude et l'élaboration des diagnostics paysagers, sont détaillés dans Fetoui (2011).

Typologie paysagère

Le travail de typologie paysagère est effectué en se basant sur les acquis de recherche, les supports cartographiques, l'inventaire systématique de transects sur le terrain, l'outil SIG et les enquêtes socioéconomiques. La lecture des paysages en fonction d'une même grille d'analyse débouche sur la partition de l'espace en unités distinctes : les paysages identifiés sont caractérisés par leurs types de végétation, leurs types de sol, par l'utilisation qui en est faite par l'homme, par leur "sensibilité" eu égard aux pratiques culturelles, aux spécificités biophysiques et aux agents de dégradation des terres. Le nombre et les états de ces variables, prises en compte isolément ou simultanément, sont volontairement limités de façon à obtenir par leurs combinaisons, un nombre restreint de types paysagers, néanmoins représentatifs de tous les systèmes biophysiques et socioéconomiques en place. A l'échelle de ce seul bassin versant, l'extension sur la carte des différents types correspond à un zonage géographique d'amont en aval qui juxtapose des unités spatiales d'un seul tenant.

L'expertise des participants à la lecture des paysages (personnes ressources de la zone, chercheurs issus de disciplines différentes (écologie, géographie, agronomie, géologie...), décideurs techniques), a permis l'identification, l'élaboration et la validation de sept types paysagers².

La délimitation précise de ces types paysagers sur le terrain a été difficile à cause de problèmes d'accessibilité et d'enclavement de certaines zones, mais aussi des flux entre les divers paysages. Or, les aspects dynamiques (dégradation, érosion, régénération) jouent un rôle prépondérant dans cette représentation simplifiée de l'hétérogénéité de l'espace rural dans cette zone aride. Les paysages sont aussi caractérisés par leurs relations dynamiques et par leurs aptitudes à évoluer. Les évolutions peuvent se manifester par une modification du fonctionnement des systèmes socioéconomiques et biophysiques qui les produisent (mise en culture, déprise, urbanisation, etc.), par le passage d'un type paysager à un autre à un endroit donné, ou encore par le déplacement des limites des types paysagers. La méthodologie utilisée pour établir la typologie des paysages permet une actualisation rapide, en quelques jours de travail à l'échelle du territoire d'étude et ainsi se donner les moyens de suivre les évolutions.

Travaux de télédétection

En ce qui concerne les travaux de télédétection, nous avons travaillé sur des images Landsat de 30 m de résolution couvrant la période 2002-2007, pour identifier et quantifier les différents types de dynamiques d'occupation du sol à partir de quatre classes d'occupation (cultures, friches, steppes et zones ensablées/sols nus).

L'analyse des flux³ des changements (figure 4) a permis de déduire que la classe des cultures est la plus grande bénéficiaire des changements puisqu'elle a gagné en 5 ans 21 % de la superficie du bassin versant. Cette emprise agricole s'est effectuée aux dépens de steppes (48,2 %) et des friches (22,9 %). L'évolution des zones de dynamiques éoliennes est aussi très marquée durant cette période. Cette dynamique est confirmée par un flux d'ensablement

² Paysage 1 : l'entrée de l'oued Oum Zessar dans les sebkhas côtières ; 2 : les cultures et les parcours steppiques autour de l'oued et des ravins affluents ; 3: le faisceau urbanisé de la route nationale GP 1 ; 4 : la plaine aux parcours dominants ; 5 : les parcours en mutation, conquis par les céréales et l'arboriculture ; 6 : les douars, tabias et parcours discontinus de la plaine de piémont ; 7 : le djebel, les parcours de versants et les jessour (Fetoui, 2011). Les jessour étant des petits barrages de collecte des eaux pluviales et de conservation des sols installés depuis l'antiquité sur les montagnes des zones arides tunisiennes (Fetoui, 2011).

³ La grosseur des traits correspond aux dynamiques d'occupation du sol. Plus le trait est gros, plus la dynamique ou le changement en terme de superficie est intense.

dont le bilan est une accumulation de 532 ha de sable dans les champs cultivés en bordure des oueds.

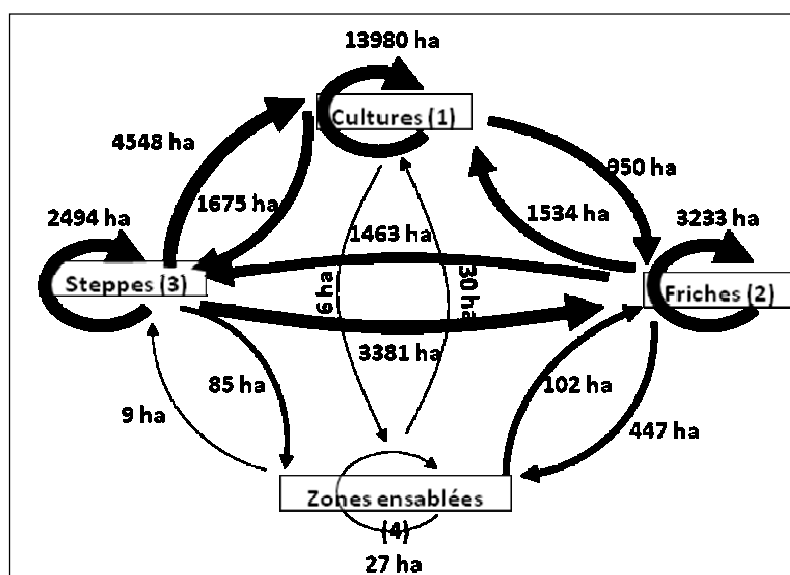


Figure 4 : Dynamique spatiale 2002-2007 des classes d'occupation du sol/Utilisation des terres dans le bassin versant de l'oued Oum Zessar

Ces changements correspondent à des flux de changement des quantités de phytomasse disponibles dans le bassin versant. Ces quantités sont calculées et enregistrées afin de les réinvestir dans les prochaines étapes de la modélisation.

Élaboration des normes standards de niveaux de risque de désertification (NRD)

Le calcul des NRD s'effectue en dehors de la modélisation SIELO. La capacité prospective du SIEL a été valorisée pour le calcul des NRD pour chaque type de changement d'occupation du sol dans les types paysagers. Les modifications des paramètres d'entrée du SIEL concernent toutes les productions en phytomasse épigée, en fonction du type de changement d'occupation du sol. Une valeur de risques de désertification a été calculée par le SIEL (scénario) pour chaque changement de 20%⁴ des différents types de dynamique d'occupation du sol. Ensuite, la moyenne des risques forts à très forts a été calculée pour trois classes de changements définies au préalable (pour notre cas : 0-40%, 40-80% et >80%).

Nous présentons un exemple du résultat (tableau 4) correspondant au calcul des NRD pour la dynamique du type Steppe-Culture (défrichement) dans le paysage 1.

Type paysager	Proportion de changement (TC1)	RFTF (%)	NRD
Entrée de l'oued Oum Zessar dans les sebkhas côtières (paysage 1)	0-40	24,4	1
	40-80	40,6	2
	> 80	46,7	3

Tableau 4 : Calcul des proportions des superficies correspondantes aux risques forts à très forts (RFTF) et des niveaux standards des risques de désertification (NRD) par type paysager pour le cas du premier type de changement d'occupation du sol TC1 (Steppe-Culture)

⁴ Nous pouvons aussi aller plus vers la précision et élaborer des scénarios pour chaque 10 % de changement (120 scénarios dans ce cas).

Intégration de données dans le prototype SIELO et élaboration des indices spécifiques de désertification ISD

Les couches d'information issues de la télédétection et de la modélisation ont été croisées grâce au prototype logiciel SIELO_v1.1 pour identifier les risques de désertification correspondant à chaque type de changement dans chaque type paysager. Les résultats de la modélisation des ISD sont affichés dans la figure 5 qui montre que les types de changement d'occupation du sol (4 : steppe-culture et 8 : culture-friche) affichent le plus grand risque de désertification dans tous les types paysagers. Cette information peut aider le décideur à mieux comprendre le phénomène de désertification et mieux agir.

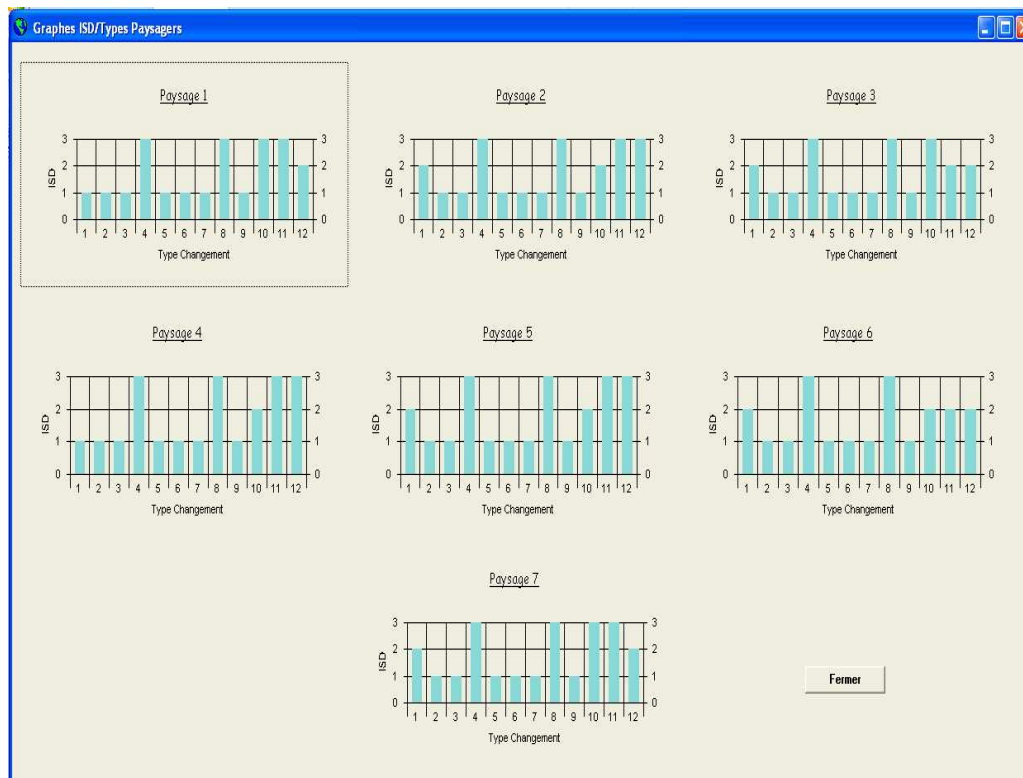


Figure 5 : Histogrammes des indices spécifiques de désertification (ISD) par type de changement d'occupation du sol et par type

Élaboration des indices globaux de désertification IGDp et IGD

Le modèle calcule par la suite les indices globaux de désertification par type paysager (IGDp) et l'indice global de désertification IGD sur la base des normes standards et les ISD calculés. Le modèle donne un IGD, correspondant à tout le territoire, qui est égale à 0,59. Ceci explique le risque moyen à fort de désertification dans toute la zone d'étude, sachant que cet IGD est compris entre 0,33 et 1.

L'histogramme des IGD par type paysager (figure 6) montre que ce sont les paysages 2, 5 et 7 qui affichent les plus grands risques de désertification suite aux changements des occupations du sol enregistrés entre 2002 et 2007. Ce type de résultat favorise un appui à la décision en cas de demandes urgentes sur les risques de désertification dans un territoire donné.

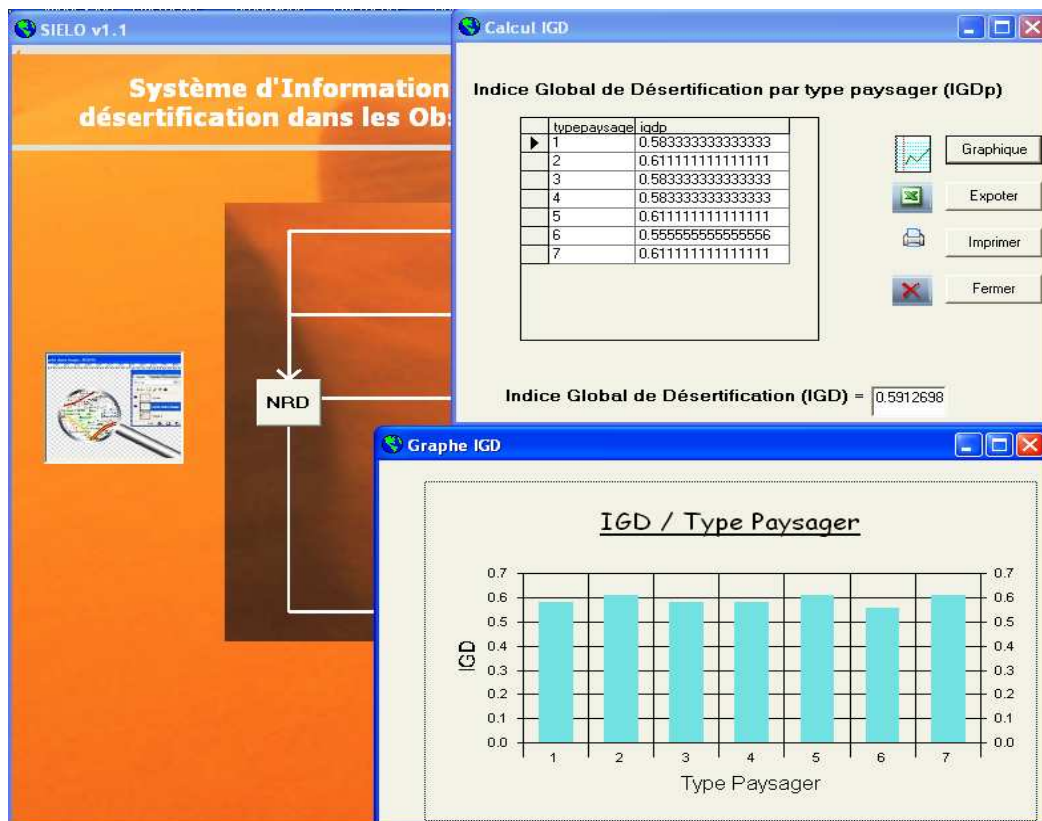


Figure 6 : Histogramme des indices globaux de désertification par type paysager (IGDp)

Scénarios IGD et suivi de désertification

L'IGD se veut aussi plus orienté vers le suivi de désertification. Les résultats de cette étape intègrent une intervention des acteurs de développement. Un travail préalable à la modélisation a en effet été effectué en collaboration avec ces acteurs afin de construire des scénarios sur les changements des occupations du sol et de l'utilisation des terres qui pourraient se manifester dans les trente prochaines années. Les scénarios proposés ont été basés sur leur connaissance du terrain, mais aussi sur les politiques et stratégies nationales en matière d'utilisation des terres. Le travail avec ces acteurs a permis d'enregistrer toutes les proportions de changements proposées. Les données ont été intégrées ensuite dans le prototype du modèle SIELO_v1.1.

Les résultats de la modélisation SIELO (figure 7) montrent que les risques de désertification dans le paysage 5 diminueront suite aux stratégies d'occupation du sol programmées (2010-2029), le cas contraire pour le paysage 7. Cette information permet à ces acteurs de réorienter ces stratégies d'occupation du sol dans chaque type paysager suivant le risque encouru et de mieux agir. Les résultats de cette étape sont en effet les plus aboutis ; directement utiles pour le suivi territorial rapide, léger et à moindre coût.

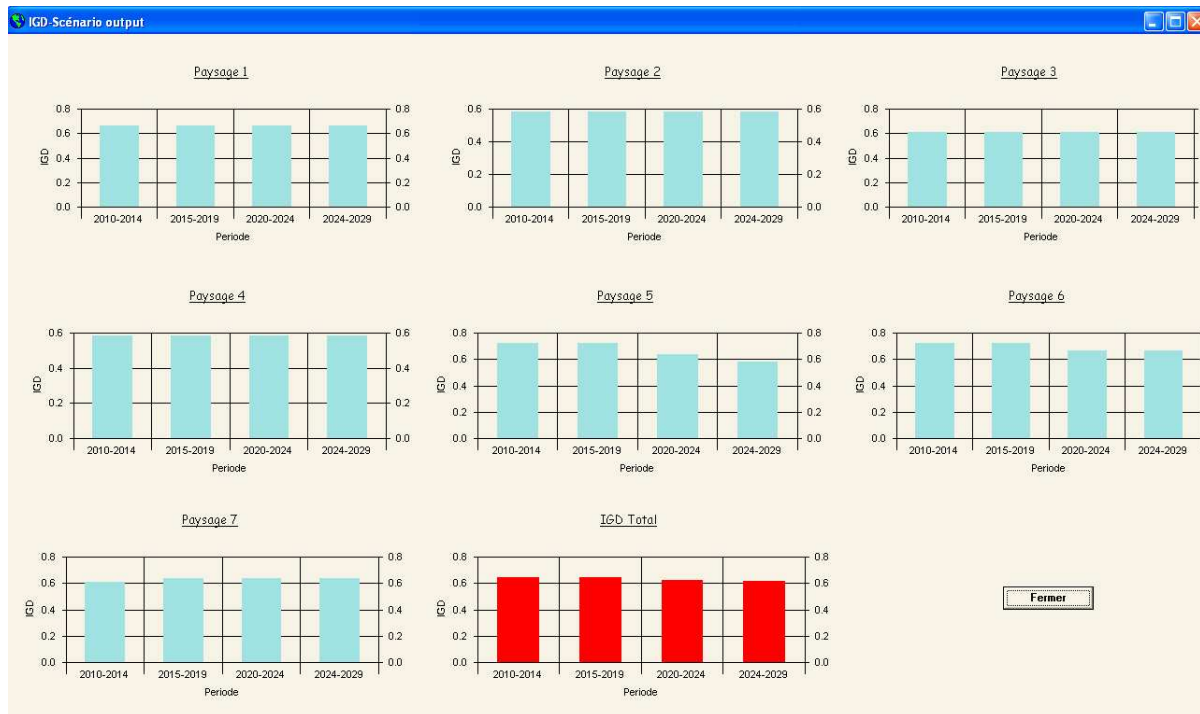


Figure 7 : Pronostics sur l'indice global de désertification par type paysager dans le bassin versant de l'oued Oum Zessar

4. Conclusion

Les résultats de cette recherche ne représentent qu'un exemple destiné spécialement à l'apprentissage de la méthode et à la présentation des types de résultats que peut élaborer le modèle prototype SIELO v1.1 (Système IntÉgré pour le suivi rapide, Léger et à moindre coût de la désertification dans les Observatoires de développement durable). Ceci dit, la conception, le développement et l'application de cet outil dans le bassin versant de l'oued Oum Zessar a fourni une occasion propice pour tester les approches interdisciplinaires et multi-acteurs, mais aussi l'importance de l'approche intégrée « paysage-télé-détection-modélisation » dans le cadre d'appréciation rapide, légère et à moindre coût de la vulnérabilité du milieu à la désertification. Ce prototype a mobilisé plusieurs méthodes de spatialisation et représente une méthode simple et légère pour intégrer les données issues de différentes analyses spatiales. Ceci afin de **mettre en relation les dynamiques d'occupation du sol et les risques encourus de désertification et pour élaborer des indices normés**. Il donne ainsi une méthode de vision plus large sur la situation des risques de désertification sur le long terme, en cas de changement de politiques d'utilisation des terres par exemple. Il permet de donner une information actualisée susceptible d'alerter à court terme les gestionnaires (du paysan à l'autorité politique, en passant par les organismes intermédiaires de développement) et d'orienter immédiatement leurs actions tout en leur donnant des recommandations, à moyen terme pour gérer les territoires dans le sens d'un développement durable, et à long terme pour des actions durables susceptibles de répondre par exemple aux conventions environnementales internationales.

Il est important de noter que SIELO se situe dans la continuité des projets antérieurs ; ce qui conforte la persistance de son caractère innovant et le bien-fondé de ses bases. Toutefois, ses approches de base sont difficiles à mettre en œuvre en réalité, surtout qu'il n'y a pas beaucoup de recherches qui ont traité les liens entre dynamiques d'occupation du sol et

risques de désertification. Mais l'outil proposé, fédérateur par ses objectifs et son fonctionnement, a pu débloquer certains verrous.

La démonstration et discussions des premiers résultats obtenus avec les gestionnaires ont démontré l'intérêt de son utilisation. Les efforts apportés à la forme de présentation des résultats ont été remarqués, mais des efforts supplémentaires pour améliorer les clés de lecture restent à faire. Indépendamment de la forme, les premiers résultats obtenus sont à considérer comme provisoires et issus d'un travail exploratoire. En fait, l'outil proposé présente des contraintes liées notamment au choix des classes d'occupation du sol, à l'utilisation des modules spécifiques dans le logiciel Idrisi, à l'évolution des types paysagers (limites, composants, dynamiques). En outre, il présente des problèmes de représentation des indicateurs choisis, mais aussi à la fiabilité des sources numériques ou graphiques. Il oblige à un travail en interdisciplinarité pour l'analyse des indicateurs spatialisés, mais aussi en collaboration avec les acteurs de développement pour l'élaboration des scénarios. Des analyses plus approfondies doivent appuyer l'interprétation des résultats, en remontant les chaînes de construction des modèles SIEL et SIELO, mais aussi les étapes de traitement/élaboration des images sur les dynamiques d'occupation du sol.

Cet outil est prêt à poursuivre son évolution dans le cadre de projets de recherche. Il peut s'adresser aux scientifiques, mais aussi aux gestionnaires de l'environnement. Nous avons l'ambition de l'utiliser comme outil pédagogique pour la formation dans les domaines de la gestion des ressources naturelles et de l'environnement. Pour cela, il doit être testé dans d'autres régions du monde. Le but est de valider la preuve du concept SIELO par la démonstration de son adéquation et applicabilité dans d'autres contextes socioéconomiques et biophysiques, mais aussi l'augmentation de sa robustesse, sa complétude (avec possibilité de complémentarité avec d'autres modèles et système d'information) et sa généralité (harmonisation du dispositif de collecte de données).

5. Références bibliographiques

- Barrue-Pastor M., 1992, « L'interdisciplinarité en pratique », In : Marcel J. (dir.), « Sciences de la nature, sciences de la société », *Les passeurs de frontières*, Paris, Éditions CNRS, pp. 457-475.
- Bourget É., Le Dû-Blayo L., 2010, « Cartographie des paysages : apport à l'analyse des trames vertes et bleues », *Projets de paysage*, 18 p.
- Dérioiz P., 2008, *L'approche paysagère : un outil polyvalent au service de l'approche opérationnelle et interdisciplinaire des problématiques environnementales*, 1^{ères} Journées scientifiques ARPEnv : Interdisciplinarité et gestion environnementale : Partage d'expériences autour de la psychologie environnementale, Université de Nîmes, 6 juin 2008, 23 p.
- Escadafal R., Bacha S., 1996, *Strategy for the dynamic study of desertification*, Document du projet « Veille satellitaire de la désertification en Tunisie méridionale », ORSTOM-CNT, pp.19-34.
- Fétoui M., 2011, *Évaluer et suivre la désertification en zones arides tunisiennes pour accompagner l'aide à la décision : dynamiques interactives « Climat-Homme-Espace-Ressource » via les paysages*, thèse de Doctorat de Géographie, Université Paul-Valéry Montpellier III, 441 p.

- Khatteli H., 1996, *L'érosion éolienne en Tunisie aride et désertique : analyse des processus et recherche des moyens de lutte*, Thèse de doctorat Ph. D., Faculté des sciences agronomiques et biologiques appliquées de l'Université de Gent, Gent (Belgique), 180 p.
- Loireau M., 1998, *Espace-Ressources-Usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien*, Thèse de doctorat en Géographie, Université Paul-Valéry Montpellier III, Montpellier (France), 411 p.
- Loireau M., Laques A-E., Derioz P., Callot Y., Delaitre E., Dessay N., Fargette M., Fétoui M., Midja D., Neyra M., Sghaier M., Venard C. Wilson G., 2009, « Des observatoires environnementaux plus souples et plus légers au service du développement des zones difficiles à l'heure de la mondialisation et du changement climatique : propositions méthodologiques et place du paysage », colloque international : Sociétés en transition et développement local en zones difficiles, IRA Jerba-Tunisie, les 22-24 avril 2009.
- Loireau M, d'Herbès J.M., Leibovici D., Desconnets J.C. & Granouillac B. 2007. *An ICS for desertification monitoring in Africa Circum-Saharan zone: focus on one of its components, the SIEL-ROSELT*, in Seminar Proceedings ; Role of Information Circulation Systems in scientific and practical approaches to combat desertification. AIDCCD. Windhoek and Ondangwa, Namibia, 2-7 April 2006. pp 81-92.
- Loireau M., Sghaier M., Fétoui M., Ba M., Abdelrazik M., d'Herbès J.-M., Desconnets J.-C., Leibovici D., Debard S., Delaitre E. 2007 Système d'Information sur l'Environnement à l'échelle locale (SIEL) pour évaluer le risque de désertification : situations comparées circum-sahariennes (réseau ROSELT). In « Science et changements planétaires / SECHERESSE », Volume 18, Numéro 4 « Surveillance à Long terme dans les zones arides et semi-arides », pp 328-335.
- MEAT, 1996, *l'état de l'environnement 1996 en Tunisie*, Rapport national, MEAT, Tunis (Tunisie), 118 p.
- Ministère de l'Agriculture, 1991, *Étude de l'impact des actions de développement et de la lutte contre la désertification*, Rapport final du Projet TUN/88/004, Tunis (Tunisie), 130 p.
- Ouessar M., Tâamallah H., Ouled Begacem A., 2006, « Un environnement soumis à des fortes contraintes climatiques », In : Genin D., Guillaume H., Ouessar M., Ouled Belgacem A., Romagny B., Sghaier M., Tâamallah H. (ed.), *Entre désertification et développement : La Jeffara tunisienne*, Cérès éditions, Tunis (Tunisie), pp. 23-32.
- ROSELT/OSS DS3, 2004, *Concepts et méthodes du SIEL - ROSELT/OSS*, Document scientifique DS n°3, Collection ROSELT/OSS, Montpellier (France), 69 p.
- Sghaier M., Fétoui M., Tbib A., 2007, « Contribution à l'analyse des évolutions des systèmes "population -exploitation des ressources naturelles" dans l'observatoire de Menzel Habib (Sud-est de la Tunisie) », *Revue Science et changements planétaires Sécheresse : Surveillance environnementale à long terme dans les zones arides et semi-arides*, Numéro Spécial, Vol. 18, n°4. pp. 321-327.
- Souissi A., 2000, *Profil des pays méditerranéens. La Tunisie : enjeux et politiques d'environnement et de développement durable*, PNUE/Plan Bleu, Sophia Antipolis, Tunis (Tunisie), 64 p.
- Talbi M., 1993, *Contribution à l'étude de la désertification par télédétection dans la plaine de la Jeffara du sud-est tunisien*, Thèse de doctorat en Géographie, Université de Tunis, 305 p.