



**GESTION INTEGREE DE LA TERRE ET DE L'EAU
POUR L'ADAPTATION A LA VARIABILITE ET AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
AU MALI**

**Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face
aux risques climatiques**



Table des matières

Contexte	2
I. Risque de sécheresse	7
I.1. Cartographie du risque.....	8
I.2. Cartographie des biens exposés à la sécheresse.....	10
I.3. Evaluation de la vulnérabilité à la Sècheresse	11
I.4 Changement Climatique et risque de sécheresse	13
II. Risque de feux de brousses tardifs.....	14
II.1. Cartographie du risque.....	15
II.2. Cartographie des bien exposés aux feux de brousse tardifs.....	16
II.3.Evaluation de la vulnérabilité face aux feux de brousse tardifs.....	17
II.4. Changement climatique et risque de feux de brousse tardifs	17
III. Risque d'inondation.....	19
III.1.Cartographie du risque.....	19
III.2. Cartographie des Biens exposés aux inondations	22
III.3. Evaluation de la vulnérabilité face aux inondations	22
III.4.Changement climatique et feux de brousse	25

Liste des figures

Figure 1: Produits issus de la phase I du projet ILWAC (SI-GDTE et COS)	4
Figure 2: Schéma conceptuel de l'approche de cartographie de la vulnérabilité aux risques liés au climat.....	5
Figure 3: Les différents types de sécheresse et leur interaction (Source : OSS, 2004).....	7
Figure 4: Evolution de la pluviométrie au Sahel – Mali.....	8
Figure 5: Carte des indices pluviométriques pour l'année 1978.....	10
Figure 6: Carte des occurrences des années déficitaires en précipitations au niveau du Mali durant la période 1901 - 2011	10
Figure 7: Carte de vulnérabilité à la sécheresse à l'échelle nationale	12
Figure 8: Carte de la vulnérabilité face à la sécheresse au niveau du site test du Gourma.....	12
Figure 9: Carte de l'expansion des régions touchées par la sécheresse en Afrique selon le scénario A2 à l'horizon de 2090.....	13
Figure 10: Projection de l'évolution des précipitations au Mali (mois JAS)(Mc Sweeney et al. 2008) .	14
Figure 11: Histogramme de distribution spatiotemporelle des feux actifs au Mali de la saison 2009 – 2010, Bulletin AMESD, 2011.....	14
Figure 12: Carte de l'occurrence des feux de brousses tardifs au Mali	15
Figure 13: Carte de la vulnérabilité aux feux de brousse à l'échelle nationale.....	17
Figure 14: Carte de vulnérabilité aux feux de brousse au niveau du site test de Sikasso.....	18
Figure 15: Nombre d'inondations déclarées	19
Figure 16: Modèle numérique de terrain Figure 17: Réseau hydrographique Figure 18: Les eaux de surface au Mali	20
Figure 19: Seuillage des valeurs d'accumulation du flux	21
Figure 20: Carte des zones inondables du Mali.....	21
Figure 21: Cartes des biens exposés à l'inondation	22
Figure 22: Carte de vulnérabilité des puits, forages, forêts classées et agriculture aux inondations...	23
Figure 23: Carte de la vulnérabilité des routes et des aéroports aux inondations	23
Figure 24: Carte de vulnérabilité des villes et des villages aux inondations	24
Figure 25: Carte des zones inondables de Ségou	24

Liste des tableaux

Tableau 1: Liste des biens exposés selon le risque considéré.....	5
Tableau 2: Tableau de pondération vulnérabilité à la sécheresse	11
Tableau 3: Tableau de pondération vulnérabilité aux feux de brousse tardifs.....	17
Tableau 4: Tableau de pondération vulnérabilité aux inondations	22

Contexte

A l'instar des autres pays sahéliens, le Mali est largement tributaire des conditions climatiques et plus particulièrement de la pluviométrie. Le climat, de type intertropical continental, est caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche et d'une saison des pluies allant de 2 mois au Nord à 5-6 mois au Sud. La pluviométrie très irrégulière dans l'espace et dans le temps varie de moins de 100 mm au Nord à environ 1200 mm au Sud.

Depuis l'apparition des périodes de sécheresse en 1970, on observe l'instauration d'un climat plus aride sur l'ensemble du territoire, ainsi qu'une tendance à la diminution globale des pluies utiles et un déplacement des isohyètes de 200 Km vers le Sud. Ces conditions contribuent à fragiliser l'ensemble des écosystèmes et plus particulièrement ceux des zones sahéliennes et sahélo-soudanienne.

Pour soutenir les efforts du Mali dans la gestion des écosystèmes et des RN, l'OSS, fort de l'appui financier de la Banque Mondiale, a lancé depuis 2011 le projet national ILWAC qui vise la mise en place d'un système global, cohérent et intégré de gestion des informations et des données permettant le renforcement du partage des connaissances et des capacités en vue d'une prise de décision éclairée sur les questions liées à la gestion durable des terres et des risques liés au changement climatique.

Le projet ILWAC est structuré autour de trois composantes étroitement liées et interdépendantes.

La première composante (A) porte sur le développement d'un système d'information, y compris la collecte et la cartographie des données.

La deuxième composante (B) est axée sur l'analyse des données et l'évaluation de la vulnérabilité ainsi que la quantification du potentiel de séquestration carbone et l'identification des bonnes pratiques de GDTE. Il s'agit de réaliser des analyses spatiales à l'échelle nationale à travers des croisements de couches d'informations afin d'identifier les zones les plus vulnérables et choisir trois zones pilotes dans lesquelles une analyse de vulnérabilité sera mise en œuvre. Les bonnes pratiques de GDTE ont été identifiées, spatialisées et ajoutées au SIGDT. Le potentiel de séquestration de carbone a été quantifié avec le but de participer au mécanisme REDD+.

La troisième composante (C) est dirigée sur le renforcement des capacités, la formation et la sensibilisation. Une stratégie de communication a été élaborée pour compiler et diffuser les produits élaborés dans des composantes A et B, aux différentes parties prenantes et informer le grand public.

Les trois composantes sont étroitement liées et interdépendantes. En effet, La première phase du projet, portant sur la composante A, a permis de préparer le terrain pour la deuxième phase, notamment à travers le développement d'une SI-GDT qui intègre les différents produits de suivi et prévision climatique et hydrologique, d'infrastructure et de constructions, en plus d'activités des campagnes agricoles etc. Outre la mise à disposition de ces données, la première phase du projet a permis la réalisation de la cartographie d'occupation de sol (figure 1). Ces différents produits ont servi pour l'évaluation des risques sélectionnés pour l'étude (sécheresse, inondations et feux de brousse tardifs) et de la vulnérabilité des populations et des écosystèmes face à ces risques.

Ces différents produits permettent d'évaluer les risques sélectionnés pour l'étude (sécheresse, inondations et feux de brousse tardifs) et d'évaluer la vulnérabilité des biens exposés à ces risques.

En évaluant les risques liés au climat, et plus particulièrement ceux liés au phénomène extrême de précipitation (sécheresse et inondation), **la deuxième phase du projet** contribue à une gestion rationnelle des ressources en eau, en particulier les eaux pluviales.

Aussi, et en vue d'accompagner le Mali dans la mise en place d'un système de gestion de l'information environnementale au niveau national, le présent guide a été élaboré. Il permettra aux experts nationaux de mieux maîtriser les méthodologies employées dans ce projet et garantira de cette sorte la continuité des activités au niveau national.

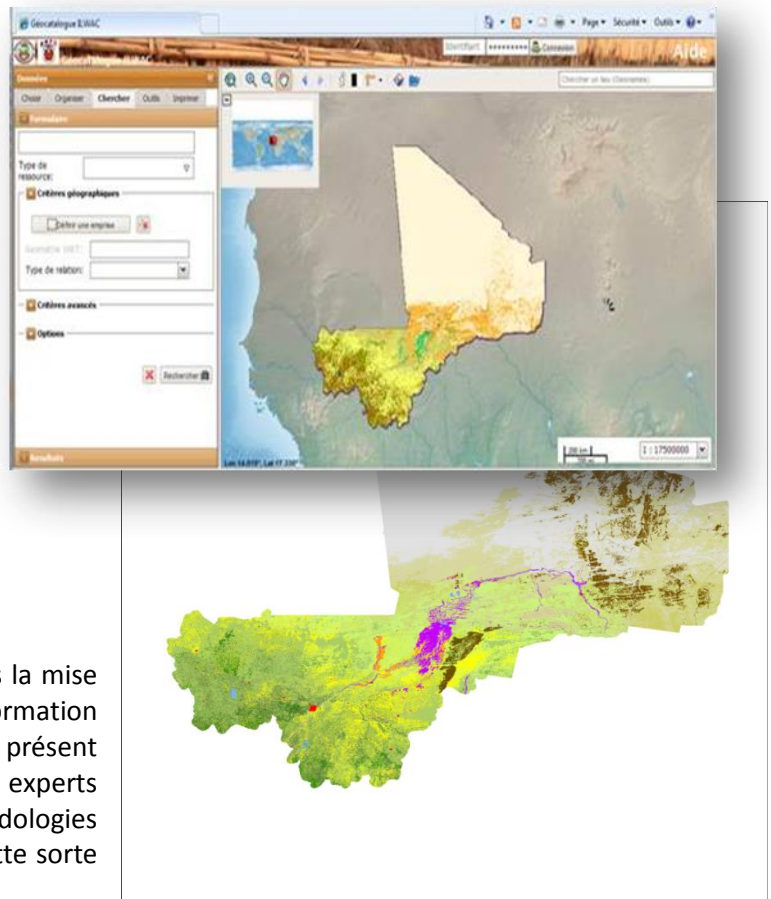


Figure 1: Produits issus de la phase I du projet ILWAC (SI-GDTE et COS)

L'approche méthodologique

Ce **guide méthodologique** présente l'approche appliquée pour analyser les risques liés au changement climatique et déterminer les zones les plus vulnérables.

En vue d'une meilleure appréciation des risques encourus par les écosystèmes et les populations, une méthodologie a été développée qui se repose sur les concepts de base décrit dans l'encadré 1 ci-dessous. Ceci se traduit par une approche à quatre étapes (figure 2) :

1) Cartographie des risques :

Cette étape porte sur l'analyse des trois risques liés au changement climatique : (i) le risque de sécheresse, (ii) le risque d'inondations et (iii) le risque de feux de brousse tardifs.

Pour analyser la probabilité d'occurrence de l'événement, sa magnitude/intensité et sa distribution spatiale, des données historiques sont traitées et spatialisées. Le résultat de cette analyse est la cartographie du risque. Cette cartographie est réalisée **au niveau national à l'échelle 1 :200.00** et **au niveau local à l'échelle 1 :100.00**. Elle est réalisée pour le niveau local sur trois sites pilotes avec une analyse détaillée pour chaque risque. Ainsi, prenant en considération les problématiques majeures de chaque site, les études ont été distribuées comme suit :

- Risque d'inondation : site test de la ville de Ségou,
- Risque de feux de brousse tardifs : site test de Sikasso
- Risque de sécheresse : site test de Gourma.

2) Cartographie des biens exposés :

Pour considérer les biens susceptibles d'être affectés par les risques d'inondation, sécheresse ou feux de brousse tardifs, une liste des différentes ressources et matériaux affectés est conçue pour chaque risque en collaboration avec les experts nationaux et sur la base des données spatiales disponibles. (tableau1).

Tableau 1: Liste des biens exposés selon le risque considéré

Risques	Biens exposés
Sécheresse	Carte Occupation du Sol : Agriculture inondée et pluviale, Prairie hygrophile, savane arborée et arbustive et boisée, steppe arborée et herbacée, galerie
Inondation	Agriculture irrigué, agriculture pluviale, forêt classée, forages et puits Routes, aéroports, Zones d'habitation
Feux de brousse	Carte Occupation du Sol : savanes, forêts et steppe

3) Pondération de la vulnérabilité :

Les biens exposés sont différenciés en plusieurs classes pour faciliter l'estimation de leur vulnérabilité. Ainsi, avec l'appui des experts nationaux, une valeur de sensibilité et une valeur de capacité d'adaptation sont attribuées à chaque classe :

- Pour la sensibilité, des valeurs entre 1-3 sont données, 1 étant une valeur pour les biens exposés les moins sensibles et 3 pour des biens exposés les plus sensibles,
- Pour la capacité d'adaptation c'est le contraire : 1 est la valeur pour les biens exposés avec une très haute capacité d'adaptation et 3 est la valeur attribuée, pour les biens exposés avec une très basse capacité d'adaptation.

La somme des valeurs de sensibilité et de la capacité d'adaptation correspond au rang de la vulnérabilité du bien exposé. Ce travail a été fait en étroite concertation avec les partenaires nationaux pour tenir compte de la réalité terrain.

4) Evaluation de l'impact du changement climatique sur l'intensité des risques étudiés.

Cette étape se base sur l'application des différents scénarios climatiques attendus sur les paramètres qui définissent le risque permettant de prédire la réponse des écosystèmes et des populations face aux mutations climatiques. Etant donné qu'au niveau national et local les scénarios sont encore très vagues, dans le cadre de cette étude, l'étape quatre se limite à la présentation générale de l'impact possible du changement climatique sur les risques liés au climat.

Cette étape pourrait aussi être étendue à la production de cartes des risques selon les scénarios prévus à l'horizon de l'année 2060 et 2090 tout en prenant en considération l'augmentation de la température et le décalage des isohyètes.

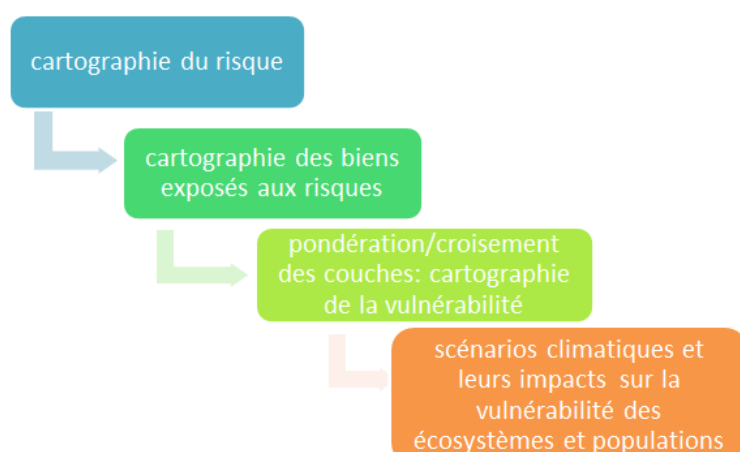


Figure 2: Schéma conceptuel de l'approche de cartographie de la vulnérabilité aux risques liés au climat

Encadré 1 : Concepts de base

Risque : Dans notre cas, c'est le risque qui résulte d'un phénomène naturel extrême, en particulier lié au climat. Le risque est la résultante de trois facteurs : la probabilité d'occurrence de l'événement, sa magnitude/intensité, et sa distribution spatiale. Le risque exprime la potentialité de pertes que peut subir une société humaine exposée à des aléas et dont la dimension de l'impact dépendra également des conditions de vulnérabilité existantes.

Risques liées au changement climatique

Les risques d'inondation, de feux de brousse tardifs et des sécheresses sont d'origine hydrométéorologique. Le GIEC 4 (2007) a fait le constat que le changement climatique aura pour conséquence l'augmentation de la température moyenne et l'élévation du niveau de la mer et des changements dans les précipitations annuelles et saisonnières. L'impact de ces changements sur les risques environnementaux est donc inéluctable.

Éléments exposés au risque : Les éléments exposés se rapportent ainsi aux éléments d'un milieu, matériels ou pas, susceptibles d'être affectés par un risque de d'origine naturelle ou anthropique et de subir des dommages. Il s'agit de la population, des bâtiments et travaux d'ingénierie civile, de l'activité économique, des services publics, des infrastructures à risque dans une région donnée.

Sensibilité : Degré auquel un système exposé est touché par les impacts du risque. Par exemple les dommages causés par les inondations sont plus grand pour une maison sensible que par une maison moins sensible. La maison moins sensible peut absorber des perturbations tout en conservant sa structure de base et ses modes de fonctionnement alors que la maison sensible est détruite.

Capacité d'adaptation ; se définit comme la totalité des possibilités, des ressources et des institutions propres à un pays, à une région, à une collectivité ou à un groupe, servant à mettre en œuvre des mesures efficaces d'adaptation, comme par exemple l'ajustement des systèmes naturels ou des systèmes humains face à un nouvel environnement ou un environnement changeant, et/ou sa réhabilitation après l'occurrence d'un hasard.

Notion de vulnérabilité ; Etroitement liée à la notion de risque, la vulnérabilité représente la mesure dans laquelle un système est sensible aux dommages – et incapable de faire face – aux effets défavorables du risque (dans le cadre de notre étude : inondation, feu de brousse tardif, sécheresse). C'est en fait une notion qui met en exergue l'inégalité des dommages et pertes des différents écosystèmes, des sociétés humaines et des et des infrastructures face à un phénomène donné. Pour une même exposition, l'impact peut être différent. La vulnérabilité d'une unité d'exposition est une fonction de

- la nature, de l'ampleur et du rythme du risque ;
 - l'exposition à ce risque ;
 - la sensibilité de ce système ;
 - et de sa capacité d'adaptation.
-
-

I. Risque de sécheresse

Définition :

En l'absence d'une définition universelle de la sécheresse, cette dernière peut être définie comme un phénomène récurrent du climat qui diffère des autres fluctuations climatiques par le fait qu'elle s'installe lentement et se développe au cours des mois voire même des années. Elle peut être comprise comme une situation temporaire caractérisée par un manque de précipitations par rapport aux valeurs normales. La sécheresse n'admet pas une définition précise et incontestée.

Des centaines de définitions de la sécheresse ajoutent à la confusion lorsqu'il s'agit de savoir si l'on a vraiment affaire à un épisode de sécheresse et de déterminer son degré d'intensité. Ces définitions devraient intéresser des régions, des applications ou des incidences particulières : la sécheresse est en effet un phénomène d'envergure régionale.

Mais d'une façon générale, selon l'Organisation Mondiale de Météorologie, ce fléau peut être défini comme étant une période prolongée de précipitations insuffisantes, normalement une ou plusieurs saisons, voire années, qui causent un déficit d'eau dans certains secteurs de l'économie d'un pays. Cette sécheresse doit être considérée par rapport à :

- Certaines conditions moyennes à long terme du bilan final des précipitations et de l'évapotranspiration dans une région particulière,
- L'échelle temporelle
- L'efficacité des précipitations.

L'Organisation Mondiale de Météorologie classe la sécheresse en trois types. En effet, La sécheresse n'a pas toujours la même signification pour un responsable de la gestion des ressources en eau, un exploitant agricole, un opérateur de centrale hydroélectrique et un biologiste spécialiste de la faune et de la flore sauvages (OMM, 2006).

Il existe, de ce fait, trois types de sécheresse : la sécheresse météorologique, la sécheresse agricole et la sécheresse hydrologique.

La sécheresse météorologique : renvoie à un manque de précipitations dans la durée. **La sécheresse agricole** se produit lorsque l'humidité du sol est insuffisante pour subvenir aux besoins des cultures, des pâturages et des espèces des parcours.

On parle de **sécheresse hydrologique** lorsque des niveaux d'eau inférieurs à la moyenne dans les lacs, les réservoirs, les fleuves, les cours d'eau et les eaux souterraines ont un impact sur les activités non agricoles comme le tourisme, les loisirs, la consommation d'eau en zones urbaines, la production d'énergie et la conservation des écosystèmes (figure 3).

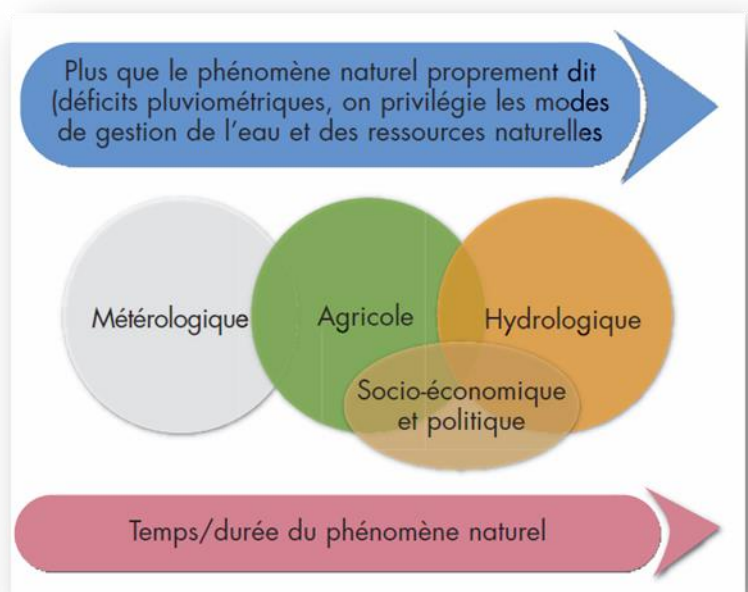


Figure 3: Les différents types de sécheresse et leur interaction (Source : OSS, 2004)

Impact :

Il apparaît ainsi que la sécheresse est l'une des catastrophes naturelles les plus complexes dont les impacts touchent différents secteurs, économiques, sociaux et environnementaux.

L'impact de la sécheresse comprend une composante naturelle et une autre sociale. Le risque qui y est associé n'est pas encore bien compris. Par conséquent, la sécheresse est souvent un risque moins visible dont les pertes et les impacts ne sont pas enregistrés systématiquement. Au niveau mondial, les normes pour mesurer le risque de sécheresse ne sont introduites qu'avec beaucoup de lenteur et la collecte des données soulève beaucoup de difficultés.

A ce jour, il n'existe pas encore de modèle crédible du risque mondial de sécheresse. En effet, les études montrent que les impacts de la sécheresse ne peuvent être qu'en partie attribués à une pluviosité déficitaire. Une multitude de facteurs y sont intégrés comme l'accroissement de la demande d'eau et sa mauvaise gestion, la croissance de l'agro-industrie, la faiblesse ou l'inefficacité de la gouvernance etc.

Au Mali, en 27 ans (1980-2007), le pays a connu cinq (05) épisodes majeurs de sécheresse ; ce qui a engendré une dégradation de l'environnement et des ressources naturelles comme le tarissement des points d'eau, l'abaissement du niveau de la nappe phréatique, l'élévation des températures, la perturbation de la biodiversité, la baisse de la productivité et de la production.

Le débit moyen du fleuve Niger a passé de 1300 m³/s en 1978 à 895 m³/s en 2002 à cause de la baisse de la pluviométrie.

Ainsi, le régime pluviométrique est très affecté par la variabilité et les changements climatiques (figure 4).

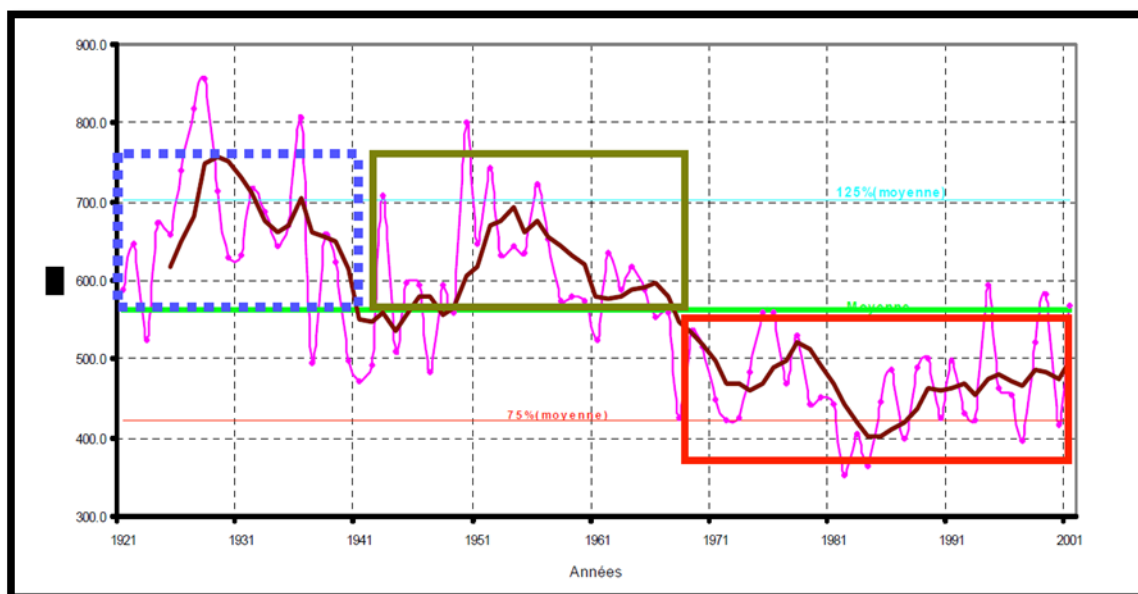


Figure 4: Evolution de la pluviométrie au Sahel – Mali
Source : Direction Nationale de la Météorologie (DNM)

I.1. Cartographie du risque

En rapport avec le changement climatique, la sécheresse constitue la problématique la plus importante au Mali. En effet, dans cette étude, l'accent est mis sur l'analyse conduite sur les indicateurs de suivi de sécheresse.

Un inventaire des indices de sécheresse a donc été effectué (Annexe 1) et leur calcul au niveau du Mali a été étudié. Ceci a permis de dégager l'indice le plus adapté au contexte du pays. .

L'indice pluviométrique IP a été sélectionné comme base pour cette étude en raison de la disponibilité des données pluviométriques et compte tenu du rôle déterminant de ce paramètre dans la sécheresse.

Les données de précipitation mensuelles pour la période 1901 – 2011 téléchargées à partir de la base de données de la CRU TS_{3.2} (Climatic Research Unit time-series),¹ sont utilisées pour calculer l'Indice de Pluviométrie (IP) selon la formule suivante:

$$IP = (X_i - X_m) / S$$

Avec :

- Les moyennes annuelles: X_i
- La moyenne interannuelle (période de référence): X_m
- L'écart-type interannuel (période de référence): S

Les valeurs d'IP obtenues ont ensuite été classées en vue d'élaborer les cartes des indices pluviométriques annuels durant la période étudiée :

- Inférieur à -1 : **Déficitaire**
- Entre -1 et -0.6: **Moyennement déficitaire**
- Entre -0.6 et -0.2: **Faiblement déficitaire**
- Entre -0.2 et 0.2: **Normale**
- Entre 0.2 et 0.6: **Faiblement excédentaire**
- Entre 0.6 et 1 : **Moyennement excédentaire**
- Supérieur à 1: **Excédentaire**

Encadré 2: Climatic Research Unit (CRU) time-series datasets (CRU –TS_{3.2})

La CRU TS_{3.2} représente une base de données des variations mensuelle du climat au cours du siècle dernier ou plus. Ces données sont calculées à une haute résolution à un pas de grilles de 0.5 degré et sont fondées sur une archive de températures moyennes mensuelles fournies par plus de 4000 stations météorologiques réparties dans le monde entier. Ceci permet l'étude des variations climatiques et comprennent des variables telles que la couverture nuageuse, la gamme des températures diurnes, la fréquence des jours de gel, les précipitations, la température moyenne journalière, la température mensuelle moyenne journalière maximale, la pression de vapeur et la fréquence des journées humide.

¹http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_1256223773328276

Des scripts exécutés avec la bibliothèque GDAL(Geospatial Data Abstraction Library)²ont été développés pour mettre en évidence les zones déficitaires en pluviométries (figure5).

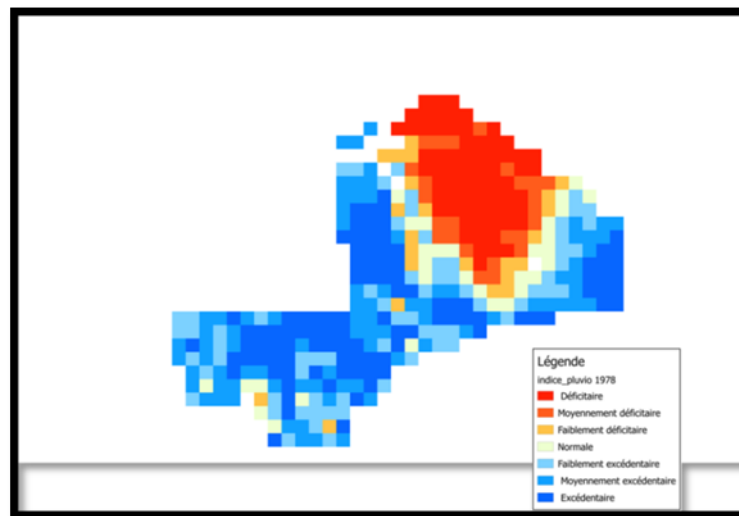


Figure 5: Carte des indices pluviométriques pour l'année 1978

Sur la base des cartes des indices pluviométriques, un calcul des occurrences de sécheresse a été effectué pour la réalisation de la carte des occurrences des années déficitaires en pluviométrie (figure 6).

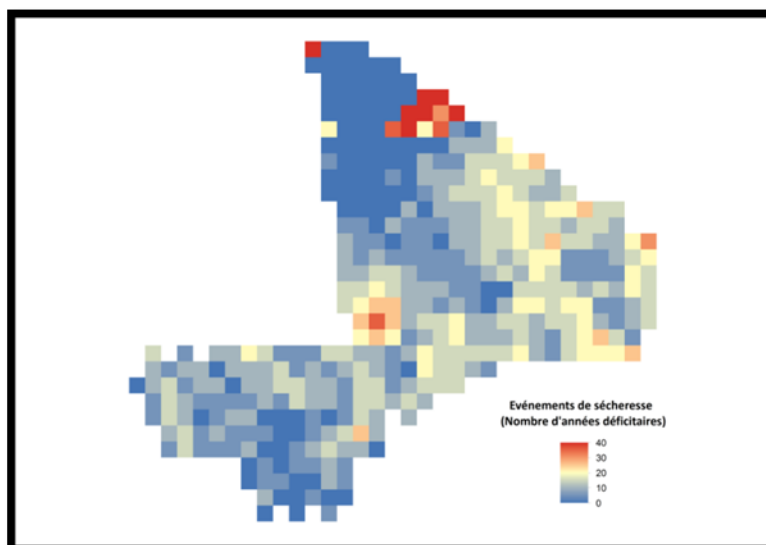


Figure 6: Carte des occurrences des années déficitaires en précipitations au niveau du Mali durant la période 1901 - 2011

I.2.Cartographie des biens exposés à la sécheresse

Les pertes occasionnées par la sécheresse touchent aussi bien les aspects écologiques (dégradation du couvert végétal et du sol, le tarissement des puits etc.) que socio-économiques (paupérisation, insécurité alimentaire, conflits etc.).

Cette étude se limite aux impacts de la sécheresse sur l'occupation du sol, notamment sur l'agriculture, la végétation naturelle et le bétail.

²<http://www.gdal.org/>

La carte d'occupation du sol a été établie au cours de la 1^{ère} phase du projet. Son élaboration s'est basée sur une classification multi-dates (environ 4 images par scène) assistée par la photo-interprétation d'images très hautes résolutions (Google earth). Par ailleurs, la collecte et la mise en forme des données disponibles sur l'occupation du sol des années 1990 et 2000 (MDA) ainsi que celles de la végétation (PIRL et PIRT), ont permis d'élaborer des cartes sur l'évolution de l'occupation, en combinant les produits réalisés dans le cadre du projet et ceux de la MDA.

I.3. Evaluation de la vulnérabilité à la Sècheresse

Cette étape, comme signalée plus haut, consiste à attribuer des valeurs pour les paramètres sensibilité et capacité d'adaptation des éléments exposés aux risques. La vulnérabilité est la somme de ces valeurs, qui tiennent largement compte de la réalité terrain (tableau 2).

Tableau 2: Tableau de pondération vulnérabilité à la sècheresse des biens exposés

bien exposé	classification	Sensibilité (1-3)	capacité d'adaptation (3-1)	Vulnérabilité (1-6)	Classe de vulnérabilité	Rang
Forêt	Forêt claire	1	1	2	Faible	4
	Forêt denses sèches	1	1	2	Faible	
	Forêt galerie de type guinéen	2	1	3	Moyenne	
	Forêt galerie de type sahélien	2	3	5	Forte	
Savane	Savane arborée	1	2	3	Moyenne	5
	Savane boisée	1	2	3	Moyenne	
	Savane arbustive	3	1	4	Moyenne	
	Savane verger	1	3	4	Moyenne	
Steppe	Steppe arborée	2	2	4	Moyenne	5
	Steppe herbacée	3	1	4	Moyenne	
Systeme de production	Agriculture pluviale	3	3	6	Très Forte	6
	Agriculture inondée	2	2	4	Moyenne	

La carte de vulnérabilité qui en résulte montre clairement les zones vulnérables à la sècheresse en fonction du degré de leur sensibilité (figure 7).

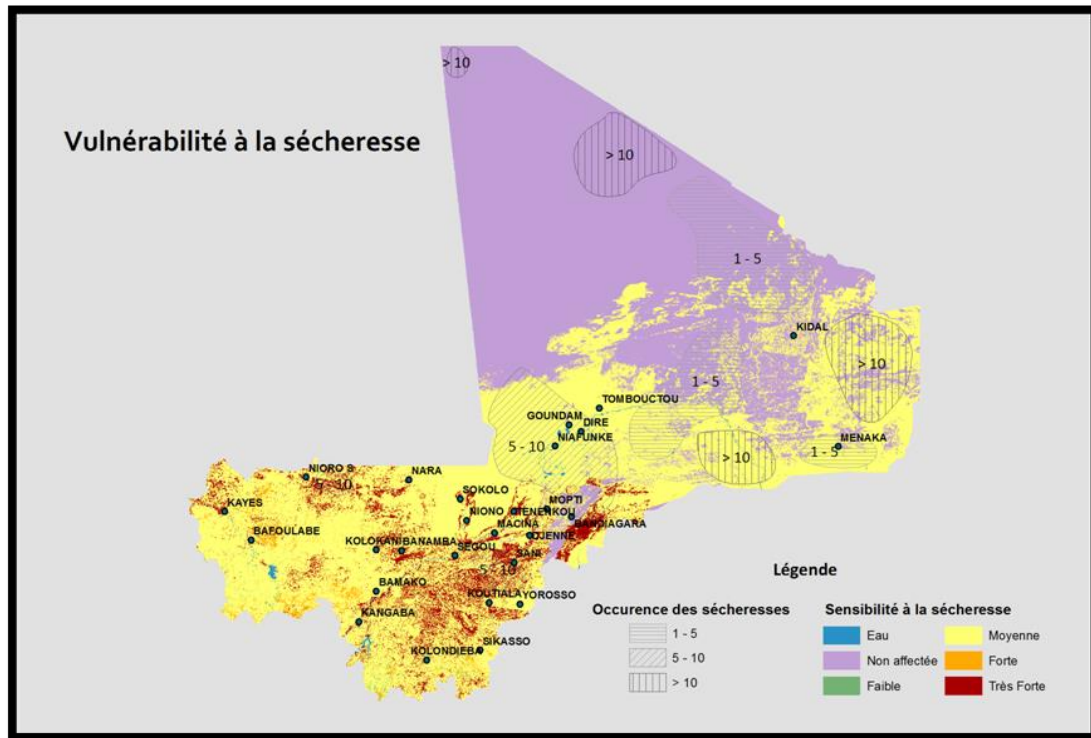


Figure 7: Carte de vulnérabilité à la sécheresse à l'échelle nationale

Sur la base de cette carte, la zone de Gourma, montrant une grande vulnérabilité à la sécheresse, a été sélectionnée pour une étude plus pointue (figure 8).

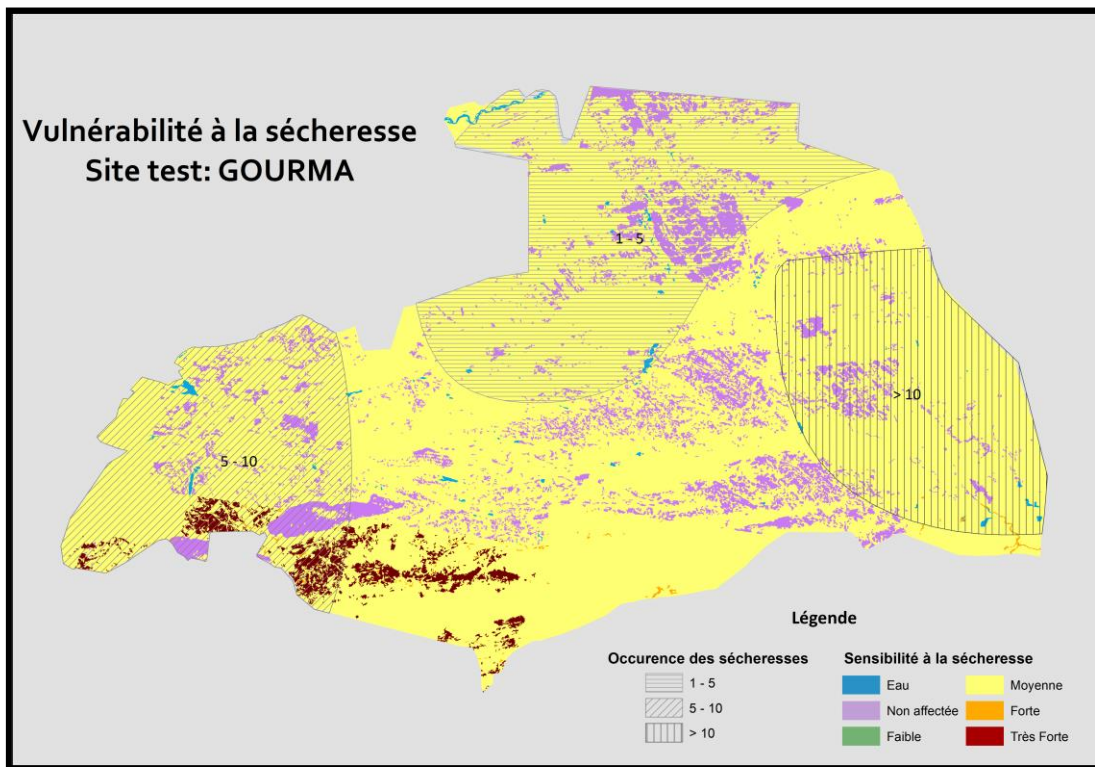


Figure 8: Carte de la vulnérabilité face à la sécheresse au niveau du site test du Gourma

I.4. Changement Climatique et risque de sécheresse

Dans un cadre marqué par le changement climatique, la situation des pays sub-sahariens suscite une préoccupation particulière, en raison du niveau de pauvreté et de la dépendance des précipitations. Le Mali, à l'instar des pays de la sous-région, est caractérisée par une forte variabilité aussi bien spatiale que temporelle des paramètres climatiques, les précipitations en particulier. Le GIEC prévoit une augmentation de la température, une baisse des systèmes pluviométriques et une augmentation de la fréquence et l'ampleur des phénomènes climatiques extrêmes.

Une augmentation de la température médiane de 3-4 °C en 2080-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999 est très probable pour la plupart de l'Afrique dans toutes les saisons. Ceci représente 1,5 fois plus les augmentations prévues au niveau global. Selon Mc Sweeney et al. (2008) une augmentation de la température de 1,2 à 3,6°C en 2060 et de 1,8 à 5,9°C en 2090 pour l'ensemble du pays est prévisible.

Par ailleurs, les projections du GIEC annoncent des augmentations des précipitations à des latitudes élevées et leurs diminutions dans les latitudes subtropicales. Ceci ne fera qu'accentuer la tendance actuelle au dessèchement de cette sous-région. Les changements climatiques devraient encore limiter la disponibilité d'eau en raison de la fréquence accrue des périodes de sécheresse, de l'augmentation de l'évaporation de l'eau et des changements des modèles de précipitation et de ruissellement.

Le climat du Mali est caractérisé par une grande variabilité inter annuelle et intra-saisonnière de la pluviométrie ainsi que par une grande variabilité à l'intérieur de chacune des quatre zones climatiques. La projection de l'évolution des précipitations au Mali (figure 9) montre que le régime pluviométrique au Mali sera très affecté par la variabilité et les changements climatiques.

La figure 9 montre que la menace de sécheresse provient partiellement de l'expansion de la région vulnérable à la sécheresse, comme le prévoit le centre Hadley. On devrait assister à une augmentation de la surface des zones arides et semi-arides de 60 à 90 millions d'hectares. À l'horizon 2090, dans certaines régions, le changement climatique pourrait avoir causé des dégâts extrêmes (figure10).

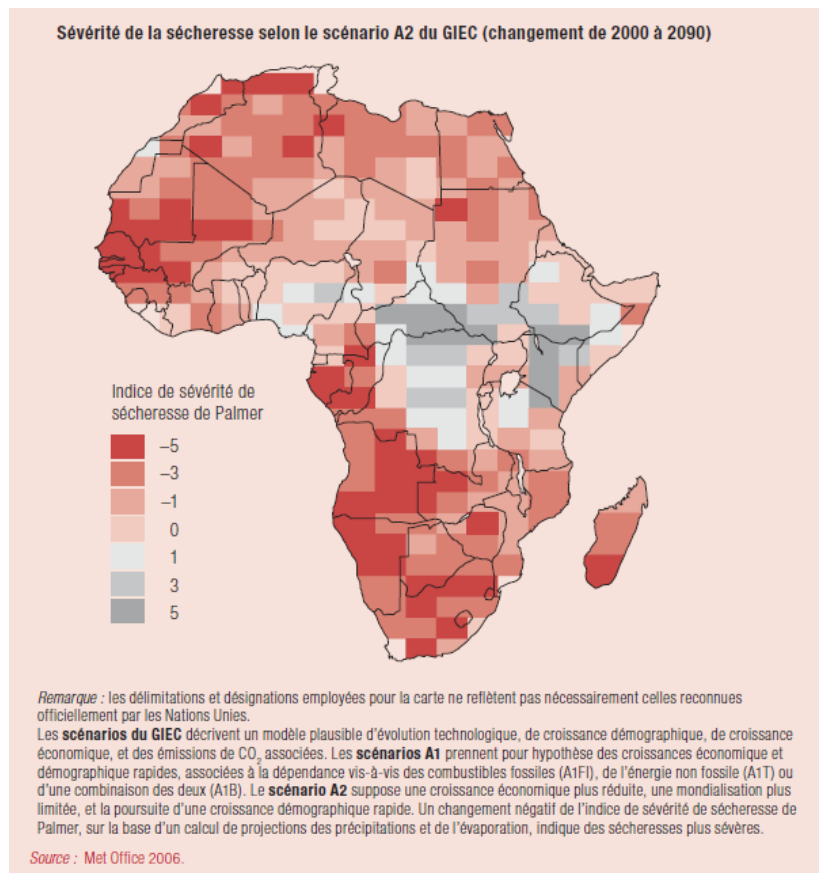


Figure 9: Carte de l'expansion des régions touchées par la sécheresse en Afrique selon le scénario A2 à l'horizon de 2090

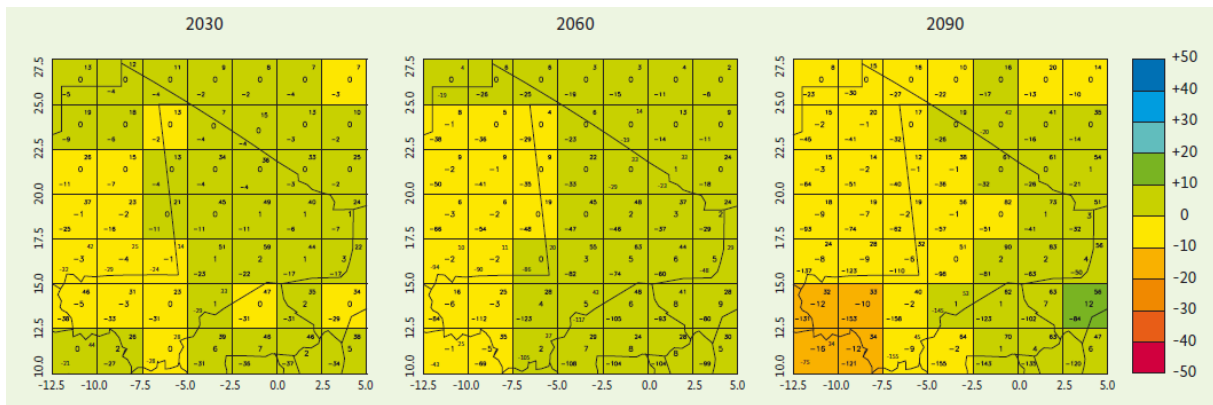


Figure 10: Projection de l'évolution des précipitations au Mali (mois JAS) (Mc Sweeney et al. 2008)

II. Risque de feux de brousses tardifs

Les feux de brousse en Afrique de l'Ouest, représentent un facteur clé dans la dynamique des paysages. Selon leur répartition spatio-temporelle (zones écologiques et période de l'année), les feux de brousse sont considérés comme un *fléau contre lequel il est indispensable de lutter* ou bien *outil de gestion et d'entretien du paysage* et qui permettrait à la population une utilisation durable des ressources de la brousse.

C'est à cause de ces multiples conséquences négatives que les différents états ont adoptés des mesures pour réglementer la mise du feu à la brousse. Pour mieux caractériser les feux et leurs impacts, les paramètres d'analyse comme la distribution, le temps, l'extension, la sévérité et la fréquence sont utilisés. La télédétection offre l'opportunité de faire des analyses spatio-temporelles pertinentes afin d'en déduire les éventuels impacts du phénomène.

Dans cette région de l'Afrique, les feux de brousse sont pratiqués pour : préparer des champs, stimuler la croissance d'herbe fraîche du bétail, se débarrasser des ravageurs, cultiver la terre à moindre coût. Cependant, ils présentent un risque pour la survie des écosystèmes et constituent un facteur important de dégradation des terres

Au Mali, les conséquences environnementales et socio-économiques sont marquantes. Bien qu'il n'existe que peu de statistiques sur les feux de brousse, déjà en 1987-90, les superficies brûlées représentaient 9 191 400 ha. Les feux tardifs qui surviennent durant la fin de la période sèche de Février à Mai représentent 63% des surfaces brûlées et demeurent une préoccupation et cela en dépit d'une législation adaptée au contexte de la décentralisation. Ils restent un danger de taille face au faible régime des pluies affectant l'environnement et les ressources naturelles (figure 11).

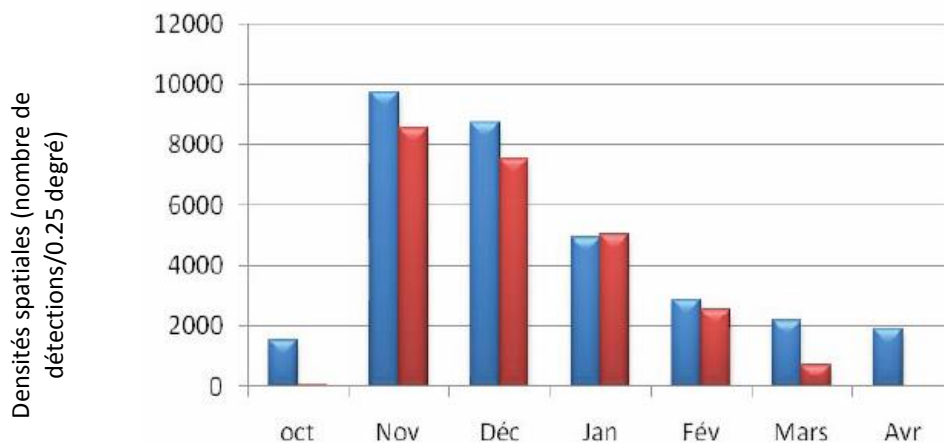


Figure 11: Histogramme de distribution spatiotemporelle des feux actifs au Mali de la saison 2009 – 2010, Bulletin AMESD, 2011

II.1. Cartographie du risque

La méthode utilisée dans le cadre de cette étude s'est appuyé sur l'utilisation des produits du programme MODIS³. Elle a consisté à dénombrer le nombre de pixels brûlés par mois au Mali au cours de la période 2000- 2013.

Concernant la répartition spatiale des feux de brousses, un dénombrement du total des pixels brûlés a été effectué au niveau de chaque arrondissement. Les différents traitements des données issues des satellites ont abouti à la réalisation des cartes mensuelles pour la période 2000 - 2013, une carte de synthèse des pixels affectés par les feux de brousses représentant les couches de distributions annuelles. Ces cartes ont servi pour l'élaboration de la carte d'occurrence des feux de brousses durant la période étudiée.

L'analyse de l'évolution temporelle des feux, basée essentiellement sur les statistiques enregistrées mensuellement pendant la période d'étude conjuguée à une bonne connaissance de la gestion des feux de brousses au niveau national a permis de qualifier le feu de précoce ou tardif selon la zone. Ainsi, une période de quatre mois allant de Février à Mai a été définie pour l'élaboration la carte d'occurrence des feux de brousses tardifs (figure 12).

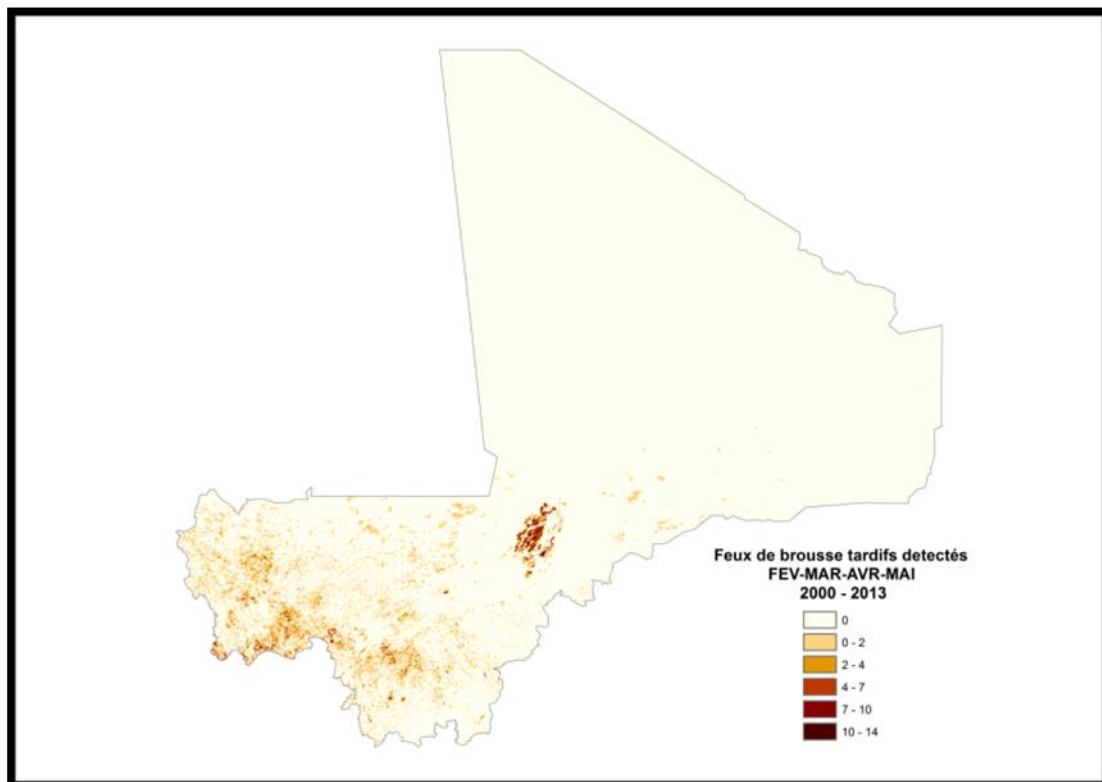


Figure 12: Carte de l'occurrence des feux de brousses tardifs au Mali

³http://modis-fire.umd.edu/BA_getdata.html#Download_2

Encadré 3 : Détection des feux de brousse par l'imagerie MODIS (Terra et Aqua)

Le satellite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est à ce jour l'outil le plus efficace pour la caractérisation de la distribution spatiale et temporelle des feux de brousse grâce à ses deux porteurs TERRA (T) et AQUA (A) qui appartiennent tous les deux au système EOS (Earth Observing System) de la NASA.

Ces satellites permettent d'avoir des données sur les feux actifs deux fois par jour. Le nombre élevé de bandes (36) permet de développer des algorithmes complexes dont la finalité est de mieux discriminer les feux des autres objets de surface qui pourraient avoir des caractéristiques spectrales similaires.

Les données sur les feux sont le résultat de l'application de l'algorithme contextuel de détection des feux actifs de MODIS (Giglio et al, 2003). Cet algorithme exploite la forte émission de la radiation infrarouge qui émane des feux. Il examine chaque pixel de la scène MODIS et attribue une étiquette à chacun suivant 6 classes : données manquantes, nuage, eau, non - feu, feu, ou inconnu.

Le traitement ne concerne que les pixels qui présentent une probabilité de contenir un événement de feu. Dans un premier temps l'algorithme élimine les pixels dont les propriétés thermiques ne peuvent correspondre à celles d'un incendie. Les pixels autour des pixels candidats sont examinés pour définir des seuils à travers des tests contextuels pour mieux déterminer l'existence ou non d'un point chaud correspondant à un feu (Mbow, 2004) De cette façon, les données MODIS ont pu fournir des informations spatiales et temporelles sur les événements de feu et les données ont été traduites sous formes de couches cartographiques (forma ASCII).

Les documents cartographiques existants numérisés et corrigés géométriquement (vecteurs) sont superposés aux couches cartographiques obtenues à partir de MODIS. Cette opération permet de déterminer des statistiques sur les surfaces brûlées et d'élaborer des cartes de la distribution spatiale des feux par arrondissement.

II.2. Cartographie des biens exposés aux feux de brousse tardifs

Les feux de brousse occasionnent beaucoup de dégâts à la fois sur le plan écologique à travers la dégradation des ressources naturelles et l'habitat de la faune sauvage et du bétail et sur le plan socio-économique par la destruction des infrastructures tels que les réseaux téléphonique et électrique.

Dans cette étude on se limite à l'étude de la vulnérabilité des savanes, des forêts et des steppes aux feux de brousse tardifs. Pour cela nous avons recours à la carte d'occupation des sols.

II.3. Evaluation de la vulnérabilité face aux feux de brousse tardifs

Tableau 3: Tableau de pondération vulnérabilité aux feux de brousse tardifs

Bien exposé	Classification	Sensibilité (faible:1-elevé:3)	Capacité d'adaptation (élevé:1-faible:3)	Vulnérabilité (1-6)	Classe de vulnérabilité	Rang
Type de forêt	dense-sèche	3	2	6	Très Forte	3
	Claire	2	2	4	Moyenne	
	Galerie	1	1	5	Forte	
Savane	Arborée	2	1	3	Faible	3
	Boisée	2	1	3	Faible	
	Arbustive	2	1	3	Faible	
Steppe	Arborée	3	1	4	Moyenne	5
	Herbacée	3	1	4	Moyenne	

La carte obtenue est la résultante du croisement de ces couches citées ci –dessus (figure 13).

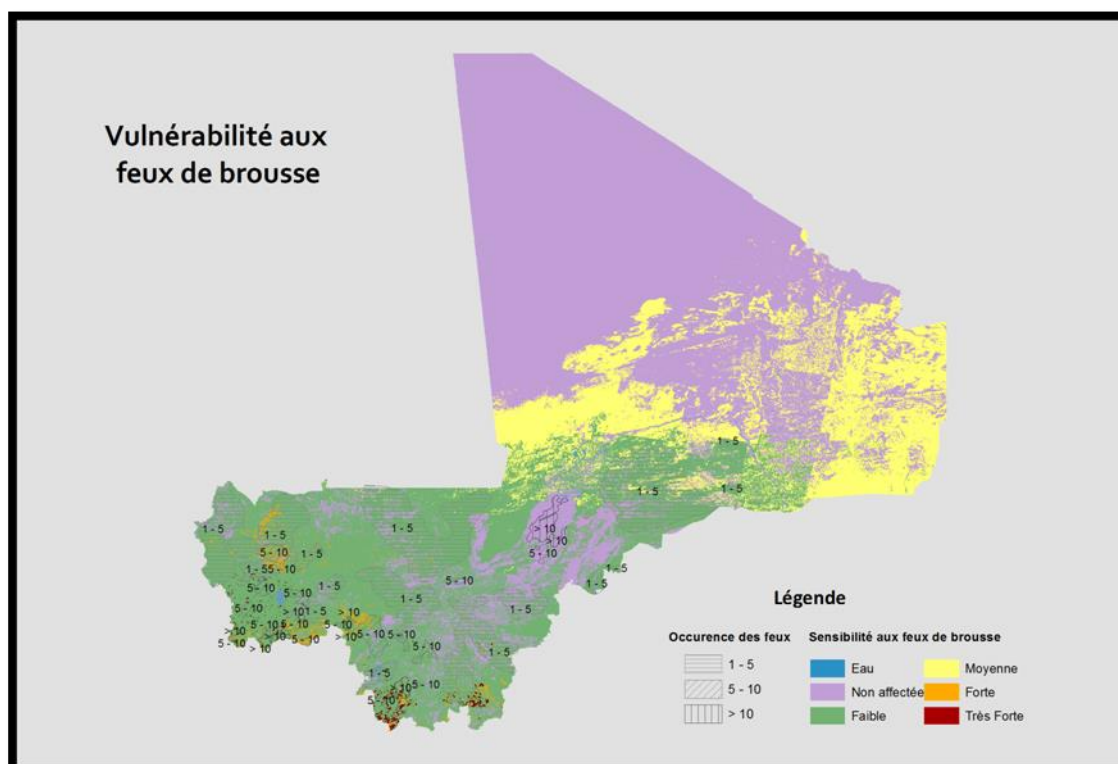


Figure 13: Carte de la vulnérabilité aux feux de brousse à l'échelle nationale

L'analyse de la carte montre que la zone la plus vulnérable aux feux de brousse est le sud du pays. La région de Sikasso a donc été sélectionnée pour cartographier à l'échelle locale la vulnérabilité aux feux de brousse (figure 14).

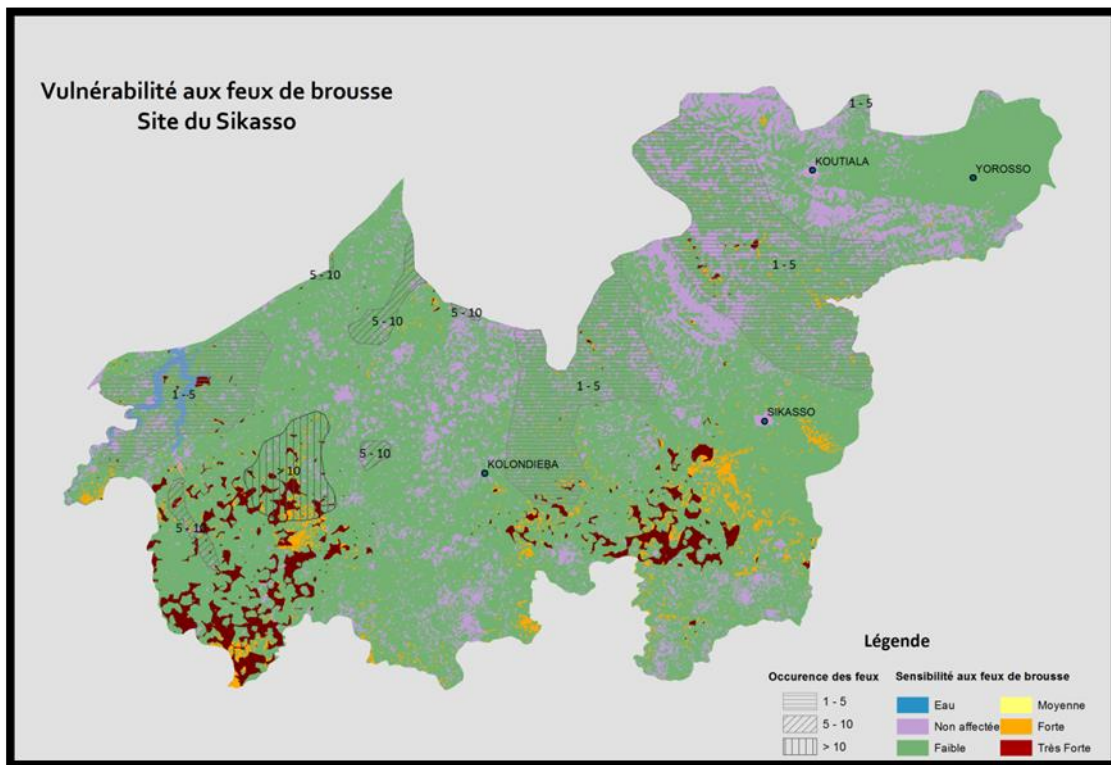


Figure 14: Carte de vulnérabilité aux feux de brousse au niveau du site test de Sikasso

II.4.Changement climatique et risque de feux de brousse tardifs

En général, les feux représentent l'un des facteurs qui influencent les écosystèmes. Les variabilités climatiques affectent de façon directe leur dynamique. Cette action se fait à deux pas de temps différents :

A long terme : en modulant la production primaire herbacée de l'année qui constitue l'essentiel du combustible ;

A court terme : les conditions météorologiques locales, pendant les feux ont une influence considérable sur leur dynamique.

La déclaration d'un feu et sa propagation au niveau de la végétation nécessite trois éléments : l'oxygène, le combustible et la chaleur. Toute modification apportée à ces trois composantes peut affecter la fréquence et l'intensité du feu. Le combustible, représenté dans notre étude par la végétation naturelle au niveau des savanes, des forêts et des steppes, est très sensible aux variations climatiques.

En effet, la teneur en humidité de ces combustibles est très importante pour déterminer le comportement du feu. Une haute teneur en humidité ralentira l'incendie parce que la plus grande partie de l'énergie thermique sera utilisée pour éliminer l'humidité dans les combustibles. Ainsi, l'augmentation de la durée et de l'intensité des saisons sèches dans la région, prévue par les scénarios climatiques du GIEC, vont augmenter la sensibilité de la végétation au feu. Les feux de brousse augmenteront en fréquence et en intensité et l'allongement de la durée des saisons sèches favoriseront les chances de déclenchement des feux de brousse tardifs.

III. Risque d'inondation

Les inondations représentent les catastrophes naturelles les plus fréquentes dans le monde. Leur fréquence et leur intensité ont considérablement augmenté, particulièrement au cours des 20 dernières années (figure15), non sans affecter les infrastructures et occasionnant d'importants dégâts financiers et économiques dans les zones touchées. Il est à signaler qu'au niveau mondial, 178 millions de gens ont été victimes d'inondations pour la seule année 2010.

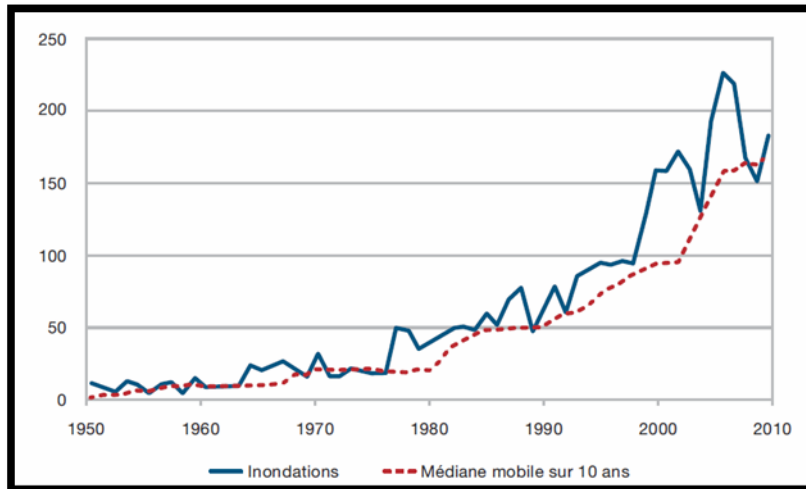


Figure 15: Nombre d'inondations déclarées

Source : D'après la base de données EM-DAT/CRED (Villes et inondations Guide de gestion intégrée du risque d'inondation en zone urbaine pour le XXI^e siècle)

Au Mali, les inondations sont fréquentes. De 1980 à 2007, le pays a subi 15 inondations, affectant environ 10 000 à 45 000 personnes à chaque événement. Elles surviennent aussi bien en milieu urbain que rural et constituent une des catastrophes auxquelles les autorités font face chaque année. Selon le profil environnemental 2006, celles de 1967 et de 2001 à Bamako ont été particulièrement graves.

En 2003, les inondations ont causé : 20 pertes en vie humaine, 6 052 habitations détruites, 12 000 ha de champs inondés, des routes et des ponts détériorés. Les dégâts sont estimés à 3,8 millions d'Euros en 2002 et à 5,9 millions d'Euros en 2003. En 2007, le nombre de personnes affectées a été estimé à 88 000 personnes dont la majorité dans le delta du fleuve Niger.

Pour les années 2002, 2003, 2007, 2008, les dégâts ont été évalués à près de 9 570 202 375 FCFA. Les inondations sont dues aux effets combinés de pluies exceptionnelles, le débordement des cours d'eau, l'installation anarchique des populations dans les zones de servitude des cours d'eau, la nature des matériaux de construction en grande partie en banco, le non-respect des normes de construction et le débordement de bancotières dans certains villages.

III.1. Cartographie du risque

Les inondations au Mali sont principalement causées par les crues inattendues des fleuves (Niger et éventuellement Sénégal) consécutives aux pluies torrentielles. Pour cela, la méthodologie proposée pour la cartographie de ce risque s'est reposée sur l'analyse de la dynamique et le comportement des cours d'eau suite aux pluies torrentielles, c'est-à-dire délimiter les zones dans lesquelles des inondations sont susceptibles de se produire suite à l'élévation du niveau de l'eau en tenant compte des variations de l'altimétrie du terrain. Comme le cas des autres risques, l'inondation a été cartographiée à l'échelle du pays ainsi que pour une zone pilote : la ville de Ségou.

La méthodologie proposée nécessite l'accès à deux types de données :

- Le modèle numérique de terrain :
 - Un SRTM⁴ de résolution 90 mètres pour tout le Mali.
 - Un ASTER GDEM⁵ de résolution 30 mètres pour la ville de Ségou (zone pilote).
- Les eaux de surface :
 - Cours d'eau générés par le modèle numérique de terrain (figure 16).
 - Plans d'eau détectés par les images haute résolution (extraits de la carte d'occupation du sol) (figures 17 et 18).

Encadré 4 : Les modèles numériques de terrain utilisés

Un MNT est une représentation de la topographie d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur.

SRTM

Shuttle Radar Topography Mission, fait référence à des données altimétriques recueillies par la NASA au cours d'une mission de 11 jours en février 2000 par la navette spatiale Endeavour (STS-99) à une altitude de 233 km en utilisant l'interférométrie radar.

Les données SRTM peuvent être obtenues à partir des serveurs du **CGIAR-CS**

ASTER GDEM

Advanced Space borne Thermal Emission Reflection Radiometer) sont des données satellites qui permettent d'obtenir des cartes détaillées de la température, de l'émissivité, de la réflectance, et de la topographie de la terre. Ces données sont obtenues par le capteur ASTER placé à bord du satellite Terra de la NASA, lancé en 1999 dans le cadre de son programme de l'observation de la Terre (Earth Observing System).

Les données DEM ASTER sont disponibles gratuitement et téléchargeables depuis l'interface **GDEx** de **LPDAAC(Land Processes Distributed Active Archive Center)**

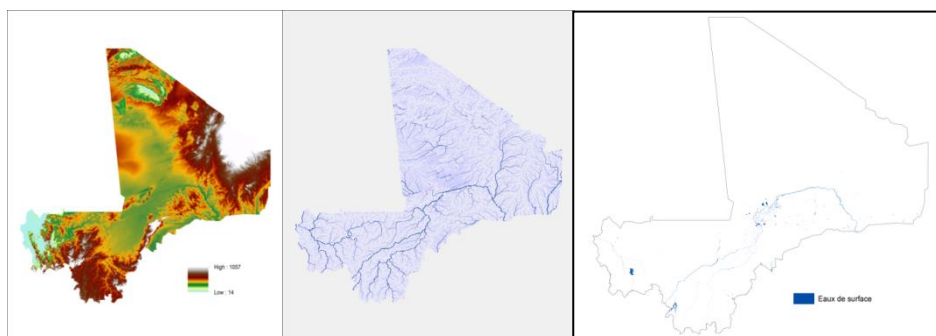


Figure 16: Modèle numérique de terrain

Figure17: Réseau hydrographique

Figure 18: Les eaux de surface au Mali

⁴<http://srtm.csi.cgiar.org/>

⁵<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>

Le relief et les processus de ruissellement sont intimement liés, au point qu'il semble possible de déduire l'un de l'autre. La démarche adoptée tente de modéliser certaines caractéristiques des processus hydrologiques en fonction d'une topographie connue. A partir du MNT, on a calculé l'accumulation du flux. C'est une grille qui représente le nombre de toutes les cellules s'écoulant dans chaque cellule en pente descendante.

Cette information nous donne une idée sur les parties du réseau hydrographique où l'écoulement est plus important et donc les plus sensibles en termes de crue (figure 19).

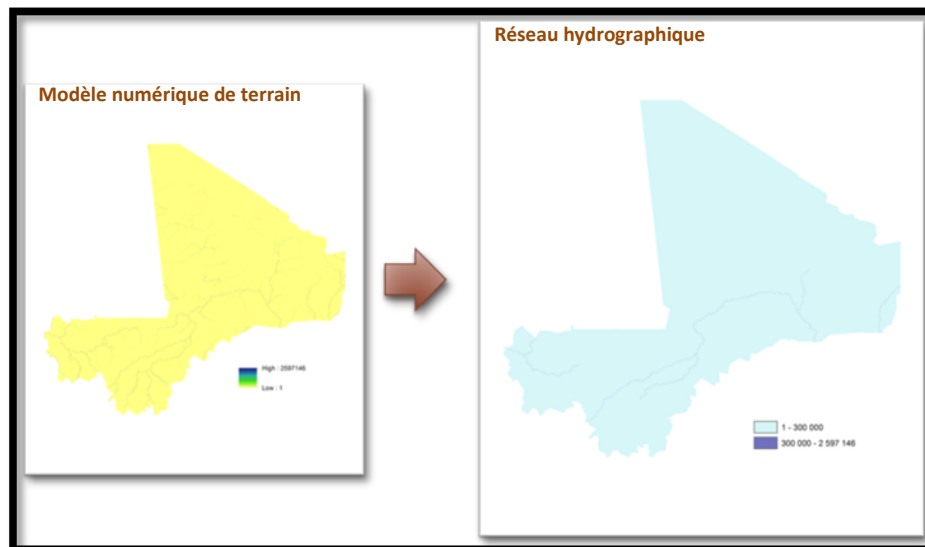


Figure 19: Seuillage des valeurs d'accumulation du flux

En superposant les données sur le réseau hydrographiques avec l'altimétrie, on peut identifier les niveaux que l'eau peut atteindre suite à une crue. Pour cartographier ces niveaux, on a élaboré trois seuils d'altitude : + 5m, +10m et +15m et délimiter les zones qui peuvent être inondées (figure 20).

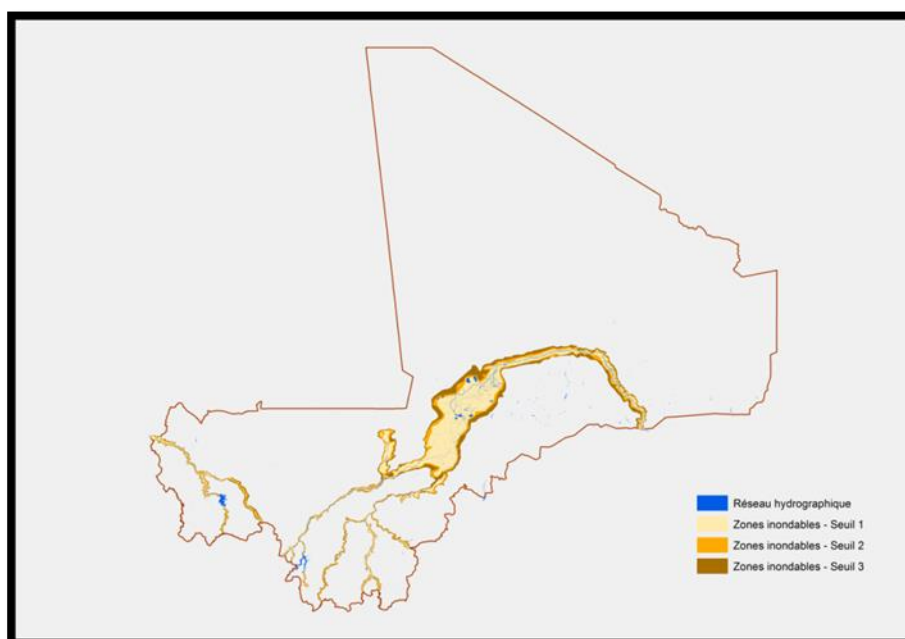


Figure 20: Carte des zones inondables du Mali

III.2. Cartographie des Biens exposés aux inondations

Dans le cadre de cette étude, l'évaluation du risque d'inondation portera sur les zones urbaines et les infrastructures. Pour cela les cartes représentant les villages, les réseaux routiers ainsi que la répartition des aéroports et aérodromes sont considérés (figure 21).

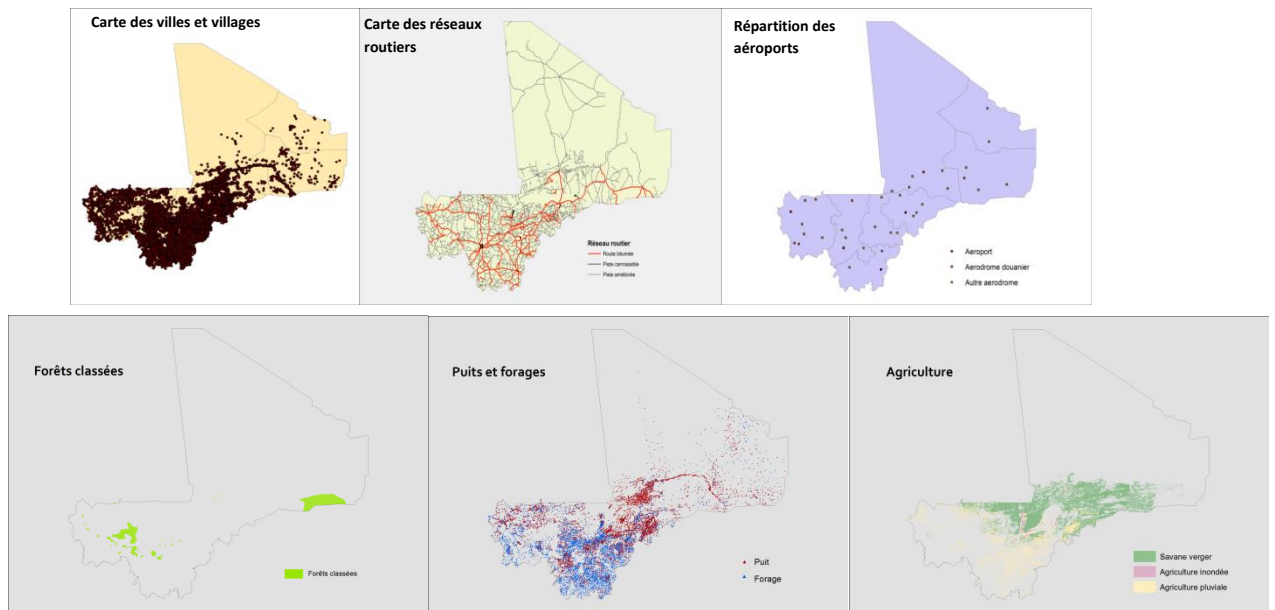


Figure 21: Cartes des biens exposés à l'inondation

III.3. Evaluation de la vulnérabilité face aux inondations

Tableau 4: Tableau de pondération vulnérabilité aux inondations

Bien exposé		Sensibilité (faible:1- élevé:3)	Capacité d'adaptation (élevé:1-faible:3)	Vulnérabilité (1-6)	Classe de vulnérabilité	Rang
Agriculture	Irriguée	1	3	4	Moyenne	6
	Pluviale	3	3	6	Forte	
	Savane verger	2	1	3	Faible	
Forages et puits	Forages	1	1	2	Faible	5
	Puits	3	2	5	Forte	
Routes	Route bitumée	2	3	5	Forte	4
	Piste carrossable	2	2	4	Moyenne	
	Piste rurale	2	1	3	Faible	
Zones habitation	Villes	1	1	2	Faible	4
	Villages	3	3	6	Faible	
Aéroport	Aéroports	2	3	5	Forte	2
Zones protégées	Forêts classées	2	2	4	Forte	4
	Aires protégées	1	2	3	Faible	

Deux produits ont été élaborés : une carte générale pour tout le Mali, divisée en 03 thématiques (Aéroports et routes / villes et villages / agriculture, forêts classées, puits et forages) (figure 22, 23 et 24) et une autre plus détaillée à l'échelle de la ville de Ségo (figure 25).

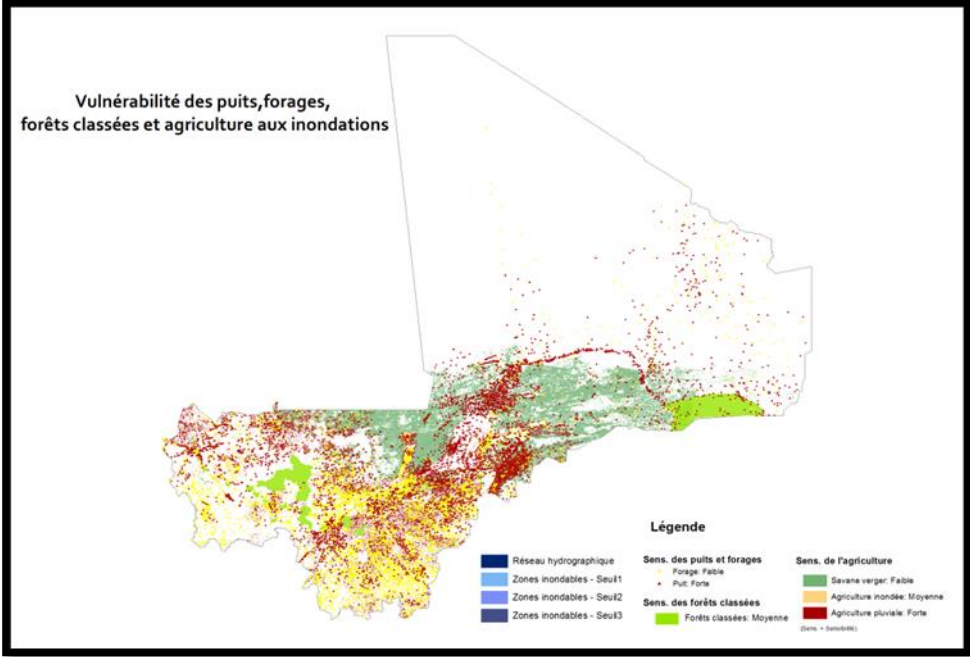


Figure 22: Carte de vulnérabilité des puits, forages, forêts classées et agriculture aux inondations

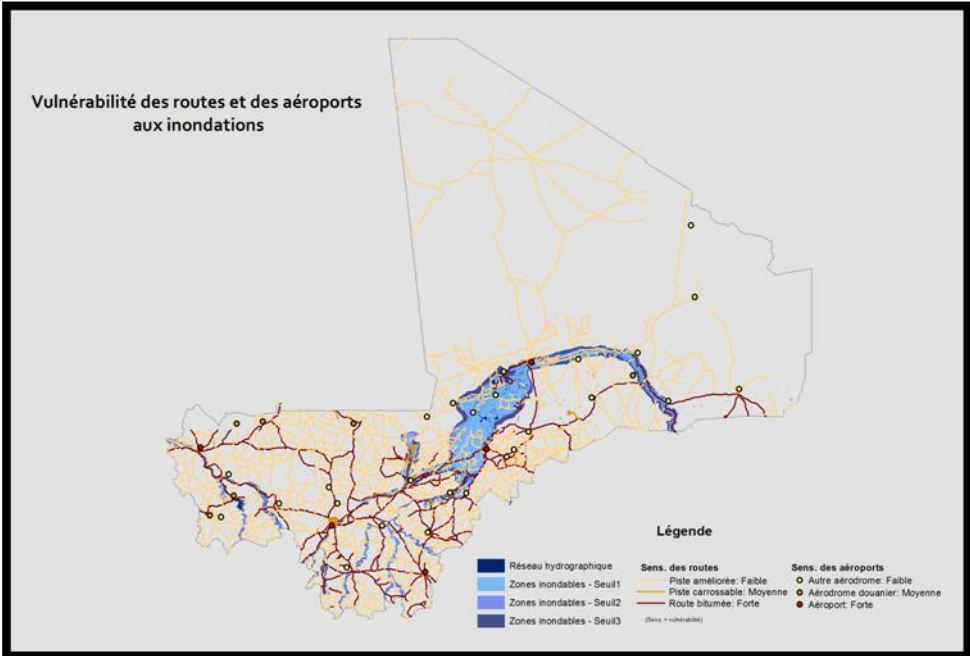


Figure 23: Carte de la vulnérabilité des routes et des aéroports aux inondations

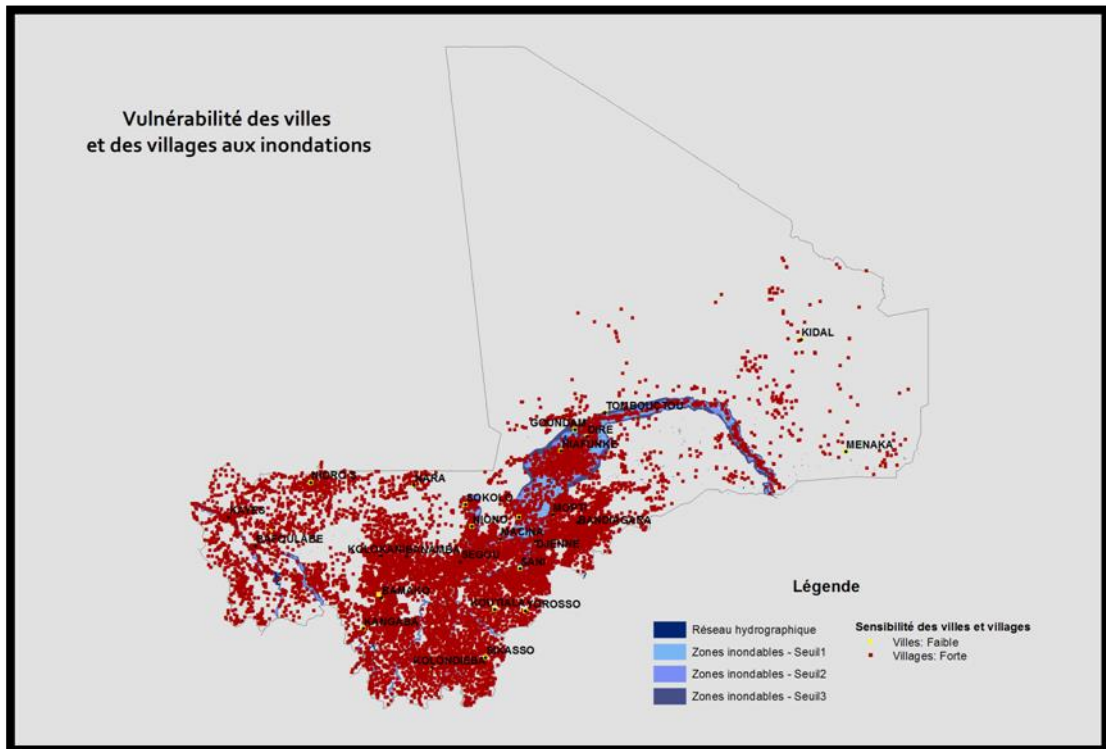


Figure 24: Carte de vulnérabilité des villes et des villages aux inondations

L'analyse de la dernière carte (figure 24) a permis de choisir la ville de Ségou pour la cartographie de la vulnérabilité aux inondations à l'échelle locale.

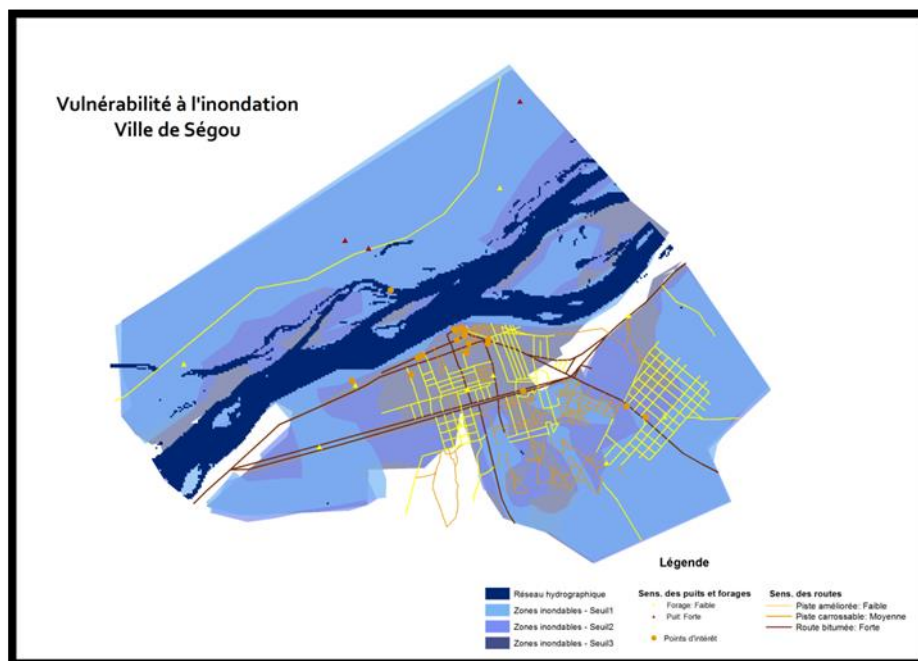


Figure 25: Carte des zones inondables de Ségou

III.4.Changement climatique et inondations

Selon les études dont on dispose, les épisodes de fortes pluies devraient grandement augmenter dans de nombreuses régions, y compris celles dans lesquelles on anticipe une diminution de la moyenne des précipitations. Le risque accru d'inondation qui s'y associe ne sera pas sans conséquence pour la société, les infrastructures physiques et la qualité de l'eau. Il est *probable* que jusqu'à 20 % de la population mondiale vivra dans des zones où le risque de crue des cours d'eau pourrait augmenter d'ici aux années 2080. Selon les projections, la multiplication et l'aggravation des inondations et des sécheresses nuiront au développement durable. Le réchauffement modifiera encore les propriétés physiques, chimiques et biologiques des lacs et des cours d'eau, le plus souvent au détriment de nombreuses espèces d'eau douce, de la composition des communautés et de la qualité de l'eau. Dans les zones côtières, l'élévation du niveau de la mer favorisera les facteurs de stress hydrique du fait de la salinisation accrue des eaux souterraines.

Conclusion

La méthodologie adoptée dans cette étude se base sur les standards internationaux mais a été adaptées au contexte malien aussi bien en termes de données et de de besoins. Cependant, elle reste valable pour d'autres applications et pourrait être perfectionnée selon la disponibilité des données.

Annexes

Annexe 1 : Inventaire des indices de sécheresse

Dans la revue bibliographique qui suit, est présentée une liste exhaustive des indices de sécheresse. Ces indices sont classés suivant quatre approches différentes :

- Approche traditionnelle
- Approche satellitaire
- Approche combinée
- Approche de modélisation physique

1.3.1. Approche traditionnelle :

Les indices issus de tests statistiques avec des données météorologiques

a. Indice de précipitations standardisé (SPI) :

Le SPI est un indice simple qui est calculée à partir de l'enregistrement à long terme de précipitations dans chaque emplacement (au moins 30 ans). Les données seront équipées d'une distribution normale et doivent être normalisées à une échelle souple multiple du temps.

Le SPI peut donner une alerte précoce de la sécheresse et de sa gravité, car il est spécifique pour chaque emplacement et est bien adapté pour la gestion des risques cependant son utilisation sur une longue échelle de temps pouvant atteindre 24 mois n'est pas fiable.

$$SPI = (p_i - p_m) / \sigma$$

P_i : Précipitation de l'année i

P_m : Précipitation moyenne

σ : Déviation standard ou écart type

McKee *et al.* (1993) a développé cet indicateur afin de faire ressortir l'impact de la période étudiée (ex. 1, 2, 3 mois) sur les différentes ressources en eau. Comme les réserves souterraines, les réservoirs, les dépôts neigeux ou les cours d'eau ne réagissent pas aux variations pluviométriques avec la même rapidité, la période de calcul du SPI fait ressortir l'effet de cette variation sur chacun de ces systèmes hydrologiques. À l'échelle temporelle d'une semaine, par exemple, la réponse du SPI est très variable. Une valeur négative, donc un déficit, ne représente pas pour autant une situation de sécheresse mais serait plutôt représentatif d'une situation de stress hydrique temporaire de la végétation. Des déficits hydriques de plus longues durées (3, 6 mois, 1 an, etc.) sont par contre nécessaires pour avoir un impact sur les ressources hydriques du sol ou sur les ressources en eau de surface (sécheresse hydrologiques).

b. Indice de précipitations évapotranspiration standardisé (SPEI)

Très utilisé, le SPEI remplit les conditions d'un indice de sécheresse puisque son caractère multi-scalaire lui permet d'être employé par différentes disciplines scientifiques pour détecter, surveiller et analyser des sécheresses. Comme le SPI, il peut mesurer la sévérité de sécheresse selon son intensité et durée, et peut identifier le début et la fin des épisodes de sécheresse. Le SPEI permet la

comparaison spatio-temporelle de sévérité de sécheresse, Le SPEI est statistiquement robuste et facilement calculé, et a un procédé clair et compréhensible de calcul.

c. Rapport à la normale des précipitations (RN)

Cet indice est exprimé mathématiquement en pourcentage comme suit :

$$\text{RN}(\%) = (\text{Pi}/\text{Pm}) \times 100$$

Pi est la précipitation de l'année i et Pm est la précipitation moyenne pour la même période de temps étudiée.

Ce rapport permet une estimation ponctuelle des précipitations par rapport à la normale : Une année est classifié comme sèche si la pluviométrie se situe au-dessous de la normale ; c'est-à-dire lorsque le RN est inférieur à 100 %.

Pendant, cet indice ne permet pas de faire la comparaison entre différentes régions. En outre, il ne peut pas identifier l'impact spécifique de la sécheresse ou le facteur d'inhibition pour les plans d'atténuation des risques de sécheresse.

d. La méthode des Déciles de précipitation

Elle a été développée par Gibbs et Maher (1967) pour pallier aux faiblesses du pourcentage à la normale. Cette approche permet de connaître la fréquence d'un événement. Elle divise la distribution des fréquences des événements en 10 parties représentant chacune 10 % de la distribution. Le cinquième décile représente donc la médiane et le dixième décile le volume maximal de précipitation reçu pour une région et pour une période de temps.

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

e. Indice de déficit pluviométrique

Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$\text{IDP}(\%) = (\text{Pi} - \text{Pm})/\text{Pm} \times 100$$

Où :

IDP : Indice de déficit pluviométrique (en pourcentage).

Pi : précipitation annuelle (en mm).

Pm : précipitation moyenne (en mm).

Cet indice nommé aussi Ecart à la normale, permet de visualiser et de déterminer le nombre des années déficitaires et leur succession.

Une année est qualifié d'humide si cet indice est positif de sèche lorsqu'il est négatif. Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des écarts croît, il s'agit d'une tendance humide. La tendance est de type « sèche » dans le cas contraire.

Indicateurs météorologiques et hydrologiques

a. L'indice de sécheresse de Palmer (PDSI)

Appelé aussi indice de sévérité de la sécheresse de Palmer, il mesure la sécheresse fondée sur les précipitations et les températures récentes. Il fut développé par le météorologue Wayne Palmer en 1965

L'indice de sécheresse de Palmer est fondé sur un modèle de l'« offre et de la demande » de l'humidité du sol. Si l'offre est directement calculée, la demande est plus complexe à établir puisqu'elle dépend de plusieurs facteurs, comme la température et l'humidité du sol mais aussi de facteurs plus difficiles à calibrer comme les taux d'évapotranspiration et le taux de recharge. Palmer a tenté de pallier ces difficultés en développant un algorithme qui les approxime en se fondant sur les données facilement disponibles : températures et précipitation.

Malgré la difficulté de son calcul, cet indice s'est révélé efficace pour déterminer la sécheresse de longue durée (à l'échelle des mois) mais il ne l'est pas autant dans des cas où il s'agit d'une question de semaines. On utilise le 0 comme moyenne, et l'état de sécheresse est représenté par des valeurs négatives ; par exemple, moins 2 signifie sécheresse modérée, moins 3 signifie sécheresse sévère, et moins 4 signifie sécheresse extrême. L'algorithme de Palmer peut donc être appliqué pour n'importe quel site du moment que les données relatives aux précipitations et aux températures sont disponibles.

$$PDSI = X(i) = 0,897X(i-1) + Z(i)/3$$

où :

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

b. L'indice de sécheresse de Keetch-Byram (Keetch-Byram Drought Index, KBDI),

Créé par John Keetch et George Byram en 1968 pour le Forest Service du département de l'Agriculture des États-Unis, cet indice fournit une mesure quotidienne de la sécheresse du soldonnant une indication du stress hydrique des plantes. Le KBDI représente l'effet net des précipitations et l'évapotranspiration dans la production de déficit cumulé de l'humidité dans les couches de sol d'humus ou supérieure profondes. Le KBDI dispose d'une gamme allant de 0 (sol à la capacité au champ) à 2000 (sécheresse extrême) et représente la quantité de pluie nécessaire pour amener le sol à saturation. L'échelle 0-2000 du point est divisée en trois classes de sécheresse : 0-999 = faible; 1000-1499 = modéré, 1500-2000 = élevé. Simple à calculer, le KBDI utilise uniquement, des observations météorologiques quotidiennes.

c. Indice des réserves en eau de surface (SWSI - Surface Water Supply Index)

Créé par Shafer et Dezman en 1982, cet indicateur est un complément au PDSI qui incorpore des éléments d'hydrologie et de climatologie. C'est aussi un indicateur normalisé qui permet de comparer différentes régions, pour des périodes mensuelles en particulier. Le SWSI a été spécialement développé pour les régions où la fonte des neiges est la principale source d'écoulement des eaux superficielles. Il incorpore la couverture neigeuse, les précipitations en montagne, les cours d'eau, le contenu des réservoirs en plus du contenu en eau du sol. Cet indicateur n'est cependant pas conçu pour de grandes variations topographiques.

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

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

Où :

a, b, c sont les poids associés à chaque composante

et a+b+c=1

sp Couverture neigeuse équivalente en eau (mm)

pcp Précipitation (mm)

rs Réservoir (mm)

PN Probabilité de ne pas excéder (%)

I.3.2. Approches satellitaires

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

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

Les indices de végétation

Ces indices sont le résultat de combinaison de signatures spectrales brutes selon la formule suivante : (canal PIR - canal rouge) / (canal PIR + canal rouge).

En situation de stress hydrique, le retour du PIR vers le capteur est plus faible alors que la réflectance du R est plus élevée. La différence PIR-R est donc plus faible en périodes de sécheresse.

L’avantage des indices de végétation se situe au niveau de la facilité des calculs. Ils offrent un outil de comparaison rapide et efficace de l’état de la végétation pour une aire et non en un point du territoire. Leur application est possible de manière instantanée jusqu’à une échelle temporelle annuelle, et de manière régionale ou continentale.

a. Indice de végétation normalisé (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index)

Proposé pour la première fois par Rouse *et al.* en 1973 (Bannari *et al.*, 1995), le NDVI est sensible à la présence de végétation verte. C’est un outil efficace pour la surveillance des cultures (Vogt, 1995) mais aussi pour la surveillance des précipitations et des sécheresses (Kogan, 1990; Unganai et Kogan, 1998; Viau *et al.*, 2000; McVicar et Bierwirth, 2001; Boyd *et al.*, 2002).

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

où :

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

Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

Le NDVI souffre aussi d'une rapide saturation en milieu de végétation dense et la contribution du sol en région de faible densité de végétation rend son interprétation douteuse. Son interprétation peut donc être biaisée dans les régions arides ou sujettes aux sécheresses (Vogt, 1992).

Le NDVI n'en demeure pas moins un indice efficace pour identifier les zones de stress hydrique, plus spécialement dans les milieux homogènes comme en agriculture.

b. Indice de végétation ajusté pour les sols (SAVI– SoilAdjustedVegetation Index)

Cet indice incorpore un ajustement pour le signal vu au satellite en provenance du sol. Comme démontré par Huete (1988), une valeur de 0,5 pour l'ajustement permet une correction optimale de la rétrodiffusion du sol à travers le couvert végétal. En réalité, cet ajustement n'est pas constant mais inversement proportionnel à la densité du couvert végétal et l'ajustement de l'effet du sol devrait être adapté pour la région étudiée (Rondeaux *et al.*, 1996). Cet indice demeure tout de même affecté par la présence de sol nu et est plus sensible à la végétation sénescente que le NDVI.

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

où :

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

Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

c. SAVImodifié (MSAVI – ModifiedSAVI)

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

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

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

où :

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

Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

d. Indice de la condition de la végétation (VCI - Vegetation Condition Index)

Le VCI est une transformation de ce dernier. Il reflète donc la distribution climatique et non les différences de végétation dues aux différents écosystèmes. En ce sens, il est un meilleur indicateur de la distribution des précipitations que le NDVI (Kogan, 1990). Il permet aussi de comparer l'effet du climat sur des aires d'études différentes. Le VCI apporte donc une amélioration dans l'analyse de la condition de la végétation pour des aires non homogènes (Kogan, 1990).

Le VCI, tout comme les autres indices de végétation satellitaires comporte les mêmes limitations associées à la méthode d'acquisition des données. De plus, l'application du VCI est fortement liée au

nombre d'images disponibles ainsi qu'à la qualité de ces images. Comme cet indicateur utilise des images composées, il est important de considérer les jours d'acquisition associés à chaque pixel puisque l'angle de vue et l'angle d'illumination peuvent varier grandement d'un pixel à l'autre.

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

où:

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

e. Indice de productivité de la végétation (VPI - Vegetation Productivity Index).

Le VPI estime la distribution statistique du NDVI de manière empirique à partir des données disponibles. Un VPI bas indique une probabilité basse de retour d'un événement, donc une situation anormalement sèche. Le VPI a été utilisé principalement sur le continent africain où il a servi à surveiller la végétation en Afrique du Sud (Sannier *et al.*, 1998), suivre l'état de sécheresse et d'humidité de la végétation au Kenya (Tanaka *et al.*, 2000) et prédire la biomasse végétale en Namibie (Sannier *et al.*, 2002)

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

f. Indice du contenu en eau des feuilles (LWCI - Leaf Water Content Index)

Utilisant les bandes 4 et 5 de Landsat TM, le LWCI estime, comme son nom l'indique, le contenu relatif en eau des feuilles ou d'un couvert végétal, de manière journalière ou hebdomadaire. En combinant le proche infrarouge (TM4) et l'infrarouge moyen (TM5), le LWCI tente de détecter le stress en eau causé par les conditions de sécheresse. Introduit par Hunt *et al.* (1987), le LWCI a été testé uniquement en laboratoire et ne semble pas être applicable sur le terrain selon ceux-ci.

$$LWCI = \frac{-\log[1 - (TM_4 - TM_5)]}{-\log[1 - (TM_{ft_4} - TM_{ft_5})]}$$

où :

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

g. Indice de stress en humidité (MSI - Moisture Stress Index)

Utilisant aussi TM4 et TM5, c'est un simple ratio de l'infrarouge moyen (SWIR) sur le proche infrarouge (Hunt et Rock, 1989). Cet indicateur est hautement corrélé au contenu en eau de la végétation et des sols et donc aux conditions de sécheresse. Le MSI est aussi fortement lié au NDVI (Hunt et al, 1987). Il est par contre peu sensible au changement hydrique. Un couvert végétal pleinement hydraté doit perdre 50% de son contenu relatif en eau pour que le MSI détecte cette différence.

$$MSI = TM_5 / TM_4$$

Où :

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

h. Indice normalisé de différence en eau (NDWI - Normalized Water Difference Index)

En 1996, Gao proposait pour la détection de l'eau contenue dans la végétation. Hardisky avait déjà proposé en 1983 un indice similaire appelé Indice normalisé de la différence d'infrarouge (NDII - Normalized Difference Infrared Index) pour Landsat TM (Jackson *et al.*, 2004).

$$NDWI = \frac{R_{NIR} - R_{SWIR}}{R_{NIR} + R_{SWIR}}$$

Où :

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

Température de surface

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

Il existe plusieurs méthodes de calcul de la **température de surface (Ts)** (Vogt, 1996; Jang *et al.*, 2004a).

Indice de condition thermique (TCI - Temperature Condition Index) (Kogan et Sullivan, 1993).

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

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

où :

- T Température de surface de la période étudié (K)
Tmax Température de surface maximale de la période étudié (K)
Tmin Température de surface minimale de la période étudié (K)

I.3.3. Les approches combinées

Les approches combinées font appel aux données in-situ et aux données satellitaires.

a. Indice de stress en eau des cultures (CWSI - Crop Water Stress Index)

C'est un outil basé sur la différence entre la température du feuillage et la température de l'air (Moran *et al.*, 1994). Il peut être calculé à partir de données aux stations ou à l'aide de données satellitaires. Le CWSI est applicable localement ou régionalement, de manière instantanée ou journalière. Le CWSI est sensible à la présence de sol nu. L'inclusion de portion de sol est une source majeure d'erreur puisque la température du sol et de la végétation peuvent varier grandement. C'est pourquoi son utilisation est généralement restreinte au milieu agricole et pour de petites surfaces (Moran *et al.*, 1996; Colaizzi *et al.*, 2003)

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

où :

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

b. Indice de déficit en eau (WDI - Water Deficit Index)

C'est un raffinement du CWSI pour les régions partiellement couvertes de végétation. Il est équivalent à ce dernier en région de forte densité, car la température de surface et la température du couvert végétal sont équivalentes. Le WDI est par définition lié au ratio de l'évapotranspiration réelle à l'évapotranspiration potentielle. En réalité, il peut être calculé en utilisant des mesures de réflectance et de température à la surface en plus de quelques données météorologiques simples. Il est applicable localement ou régionalement, de manière instantanée ou journalière.

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

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

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

où :

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

1.3.4. Les approches de modélisation physique

Une dernière approche, l'approche physique, consiste à quantifier le bilan énergétique de surface. Ce sont des indicateurs qui utilisent l'énergie fournie principalement par le Soleil et la Terre pour caractériser les conditions environnementales en fonction d'un manque ou d'un surplus en énergie.

a. Indice simple de stress en eau (WSI - Simple Water Stress Index)

(Lhomme et Katerji, 1991). C'est un indicateur qui quantifie le manque en eau d'une culture. Il est applicable localement et régionalement à une échelle journalière. En plus des données de précipitation, il nécessite des informations spécifiques à chaque culture, comme les coefficients de culture et l'humidité disponible. Le WSI est un indicateur sensible au contenu maximal en eau du sol. Cette variable est cependant difficile à déterminer. De plus, il ignore la montée capillaire de l'eau qui peut contribuer substantiellement au bilan hydrique dans les sols profonds ou en période sèche.

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

$$WSI = \frac{\sum WD}{\sum ETm}$$

Où :

WD	Déficit journalier en eau (différence entre évapotranspiration maximale et actuelle) (mm)
ETm	Évapotranspiration maximale ou potentielle (mm)

b. Fraction évaporatoire (EF - Evaporative Fraction) .

Cet indicateur représente la fraction d'énergie disponible pour l'évapotranspiration (Kustas *et al.*, 1993). C'est un indicateur local ou régional qui fonctionne à une échelle temporelle instantanée ou journalière. Cet indicateur nécessite une estimation complète du bilan énergétique. Il intègre l'énergie disponible ainsi que les réserves hydriques. Il est aussi possible de calculer cet indicateur à partir de données satellitaires et si la représentativité des valeurs est assumée, le EF est valide à l'échelle journalière.

$$EF = - \frac{LE}{R_n + G}$$

où :

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

Références bibliographiques

Bannari, A., Morin, D., Huette, A.R. and Bonn, F., 1995, A review of vegetation indices. *RemoteSensingReviews*, vol.13, p. 95-120.

Boyd, C.E., Thunjai, T., Boonyaratpalin, M., 2002. Dissolved salts in waters for inland, low-salinity shrimp culture. *Global Aquac. Advocate* 5 (3), 40–45

Crago, R.D., 1996. Conservation and variability of the evaporative fraction during daytime. *Journal of Hydrology*, **180**, 173-194.

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th conference on applied climatology, 17 – 22 January, Anaheim, CA, pp 179 – 184.

Huete, A.R., 1988, A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, p.295-309

Hunt, E.R. & Rock, B.N., 1989. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-infrared Reflectances. *Remote sensing of Environment*, **30**, 43-54.

Hunt, E.R., Rock, B.N. & Nobel, P.S., 1987. Measurements of Relative Water Content by Infrared Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **22**, 429-435.

Jackson, T.J., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Wathall, C., Doriaswamy, P. & Hunt, E.R., 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*, **92-4**, 475-482.

Kogan, F.N. 1990: Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *Int. J. Remote Sens.*, 11, 1405- 1419

Kustas, W.P., Schmugge, T.J., Humes, K.S., Jackson, T.J., Parry, R., Wertz, M.A. & Morans, M.S., 1993. Relationship between Evaporative Fraction and Remotely Sensed Vegetation Index and Microwave Brightness Temperature for Semiarid Rangelands. *Journal of Applied Meteorology*, **32**, 1781-1790.

Lhomme, J-P. & Katerji, N., 1991. A simple modeling of crop water balance for agrometeorological applications. *Ecological Modeling*, **57**, 11-25.

Mader, S., 1987. Biologie. Évolution, diversité et environnement. Éditions du Trécarré, Les Éditions Reynald Goulet inc., Saint-Laurent, Qc., Canada. MARS, date inconnue. Methodology of the MARS crop yield forecasting system. Monitoring Agriculture with Remote Sensing. Consulté en ligne : <http://mars.jrc.it/marsstat/Crop%5FYield%5FForecasting/METAMP/00000003.HTM#> , 2006.

McVicar, T.R. and Bierwirth, P.N., (2001) Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. *International Journal of Remote Sensing* 22(11), pp 2109 – 2128.

Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. & Vidal, A., 1994. Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, **49**, 246-263.

McVicar, T.R. & Jupp, L.B., 1998. The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review. *Agricultural Systems*, **57-3**, 399-468.

Moran, M.S., Rahman, A.F., Washburne, J.C., Goodrich, D.C., Wertz, M.A. & Kustas, W.P., 1996. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **80**, 87-109.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. and Sorrosian, S., 1994, A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, vol. 47, p. 1-25.

Sannier, C.A. D., Taylor, J. C. & Du Plessis, W., 2002. Real-time monitoring of vegetation biomass with NOAA AVHRR in Etosha National Park, Namibia, for fire risk assessment. *International Journal of Remote Sensing*, **23-1**, 71-89.

Unganai, L.S., and F.N. Kogan, 1998. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, 63:219–232.

Viau, A. A., Vogt, J. V. & Beaudin, I, 2000. Comparison of a Satellite-Based and a Precipitation-Based Drought Index. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26, 580-583.

Vogt, J.V., 1995. The use of low resolution satellite data for crop state monitoring. possibilities and limitations (eur 16008 en). *Agrometeorological Models: Theory and Applications in the MARS Project*, 223-240.

Vogt, J.V., 1992. Characterizing the Spatio-temporal Variability of Surface Parameters from NOAA AVHRR Data. A case Study for Southern Mali. Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication no. 14637 EN, Brussels/Luxembourg. 263p.

ANNEXE 2 :Liste des références bibliographiques

Analyse de la situation et estimation des besoins en santé et environnement au Mali dans le cadre de la mise en œuvre de la déclaration de Libreville (juin 2010).

Beintema, A.J., J. Van Der Kamp & B. Kone (2007). Les forêts inondées: trésors du delta intérieur du Niger au Mali.

Bruno B, Nathalie P et Emilie L (2005). Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'orge aval .Septièmes rencontres de Théo Quant, Janvier 2005.

Cancelliere A., Loukas A., Pangalou D ., Rossi G., Tigkas D ., Tsakiris G., Vangelis h (2007). Drought characterization [part 1. components of drought planning.] in: Iglesias a. (ed.), Moneo M. (ed.), López-francos A. (ed.). *Drought Management Guidelines Technical*. p. 85-102 (options méditerranéennes :série b. Etudes et recherches; n . 58).

GIEC, 2007 : bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [équipe de rédaction principale, Pachauri, r.k. et Reisinger, a. (publié sous la direction de)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages

Giuseppina M, maria CG, maura abbatati (2005). Drought assessment and forecasting. drought within the context of the region VI.

McKee *et al.* (1993)

Michael J. Hayes (1999). Drought indices. National Drought Mitigation Center. <http://www.civil.utah.edu/~cv5450/swsi/indices.htm>

Kustas *et al.*, (1993)

Organisation météorologique mondiale (2006). Suivi de la sécheresse et alerte précoce, principes, progrès et enjeux futurs. Omm-n°1006.

Rapport mondial sur le développement humain 2007/2008 : Chocs climatiques : risques et vulnérabilités dans un monde marqué par l'inégalité.

Réduction des risques de catastrophe : bilan mondial (2011). Révéler le risque, redéfinir le développement.

Souleymane K, Abdourahamane Konaré. Cas des feux de savanes, suivi des feux de brousse au Sénégal (2008-2009).

Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb \ OSS, CE. _ Collection Synthèse n° 4. _ OSS : Tunis, 2008. _ 84 pp.