

REPUBLIQUE DU MALI
Un peuple – Un But – Une Foi

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT

MINISTERE DE L'EDUCATION

**ELABORATION DES SCENARIOS DE
CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR LE MALI**

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE**

**PROGRAMME D'ASSISTANCE DE
PAYS BAS SUR LES
CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Avril 2003

AUTEURS

La présente étude a été effectuée avec la collaboration des personnes suivantes :

TRAORE Famouké	Ecole Nationale d'Ingénieurs BP 242 Bamako – Mali Email : tfamouke@hotmail.com
BAYOKO Abdoulaye Coordinateur de l'étude	Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique BP 3052 Bamako-Mali Email : projetgef@afribone.net.ml
SANOGO Bréhima	Direction Nationale de la Statistique et de l'Informatique Bamako – Mali Email : brehimas@yahoo.fr
DIARRA Birama	Direction Nationale de la Météorologie Bamako- Mali Email : biramadia@yahoo.fr
KONATE Mama	Direction Nationale de la Météorologie Bamako- Mali Email : mama.konate@hotmail.com

Nous remercions tous ces experts pour leurs contributions. Nous remercions également Mme BARRY Maï mouna DJOURTE pour la qualité de la saisie du présent document.

REMERCIEMENTS

La présente étude a été menée dans le cadre du programme Néerlandais d'Assistance aux études sur les changements climatiques (NCCSAP). Ce programme est financé par le ministère des Affaires Etrangères à travers la Direction Générale pour la Coopération et le Développement (DGDC). Nous adressons nos sincères remerciements au Royaume des Pays-Bas dont la fructueuse coopération a permis de réaliser cette étude combien importante pour le Mali. Nous remercions également l'Institut Néerlandais pour les études environnementales (IVM) de l'Université de Vrijè à Amsterdam au Pays Bas qui a assuré avec efficacité la gestion du présent projet. Enfin, qu'il nous soit permis d'adresser nos vifs remerciements à Mr. Amadou Thierno GAYE du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon FONGANG (Sénégal) pour son assistance technique combien appréciable et efficace.

SOMMAIRE

SINGLES	vii
RESUME	ix
INTRODUCTION	1
1. PRESENTATION CLIMATIQUE DU MALI	3
1.1 Situation climatique	3
1.2. Paramètres climatiques	4
2. METHODOLOGIE	7
2.1. Données	7
2.2. Base de référence climatique	7
2.3. Limites de prévisibilité	7
2.4. Procédure d'analyse	8
3 CHOIX DE SCENARIOS	9
3.1. Scenarios Socio-Economiques	9
3.2. Scenario d'émissions	17
4. UTILISATION DE SCENGEN	23
4.1 Identification des points de grille de la maille GCM sur le Mali	23
4.2 Choix de GCM	24
4.3. Projections avec CSIRO-TR	35
4.4 Interpolation spatiale des résultats	36
5. ANALYSE DE SENSIBILITE	53
5.1 Analyse aux sensibilités de scénario climatique	53
5.2 Analyse de sensibilités théoriques	57

6. EVENEMENTS EXTREMES	71
6.1. Cas de la température	71
6.2. Cas de la pluviométrie	74
7. RESUME DES DONNEES PRODUITES POUR LES AUTRES ETUDES	83
7.1 Données de projection	83
7.2 Données d'analyse de sensibilité et d'évènements extrêmes	91
8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	93
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	95
ANNEXES	97

SINGLES

a) Sigles généraux

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

CC : Changement Climatique

CEDEAO : Communauté Economique et Douanière des Etats de l'Afrique de l'Ouest

CERPOD : Centre d'Etude et de Recherche en Population et Développement

CILSS : Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

CNRST : Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique

CO₂ : Gaz carbonique

CRIWAR : Crop Irrigation Water Requirement

DNM : Direction Nationale de la Météorologie

DNP : Direction Nationale de la Planification

FEM : Fonds pour l'Environnement Mondial

FIT : Front Inter-Tropical

GEF : Global Environment Facility

GES : Gaz à Effet de Serre

GtC : Giga-tonne Carbonne

°C : degré Celsius

IEC : Information Education Communication

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

INSAH : INstitut du SAHel

ISF : Indice Synthétique de Fécondité

Km : kilomètre

MAGICC : Model for Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change

MCG : Modèle de Circulation Général

MEP : Ministère de l'Economie et du Plan

MW : Méga- Watt heure

m³/ ha : mètre cube par hectare

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

PEV : Programme Elargi de Vaccination

PIB : Produit Intérieur brut

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

PPMV : Particules Par Millier de Volume

RAINRU : Modèle numérique de détermination du débit à partir de la pluie

SCENGEN : SCENario GENerator

SRES : Special Report on Emissions Scenarios

TEP : Tonne Equivalent Pétrole

UEMOA : Union Economique Monétaire Ouest Africaine

W/m² : Watt par mètre carré

ZCI : Zone de Convergence Intertropicale

b) Sigles des GCM

BMRC-EQ : Bureau of Meteorology Research Centre (Australia)

CSIRO-TR : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation,
TRansient model (Australia)

CSIRO2-EQ : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation,
EQilibrium model (Australia)

GFDL –TR : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Transient model (USA)

ECHAM4 : European Center/Hamburg Model 4 Transient (Germany)

HadCM2 : Hadley Centre unified Model 2 Transient Ensemble-mean (United
Kingdom)

UK HI-EQ : United Kingdom Meteorological Office High Resolution

UKTR : United Kingdom Meteorology Office / Hadley Centre Transient

RESUME

La présente étude a été réalisée grâce à l'appui financier du programme Néerlandais d'Assistance aux Etudes sur les Changements Climatiques (NCCSAP). Son objectif général est la construction d'un scénario de changement climatique pour le Mali. Ce scénario à élaborer doit décrire de façon cohérente et plausible l'état futur du climat au Mali. Les données climatiques obtenues de ces simulations futures du climat seront utilisées dans d'autres études du CNRST soutenues par le NCCSAP notamment la Vulnérabilité/Adaptation dans les secteurs de l'agriculture et des ressources en eau. Ces études ont apporté beaucoup d'innovations par rapport aux précédentes études de vulnérabilité/adaptation sur le mil/sorgho et sur les ressources en eau financées par le PNUD/FEM.

Dans une première étape, nous avons choisi un scénario d'émissions pour analyser les émissions futures de GES. Les critères de ce choix au niveau national sont principalement :

- Le scénario de croissance de la population, celui de la répartition spatiale de cette population et le scénario de croissance économique ;
- Les hypothèses d'évolution des différentes sources d'énergie électrique qui conditionnent essentiellement le développement économique et technologique futur d'un pays.

Ainsi, nous avons retenu, comme scénario de politique d'atténuation des émissions de GES, le scénario SRESB2 et comme scénario de référence le SRESA2.

Nous avons ensuite utilisé, dans le modèle MAGGIC, ce scénario d'émissions de GES pour projeter au niveau global et à différents horizons temporels futurs les principaux paramètres climatiques concernés par l'étude à savoir la température et la pluviométrie.

Nous avons déduits les données locales des données obtenues au niveau global par la technique du downscaling. Pour cela nous avons utilisé le modèle SCENGEN. Il utilise les résultats de sortie de MAGGIC et les normales climatiques (1961-1990) de la température et de la pluviométrie. Nous l'avons employé pour donner des représentations spatio-temporelles des CC par point de grille (de résolution 5° de latitude sur 5° de longitude) en exploitant les résultats des expériences de GCM disponibles dans le modèle. Les résultats de simulation obtenus nous ont permis de choisir le GCM CSIRO-TR. Car, ses résultats sous SCENGEN donnent une bonne concordance avec les valeurs réelles de température et de précipitation mesurées dans certaines localités que nous avons choisies pour faire la validation.

Les données de SCENGEN et du GCM CSIRO-TR obtenus par point de grille ont été traduites en données locales en procédant par l'interpolation spatiale des résultats de grilles pour les localités de Bougouni, Sikasso, Sélingué, Koutiala, Dioï la et Yanfolila.

Les résultats obtenus sont :

- Les valeurs escomptées, sur l'ensemble du pays, des paramètres climatiques comme la pluviométrie et la température aux horizons temporels compris entre 2000 et 2100

- Les valeurs escomptées de la pluviométrie et de la température pour chaque localité du pays entre 2000 et 2100.

Pour toutes ces localités on assisterait à une diminution de la pluviométrie qui se traduirait par un déplacement des isohyètes vers le nord. Le cas de la localité de Sikasso est une illustration de cette situation (Figures i à iii). Les températures seraient par contre en hausse dans toutes les localités.

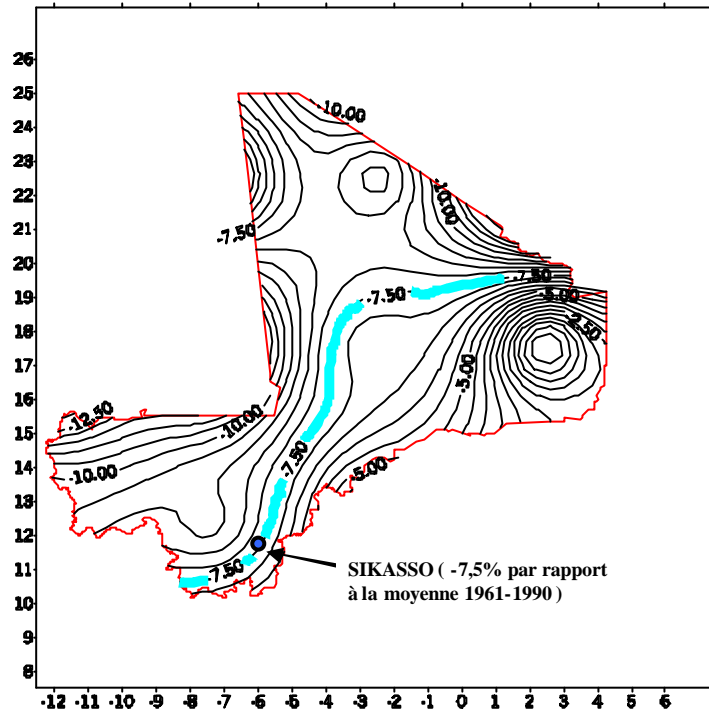


Figure i: Variation moyenne annuelle (en %) de la pluviométrie au Mali en 2050.

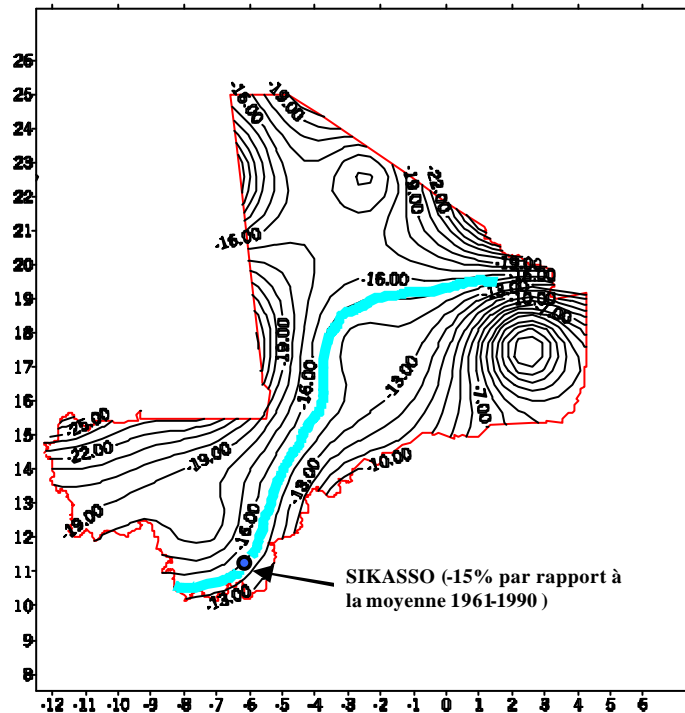


Figure ii: Variation moyenne annuelle (en %) de la pluviométrie au Mali en 2100.

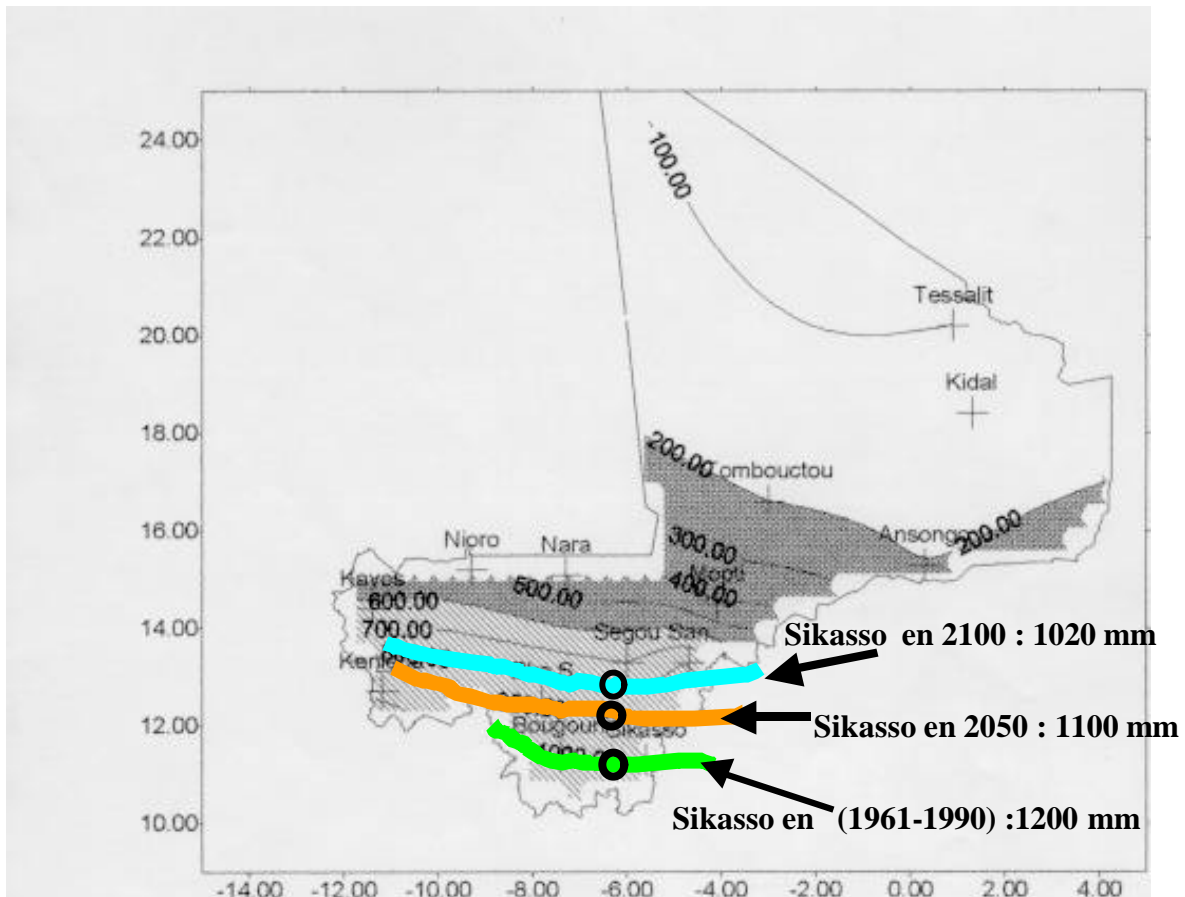


Figure iii : Evolution de la pluviométrie à Sikasso.

Nous avons procédé à une analyse de sensibilité par rapport aux variations des paramètres climatiques d'une part en utilisant les données issues du scénario climatique construit et d'autre part en utilisant un scénario théorique de variation des paramètres climatiques entre 5 % et 20 % au pas de 5 % par rapport à la normale 1961-1990.

Cette analyse nous a permis de constater qu'avec une augmentation de 5 % de la pluviométrie par rapport à la moyenne 1961-1990, la situation pluviométrique au Mali correspondrait à celle de la période humide et qu'une diminution de 10 % de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-1990 entraînerait une situation de sécheresse au Mali.

Dans le scénario climatique élaboré, cette situation de sécheresse serait constatée sur la première moitié de l'hivernage (mois de mai, juin et juillet) à partir de l'horizon 2025 sur toutes les stations de la zone d'étude pour une sensibilité climatique moyenne. La même situation pourrait s'installer dès l'horizon 2020 si la réaction du climat aux perturbations devenait plus rapide.

Suite au déficit pluviométrique, les sources d'approvisionnement naturelles en eau des communautés constituées par les eaux de surface et les eaux souterraines superficielles seront affaiblies dans une certaine proportion et les populations auront recours au transport, au stockage et aux forages. Les coûts que nécessiteront ces activités de transport, de réalisation de forages équipés constitueront un facteur

limitant pour l'approvisionnement en eau. Des mouvements de populations pour se regrouper autour des points d'eau pérennes et un exode rural des populations vers les centres urbains et les pays voisins seront à prévoir.

L'analyse des événements extrêmes pour la température nous a permis de comparer les occurrences de températures maximales supérieures à la moyenne maximale de la normale 1961-90 des horizons temporels 2050 et 2100. De cette analyse, on retient:

- Pour la période 1961-1990, la température moyenne maximale est de 30,5°C avec 50% d'occurrence d'avoir des températures supérieures à cette moyenne de 30,5°C ;
- En 2050, la température moyenne maximale serait de 32,5°C et l'occurrence des températures supérieures à cette valeur serait de 40% ;
- En 2100, la température moyenne maximale serait de 34,5°C et l'occurrence des températures supérieures à cette valeur serait de 36%.

Les incertitudes pouvant affecter les résultats de cette étude concernent entre autres :

- Les incertitudes liées aux perspectives de développement qui ont conditionné le choix du scénario de référence ;
- Les erreurs liées au "downscaling" du GCM notamment à cause du rapport de réduction de la maille ;
- Les incertitudes liées à la technique de spatialisation ;
- Les erreurs et incertitudes liées aux données statistiques et aux résultats de projection.

INTRODUCTION

L'élaboration de la Communication Nationale Initiale du Mali dans le domaine des changements climatiques (CC) a permis aux projets financés par le Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM) sous la coordination du Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (CNRST) de réaliser des études de Vulnérabilité/Adaptation pour les secteurs de l'agriculture et des ressources en eau.

Afin d'améliorer les résultats obtenus de ces travaux, la présente étude, financée par le NCCSAP, a été initiée pour élaborer des scénarios climatiques pouvant décrire de façon cohérente et plausible l'état futur du climat du Mali.

Etudes initiales de Vulnérabilité/Adaptation financées par le PNUD/FEM

Dans des études précédentes du CNRST financées par le PNUD/FEM, les Modèles de Circulation Générale (MCG ou GCM en anglais) pour l'Afrique et notamment le Sahel ont été utilisés. Les MCG sont basés sur les expériences de réaction d'équilibre qui évaluent la réaction d'équilibre du climat mondial suite au doublement de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Dans ces études, on a considéré les résultats des modèles de circulation générale donnant les variations de température au niveau mondial ainsi qu'au niveau du Sahel correspondant à la concentration de 1990 en CO₂ (1xCO₂) pour le scénario climatique de base et au doublement de la concentration en CO₂ (2xCO₂) de l'atmosphère comme scénario avec changement climatique en 2025.

Secteur de l'agriculture

Les hypothèses qui ont soutenu cette étude sont :

- Augmentation par rapport à la période 1961-1990 de 0,27°C pour la température moyenne au Sahel à l'horizon 2025.
- Baisse de la pluviométrie avec un taux constant variant de 12 à 15% par rapport à la normale (1961-1990) pour toutes les localités de la zone d'étude OHVN.
- Diminution du rendement de la production du mil/sorgho de 2 à 16% suite à l'augmentation de température à l'horizon 2025.

Secteur des Ressources en Eau

Les hypothèses qui ont soutenu cette étude sont :

- Augmentation de 1,5°C par rapport à la température normale (1961-1990) pour toutes les localités en zone OHVN;
- Augmentation de 15% par rapport à la pluviométrie normale (1961-1990) pour toutes les localités de la zone d'étude.

Les résultats obtenus à partir de ces hypothèses n'ont pas permis d'évaluer les impacts des changements climatiques sur le mil/sorgho dans les différentes localités d'une part par le manque de données locales de projection et d'autre part par le manque d'outils d'analyse adéquats. Dans le domaine des ressources en eau, ils sont aussi restés limités à une évaluation grossière du potentiel des ressources en eau sans pouvoir évaluer de manière convenable les impacts des changements climatiques.

Ces insuffisances constatées lors des premières études ont motivé l'étude financé par le NCCSAP.

Etude actuelle financée par le NCCSAP

Une innovation fondamentale de cette étude est l'élaboration d'un scénario de changement climatique plausible pour le Mali. Les résultats de ce scénario ont permis de réaliser de manière efficace et complète l'évaluation des impacts, au niveau des différentes localités, dans les secteurs de l'agriculture et des ressources en eau. En effet, ils ont permis d'étudier de manière fine l'impact des CC pour chaque localité sur le maïs et le coton et sur les ressources en eau et la production d'énergie. Ces impacts ont pu être traduits en terme de couverture des besoins céréaliers au niveau des localités.

1. PRESENTATION CLIMATIQUE DU MALI

Le Mali est situé en Afrique de l'Ouest au Sud du Sahara. Il s'étend, sans accès à la mer entre le 10^{ème} et le 25^{ème} degré de latitude Nord d'une part et d'autre part entre le 4^{ème} degré de longitude Est et le 12^{ème} degré de longitude Ouest, sur une surface de 1.241.231 km² au Sud du Sahara, sans accès à la mer.

1.1 Situation climatique

En Afrique subtropicale et intertropicale le climat est essentiellement conditionné par le déplacement des deux zones de pression de part et d'autre de la zone de convergence intertropicale (Z.C.I), zone de rencontre de la masse d'air tropical sec avec la masse d'air équatorial humide (Sivakumar et al., 1984).

Au Mali, le rythme des différentes saisons dépend de l'existence, au voisinage du sol et aux altitudes élevées, de centres d'action semi-permanents et quasi-stationnaires que sont les anticyclones des Açores, de Libye et de Sainte-Hélène.

Les variations de position et d'altitude de ces anticyclones commandent le mouvement de la Z.C.I, dont la trace au sol est communément appelée Front Intertropical (F.I.T).

Dans la position la plus méridionale de l'Anticyclone des Açores, le vent souffle du Nord au Nord-Est sur toute l'Afrique de l'Ouest. L'harmattan, vent sec soufflant de l'Est de Novembre à Mai, a son origine dans l'anticyclone de Libye et celui des Açores.

Quant à l'anticyclone de Sainte-Hélène, de sa position la plus septentrionale il envoie un courant très humide de Sud-Ouest d'origine océanique appelé mousson.

Ainsi, il existe deux saisons principales et des périodes de transition :

- Une saison sèche, dont la durée varie entre 6 et 9 mois du Sud au Nord qui est caractérisée par la présence quasi-permanente de particules solides suspendues dans l'air au voisinage du sol ;
- Deux périodes intermédiaires, ni pluvieuses, ni sèches, marquées par des passages nuageux qui apportent des averses brusques et des orages sporadiques, en général à la fin du jour ou à la tombée de la nuit. Pendant ces périodes, les températures atteignent le maximum et il n'y a pas de vent au voisinage du sol ;
- Une saison humide pendant laquelle les averses et la mousson se succèdent créant deux types de temps : les lignes de grains dont le passage d'Est en Ouest s'accompagne de vents forts et de pluies abondantes ayant parfois des effets catastrophiques ; le régime de mousson, qui domine la saison des pluies, s'intensifie pendant le mois d'Août produisant des pluies modérées ou des averses orageuses.

La zone d'étude, située entre les 11 et 15° de latitude Nord et les 8 et 12° de longitude Ouest, est principalement à cheval sur deux zones agroclimatiques dont l'activité, essentiellement agro-silvo-pastorale est largement tributaire des paramètres

climatiques tels que la pluviométrie, la température, l'évaporation, l'insolation, etc.. Il s'agit de :

- La zone sahélo-saharienne où les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à 600 mm ; elle correspond à une zone dont la période de végétation varie entre 45 et 90 jours ; on y pratique l'élevage transhumant avec quelques cultures sèches notamment le mil et les cultures de décrue ;
- Les zones soudano-sahélienne et soudano-guinéenne où les précipitations moyennes annuelles vont de 600 mm à plus de 1200 mm, sont caractérisées par une période de végétation dépassant 130 jours, où se côtoient les cultures de rente, les cultures sèches et l'élevage.

Toutes ces activités de production sont fortement influencées par les facteurs climatiques notamment la pluviométrie et la température.

1.2. Paramètres climatiques

1.2.1. Pluviométrie

L'analyse de séries pluviométriques des stations de la zone montre que la pluviométrie y varie entre 460 et 1130 mm (Figure 1.1.), avec une alternance de périodes humides et de périodes sèches. Toutefois, on note une persistance de périodes à pluviométrie inférieure à la moyenne 1961-1990 (Figure 1.2.) à partir des années 70 au Nord et au Centre de la zone (Figure 1.3.) ; au Sud de la zone, ces périodes sont observées à partir des années 80. Quant à la période humide, elle a été constatée de 1951 à 1969 (Figure 1.4).

Cette variabilité de la pluviométrie a entraîné des fluctuations de la durée de la saison végétative impliquant une instabilité de la production agricole et une dégradation des sols et de la végétation.

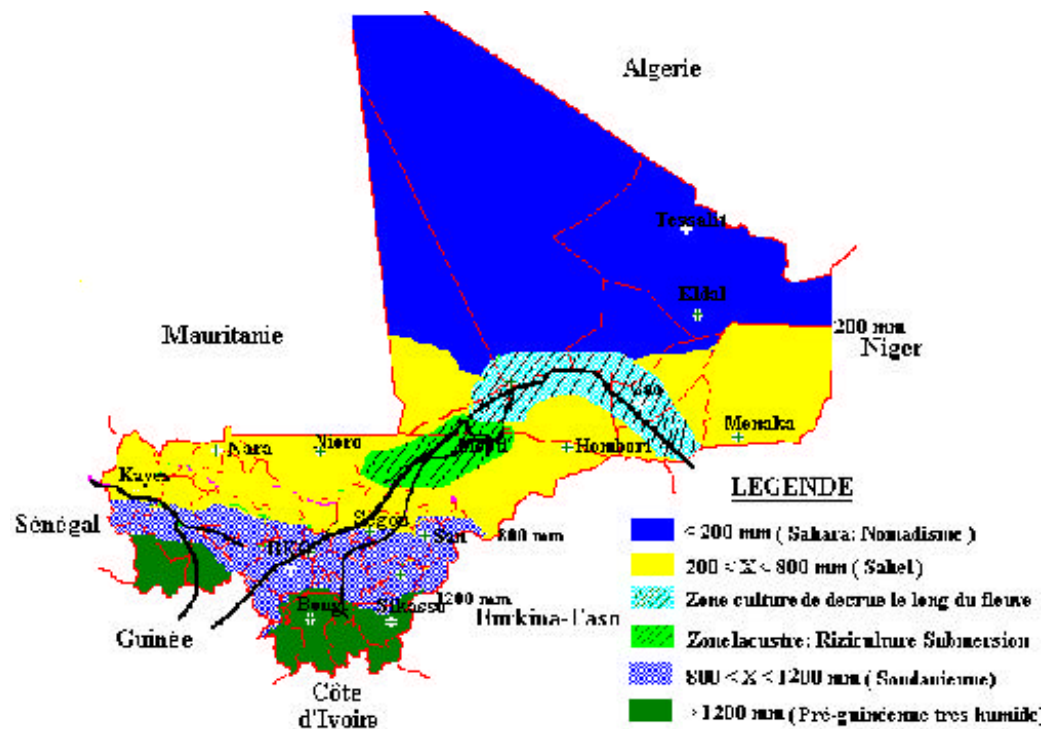


Figure 1.1 : Répartition des zones climatiques et agricoles du Mali (source DNM).

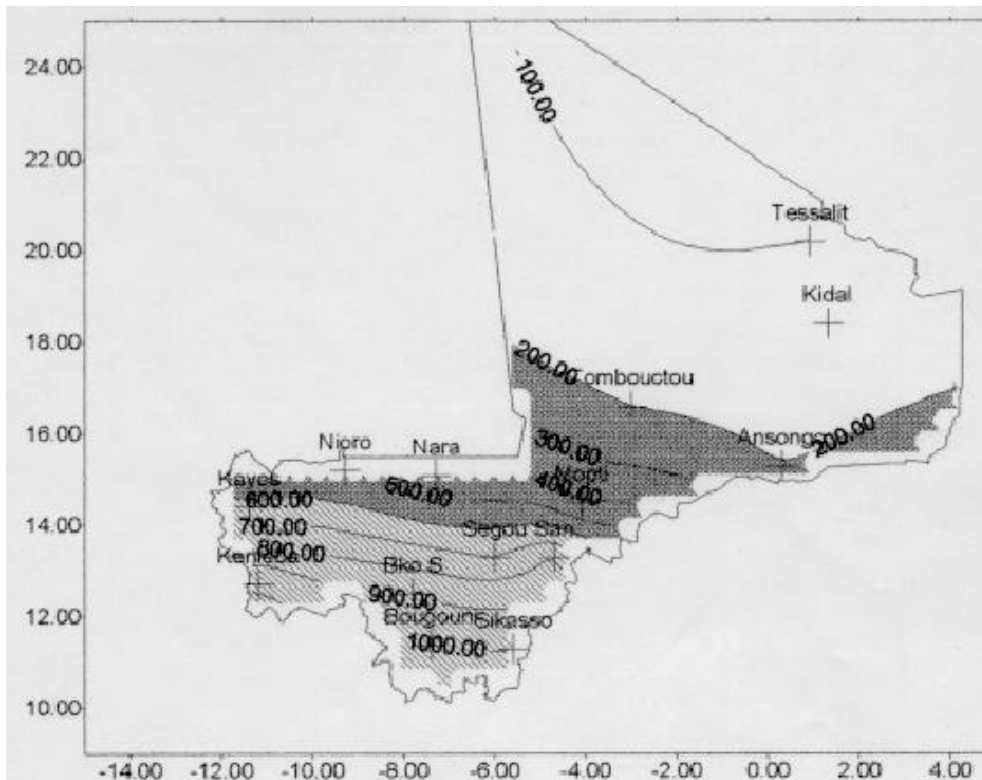


Figure 1.2 : Evolution de la normale pluviométrique (1961-1990) au Mali (source DNM).

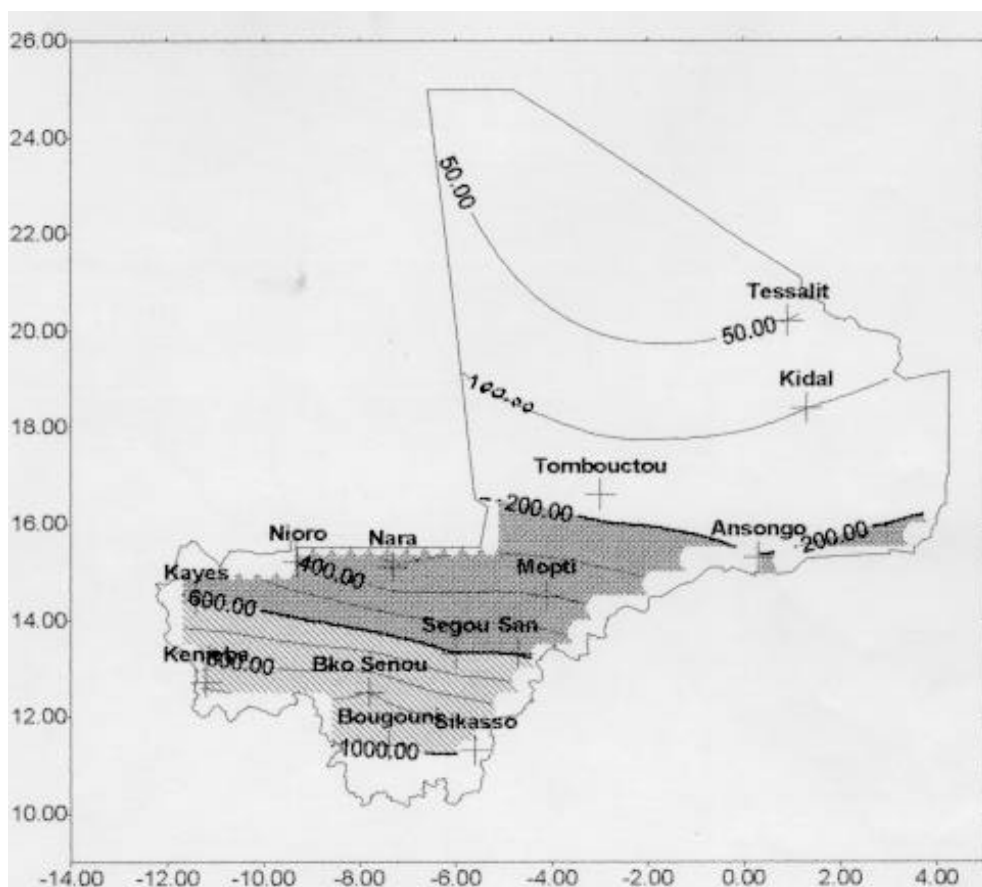


Figure 1.3 : Moyenne pluviométrique de la période sèche 1970-1985 (source DNM).

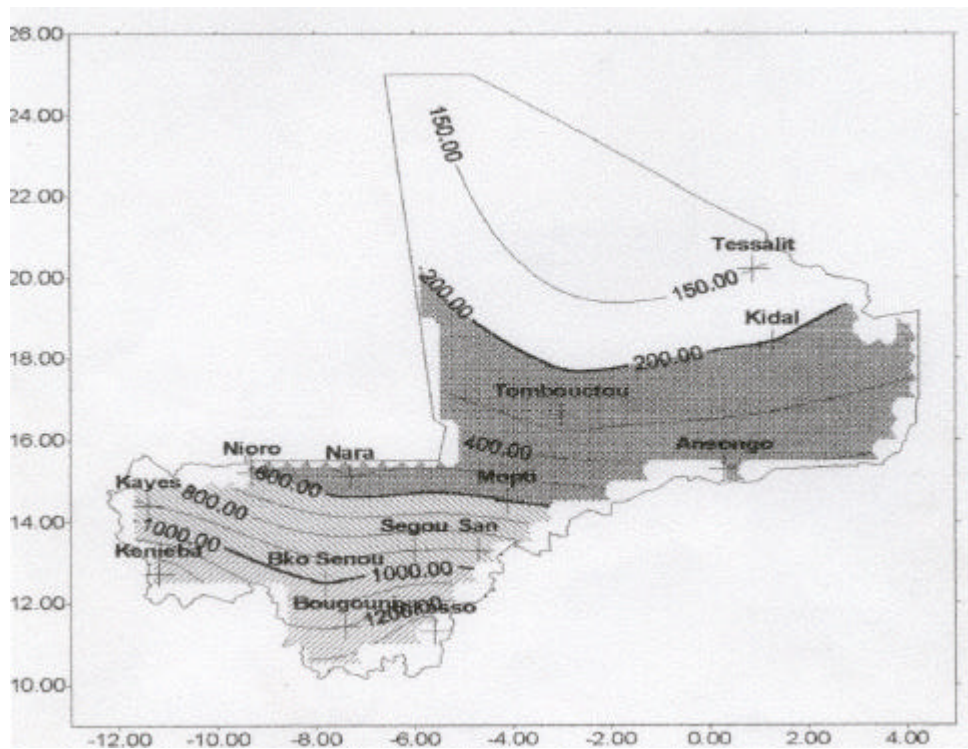


Figure 1.4 : Moyenne pluviométrique de la période humide 1951-1969 (source DNM).

1.2.2. Autres paramètres météorologiques

Les paramètres climatiques autres que la pluviométrie, tels que la température, l'évaporation, l'humidité, l'insolation (Tableau 1.1) ont une grande influence sur le développement, la croissance, la productivité des cultures, l'apparition d'insectes et de maladies et, sur les animaux bien que n'étant pas des facteurs limitants dans la zone.

En moyenne, la température maximale sous abri varie entre 34 et 36°C et la minimale entre 21-22°C. L'humidité relative maximale oscille entre 56 et 75 % et la minimale entre 23 et 37 %. L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle qui exprime la demande évaporative du climat varie entre 1534 et 2003 mm.

L'ensoleillement mensuel moyen varie de 238,2 à 266,2 heures.

Tableau 1.1 : Paramètres moyens calculés sur la période 1961-1990

Stations	Coordonnées géographiques	Pluie (mm)	Temp. Max. (°C)	Temp. Min. (°C)	Humidité Max (%)	Humidité Min (%)	ETP (mm)	Insolation (heures)
Bamako	8°10;12°38 N	995,3	33,3	21,4	72,8	34	1630	245,1
Bougouni	7°30 O;11°25 N	1132,6	33,2	20,7	75	37	1534	241,4
Mopti	4°6 O;14°31 N	462,4	35,6	21,8	56	23	2003	261,8
San	4°54 O ;13°17N	692,8	35,4	21,4	63	29	1832	238,2
Ségou	6°9 O ;13°24 N	635,3	35,0	21,7	66	32	1851	266,2

2. METHODOLOGIE

Le climat peut être défini comme l'ensemble des circonstances atmosphériques et météorologiques caractéristiques d'un lieu ou d'une région donnée. Le scénario climatique est défini comme une représentation plausible du climat futur, construite à partir de méthodes basées sur des principes scientifiques solides, et qui peut être utilisée pour comprendre la réponse des milieux sociaux et écologiques aux changements du climat (Viner et Hulme, 1992).

Nous utilisons des résultats d'expériences de modèles de circulation générale (MGC) et de modèles simples unidimensionnels. Ces sorties de modèles sont aussi couplées avec des données d'observations de la période 1961-90.

La méthode que nous avons utilisée pour réaliser les scénarios est résumé comme suit :

- Normalisation des sorties de modèles de circulation globale pour déterminer différentes variations des paramètres climatiques pour un degré de réchauffement global ;
- Représentation à l'échelle spatiale de ces variations obtenues ;
- Interpolation de ces projections obtenues à l'échelle du pays (stations d'observations).

2.1. Données

Les données utilisées pour cette étude portant sur « l'élaboration de scénarios de changement climatique » proviennent exclusivement de la banque de données de la Direction Nationale de la Météorologie du Mali. Elles portent sur les séries de données disponibles depuis l'origine des stations jusqu'en 2000 et sont relatives à :

- La température minimale
- La température maximale
- La température moyenne
- La pluviométrie.

Les données concernent principalement les 19 stations synoptiques du Mali et sont sous la forme ASCII.

2.2. Base de référence climatique

La période standard 1961-1990 actuellement définie par l'OMM sera choisie comme période de référence de l'étude.

2.3. Limites de prévisibilité

L'année 1995 sera l'année de base pour les émissions de GES conformément à l'inventaire de GES effectué au Mali. Les horizons temporels choisis sont 2025, 2050, 2075 et 2100.

2.4. Procédure d'analyse

La construction de scénarios climatiques se fait en 4 étapes essentielles :

1. Choix de scénarios d'émissions globales de GES
2. Détermination des projections climatiques avec le modèle climatique unidimensionnel MAGICC (Model for Assessment of Greenhouse-gas induced Climate Change) MAGICC est un modèle unidimensionnel, constitué d'un ensemble de modules couplés cycle gaz, modèle de climat et de fusion de glace, qui permet de comparer à un scénario-référence (scénario IPCC 92 par exemple) différents scénario-plan d'émissions dans le but d'estimer l'efficacité d'une politique de contrôle des émissions de GES par rapport au cas "sans politique".
3. Génération du climat futur par représentation spatiale des différentes expériences de MGC avec le logiciel SCENGEN (SCENario GENerator). SCENGEN exploite les résultats d'expériences de GCM et les projections de MAGICC combinées avec des observations climatologiques aux échelles régionales et globales.
4. Représentation à l'échelle locale des variations des paramètres climatiques par interpolation des projections obtenues au point 3) seules ou en combinaison avec les données d'observations locales de la normale 1961-90.

3 CHOIX DE SCENARIOS

3.1. Scenarios Socio-Economiques

3.1.1. Activités économiques principales

La diversité écologique du Mali se traduit par des situations forestières très contrastées entre les savanes arbustives du Nord du pays qui portent moins de 10 m³/ha, à la brousse tigrée, qui couvre 25% du Sud du pays avec des volumes sur pied atteignant souvent 20 à 40 m³/ha, jusqu'aux forêts de la zone Soudano-Guinéenne, entre 50 et 80 m³/ha, et parfois même plus de 100 m³/ha dans les forêts galeries de l'Ouest du pays.

Sur le plan hydrologique le pays est arrosé par deux grands fleuves et leurs affluents. Il s'agit du fleuve Sénégal long de 1 700 km dont près de la moitié se trouve au Mali, et du fleuve Niger 4 200 km dont 1 780 km au Mali.

Seuls 14% de la superficie totale du pays sont des terres aptes à l'agriculture et 25% sont des terres impropres aux cultures mais se prêtant aux pâturages et à la production de bois. La superficie totale cultivée ne représente que 12% de la superficie cultivable. Cependant certaines terres demeurent surexploitées.

Le secteur agricole est le plus gros pourvoyeur d'emplois, près de 75% de la population vivent dans les zones rurales. L'essentiel de la production du Mali provient du secteur agraire (l'agriculture, l'élevage, et la pêche). L'agriculture, contribuant pour 38 à 46% du PIB entre 1982 et 1992 (Source Banque Mondiale 1995) est essentiellement extensive et s'étend de l'extrême Sud du pays (zone Soudano-Guinéenne) jusqu'à la limite septentrionale de la zone sahélienne.

A coté de la production vivrière (mil, sorgho, Mais, riz, etc.), les principales cultures de rente sont le coton au Sud, et l'arachide principalement au Sud-Ouest. Le coton constituant la principale source d'exportation du pays, la production a été estimée environ à 400.000 tonnes au cours de la campagne 1995-1996. L'agriculture fournit aussi l'essentiel des matières premières pour le secteur manufacturé.

L'élevage, qui compte pour plus de 16% du PIB global et 35% du PIB agricole est traditionnellement aussi important que l'agriculture dans l'économie nationale. Après la dévaluation du franc CFA en 1994, les exportations de bovins sont en nette augmentations ces dernières années.

D'un point de vue économique, le Mali est classé parmi les pays les plus pauvres du monde. L'économie, étant basée sur le secteur primaire (environ 45% du PIB et 2/3 des recettes d'exportation) dépend fortement des variations climatiques.

En plus de la dépendance de l'économie malienne aux variations climatiques (paramètres météorologiques) , elle est aussi très vulnérable aux mouvements négatifs sur les marchés internationaux des produits de base. Ces contraintes ont eu pour résultat une épargne nationale limitée, la dépendance de l'aide étrangère, et un faible transfert d'emplois de l'agriculture vers l'industrie.

Le niveau d'industrialisation du pays est faible, il n'y a pratiquement pas d'industries lourdes. Ce sont les industries de transformation des produits agricoles qui prédominent. Ces dernières années, on assiste à un développement de secteurs miniers, surtout dans le secteur de l'or, avec la création et l'installation de plusieurs sociétés minières. La plus grande mine d'or du pays (Sadiola) fonctionne avec une consommation journalière de 110.000 litres de carburant. Ceci peut contribuer à l'augmentation des GEF et donc à l'augmentation de la température.

3.1.2. Scénario de croissance de la population

Evolution de la population du Mali

Tableau 3.1 : Evolution de la population

Source	Année	Population
1 ^{er} Recensement de la population	1955	3,6 millions
2 ^{ème} Recensement de la population	1960	4,1 millions
3 ^{ème} Recensement de la population	1976	6,4 millions
4 ^{ème} Recensement de la population	1987	7,6 millions
5 ^{ème} Recensement de la population	1998	9,0 millions

De 1976 à 1998 les taux de croissance observés se présentent comme suit

- 1976-1987 : Taux d'accroissement naturel = 3,7 %
Solde migratoire = -1,89 %
- 1987-1998 : Taux d'accroissement naturel = 3,2 %
Solde migratoire = -0,9 %

Population par région et taux de croissance (1998)

Tableau 3.2 : Population par région et taux de croissance

REGION	Effectif de la population	Taux de croissance
Kayes	1.372.019	2,3
Koulikoro	1.565.838	2,5
Sikasso	1.780.042	2,8
Ségou	1.679.201	2,1
Mopti	1.475.274	1,3
Tombouctou	461.956	0,1
Gao	397.516	1,2
Kidal	42.479	2,3
District de Bamako	1.016.167	4,0
Ensemble du MALI	9.790.492	2,2

Source : Recensement Général de la Population et de l'Habitat (Avril 1998) Résultat provisoire

Tableau 3.3 : Population et taux de croissance pour le cercle de Sikasso

Arrondissements	Localité	population en 98	Taux d'accroissement	poids démographique
SIKASSO COMMUNE	15	113 813	4	22%
CENTRAL	117	84 251	1,8	16%
KIGNAN	57	63 424	2,8	12%
KLELA	38	45 250	4,5	9%
NIENA	67	42 574	2,3	8%
BLINDIO	39	36 124	2,2	7%
DANDERESSO	39	34 277	4,2	7%
LOBOUGOULA	45	30 451	2	6%
NKOURALA	38	28 326	2	6%
DOGONI	27	18 093	1,8	4%
FINKOLO	22	14 066	1,7	3%
ENSEMBLE	504	510 649	2,7	100%

Tableau 3.4 : Population et taux de croissance pour la région de Sikasso

Cercle	nombre de localités	population	taux de croissance	poids démographique
SIKASSO	504	510 649	2,8	29%
KOUTIALA	254	378 561	2,7	21%
BOUGOUNI	475	304 646	2,9	17%
YANFOLILA	175	166 049	2,7	9%
YOROSSO	95	144 232	3	8%
KOLONDIÉBA	207	143 284	2,9	8%
KADIOLO	121	132 621	2,7	7%
ENSEMBLE	1831	1 780 042	2,8	100%

Politique nationale de population du Mali

Introduction

En mai 1991 le gouvernement du Mali a adopté une politique nationale de population en vue de soutenir ses efforts de développement notamment :

- L'amélioration du niveau de la qualité de vie des populations
- La couverture des besoins alimentaires et nutritionnels
- La couverture des besoins de santé des populations en général, des groupes vulnérables en particulier (femmes en âge de procréer et enfants)
- Le développement de l'éducation de l'alphabétisation et la promotion de la famille et de l'individu.

Fondements

Pendant longtemps les programmes et les plans de développement ont longtemps négligé sinon ignoré les problèmes démo-économiques. Ce qui se traduit par un laisser faire en ce qui concerne la dynamique démographique entraînant :

- Une fécondité élevée
- Un déséquilibre dans la répartition spatiale de la population
- Une forte immigration internationale souvent anarchique

Les programmes de population développés en 1972 étaient essentiellement axés sur l'espacement des naissances pour la sauvegarde de la santé de la mère et de l'enfant. Ils ont eu une portée assez limitée pour permettre de modifier le comportement socio-démographique des populations.

Principes

La politique de population sera mise en œuvre comme un élément de la politique nationale de développement. Elle sera basée sur trois principes :

- Le respect et la protection de la famille
- La liberté des couples et des individus de décider en toute responsabilité de la taille de leur famille et de l'espacement des naissances de leurs enfants. L'Etat pour ce faire prendra les mesures nécessaires pour leur faciliter l'accès à l'information et l'éducation et aux moyens auxquels ils ont droit.
- Le respect des droits fondamentaux des enfants (la survie, la santé, l'éducation et la formation). L'Etat et la société dégageront les moyens nécessaires à cet effet
- Nécessité d'œuvrer pour l'intégration de la femme dans le processus de développement.

Objectifs de la politique de population

1. Maîtrise de la croissance démographique
2. Réduction de la morbidité et de la mortalité
3. Redistribution spatiale de la population
4. Intégration de la migration internationale à la stratégie de développement
5. Intégration de la femme au développement
6. Amélioration des conditions de vie des enfants et des jeunes
7. La promotion des ressources humaines
8. La couverture des besoins alimentaires
9. La protection et la préservation des ressources renouvelables
10. L'amélioration des connaissances socio-démographiques

Stratégies

Entre autres stratégies on peut noter,

- Accélération du processus de développement
- Maîtrise progressive de la fécondité en rapport avec le développement économique
- Amélioration du taux de couverture sanitaire à plus de 80% d'ici l'an 2020
- Lutte contre les pratiques traditionnelles ayant des effets nocifs sur la santé des filles telle que l'excision
- La mise en application des dispositions légales sur les ventes en plein air des aliments, le dépôt des ordures et des déchets toxiques, etc.
- Développement des programmes relatifs à la salubrité publique telles que les voiries pour ce qui est de l'évacuation des eaux usées et des ordures ménagères, les latrines publiques au niveau des villes et villages.
- Développement des campagnes d'IEC et PEV
- Lutte contre le Sida et les maladies sexuellement transmissibles
- Approvisionnement en eau potable des populations
- Participation communautaire des populations à la gestion des programmes sanitaires.

Les migrations

Toutes les données sur les migrations sont celles de l'année 1992 (CERPOD-INSAH-CILSS ; 1996).

Emigration

Le District de Bamako a le taux d'émigration le plus élevé (5,74%) en raison de son rôle de capitale politique et commerciale du Mali. Dans les autres régions ce taux varie de 2,6 (Sikasso) à 3,69 (Tombouctou).

Immigration

- Le District de Bamako présente aussi le taux d'immigration le plus élevé avec 6,68% et la région de Mopti le taux le moins élevé (0,91%).
- Les taux des autres régions varient entre 1,57% et 3,07% (Tableau 3.5).

Tableau 3.5 : Taux de migration nette de la population de 15 ans et plus

Destination Origine	Kayes	Koulikoro	Sikasso	Ségou	Mopti	Tombouctou	Gao - Kidal	Bamako	Taux Inter-
Kayes	–	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,09	
Koulikoro	0,02	–	0,00	-0,01	-0,04	-0,05	-0,04	0,31	
Sikasso	0,00	0,00	–	-0,01	-0,07	-0,02	-0,01	0,18	
Ségou	0,00	0,02	0,01	–	-0,24	-0,30	-0,13	0,05	
Mopti	0,00	0,05	0,09	0,22	–	0,01	-0,12	0,33	
Tombouctou	0,00	-0,02	0,01	0,09	0,00	–	-0,07	0,06	
Gao - Kidal	-0,01	0,01	0,00	0,03	0,03	0,06	–	-0,01	
Bamako	0,05	-0,23	-0,14	-0,03	-0,20	-0,11	-0,02	–	
Pays Limitrophes et Nigeria	-0,54	-0,65	-0,15	-0,27	-1,65	-0,86	-1,09	0,21	-0,61
Reste du Monde	-0,82	-0,29	-0,04	-0,32	-0,03	-0,07	-0,08	-0,09	-0,27
TOTAL	-1,34	-1,08	-0,22	-0,30	-2,20	-1,24	-1,50	0,95	-0,88

Source : Rapport National Descriptif de L'Enquête Malienne sur les Migrations et l'Urbanisation (EMMU) 1992 – 1993 ; Réseau Migration et Urbanisation en Afrique de l'Ouest CERPOD-INSAH-CILSS ; Novembre 1996

Migration internationale

Le taux de migration nette illustre l'importance de la migration internationale dans la croissance migratoire de chaque région du Mali. Le solde migratoire international équivaut à plus de 75% du solde migratoire total dans les régions du Nord (Mopti – Tombouctou – Gao/Kidal) et pour plus de 85% dans les régions de Koulikoro et Sikasso. Dans la région de Kayes la contribution est même supérieure. Le solde migratoire est presque exclusivement dû à l'émigration internationale. Dans la région de Ségou l'immigration interne compense pour la moitié l'émigration internationale. Le taux d'émigration internationale est de 1,72% dont 78% en direction des pays frontaliers et du Nigeria. Le taux d'immigration internationale est de 0,84% dont 88%

en provenance des pays limitrophes et du Nigeria. Le taux de migration net du Mali est donc négatif (-0,88%).

Migrations internes

Du point de vue des migrations interrégionales, Bamako est la première destination des flux internes avec des taux variant de 0,34 (Mopti) à plus de 1% (Koulikoro et Ségou).

Les politiques de gestion des migrations au Mali

Depuis 1991, les politiques menées par le gouvernement en matière de migration portent sur des actions concrètes pour faire face à certaines situations.

Le Mali a opté pour une politique de pilotage et de régulation des mouvements migratoires :

- Informer et sensibiliser les migrants (et leurs familles restées sur place) et les candidats potentiels à la migration, sur les avantages et les inconvénients de la migration.
- Donner des informations sur les conditions d'entrées et de séjour dans les pays d'accueil.
- Négocier avec les pays d'accueil toutes les questions liées à la migration et aux migrants pour éviter les cas d'expulsion.
- Inciter les migrants qui le désirent à retourner au pays en leur accordant des facilités d'insertion ou de réinsertion.

Des accords ont été signés dans le cadre de la libre circulation des personnes et des biens. Parmi ces accords on peut retenir :

- L'adoption au plan multilatéral de l'accord sur la libre circulation des personnes et le droit d'établissement adopté dans le cadre de la CEDEAO.
- Les accords de transhumance signés entre le Mali et ses voisins (Burkina Faso, Mauritanie, Niger)
- Les accords d'établissement et de circulation des personnes signés à Niamey entre le Mali et le Niger en Avril 1964 ; entre le Mali et la Guinée signés à Bamako en Mai 1964
- La convention entre la France et le Mali sur la circulation et le séjour des personnes.

Ces différents accords visent d'une part, à faciliter les mouvements de population à travers les frontières, et d'autre part à conférer des garanties aux migrants dans la jouissance de leur droits et la recherche d'un meilleur système de protection mutuelle des travailleurs émigrés.

Projections de la population du Mali

Dans son document « Perspectives de la population résidente du Mali 1987 à 2022 » la Direction Nationale de la Statistique et de l'informatique s'est basée sur trois scénarios de projection (Tableau 3.6).

Tableau 3.6 : Projection des scénarios de croissance de la population du Mali

Population								
Scénario de projection	Hypothèse de Fécondité	Hypothèse de mortalité	Hypothèse de migration	2022	2025	2050	2075	2100
Scénario 1	Fécondité constante ISF ¹ =6,776	Unique	Unique	20.162.798	21.523.034	37.083.087	63.892.264	110.083.105
Scénario 2	Baisse modérée de la fécondité ISF = 4,374	Unique	Unique	17.500.375	18.680.097	32.186.402	55.455.526	95.547.038
Scénario 3	Baisse forte de la fécondité ISF= 3,470	Unique	Unique	15.898.837	16.071.415	29.240.880	50.380.542	86.803.099

En retenant l'hypothèse (baisse modérée de la fécondité) qui est la plus probable il ressort des projections les chiffres indiqués dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Evolution de la population

Augmentation de la population (%)	Période						
	1995-2005	2005-2015	2015-2022	2022-2025	2025-2050	2050-2075	2075-2100
population totale	26%	31%	17%	9%	2,2% par an		
population rurale	15%	17%	7%	4%	-	-	-
population urbaine	77%	63%	19%	16%	-	-	-

- non prévisible de manière réaliste à ces horizons temporels

Le Tableau 3.7 montre par exemple que la population totale a connu une augmentation de:

- 26% en 2005 par rapport à celle de 1995,
- 31% en 2015 par rapport à celle de 2005,
- 17% en 2022 par rapport à celle de 2015,
- 9% en 2025 par rapport à celle de 2022.

Grandes tendances démographiques.

Au Mali le taux d'accroissement naturel était de 3,7% entre 1976 et 1987. Ce taux est jugé trop élevé car à ce rythme et faisant abstraction des migrations, la population doublera tous les 19 ans. Cependant le Mali est un pays à forte émigration et ceci vient contrebalancer la forte croissance de la population et semble faire du Mali un pays à faible croissance générale de la population. Ainsi la population résidente a

¹ ISF (Indice Synthétique de Fécondité)

augmenté de 1,8% en moyenne entre 1976 et 1987 (et de 4,5% pour le milieu urbain 1,2% pour le milieu rural).

A l'horizon 2025 (Tableau 3.8) il est prévu :

- Un début de baisse du taux de fécondité en milieu urbain
- Une diminution progressive de la mortalité au niveau national.

On observera aussi dans le scénario de prévision 1997-2025²,

- Une baisse de la proportion des jeunes de moins de 15 ans (de 48.7% en 1997 à 43% en 2025
- Une augmentation de 33.1% à 40.8% de la population en classe d'âge de « 15 à 39 ans » à l'horizon 2025

Tableau 3.8 : Evolution de la structure de la population (1997-2025)

Classe d'âge	Pourcentage dans la population totale	
	en 1997	en 2025
Moins de 15 ans	48,7	43
15 ans à 39 ans	33,1	40,8
Adultes	12,3	10,8
Personnes âgées	5,9	5,4

3.1.3. Scénario de répartition spatiale de la population.

Selon le recensement général de la population et de l'habitat, la population malienne a atteint 9,790 million en 1998. Cette population est inégalement répartie :

- En 1997, 65% de la population vivait sur 25% du territoire,
- En 1998, 91% de la population résidente n'occupe que 30% du territoire.

De 1987 à 1998 la densité de la population est passé de 6,2 habitants/Km² avec 0,9 habitants /Km² habitants à Tombouctou 25,9 habitants /Km² à Ségou pour l'année 1998.

Tendance urbaine de la population

En l'an 2025 plus de 9 millions d'habitants soit environ 50% de la population malienne vivront dans les villes. A cet horizon l'effectif des villes passera de 80 en 1987 à 108 en 2025.

3.1.4. Scénario de croissance économique

Le Mali fait parti des pays les plus pauvres du Monde. Le revenu par tête est d'environ 250 dollars par an. Le PIB est estimé en 1998 à 2,646 milliards de dollars US. Il se répartit comme suit :

- Secteur Primaire 47%
- Secteur Secondaire 16%
- Secteur Tertiaire 37%

Le taux de croissance économique est passé de -1,9% en 1990 à 6,7% en 1997 après la dévaluation du franc CFA. Il est ensuite retombé à 3,6% en 1998.

Le secteur primaire

² Etude Nationale Prospective, Mali 2025

Les ressources économiques dominantes au Mali proviennent de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche. L'agriculture est essentiellement pluviale et est tributaire des conditions climatiques. Quant au bétail il constitue la 3^{ème} source de devise du Mali (après le coton et l'or).

Il n'y a eu qu'un seul recensement du cheptel au Mali ; c'est celui de 1992 :

Toutefois dans les rapports annuels des services de l'élevage les taux de croissance retenus sont les suivants :

- Taux de croissance des bovins : 3% par an
- Taux de croissance des ovins : 5% par an
- Taux de croissance des équins : 10% par an
- Taux de croissance asins : 2,2% par an

La Pêche

En outre dans le commerce extérieur, le poisson occupe une place assez importante sur les marchés de l'UEMOA et de la CEDEAO, le Mali peut occuper une place stratégique dans l'offre de poissons d'eau douce : « en terme d'avantages comparatifs »

L'irrigation

Un élément non moins important est aussi les potentialités d'irrigation que les fleuves offrent pour l'agriculture. Dans ce dernier cas l'eau devrait être l'instrument pour la stratégie d'autosuffisance alimentaire voire un créneau pour le commerce intra commentaire de céréales.

L'énergie

La situation énergétique du Mali en 1995 était caractérisée par son bilan énergétique estimé à 2 576 000 TEP réparties comme suit :

- 88 % de consommation en bois et charbon de bois
- 11,2 % de consommation en produits pétrolier
- 0,8 % de consommation en électricité.

L'analyse de ce bilan montre que l'essentiel de la consommation d'énergie se situe au niveau du bois énergie et des hydrocarbures ce qui montre la part prédominante de ces secteurs dans les émissions de gaz à effet de serre. La production d'électricité occupe une part très faible dont 73 % sont cependant d'origine hydraulique. Cette part de l'hydroélectricité est appelée à augmenter dans le futur si les conditions climatiques le permettent avec la mise en service probable du barrage de Manatali en Août 2001 et la mise en valeur du potentiel hydraulique qui est estimé à 1050 MW dont seulement 50 mégawatts sont actuellement installés. Le choix des scénarios d'émission doit aussi tenir compte des hypothèses d'évolution des sources d'énergie électrique (notamment l'hydroélectricité) qui conditionnent fondamentalement le développement économique et technologique d'un pays.

3.2. SCENARIOS D'EMISSIONS

Les scénarios d'émission sont élaborés à partir d'hypothèses d'émissions globales de GES. Ces hypothèses sont basées sur la croissance démographique, le développement socio-économique et le niveau technologique. Les évolutions futures de ces facteurs sont hautement incertaines. Les scénarios sont des images diverses du déroulement possible du futur et ils constituent un outil approprié pour analyser les émissions

futures de GES et pour évaluer les incertitudes. Ils aident à analyser l'évolution du climat, notamment sa modélisation et l'évaluation des impacts, l'adaptation et l'atténuation (IPCC, 2000).

Comme le recommande l'IPCC dans toute analyse, les différents scénarios SRES (A1, A2, B1, B2) disponibles dans le modèle MAGICC ont été utilisés. Ils permettent, à partir d'un scénario sans adoption de mesures d'atténuation (reference scenario) et d'un scénario avec considération de stratégies de réduction de GES (policy scenario), de définir en fonction de la sensibilité du climat :

- Les variations de la température et du niveau de la mer,
- La variation de la concentration du dioxyde de carbone CO₂,
- Le forçage radiatif,
- L'émission dues aux combustibles fossiles et à la déforestation.

Le choix des scénarios d'émission est basé sur une analyse de la situation socio-économique de la région ou du pays à partir d'une hypothèse de développement de références ou d'une hypothèse de développement volontariste soutenu par des politiques d'atténuations de GES.

De l'analyse socio-économique qui précède et des perspectives de développement futur qui en découlent nous retenons les scénarios d'émission de GES suivants :

- Scénario de référence : scénario A2
- Scénario de politique d'atténuation : scénario B2.

Choix des scénarios d'émission et des paramètres dans MAGICC

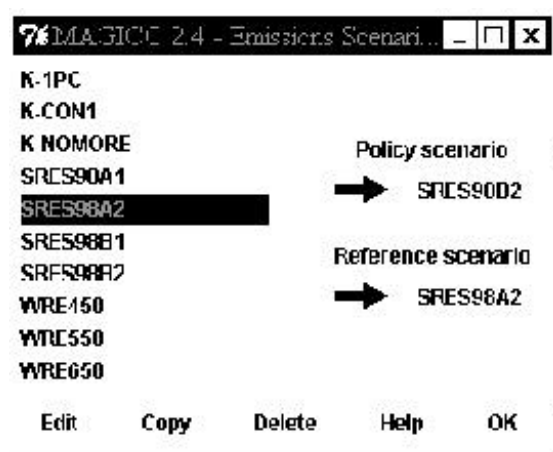


Figure 3.1 : Choix des scénarios.

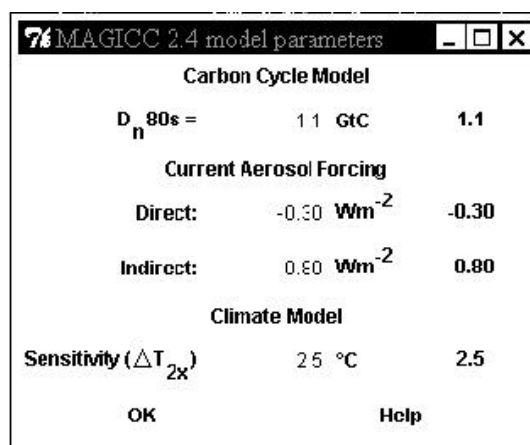


Figure 3.2 : Choix des paramètres.

L'année de référence choisie dans MAGICC est 1990. L'horizon temporel choisi est 2025 parce qu'il correspond à la perspective retenue au niveau national pour la planification. En plus de cet horizon, les horizons temporels 2050, 2075 et 2100 seront examinés. Les trois sensibilités du climat (1,5 ; 2,5 et 4,5) retenues par les études de l'IPCC ont été utilisées.

La simulation effectuée donne à l'horizon temporel choisi, les paramètres de sortie de MAGICC qui sont:

- L'élévation de température (ΔT),
- La concentration de dioxyde de carbone (CO₂),
- Le forçage radiatif (Forç), et,
- Les émissions dues au brûlage du carbone fossile (Fossil) et à la déforestation (Défor), du scénario sans intervention (reference scenario) et du scénario avec intervention (policy scenario) comme l'indiquent les Figures 3.3 à 3.6 et le Tableau 3.9.

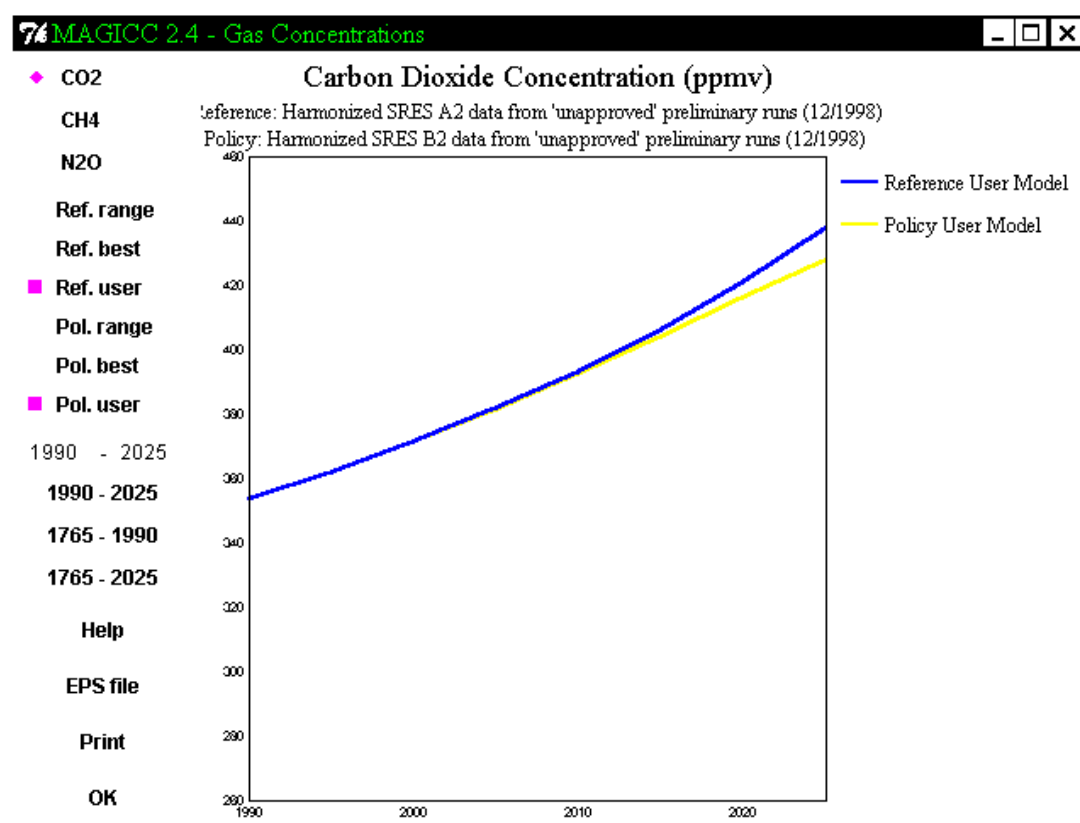


Figure 3.3 : projection de la concentration de CO₂ au niveau global à l'horizon 2025.

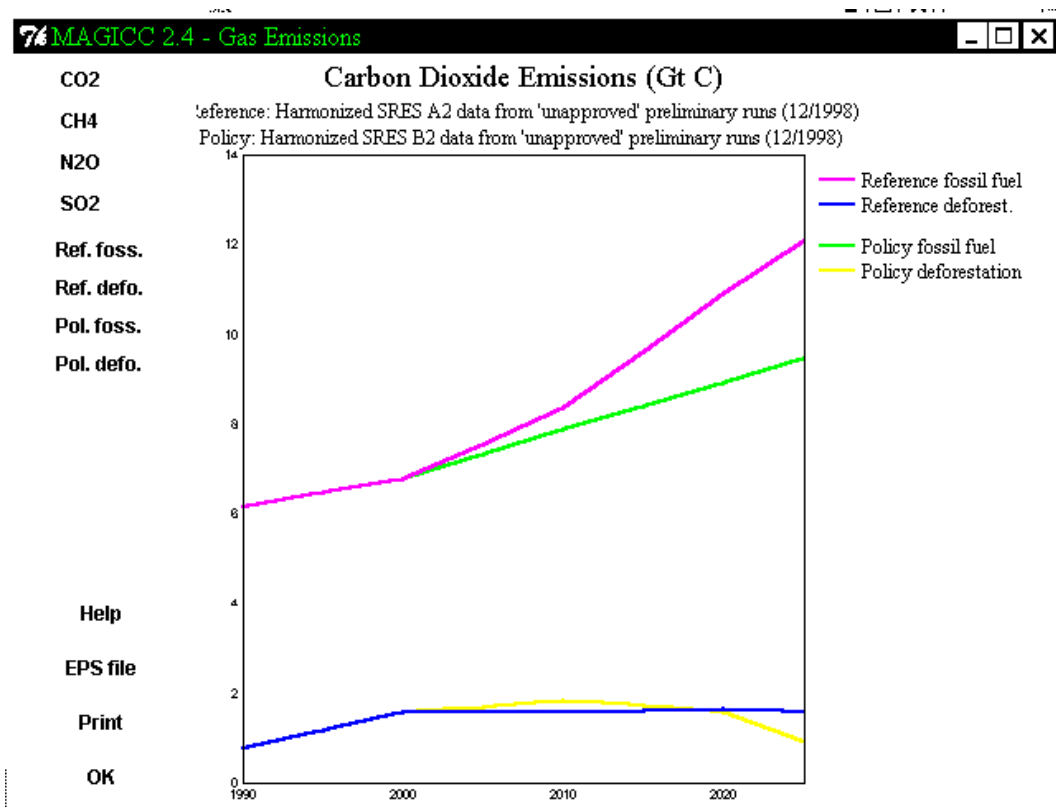


Figure 3.4 : Projection des coefficients d'émissions fossile et de la déforestation au niveau global à l'horizon 2025.

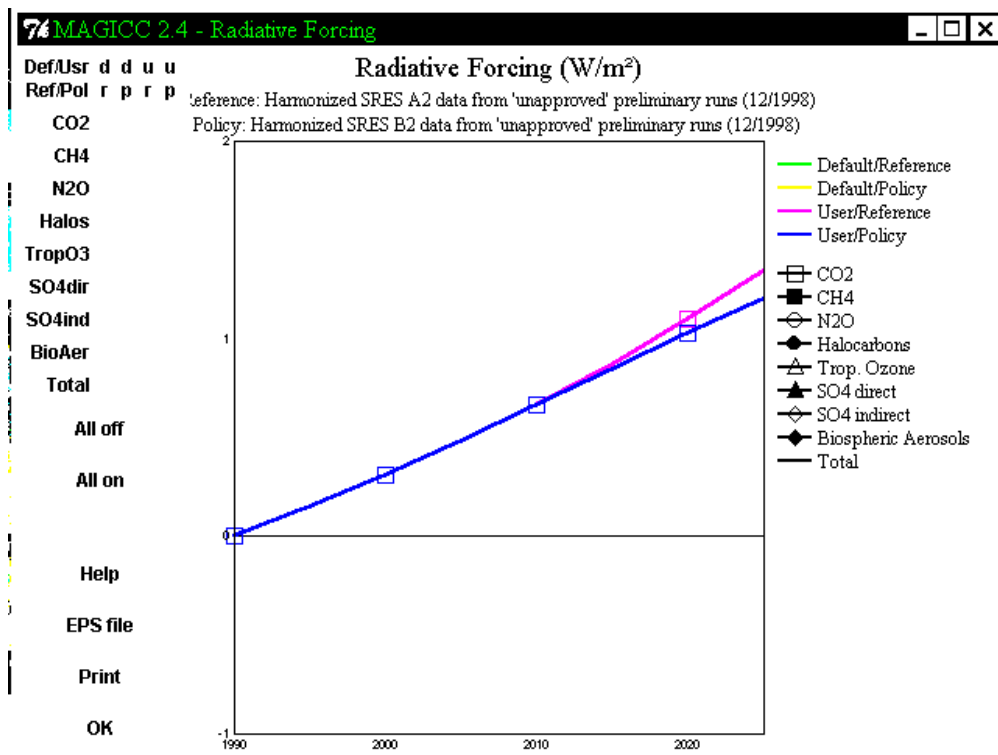


Figure 3.5 : Simulation du forçage radiatif global à l'horizon 2025.

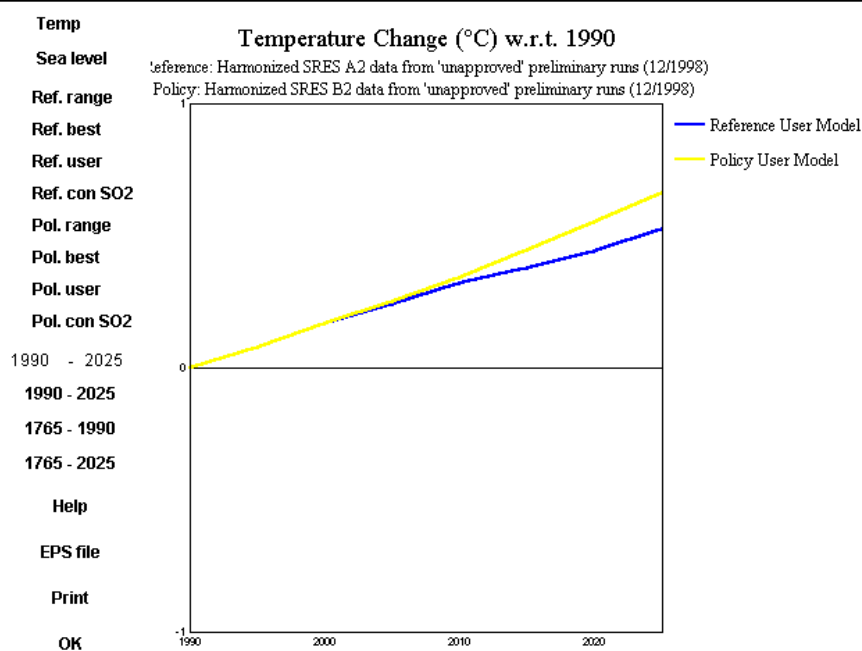


Figure 3.6 : Projection du réchauffement global à l’horizon 2025.

Tableau 3.9: Projection des paramètres de sortie sous MAGICC.

Horizon temporel	DT (°C)	CO2 (ppmv)	Forçage radiatif (W/m ²)	Fossile (Gt C)	Déforestation (Gt C)
Sensibilité = 1,5					
2025	-0,1	10	0,2	2,6	0,8
2050	0,1	50	0,8	5,4	1,0
2075	0,4	120	1,3	10,0	1,0
2100	0,8	240	2,0	14,0	1,0
Sensibilité = 2,5					
2025	-0,2	10	0,3	2,6	0,8
2050	0,0	50	0,8	5,4	1,0
2075	0,5	120	1,3	10,0	1,0
2100	1	240	2,0	14,0	1,0
Sensibilité = 4,5					
2025	0,1	10	0,2	2,6	0,8
2050	0,1	50	0,8	5,4	1,0
2075	0,7	120	1,3	10,0	1,0
2100	1,2	240	2,0	14,0	1,0

4. UTILISATION DE SCENGEN

Le but de l'utilisation de ce logiciel est de réaliser les représentations spatiales des CC avec des résultats des expériences de GCM avec SCENGEN. Il s'agit de construire un ensemble de scénarios futurs de CC géographiquement explicite à partir d'expériences de GCM et de modèles climatiques simples combinés avec des climatologies régionales et globales.

4.1 Identification des points de grille de la maille GCM sur le Mali

On identifie sur la superficie du pays (ou de la zone d'étude) le nombre de points de grille de 5° de latitude sur 5° de longitude. Dans le cas du Mali, nous avons obtenu sept (7) grilles dans chacune desquelles se trouve une station synoptique de la météorologie nationale (Tableau 4.1, Figure 4.1).

Tableau 4.1 : Points de grille de la maille de CGM de résolution 5° X 5° sur le Mali.

Point de grille	Latitude	Longitude	Stations synoptiques
1	10 – 15° N	15° W – 10° W	Kayes
2	10 – 15° N	10° W – 5° W	Bamako, Bougouni, Sikasso, Koutiala
3	10 – 15° N	5° W – 0°	Mopti, Gao
4	15 – 20° N	5° W – 0°	Tombouctou, Aguelhok
5	15 – 20° N	0° – 5° E	Ansongo
6	20 – 25° N	5° W – 0°	Taoudeni
7	20 – 25° N	0° – 5° E	Tessalit

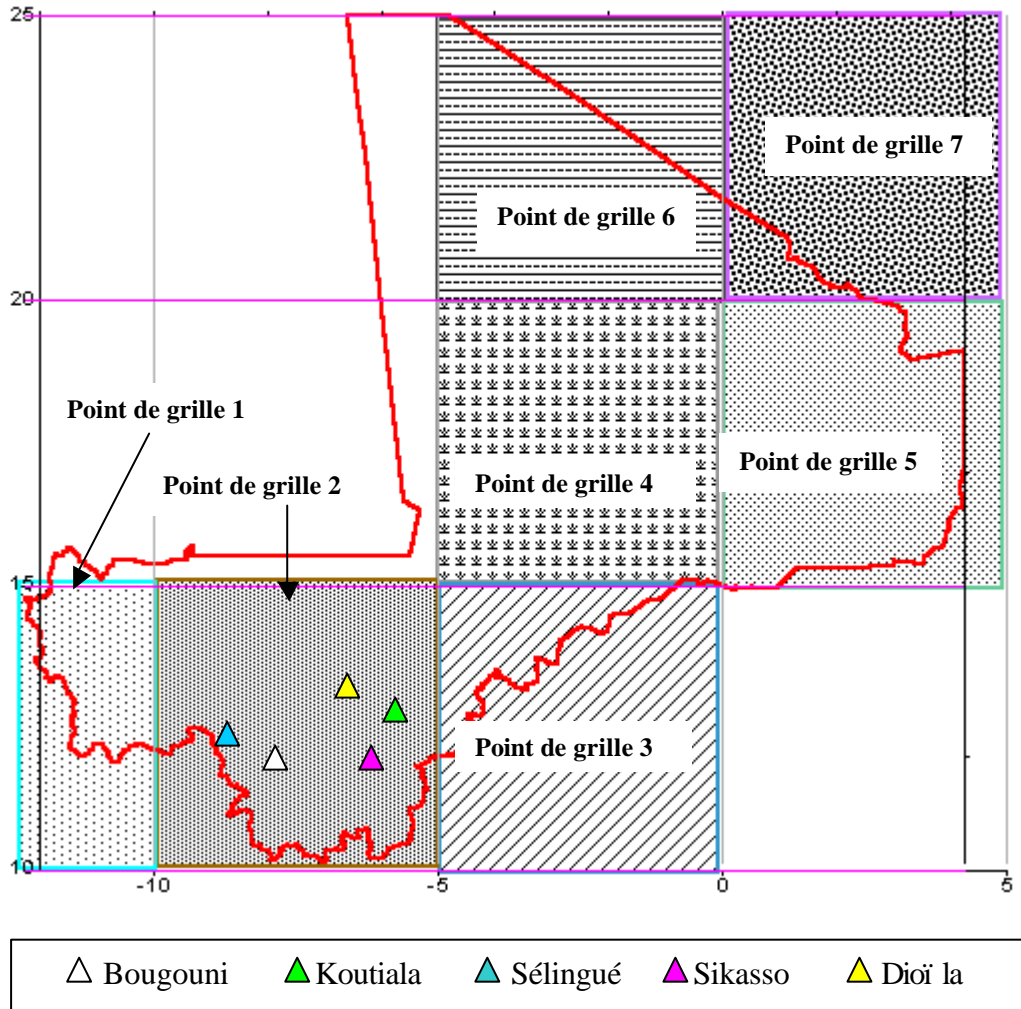


Figure 4.1: Points de grille de la maille de GCM de résolution 5° X 5° sur le Mali

Nous avons mis en relief certaines localités du point de grille numéro 2 (Figure 4.1). Le choix de ces sites est lié à celui du secteur de nos deux autres études sur la vulnérabilité et l'adaptation aux changements climatiques au Mali. En effet, c'est dans ces localités que nous avons effectué les études de vulnérabilité et d'adaptation sur le maïs et les ressources en eau. Ces localités sont situées dans la zone sud du Mali qui est la plus économiquement importante sur le plan des ressources agricoles et la disponibilité des ressources en eau. Par ailleurs, c'est une zone qui a bénéficié d'un bon encadrement technique des agriculteurs d'où la possibilité d'avoir des données pour les études d'impacts et d'adaptation aux changements climatiques.

4.2 Choix de GCM

La simulation avec SCENGEN a été effectuée avec chacun des GCM aux trois sensibilités du climat (S=4,5 ; S=2,5 ; S=1,5) et pour les principaux points de grilles qui couvrent le Mali (points de grilles 2, 4, 5 et 6). Un extrait des variations de température et de précipitation issues de ces simulations pour l'horizon 2025 est donné par le Tableau 4.2.

Tableau 4.2: Extrait des projections de GCM à l'horizon 2025.

GCM	S=4,5		S=2,5		S=1,5		Points de grille
	Delta_T	Delta_P	Delta_T	Delta_P	Delta_T	Delta_P	
HadCM2	1,5	-16,3	1,1	-11,4	0,8	-8,3	2
	2,1	-2,5	1,5	-1,8	1,1	-1,3	4
	2,0	7,1	1,4	5,2	1,0	3,7	5
	1,9	13,5	1,4	9,8	1,0	6,2	6
UKTR	1,5	-19,2	1,0	-13,5	0,8	-9,8	2
	1,5	-14,9	1,0	-10,5	0,8	-7,6	4
	1,5	-9,4	1,1	-6,8	0,8	-4,8	5
	1,6	-11,6	1,2	-8,4	0,8	-5,9	6
CSIRO-TR	1,3	-6,8	0,9	-4,8	0,7	-3,5	2
	1,4	-2,5	1,0	-1,8	0,7	-1,3	4
	1,6	0,4	1,1	0,3	0,8	0,2	5
	1,6	-5,4	1,2	-3,9	0,8	-2,8	6
ECHAM4	1,5	-1,4	1,0	-0,9	0,7	-0,7	2
	1,7	5,1	1,2	3,5	0,9	2,6	4
	1,6	6,8	1,1	4,9	0,8	-0,8	5
	1,8	6,8	1,3	4,9	0,9	3,5	6
UKHI-EQ	1,3	-14,1	0,9	-9,9	0,7	-7,2	2
	1,4	-14,0	1,0	-9,8	0,7	-7,2	4
	1,3	-21,3	0,9	-15,4	0,7	-10,9	5
	1,4	-29,0	1,0	-21,0	0,7	-14,8	6
CSIRO2-EQ	0,9	0,4	0,6	0,3	0,5	0,2	2
	1,0	-1,4	0,7	-1,0	0,5	-0,7	4
	1,2	-8,3	0,9	-6,8	0,6	-4,3	5
	1,4	-14,0	1,0	-10,1	0,7	-7,2	6
GFDL-TR	1,2	0,9	0,9	0,6	0,6	0,4	2
	1,1	2,0	0,8	1,4	0,6	1,0	4
	1,1	7,6	0,8	5,5	0,6	3,9	5
	1,4	7,8	1,0	5,7	0,7	4,0	6
BMRC-EQ	0,9	-0,9	0,6	-0,6	0,4	-0,5	2
	0,9	-0,5	0,6	-0,3	0,5	-0,2	4
	1,1	-0,9	0,8	-0,7	0,6	-0,5	5
	1,5	-8,7	1,0	-6,3	0,7	-4,4	6

Pour discriminer les tendances des différents GCM en fonction de leurs sorties à l'horizon 2025, nous avons utilisé ces sorties conformément au Tableau 4.2 en présentant l'ensemble des nuages de points ΔP (%) en fonction de ΔT (°C). Chaque point correspond à un GCM pour une sensibilité donnée et un point de grille donné (Figure 4.3).

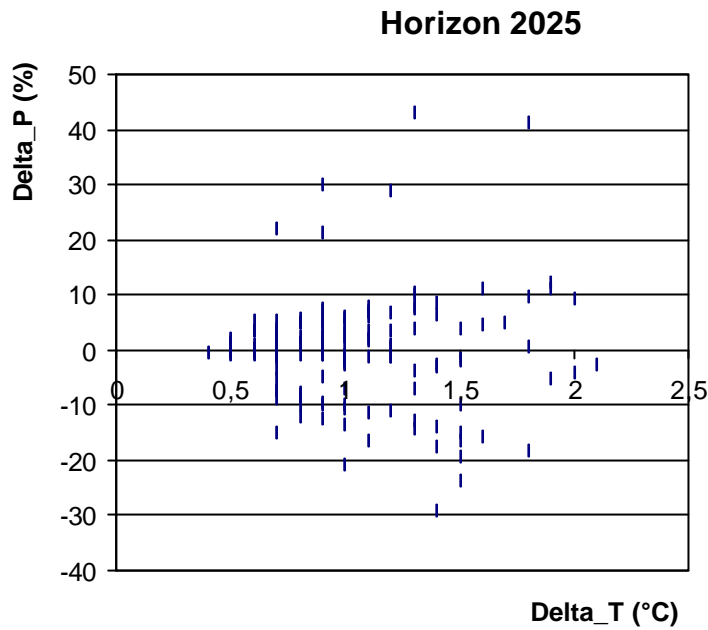


Figure 4.2 : Nuage de points non traité pour tous les GCM et aux 3 sensibilités du climat.

La Figure 4.2 ci-dessus montre un regroupement de la majorité des points dans la plage de précipitation de -20 à $+10\%$ par rapport à la normale 1961-1990. Il apparaît quelques points isolés entre 20 et 45 % d'une part et entre -20 et -30% d'autre part. Nous avons éliminé ces points. Ceci nous donne la configuration de la Figure 4.3.

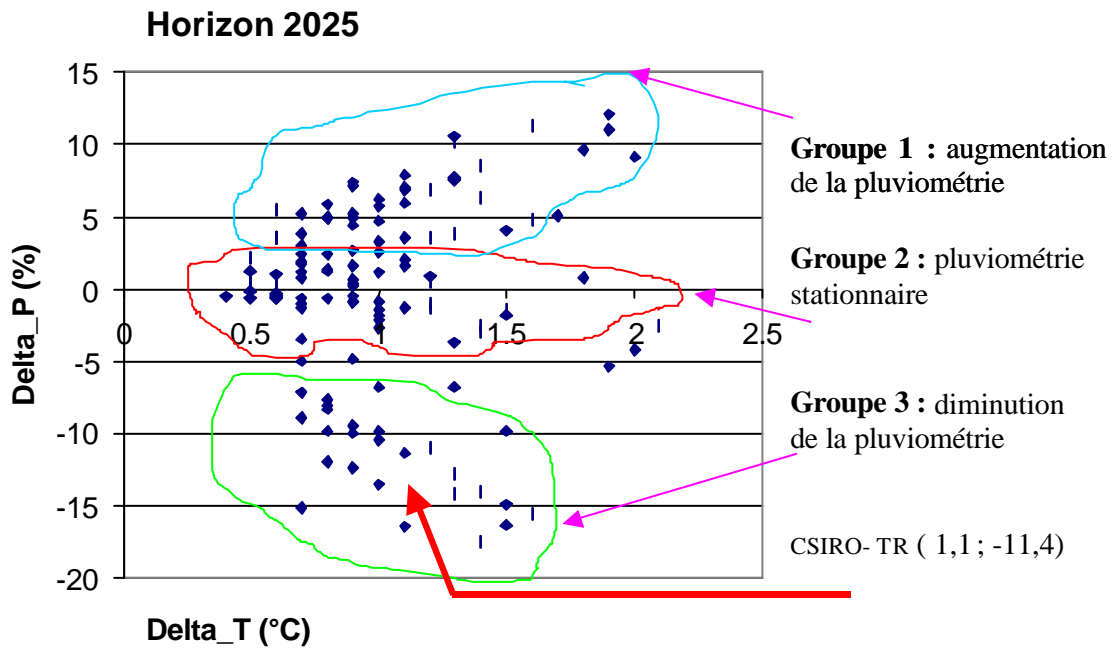


Figure 4.3 : classification des nuages de points correspondant aux GCM/

Il apparaît sur cette Figure, trois groupes de nuages de points. Le 1^{er} groupe correspond à l'ensemble des GCM qui prévoient une augmentation de la pluviométrie à l'Horizon 2025. Le second groupe correspond aux GCM qui indiquent une tendance stationnaire. Quant au 3^{ème} groupe, les variations sont à la baisse. Il est à noter que tous les GCM prévoient une augmentation de température. Le meilleur choix de GCM dans chaque regroupement doit se rapprocher autant que possible du centre du nuage de points. Ces GCM sont repérés à partir des coordonnées du point central dans le fichier Excel correspondant au nuage de points. Ainsi, les GCM suivants ont été obtenus :

- CSIRO-TR pour la tendance à la diminution de la pluviométrie moyenne annuelle,
- GFDL-TR pour la tendance à l'augmentation de la pluviométrie moyenne annuelle,
- BMRC-EQ pour la tendance stationnaire de la pluviométrie moyenne annuelle.

Parmi ces GCM, CSIRO-TR a été choisi suite à la comparaison des sorties de ce GCM aux valeurs réelles de température et de précipitation pour la normale 1961-1990 et pour l'année 2000 dans les localités de la zone d'étude (Tableaux 4.3 et 4.4 ; Figures 4.4 à 4.13).

Cette comparaison montre une bonne concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs de projection de la pluviométrie et de la température issues du choix du GCM CSIRO-TR à Bougouni, Koutiala, Sélingué, Sikasso et Dioï la pour l'année 2000. En effet, l'année 2000 est une période où l'on dispose à la fois des séries de mesures et de projections des paramètres climatiques étudiés. C'est pourquoi dans la suite de l'étude, CSIRO-TR a été le GCM retenu.

Tableau 4.3: Variations mensuelles de la pluie et les projections correspondantes du GCM CSIRO en 2000 dans les localités de la zone d'étude.

Mois	Pluviométrie (mm) par localité														
	Bougouni			Koutiala			Sélingué			Sikasso			Dioï la		
	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000
Janvier	0,4	0,8	0,39	0,6	2,10	0,58	0,8	0,2	0,78	1,1	12,9	1,07	0,5	0,0	0,49
Février	0,4	0,0	0,38	0,8	0,00	0,77	1,2	0,0	1,15	3,3	0,0	3,17	0,00	0,0	0,00
Mars	8,9	2,2	8,61	4,1	4,70	3,97	8,3	3,6	8,02	12,9	0,8	12,51	3,3	0,0	3,19
Avril	46,1	41,9	44,51	23,0	45,50	22,34	38,8	45,6	37,44	45,1	66,6	43,81	25,5	2,1	24,49
Mai	100,1	103,9	97,50	65,6	95,20	63,65	95,7	77,7	93,19	94,8	130,3	92,19	55,7	45,3	54,25
Juin	144,9	182,6	140,68	125,6	151,70	121,62	155,5	133,5	150,88	151,9	138,5	147,40	117,1	143,3	113,59
Juillet	247,1	235,2	240,48	217,0	225,60	211,60	233,4	215,5	227,10	235,7	178,5	229,97	194,8	289,7	266,70
Août	284,4	343,4	283,06	241,1	279,10	241,10	312,5	259,9	310,94	298,7	344,9	298,70	271,2	131,8	150,00
Septembre	211,7	162,7	209,94	164,7	140,00	162,39	239,3	129,7	237,39	193,2	137,2	190,84	130	119,3	128,62
Octobre	72,4	137,5	71,68	45,8	39,10	43,40	93,8	68,3	91,95	74,6	57,4	71,62	50,3	48,0	49,04
Novembre	6,8	30,3	6,93	3,5	0,00	3,59	6,8	38,2	6,92	11,2	25,1	11,47	2,4	6,0	2,35
Décembre	0,7	0,0	0,70	1,6	0,00	1,59	0,4	0,0	0,40	1,9	0,0	1,89	0,7	0,0	0,70
Moyenne	93,7	103,4	92,12	74,5	61,50	73,41	98,9	89,4	97,24	93,7	91,0	92,39	829,9	65,5	66,1
Cumul	1123,9	1240,5	1196,98	893,4	738,30	876,60	1 186,5	1072,2	1166,16	1124,4	1092,2	1 197,04	851,5	785,5	793,4

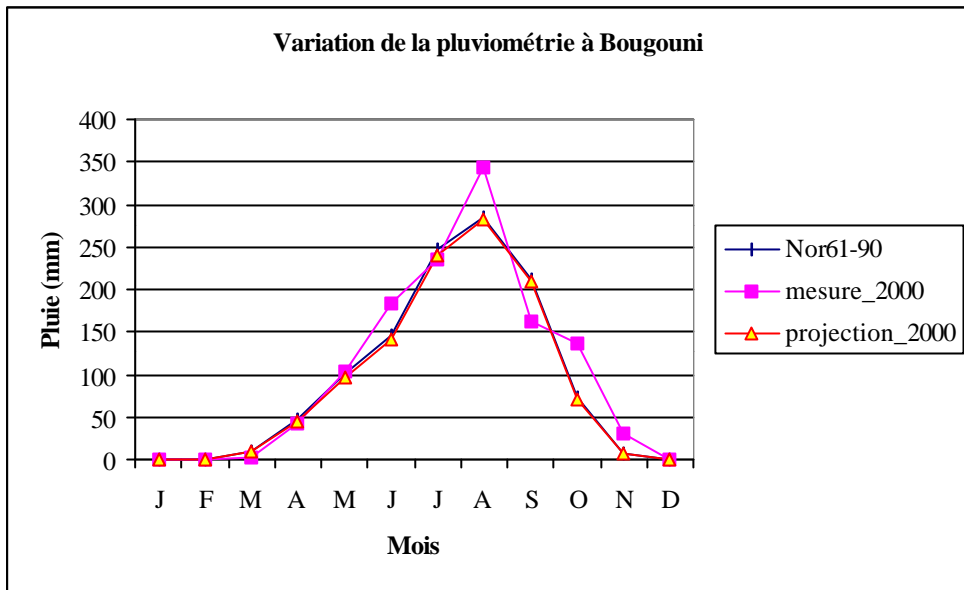


Figure 4.4 : Courbes comparatives de la pluie (mesurée et estimée) à Bougouni en 2000.

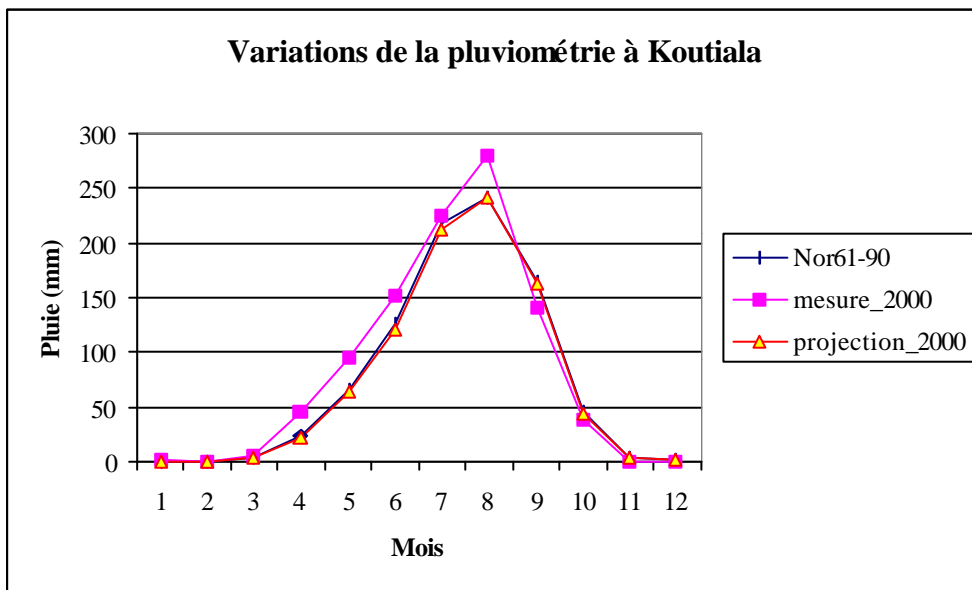


Figure 4.5 : Courbes comparatives de la pluie (mesurée et estimée) à Koutiala en 2000.

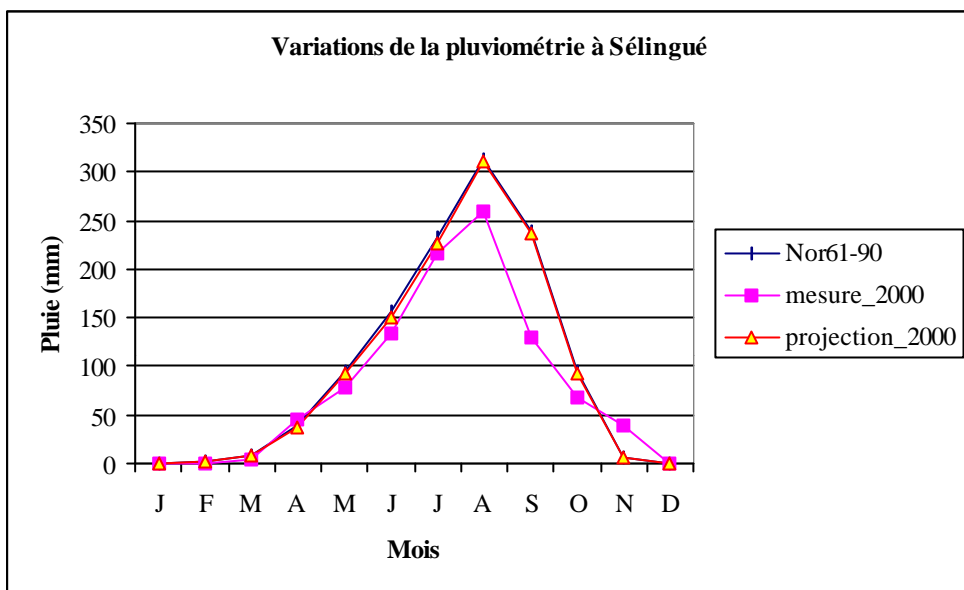


Figure 4.6 : Courbes comparatives de la pluie (mesurée et estimée) à Sélingué en 2000.

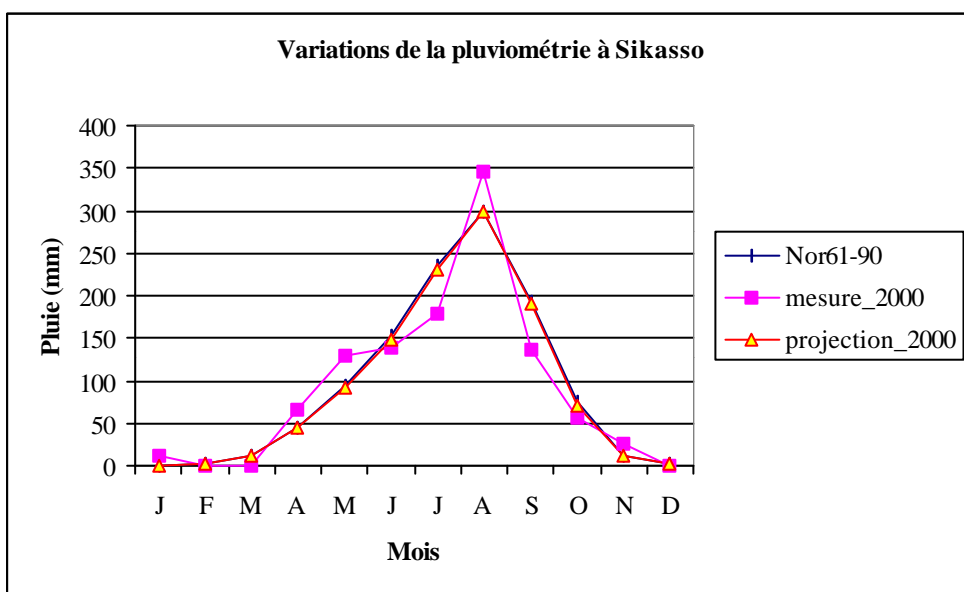


Figure 4.7 : Courbes comparatives de la pluie (mesurée et estimée) à Sikasso en 2000.

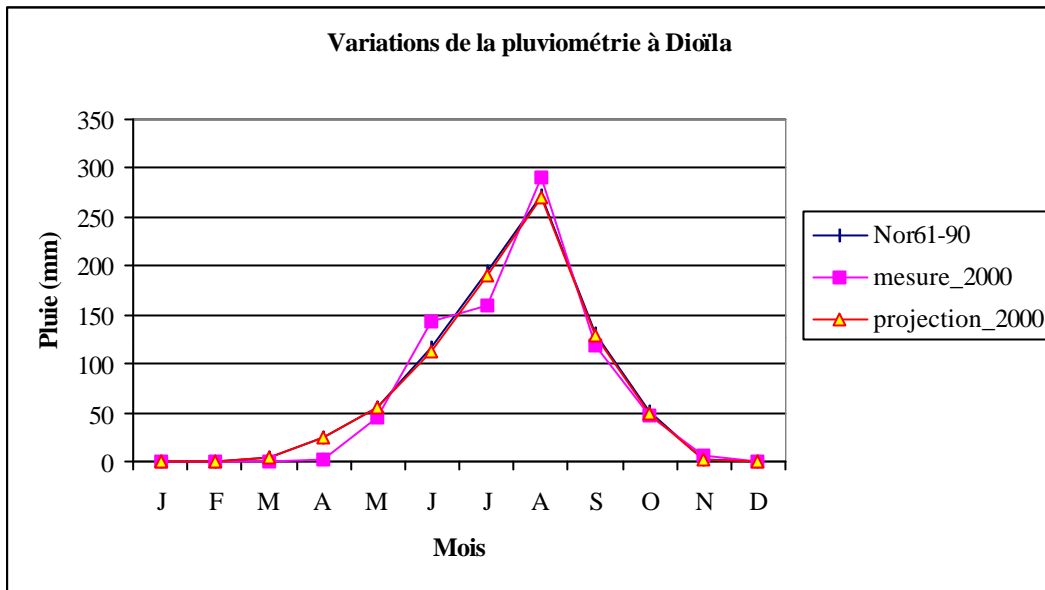


Figure 4.8 : Courbes comparatives de la pluie (mesurée et estimée) à Dioï la en 2000.

Tableau 4.4: Variations mensuelles de la température et les projections correspondantes du GCM CSIRO en 2000 dans les localités de la zone d'étude

Mois	Température (°C) par localité														
	Bougouni			Koutiala			Sélingué			Sikasso			Dioï la		
	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000	Normale 1961-99	Mesure 2 000	Projection 2 000
Janvier	24,7	27,2	25,0	23,1	26,9	24,4	25,5	27,3	25,8	24,1	26,9	24,4	25,6	24,0	25,9
Février	27,6	26,3	27,9	26,1	25,5	27,4	27,0	26,0	27,3	27,1	25,5	27,4	27,1	25,7	27,4
Mars	29,9	30,1	30,2	29,3	30,0	30,0	30,5	30,3	30,8	29,7	30,0	30,0	30,7	30,8	31,0
Avril	31,0	32,0	31,4	31,4	31,7	31,3	32,1	32,4	32,5	30,9	31,7	31,3	32,3	32,8	32,6
Mai	29,8	30,3	30,2	31,0	29,4	30,3	30,8	30,9	31,1	30,0	29,4	30,3	31,1	32,5	31,4
Juin	27,6	27,6	27,9	28,6	27,2	28,0	28,8	27,5	29,1	27,7	27,2	28,0	29,2	28,9	29,5
Juillet	26,0	26,6	26,3	26,5	25,8	26,5	27,1	27,1	27,4	26,2	25,8	26,5	27,4	27,1	27,7
Août	25,6	25,6	25,9	25,9	25,5	26,0	26,1	26,0	26,4	25,7	25,5	26,0	26,1	27,1	26,4
Septembre	26,0	26,6	26,3	26,4	26,1	26,5	26,9	27,4	27,2	26,2	26,1	26,5	26,9	27,5	27,2
Octobre	27,2	27,2	27,5	27,8	27,4	27,9	27,5	27,7	27,9	27,5	27,4	27,9	27,2	29,6	27,6
Novembre	26,3	26,3	26,6	26,0	26,9	26,6	26,6	26,9	26,9	26,2	26,9	26,6	26,7	28,1	27,0
Décembre	24,3	24,5	24,6	23,3	24,7	24,2	24,7	24,6	25,0	23,8	24,7	24,2	24,9	26,4	25,2
Moyenne	27,2	27,5	27,5	27,1	27,2	27,4	27,8	27,8	28,1	27,1	27,2	27,4	27,9	28,4	28,3

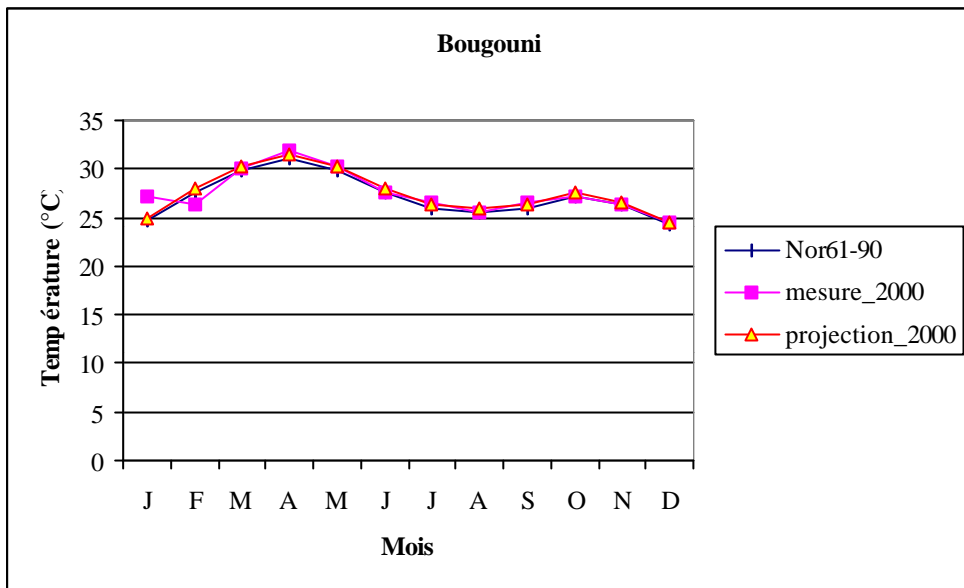


Figure 4.9 : Courbes comparatives de la température (mesurée et estimée) à Bougouni en 2000.

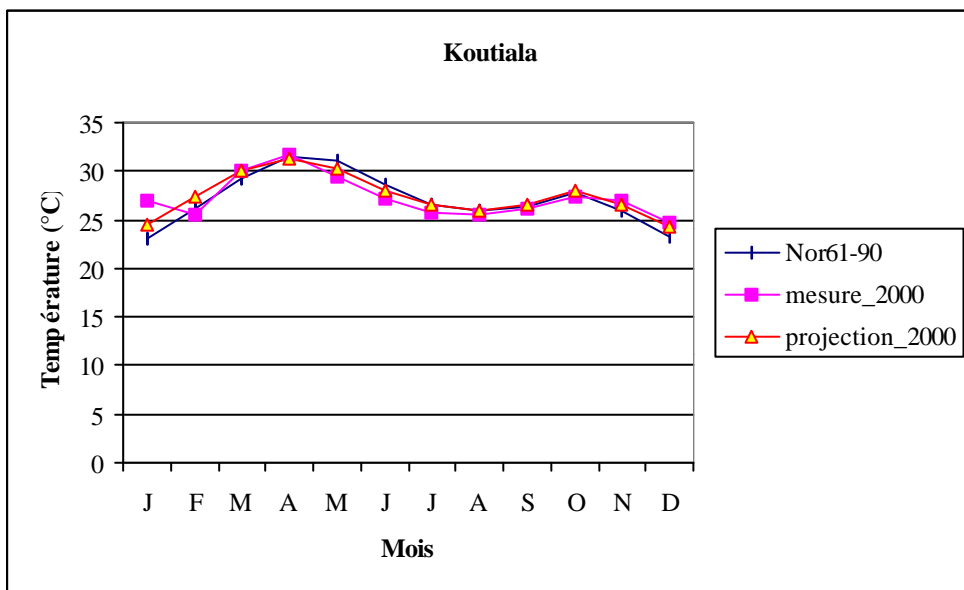


Figure 4.10 : Courbes comparatives de la température (mesurée et estimée) à Koutiala en 2000.

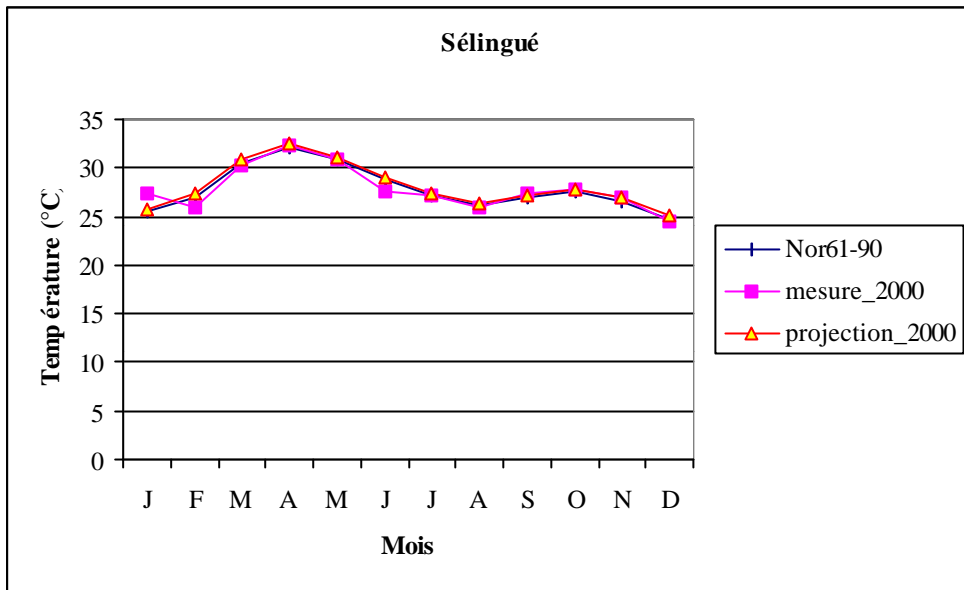


Figure 4.11: Courbes comparatives de la Température (mesurée et estimée) à Sélingué en 2000.

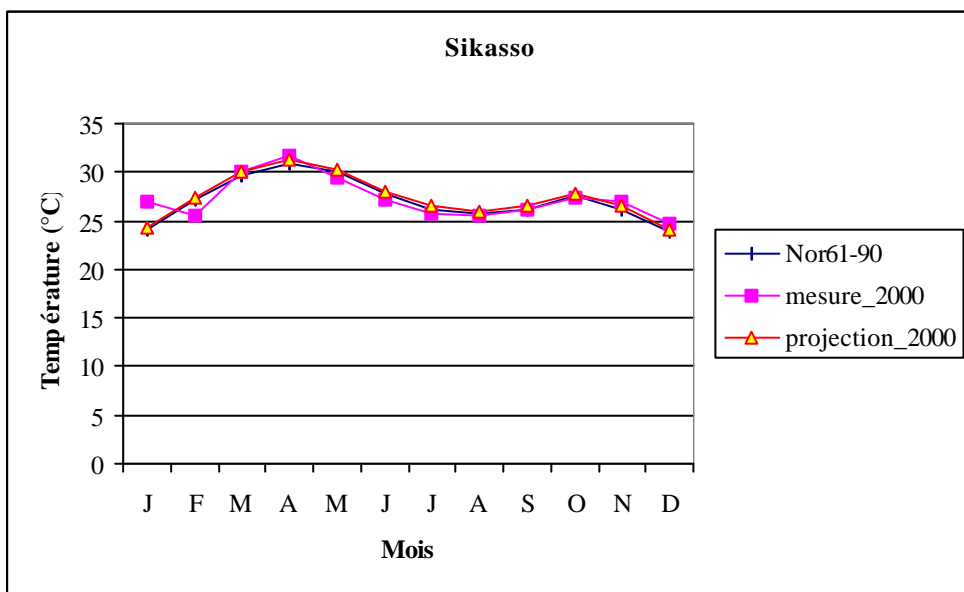


Figure 4.12 : Courbes comparatives de la température (mesurée et estimée) à Sikasso en 2000

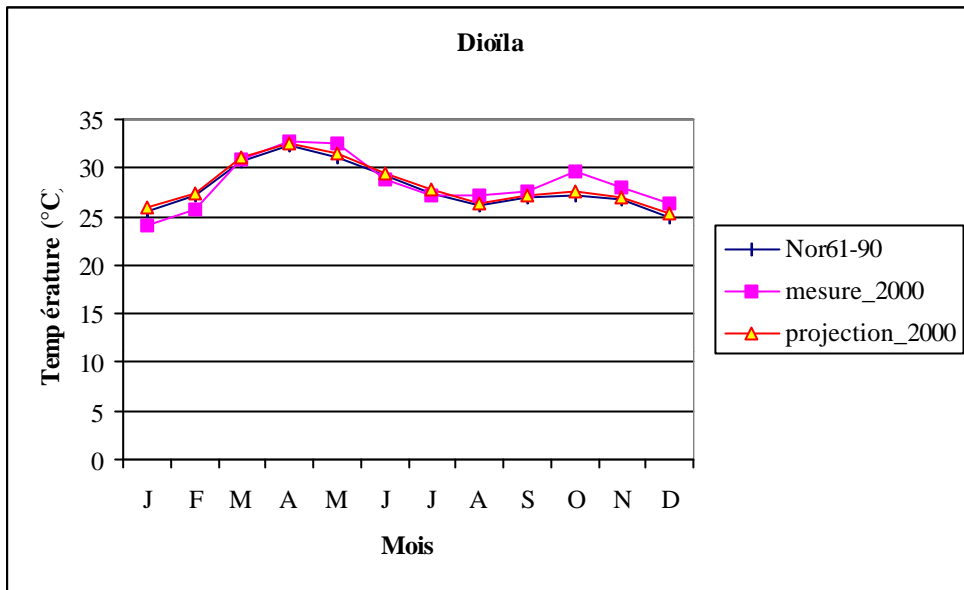


Figure 4.13 : Courbes comparatives de la température (mesurée et estimée) à Dioï la en 2000

4.3. Projections avec CSIRO-TR

Le logiciel SCENGEN utilise les résultats de MAGICC en association avec un GCM choisi pour générer des projections de paramètres climatiques (température, pluviométrie, couverture nuageuse) qu'il spatialise sur la carte du globe (Figure 4.14).

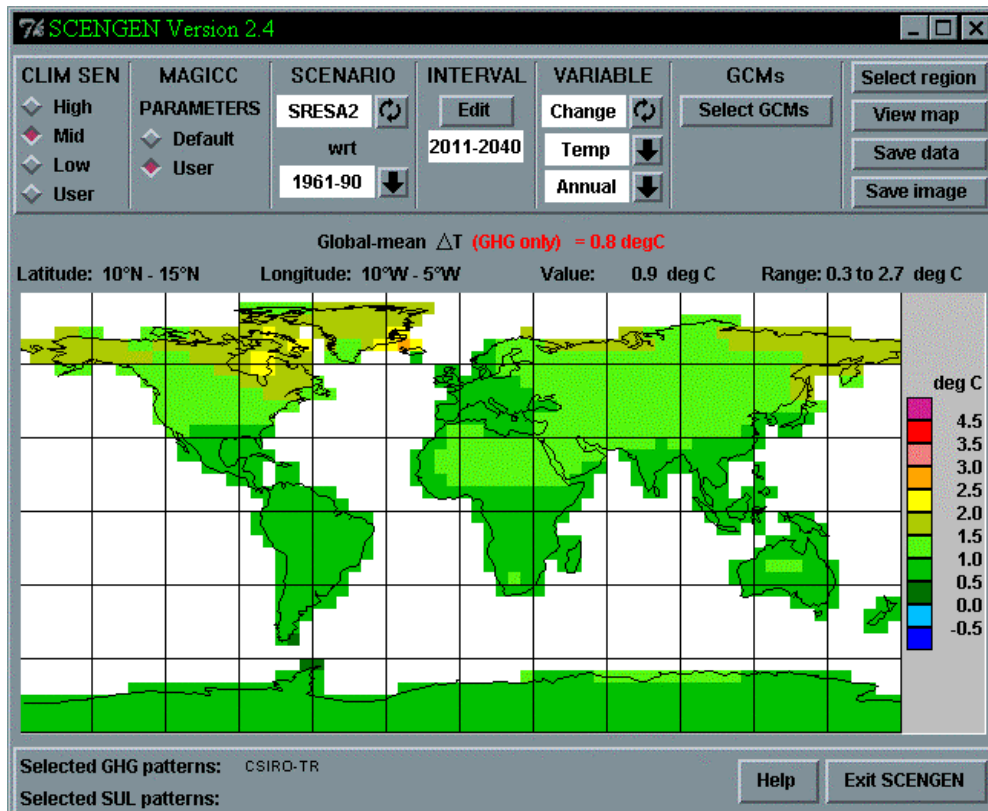


Figure 4.14: Projection avec SCENGEN.

Pour étendre la spatialisation à une échelle plus réduite que la grille du GCM, nous avons eu recours à l'interpolation statistique.

4.4 Interpolation spatiale des résultats

Nous avons déterminé les projections de précipitation (Figures 4.15 à 4.18) et de température (Figures 4.19 à 4.22) dans les localités concernées par l'étude pour chacun des horizons temporels 2025, 2050, 2075 et 2100 en interpolant les résultats obtenus sur les points de grille de GCM recouvrant la zone. Les coordonnées géographiques des localités concernées sont présentées dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Coordonnées de quelques localités de la zone d'étude.

Localités	Latitude (°)	Longitude (°)
Bougouni	11,40	-7,50
Dioï la	12,50	-6,80
Sélingué	11,60	-8,20
Sikasso	11,35	-5,68
Koutiala	12,40	-5,47
Kéniéba	12,80	-11,35

A l'horizon 2025, on note une diminution progressive de la pluviométrie d'Est en Ouest suivant des courbes de niveau de diminution organisées à peu près suivant un axe Nord-Est Sud-Ouest jusqu'au niveau de la latitude 20° Nord (Figure 4.15). Ainsi, cette diminution pourrait beaucoup varier à l'intérieur d'une même zone climatique. Par exemple dans la zone pré-guinéenne, une baisse de 4% pourrait être constatée à Sikasso, pendant qu'à Kéniéba on observerait une baisse de 5% (Figure 4.15 et Tableau 4.5). Une baisse de 4% pourrait être constatée plus au Nord à Kidal.

Ce profil de diminution des précipitations se retrouve au niveau des années 2050, 2075 et 2100 (Figures 4.16 à 4.18).

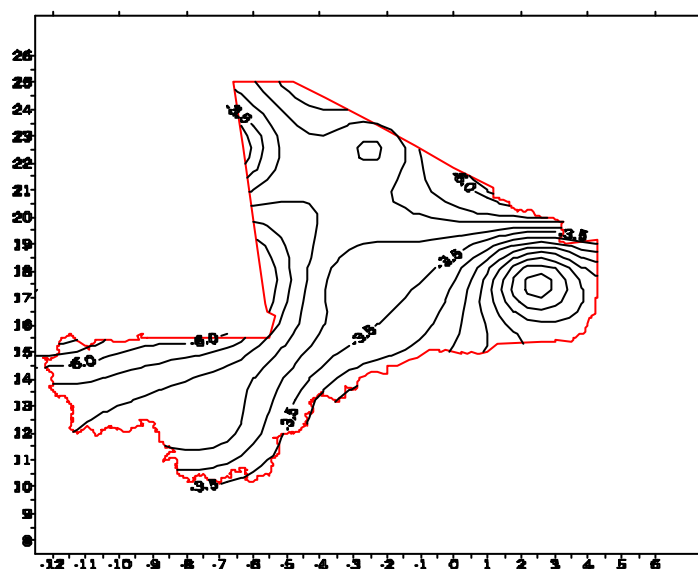


Figure 4.15: Variation moyenne annuelle (en %) de la pluviométrie au Mali en 2025.

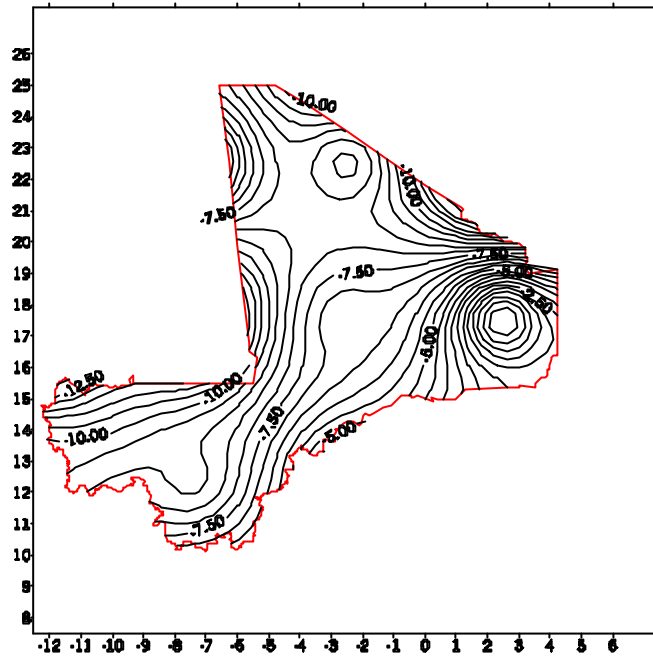


Figure 4.16: Variation moyenne annuelle (en %) de la pluviométrie au Mali en 2050.

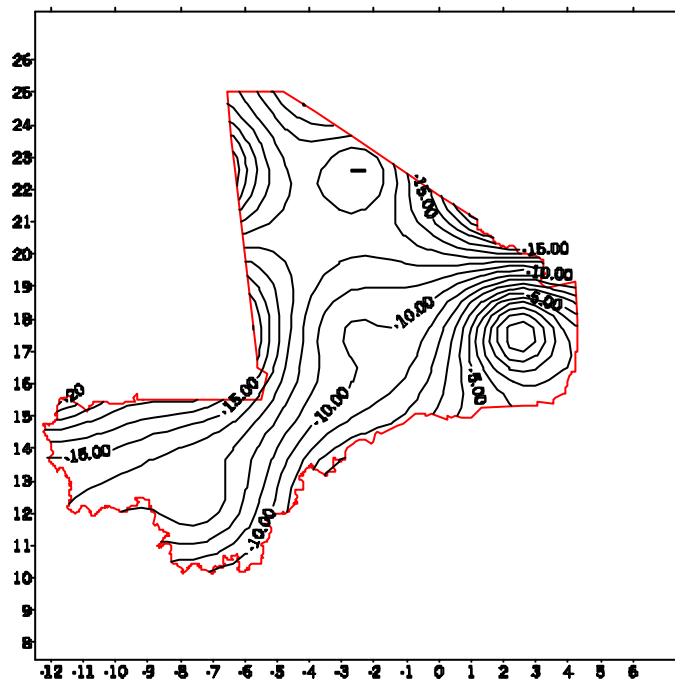


Figure 4.17: Variation moyenne annuelle (en %) de la pluviométrie au Mali en 2075.

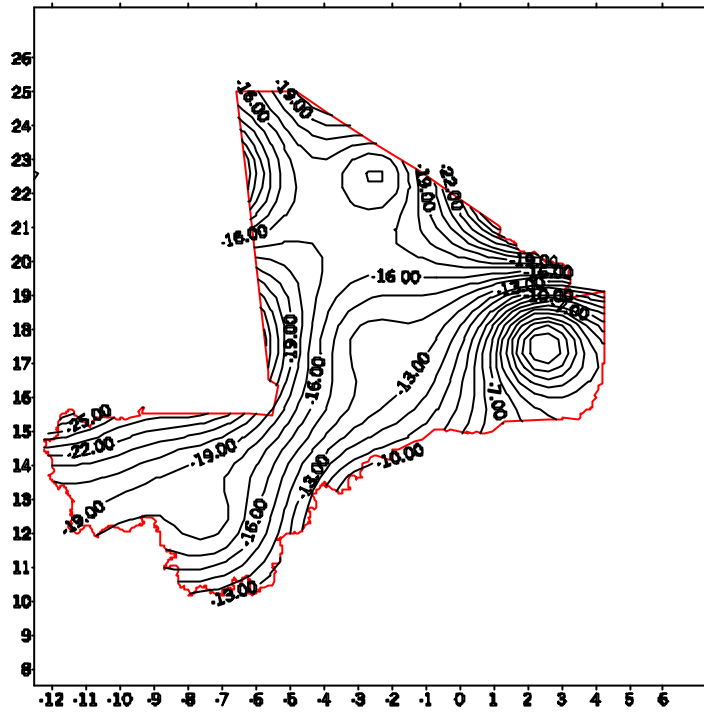


Figure 4.18: Variation moyenne annuelle (en %) de la pluviométrie au Mali en 2100.

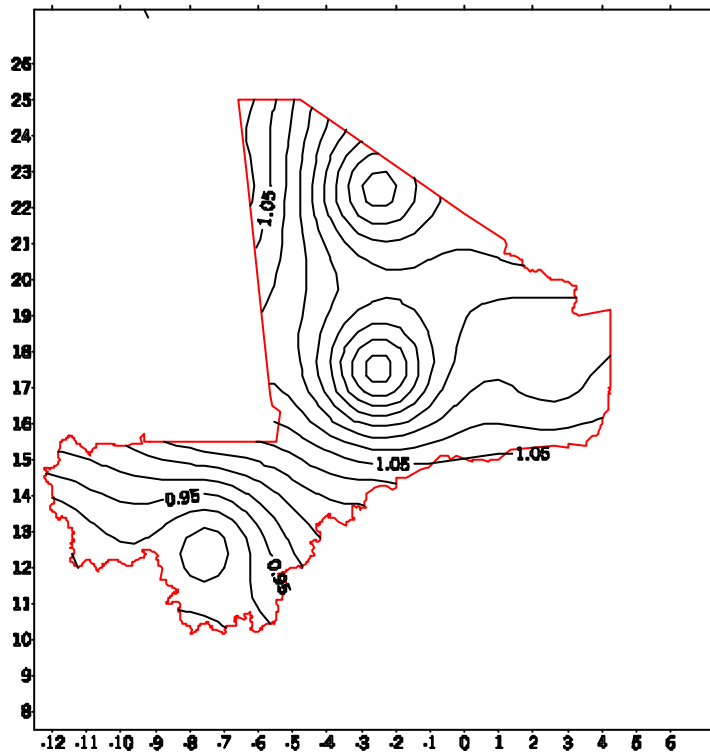


Figure 4.19: Variation moyenne annuelle (en °C) de la température au Mali en 2025. Les courbes de niveau de hausse de température sont surtout organisées suivant une direction Nord-Ouest Sud-Est jusqu'au niveau de la latitude 17°Nord (Figures 4.19 à 4.22). Sur chacune des courbes, on peut distinguer les limites des différentes zones climatiques du pays. Sur toutes ces Figures, on note une augmentation de la température du Sud vers le Nord.

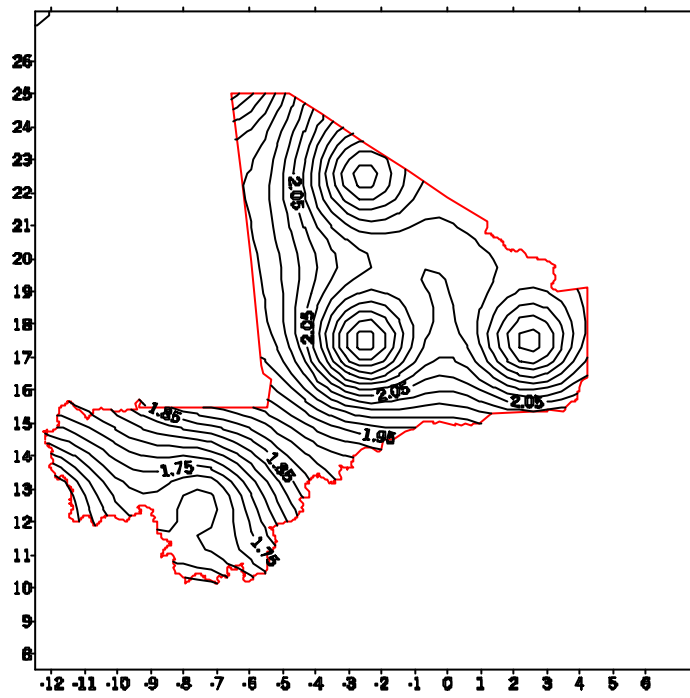


Figure 4.20: Variation moyenne annuelle (en °C) de la température au Mali en 2050.

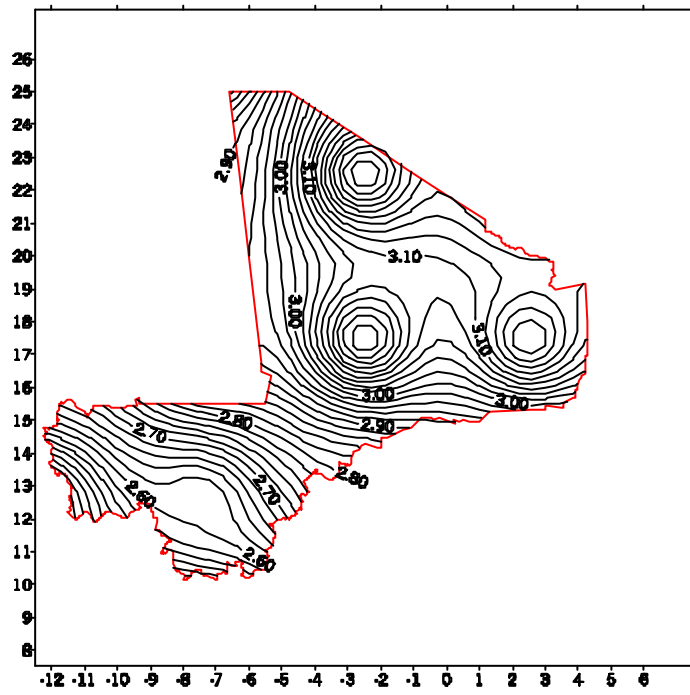


Figure 4.21: Variation moyenne annuelle (en °C) de la température au Mali en 2075.

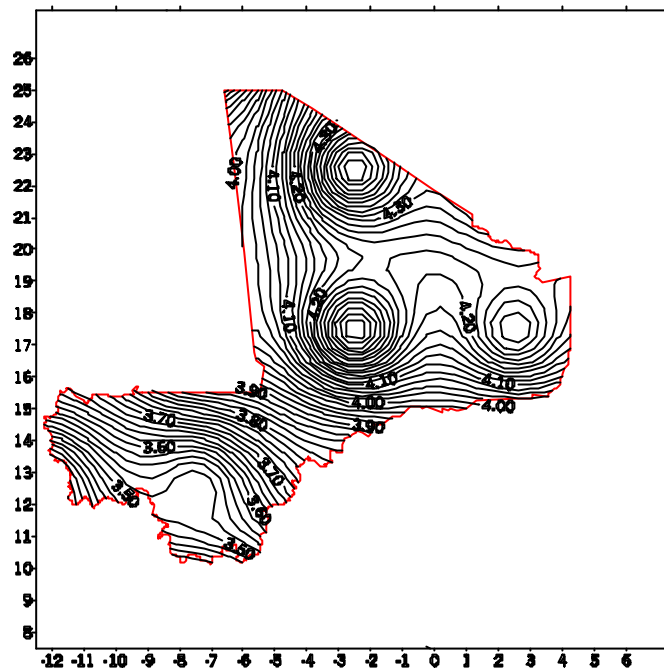


Figure 4.22: Variation moyenne annuelle (en °C) de la température au Mali en 2100.

Nous avons ensuite calculé pour chaque localité concernée par l'étude et pour chacun des horizons temporels 2025, 2050, 2075 et 2100 les précipitations et les températures mensuelles (Tableaux 4.6 à 4.15) en interpolant les résultats obtenus sur les points de grille de GCM recouvrant la zone.

Les Figures 4.23, 4.27 et 4.31 montrent une diminution progressive des taux de précipitation entre les mois de janvier et de septembre. Durant cette période, c'est l'intervalle de juin à septembre qui correspond à la saison des pluies au Mali mais Il peut souvent avoir une prolongation de d'hivernage aux mois d'octobre et de novembre. Enfin, quelques pluies épisodiques peuvent survenir en mars, avril et mai. Elles correspondent aux pluies dites de « mangues » car cette période correspond à la période de maturité des mangues au Mali.

L'augmentation de la pluviométrie durant les mois d'octobre et de novembre comme il a souvent été le cas au Mali, peut avoir des avantages comme des inconvénients. Du point de vue avantage, cette situation favoriserait une amélioration de la production des plantes à tubercules comme la patate, l'igname, l'arachide et des variétés tardives de céréales. Sur le plan inconvénient, on pourrait assister à une pénalisation de la production de certaines cultures comme le coton, les variétés précoces de maïs et le petit mil.

Les Figures 4.25, 4.26, 4.29, 4.30, 4.33 et 4.34 montrent une bonne concordance entre les profils de la température sur la moyenne 1961-90 et pour les horizons temporels 2025, 2050, 2075 et 2100 pour les différentes localités Ceci atteste une foi de plus le bon choix du scénario climatique.

Enfin, nous avons présenté les variations de températures dans les localités de Bougouni, Sikasso et Koutiala pour les horizons 2025, 2050 2075 et 2100 (Figure 4.24, 4.28 et 4.32).

Toutes ces Figures montrent un profil analogue avec des maxima en Avril et Octobre et des minima en Août.

4.4.1 BOUGOUNI

Tableau 4.6 : Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la pluviométrie à Bougouni.

Mois	Diminution de précipitation (%) à S = 2,5				Pluie normale (mm)	Pluie estimée (mm)			
	2025	2050	2075	2100		1961-90	2025	2050	2075
Janvier	-11,60	-15,55	-23,50	-32,00	0,4	0,35	0,34	0,31	0,27
Février	-15,50	-21,00	-31,10	-42,50	0,4	0,34	0,32	0,28	0,23
Mars	-12,75	-17,00	-25,50	-34,50	8,9	7,77	7,39	6,63	5,83
Avril	-14,75	-18,00	-27,00	-37,00	46,1	39,30	37,80	33,65	29,04
Mai	-10,25	-13,10	-20,10	-26,80	100,1	89,84	86,99	79,98	73,27
Juin	-11,25	-15,10	-22,50	-31,00	144,9	128,60	123,02	112,30	99,98
Juillet	-10,50	-14,00	-21,00	-28,60	247,1	221,15	212,51	195,21	176,43
Août	-3,60	-2,55	-4,00	-5,50	284,4	274,16	277,15	273,02	268,76
Septembre	-3,50	-6,53	-6,50	-9,80	211,7	204,29	197,88	197,94	190,95
Octobre	0,00	13,00	19,00	26,00	72,4	72,40	81,81	86,16	91,22
Novembre	-2,20	10,00	15,00	20,50	6,8	6,65	7,48	7,82	8,19
Décembre	-1,20	-2,46	-3,50	-4,80	0,7	0,69	0,68	0,68	0,67
Moy/AN	-4,56	-8,40	-12,50	-17,20	93,7	89,39	85,79	81,95	77,55
Cumul					1 123,9	1 045,54	1 033,35	993,97	944,85

Tableau 4.7 : Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la température à Bougouni.

Mois	Augmentation de température (°C) à S = 2,5				Température normale (mm)	Température estimée (°C)			
	2025	2050	2075	2100		1961-90	2025	2050	2075
Janvier	0,910	1,710	2,523	3,442	24,7	25,6	26,4	27,2	28,2
Février	0,910	1,710	2,600	3,508	27,6	28,5	29,3	30,2	31,1
Mars	0,990	1,798	2,692	3,684	29,9	30,9	31,7	32,6	33,6
Avril	0,905	1,950	2,850	3,920	31,0	31,9	33,0	33,9	34,9
Mai	0,985	1,786	2,680	3,660	29,8	30,8	31,6	32,5	33,5
Juin	0,900	1,695	2,570	3,480	27,6	28,5	29,3	30,2	31,1
Juillet	0,890	1,602	2,400	3,293	26,0	26,9	27,6	28,4	29,3
Août	0,810	1,445	2,165	2,992	25,6	26,5	27,1	27,8	28,6
Septembre	0,895	1,600	2,400	3,222	26,0	26,9	27,6	28,4	29,2
Octobre	0,995	1,875	2,770	3,750	27,2	28,2	29,0	29,9	30,9
Novembre	0,920	1,740	2,630	3,550	26,3	27,2	28,0	28,9	29,8
Décembre	0,920	1,730	2,630	3,540	24,3	25,2	26,0	26,9	27,8
Moy/AN	0,910	1,710	2,592	3,505	27,2	28,1	28,9	29,8	30,7

Taux de variation de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-90 à Bougouni

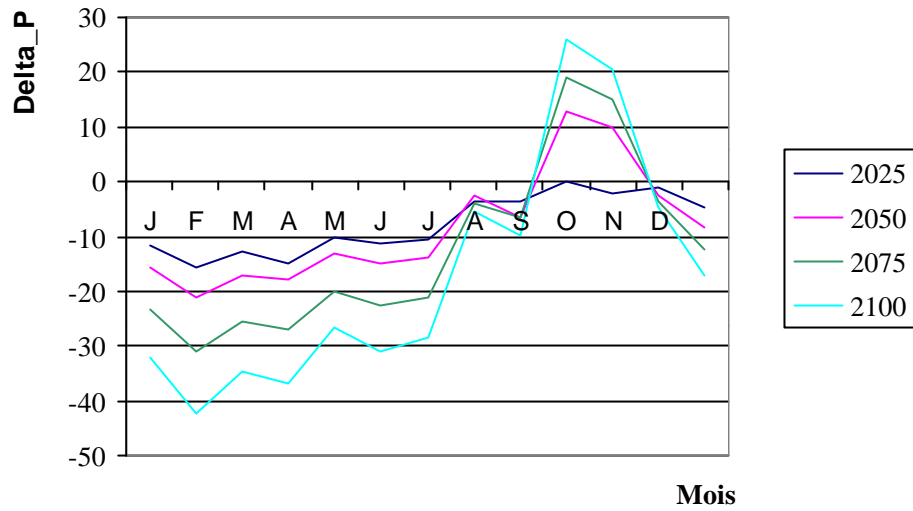


Figure 4.23: Evolution des taux de variation de la pluviométrie à Bougouni.

Accroissement mensuelle de la température par rapport à la normale 1961-90 à Bougouni

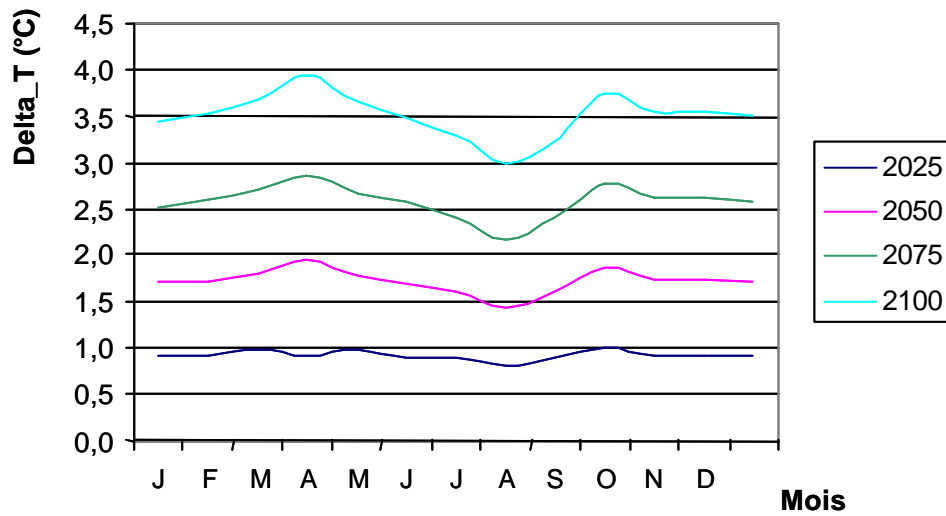


Figure 4.24: Evolution des taux de variation de la température à Bougouni.

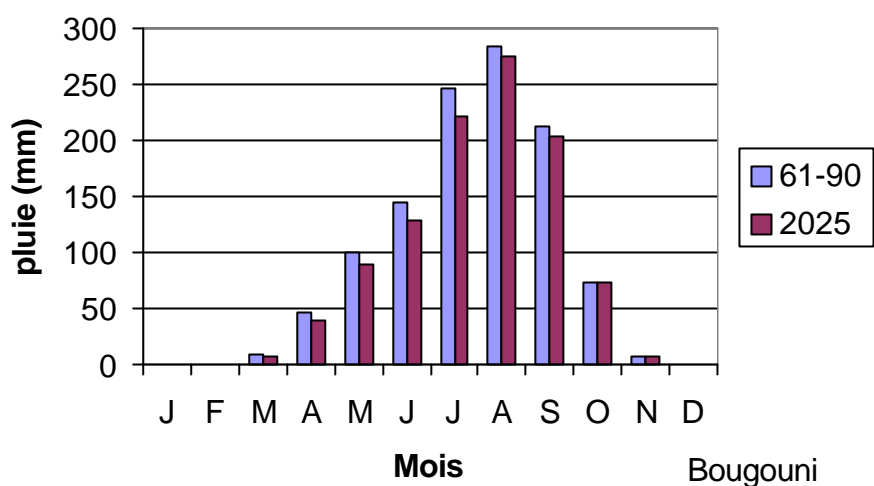


Figure 4.25 :Projection de la pluviométrie à Bougouni en 2025 et évolution de la normale pluviométrique 1961-1990.

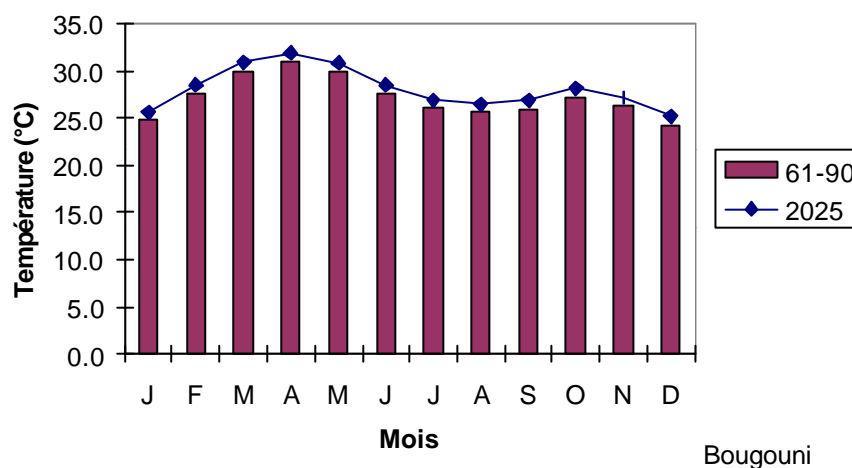


Figure 4.26 : Projection de la température à Bougouni en 2025 et évolution de la température normale 1961-1990.

4.4.2 SIKASSO

Tableau 4.8 : Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la pluviométrie à Sikasso

Mois	Diminution de précipitation (%) à S = 2,5				Pluie normale (mm) 1961-90	Pluie estimée (mm)			
	2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	-8,00	-15,00	-22,20	-30,50	1,1	1,01	0,94	0,86	0,76
Février	-11,50	-21,40	-31,70	-43,50	3,3	2,92	2,59	2,25	1,86
Mars	-8,60	-16,00	-23,70	-32,00	12,9	11,79	10,84	9,84	8,77
Avril	-8,00	-15,00	-22,50	-30,00	45,1	41,49	38,34	34,95	31,57
Mai	-7,80	-14,50	-21,60	-29,90	94,8	87,41	81,05	74,32	66,45
Juin	-8,30	-15,50	-23,00	-31,50	151,9	139,29	128,36	116,96	104,05
Juillet	-6,80	-12,50	-19,00	-26,00	235,7	219,67	206,24	190,92	174,42
Août	-0,80	-1,50	-2,00	-2,00	298,7	296,31	294,22	292,73	292,73
Septembre	-3,70	-6,50	-9,60	-13,00	193,2	186,05	180,64	174,65	168,08
Octobre	11,50	22,00	32,00	51,50	74,6	83,18	91,01	98,47	113,02
Novembre	-1,60	13,00	19,00	24,00	11,2	11,02	12,66	13,33	13,89
Décembre	-0,90	-1,50	-2,50	-3,50	1,9	1,88	1,87	1,85	1,83
Moy/AN	2,00	-7,20	-10,50	-14,50	93,7	95,57	86,95	83,86	80,11
Cumul					1124,4	1 082,03	1 048,75	1 011,14	977,45

Tableau 4.9 : Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la température à Sikasso

Mois	Augmentation de température (°C) à S = 2,5				Température normale (mm) 1961-90	Température estimée (°C)			
	2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	0,938	1,750	2,630	3,520	24,1	25,0	25,8	26,7	27,6
Février	0,932	1,732	2,653	3,540	27,1	28,0	28,8	29,7	30,6
Mars	0,990	1,820	2,718	3,710	29,7	30,7	31,5	32,4	33,4
Avril	0,995	1,930	2,850	3,900	30,9	31,9	32,8	33,7	34,8
Mai	0,990	1,808	2,700	3,680	30,0	30,9	31,8	32,7	33,6
Juin	0,910	1,710	2,570	3,480	27,7	28,6	29,4	30,3	31,2
Juillet	0,886	1,627	2,435	3,320	26,2	27,1	27,8	28,6	29,5
Août	0,827	1,510	2,258	3,070	25,7	26,5	27,2	27,9	28,8
Septembre	0,895	1,620	2,421	3,280	26,2	27,1	27,8	28,6	29,5
Octobre	1,006	1,890	2,800	3,800	27,5	28,5	29,4	30,3	31,3
Novembre	0,962	1,829	2,730	3,700	26,2	27,2	28,1	29,0	29,9
Décembre	0,960	1,789	2,710	3,660	23,8	24,8	25,6	26,5	27,5
Moy/AN	0,937	1,745	2,620	3,560	27,1	28,0	28,8	29,7	30,6

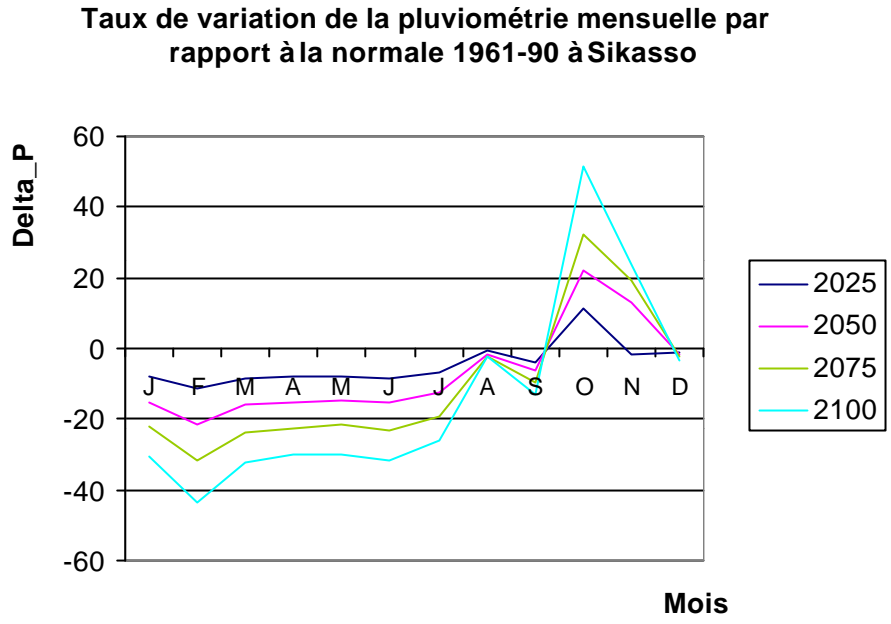


Figure 4.27: Evolution des taux de variation de la pluviométrie à Sikasso.

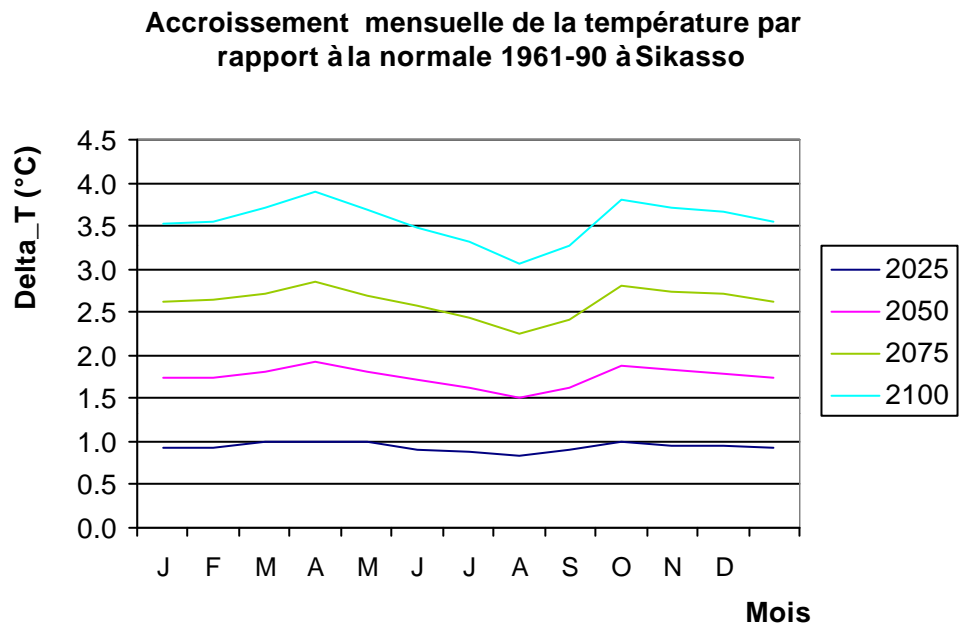


Figure 4.28: Evolution des taux de variation de la température à Sikasso.

4.4.3 SELINGUE

Tableau 4.10 : Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la pluviométrie à Sélingué.

Diminution de précipitation (%) à S = 2,5					Pluie normale (mm)	Pluie estimée (mm)			
Mois	2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	-11,50	-16,00	-23,00	-31,50	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5
Février	-15,50	-21,60	-31,50	-42,60	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
Mars	-12,70	-17,25	-25,54	-36,00	8,3	7,2	6,9	6,2	5,3
Avril	-14,75	-18,00	-27,00	-36,10	38,8	33,1	31,8	28,3	24,8
Mai	-10,25	-13,50	-20,20	-27,50	95,7	85,9	82,8	76,4	69,4
Juin	-11,50	-15,50	-23,00	-31,25	155,5	137,6	131,4	119,7	106,9
Juillet	-10,67	-14,10	-21,00	-29,00	233,4	208,5	200,5	184,4	165,7
Août	-3,75	-2,50	-3,60	-5,00	312,5	300,8	304,7	301,3	296,9
Septembre	-3,00	-6,55	-6,50	-9,00	239,3	232,1	223,6	223,7	217,8
Octobre	0,00	13,00	19,00	26,00	93,8	93,8	106,0	111,6	118,2
Novembre	-2,30	9,50	14,00	19,00	6,8	6,6	7,4	7,8	8,1
Décembre	-1,40	-2,50	-4,00	-5,00	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Moy/AN	-4,60	-8,60	-12,70	-17,50	98,9	94,3	90,4	86,3	81,6
Cumul					1186,5	1 107,8	1 097,1	1 061,2	1 014,6

Tableau 4.11 : Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la température à Sélingué.

Mois	Augmentation de température (°C) à S = 2,5				Température normale (mm)	Température estimée (°C)			
	2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	0,910	1,713	2,530	3,443	25,5	26,4	27,2	28,0	28,9
Février	0,910	1,712	2,595	3,505	27,0	27,9	28,7	29,6	30,5
Mars	0,990	1,795	2,690	3,680	30,5	31,5	32,3	33,2	34,2
Avril	0,905	1,950	2,860	3,910	32,1	33,0	34,1	35,0	36,0
Mai	0,980	1,783	2,670	3,650	30,8	31,8	32,6	33,5	34,5
Juin	0,900	1,694	2,570	3,475	28,8	29,7	30,5	31,4	32,3
Juillet	0,890	1,602	2,400	3,290	27,1	28,0	28,7	29,5	30,4
Août	0,820	1,440	2,170	2,993	26,1	26,9	27,5	28,3	29,1
Septembre	0,895	1,600	2,400	3,230	26,9	27,8	28,5	29,3	30,1
Octobre	0,990	1,870	2,760	3,740	27,5	28,5	29,4	30,3	31,2
Novembre	0,920	1,733	2,622	3,542	26,6	27,5	28,3	29,2	30,1
Décembre	0,920	1,723	2,623	3,532	24,7	25,6	26,4	27,3	28,2
Moy/AN	0,910	1,702	2,590	3,502	27,8	28,7	29,5	30,4	31,3

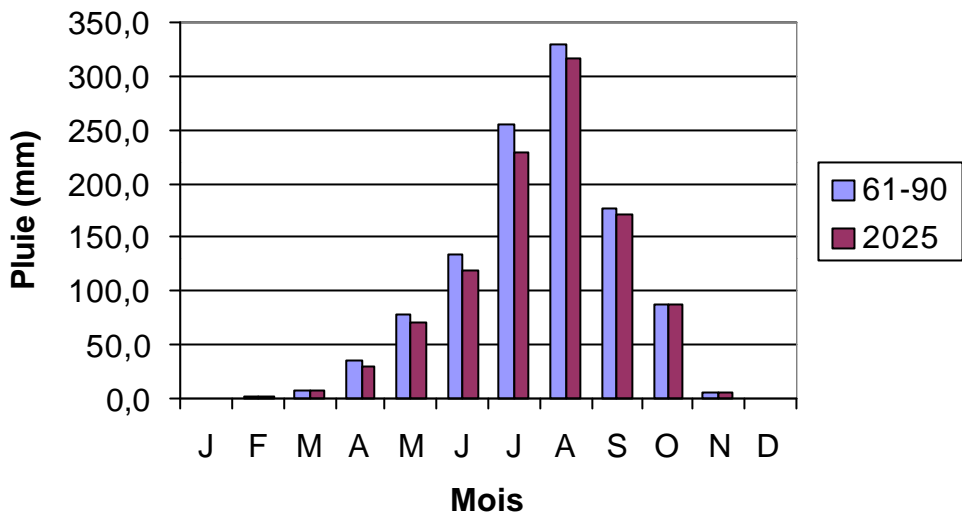


Figure 4.29 :Projection de la pluviométrie à Sélingué en 2025 et évolution de la normale pluviométrique 1961-1990.

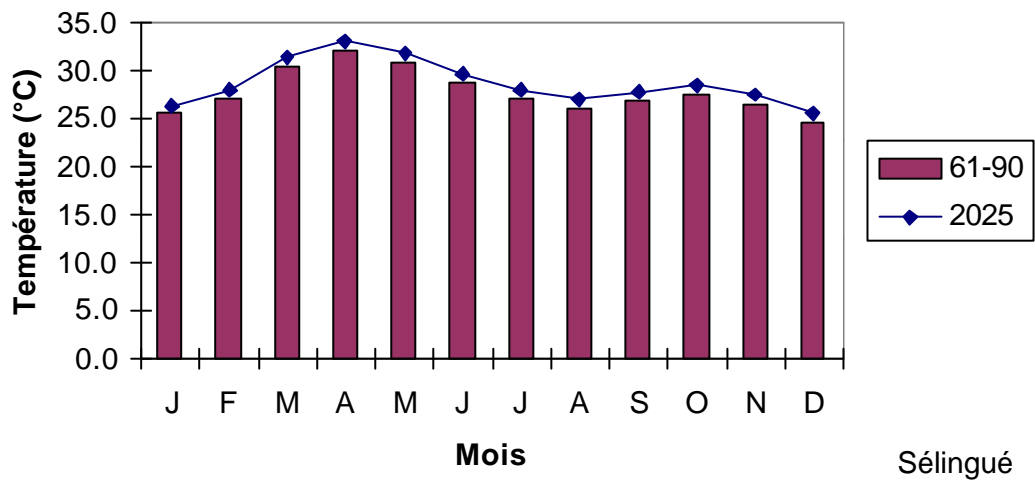


Figure 4.30 :Projection de la température à Sélingué en 2025 et évolution de la température normale 1961-1990.

4.4.4 Koutiala

Tableau 4.12 : Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la pluviométrie à Koutiala.

Mois	Diminution de précipitation (%) à S = 2,5				Pluie normale (mm)	Pluie estimée (mm)			
	2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	-8,40	-15,60	-23,00	-32,00	0,6	0,55	0,51	0,46	0,41
Février	-12,00	-22,40	-33,50	-45,50	0,8	0,70	0,62	0,53	0,44
Mars	-9,10	-16,50	-25,00	-34,00	4,1	3,73	3,42	3,08	2,71
Avril	-8,20	-15,00	-22,60	-30,80	23,0	21,11	19,55	17,80	15,92
Mai	-8,30	-15,40	-23,00	-31,50	65,6	60,16	55,50	50,51	44,94
Juin	-8,90	-16,50	-24,50	-33,50	125,6	114,42	104,88	94,83	83,52
Juillet	-7,10	-13,30	-19,60	-26,70	217,0	201,59	188,14	174,47	159,06
Août	-0,78	-1,40	-2,00	-2,50	241,1	239,22	237,72	236,28	235,07
Septembre	-4,00	-7,40	-11,00	-15,00	164,7	158,11	152,51	146,58	140,00
Octobre	13,50	26,00	38,00	42,00	45,8	51,98	57,71	63,20	65,04
Novembre	-1,60	13,50	20,00	27,00	3,5	3,44	3,97	4,20	4,45
Décembre	-1,40	-2,50	-3,80	-5,40	1,6	1,58	1,56	1,54	1,51
Moy/AN	1,92	-7,30	-10,70	-14,50	74,5	75,88	69,02	66,48	63,65
Cumul					893,4	856,60	826,09	793,48	753,05

Tableau 4.13: Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la température à Koutiala.

Mois	Augmentation de température (°C) à S = 2,5				Température normale (°C)	Température estimée (°C)			
	2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	0,938	1,750	2,630	3,520	23,1	24,0	24,9	25,7	26,7
Février	0,932	1,732	2,653	3,540	26,1	27,1	27,9	28,8	29,7
Mars	0,990	1,820	2,718	3,710	29,3	30,3	31,1	32,0	33,1
Avril	0,995	1,930	2,850	3,900	31,4	32,4	33,4	34,3	35,4
Mai	0,990	1,808	2,700	3,680	31,0	32,0	32,9	33,8	34,8
Juin	0,910	1,710	2,570	3,480	28,6	29,5	30,3	31,2	32,1
Juillet	0,886	1,627	2,435	3,320	26,5	27,4	28,2	29,0	29,9
Août	0,827	1,510	2,258	3,070	25,9	26,7	27,4	28,2	29,0
Septembre	0,895	1,620	2,421	3,280	26,4	27,3	28,0	28,8	29,7
Octobre	1,006	1,890	2,800	3,800	27,8	28,9	29,8	30,7	31,8
Novembre	0,962	1,829	2,730	3,700	26,0	27,0	27,9	28,8	29,7
Décembre	0,960	1,789	2,710	3,660	23,3	24,3	25,1	26,1	27,0
Moy/AN	0,937	1,745	2,620	3,560	27,1	28,1	28,9	29,8	30,7

Taux de variation de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-90 à Koutiala

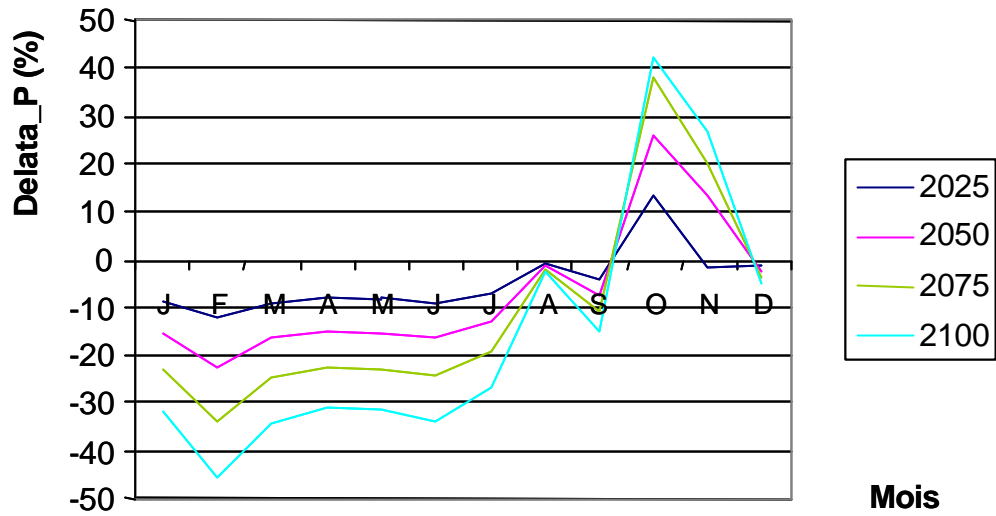


Figure 4.31: Evolution des taux de variation de la pluviométrie à Koutiala.

Accroissement mensuelle de la température par rapport à la normale 1961-90 à Koutiala

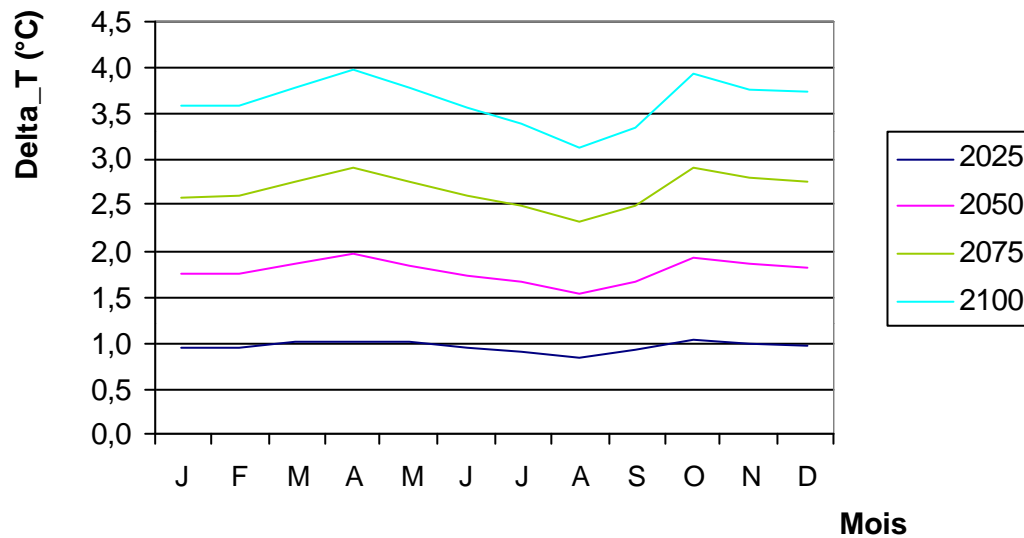


Figure 4.32: Evolution des taux de variation de la température à Koutiala.

4.4.5 Dioï la

Tableau 4.14 : Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la pluviométrie à Dioï la.

Mois	Diminution de précipitation (%) à S = 2,5				Pluie normale (mm)	Pluie estimée (mm)			
	2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	-12,33	-15,00	-22,00	-31,00	0,5	0,44	0,43	0,39	0,35
Février	-15,82	-21,00	-31,67	-42,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mars	-13,17	-17,70	-26,20	-35,50	3,3	2,87	2,72	2,44	2,13
Avril	-15,60	-15,00	-22,00	-30,00	25,5	21,52	21,68	19,89	17,85
Mai	-10,50	-13,50	-20,50	-27,67	55,7	49,85	48,18	44,28	40,29
Juin	-11,50	-15,50	-23,00	-31,75	117,1	103,63	98,95	90,17	79,92
Juillet	-11,10	-14,70	-22,00	-30,00	194,8	173,18	166,16	151,94	136,36
Août	-3,80	-0,50	-2,00	-0,90	271,2	260,89	269,84	265,78	268,76
Septembre	-2,50	-5,75	-8,67	-11,33	130	126,75	122,53	118,73	115,27
Octobre	2,00	16,00	25,00	30,67	50,3	51,31	58,35	62,88	65,73
Novembre	-2,64	10,00	16,00	22,00	2,4	2,34	2,64	2,78	2,93
Décembre	-1,60	-2,50	-4,00	-5,50	0,7	0,69	0,68	0,67	0,66
Moy/AN	-4,75	-9,00	-13,20	-18,00	829,9	790,48	755,21	720,35	680,52
Cumul					851,5	793,46	792,15	759,94	730,24

Tableau 4.15: Taux de variations mensuelles et projections du GCM CSIRO de la température à Dioï la.

Mois	Augmentation de température (°C) à S = 2,5				Température normale (°C)	Température estimée (°C)			
	2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	0,910	1,720	2,540	3,450	25,6	26,5	27,3	28,1	29,1
Février	0,910	1,710	2,610	3,515	27,1	28,0	28,8	29,7	30,6
Mars	1,000	1,810	2,710	3,710	30,7	31,7	32,5	33,4	34,4
Avril	1,000	1,980	2,893	3,983	32,3	33,3	34,3	35,2	36,3
Mai	0,905	1,805	2,705	3,702	31,1	32,0	32,9	33,8	34,8
Juin	0,905	1,710	2,600	3,510	29,2	30,1	30,9	31,8	32,7
Juillet	0,900	1,610	2,410	3,307	27,4	28,3	29,0	29,8	30,7
Août	0,820	1,470	2,200	3,000	26,1	26,9	27,6	28,3	29,1
Septembre	0,905	1,615	2,415	3,240	26,9	27,8	28,5	29,3	30,1
Octobre	1,050	1,904	2,805	3,810	27,2	28,3	29,1	30,0	31,0
Novembre	0,925	1,740	2,630	3,560	26,7	27,6	28,4	29,3	30,3
Décembre	0,925	1,730	2,630	3,540	24,9	25,8	26,6	27,5	28,4
Moy/AN	0,910	1,710	2,610	3,520	27,9	28,9	29,6	30,5	31,5

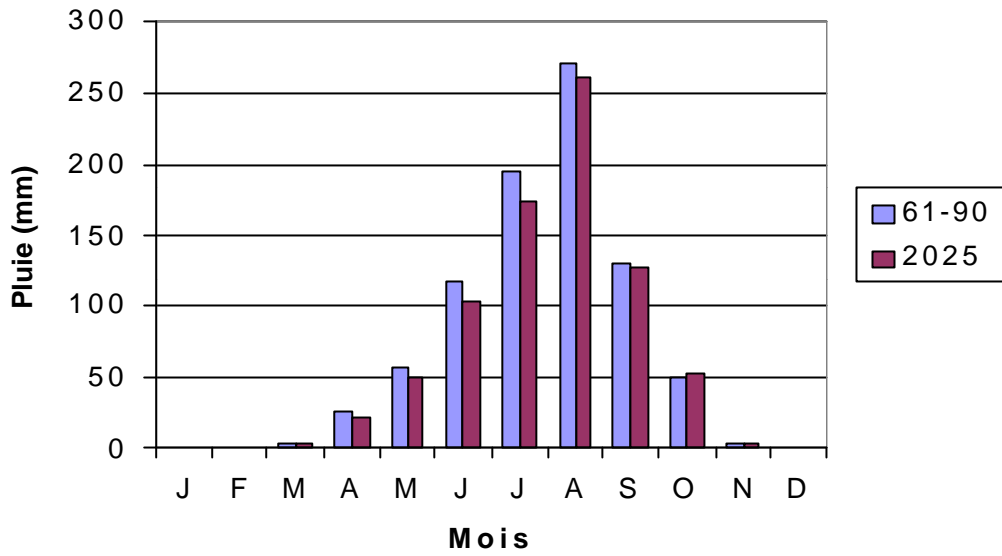


Figure 4.33 :Projection de la pluviométrie à Dioï la en 2025 et évolution de la normale pluviométrique 1961-1990.

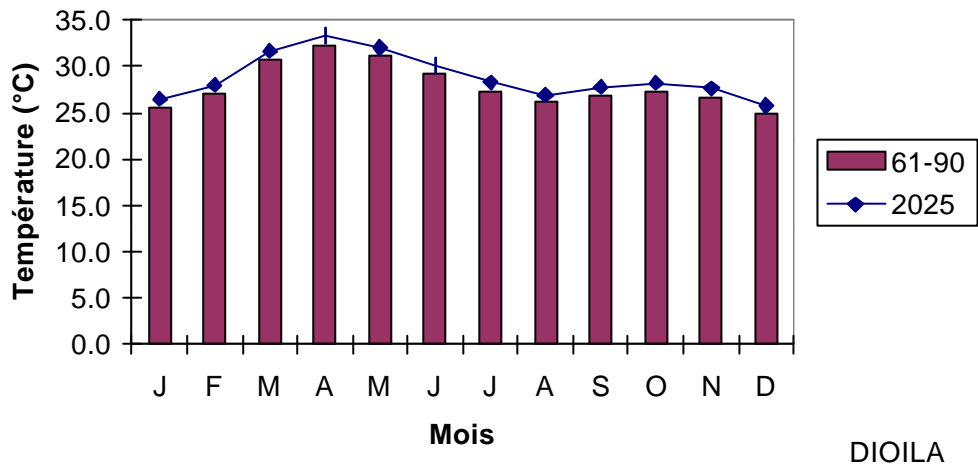


Figure 4.34 : Projection de la température à Dioï la en 2025 et évolution de la température normale 1961-1990.

5. ANALYSE DE SENSIBILITE

5.1 Analyse aux sensibilités de scénario climatique

Dans cette partie, les résultats du scénario climatique sont présentés pour la température annuelle et la pluviométrie saisonnière pour les trois sensibilités climatiques 1,5°C ; 2,5 °C et 4,5°C qui correspondent respectivement aux scénarios de bas niveau, de niveau moyen et de haut niveau de changement climatique.

La pluviométrie saisonnière est la moyenne des valeurs mensuelles de Juin, Juillet, Août, septembre et Octobre car cette période est la saison pluvieuse au Mali. Les pluies sporadiques souvent observées en saison sèche ne sont pas prises en compte.

5.1.1 Variations de températures

Pour toutes les sensibilités climatiques, on observe un gradient positif de température du sud vers le nord (Figures 5.1 à 5.3) avec des augmentations variant entre 0,62 et 0,77°C (sensibilité S=1,5) ; entre 0,91 et 1,18°C (sensibilité S=2,5), et entre 1,25 et 1,55°C (sensibilité S=4,5). Ce gradient positif de température respecte les différentes zones climatiques. En effet, suivant ces zones climatiques la température moyenne augmente du sud vers le nord, c'est à dire des zones humides vers les zones désertiques (Tableau 5.1).

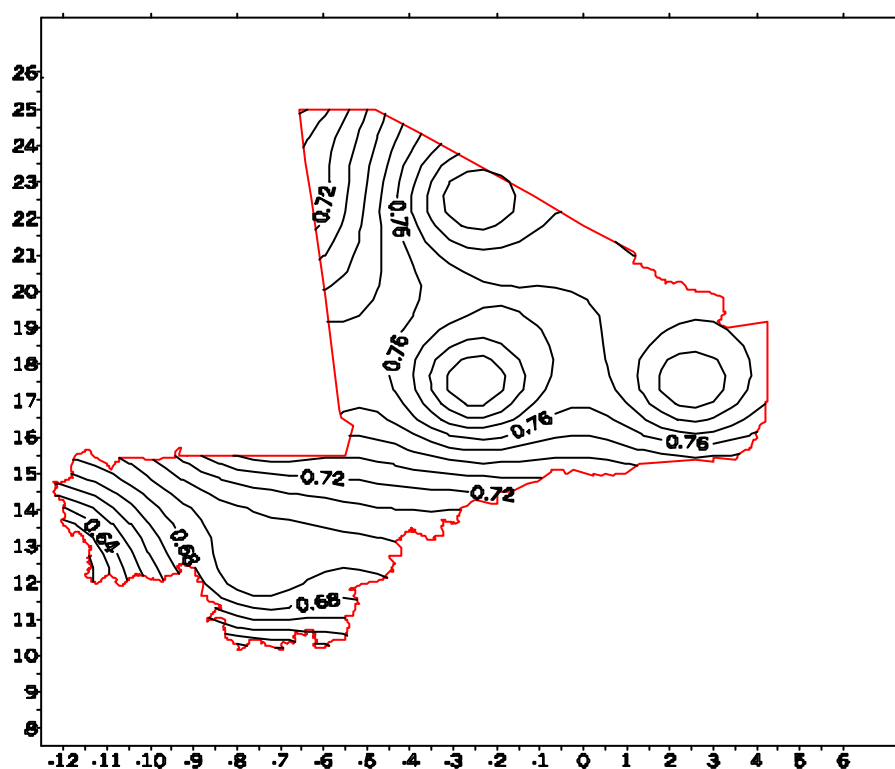


Figure 5.1 : Variation de la température moyenne à S=1,5 en 2025.

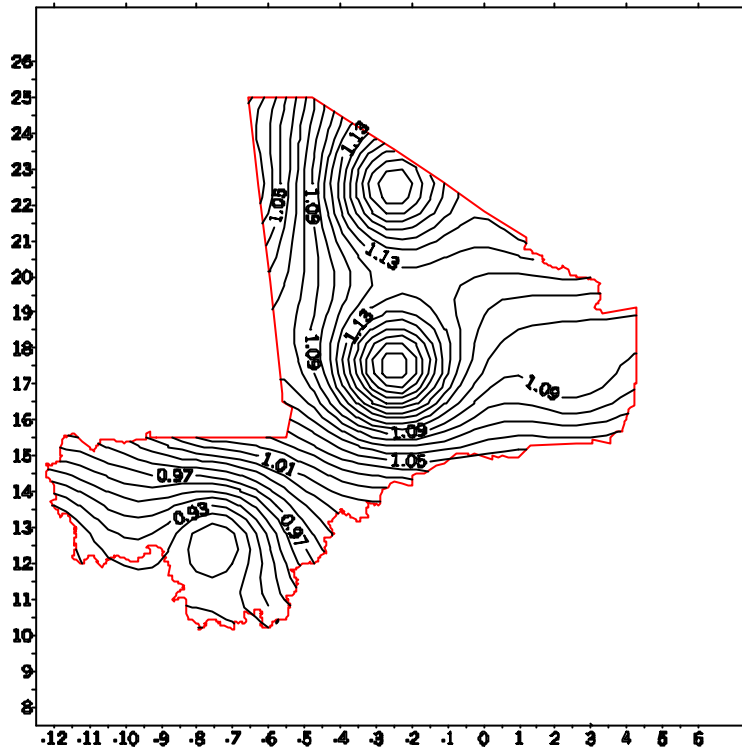


Figure 5.2 : Variation de la température moyenne à S=2,5 en 2025

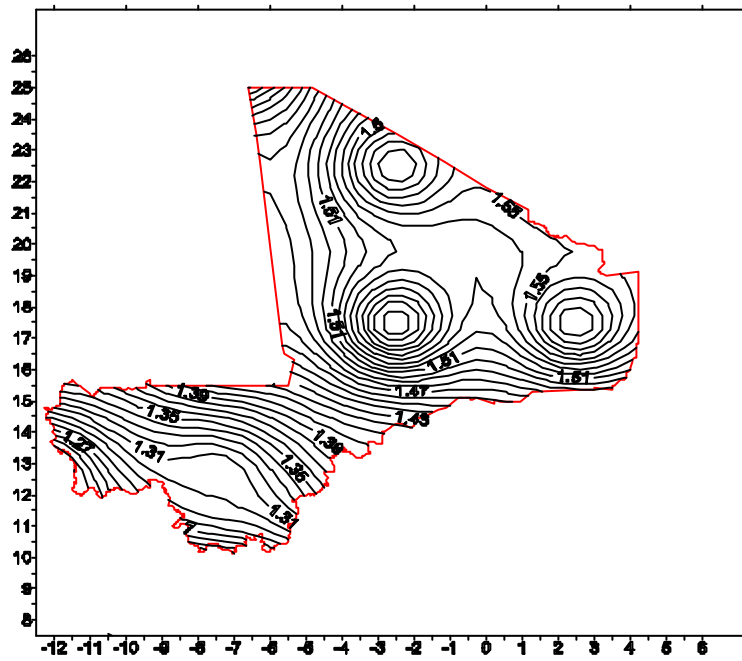


Figure 5.3 : Variation de la température moyenne à S=4,5 en 2025.

Tableau 5.1 : Taux d'augmentation de la température moyenne par rapport à la normale 1961-90 dans les différentes zones climatiques en fonction de la sensibilité.

Sensibilité (°C)	Augmentation de température (°C) en 2025				
	Zone pré-guinéenne	Zone soudanienne	Zone sahélienne	Zone saharienne	Moyenne
1,5	0,62 à 0,68	0,69 à 0,71	0,72 à 0,75	0,76 à 0,78	0,70
2,5	0,92 à 0,93	0,94 à 1,00	1,01 à 1,07	1,08 à 1,15	1,03
4,5	1,24 à 1,30	1,31 à 1,39	1,40 à 1,47	1,48 à 1,55	1,39

5.1.2. Variation de précipitations

Les Figures 5.4 à 5.6 montrent que les précipitations diminuent du sud vers le nord. En effet, le sud correspond à une zone climatique de type pré-guinéenne où les précipitations moyennes saisonnières enregistreraient à l'horizon 2025 des taux de diminution allant de $-2,4\%$ à $-5,5\%$ pour les différentes sensibilités climatiques. Cette diminution s'accroîtrait plus au nord avec des taux de diminution variant de $-5,2\%$ à $-10,5\%$ pour la zone saharienne (Tableau 5.2). La même tendance est observée pour la moyenne saisonnière pour les horizons temporels 2050, 2075 et 2100 dont les cartes sont présentées en annexes.

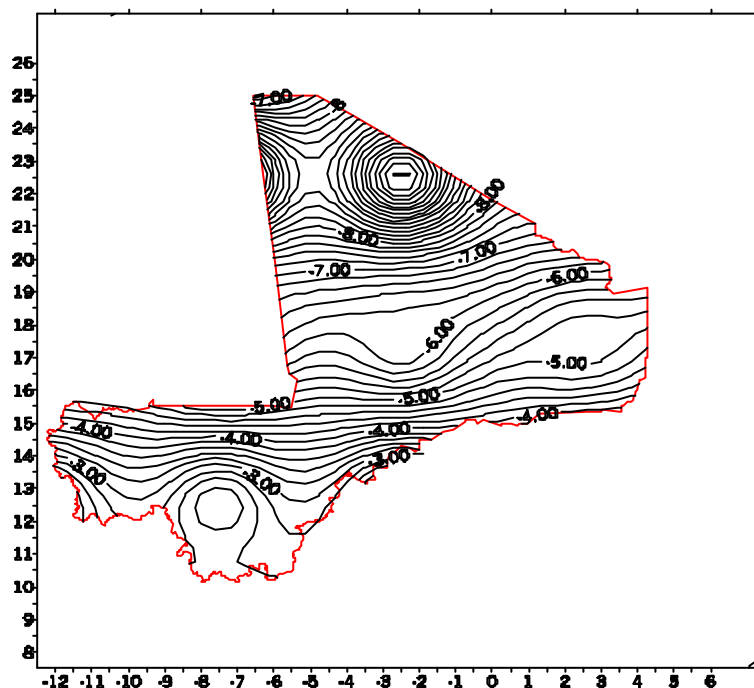


Figure 5.4 : Variation de la moyenne pluviométrique saisonnière à S=1,5 pour 2025.

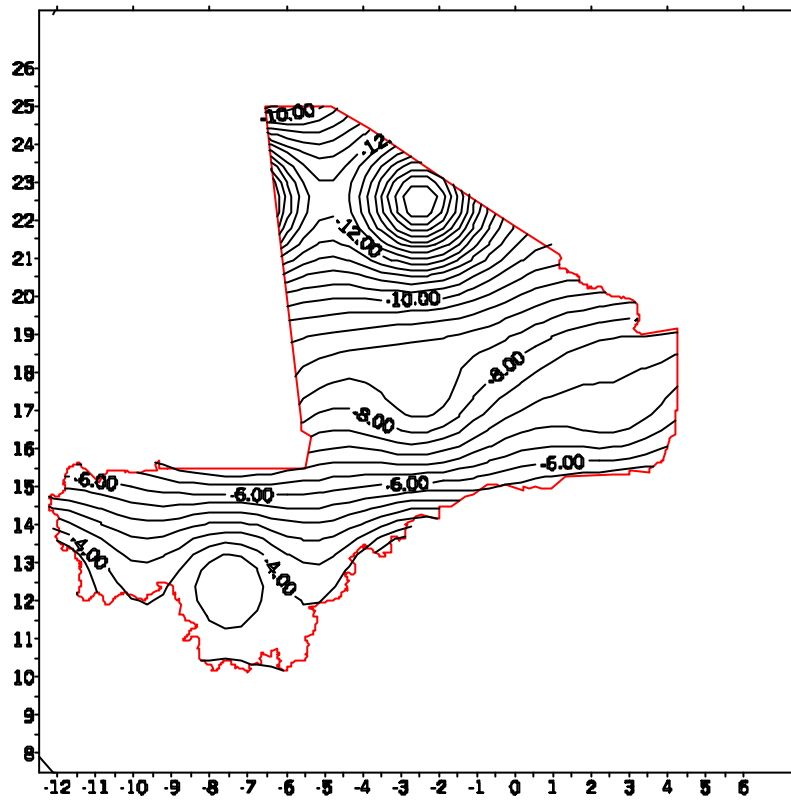


Figure 5.5 :Variation Moyenne pluviométrique saisonnière à S=2,5 pour 2025.

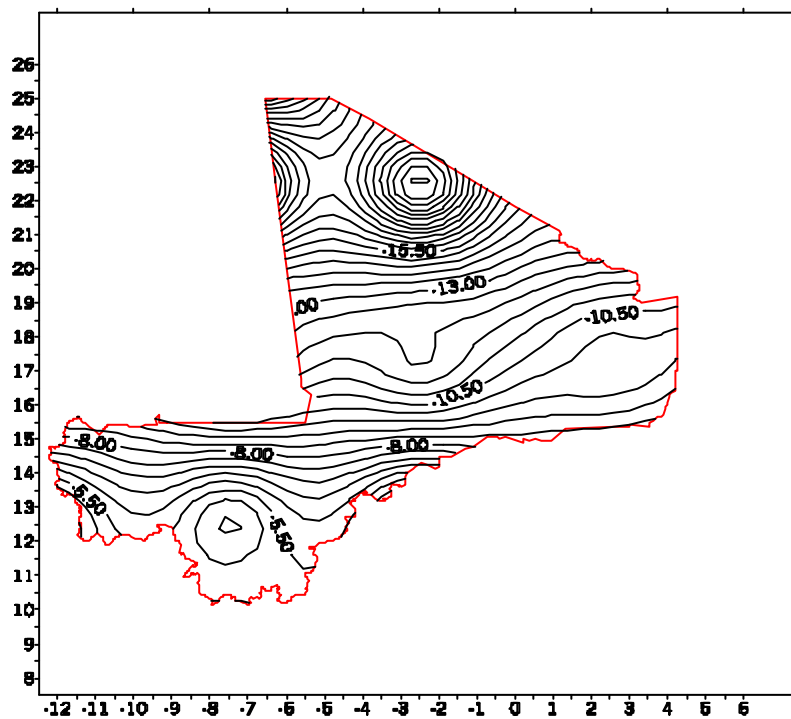


Figure 5.6 :Variation de la moyenne pluviométrique saisonnière à S=4,5 pour 2025.

Tableau 5.2 : Taux de diminution de la pluviométrie moyenne saisonnière par rapport à la normale 1961-90 dans les différentes zones climatiques en fonction de la sensibilité.

Sensibilité (°C)	Diminution de la pluviométrie (%)				
	Zone pré-guinéenne	Zone soudanienne	Zone sahélienne	Zone saharienne	Moyenne
1,5	-2,4 à -3,0	-3,1 à -4,0	-4,1 à -5,0	-5,1 à -8,0	-5,20
2,5	-3,8 à -4,0	-4,1 à -4,6	-4,7 à -6,2	-6,3 à -12	-7,90
4,5	-4,5 à -5,5	-5,6 à -7,0	-7,1 à -9,0	-9,1 à -16	-10,25

5.2 Analyse de sensibilités théoriques

Pour étudier la sensibilité des différentes localités du pays aux variations climatiques, cinq sites ont été choisis. Chacun des sites représentant une région climatique du pays (Figure 1.1). C'est ainsi que la localité de Bougouni se situe en zone pré-guinéenne à l'extrême sud du pays où la pluviométrie est la plus abondante. La ville de Bamako se situe en zone soudanienne.

Les localités de Kayes et Mopti sont situées dans la zone sahélienne avec une pluviométrie moins importante que les deux premières zones climatiques. Quant à Kidal, elle se situe plus au nord dans la zone saharienne désertique avec des précipitations faibles.

Pour chacune des localités donnant une image de la zone climatique associée, nous avons étudié par rapport à la valeur moyenne des différents paramètres climatiques sur la période 1961-90 la sensibilité de ces paramètres. Ces paramètres sont : la température moyenne (Tmoy), la température maximale (Tmax), la température minimale (Tmin), la pluviométrie moyenne, l'humidité relative maximale (Hmax), l'humidité relative minimale (Hmin) et l'humidité relative moyenne (Hmoy). Les tests de sensibilité ont porté sur des taux d'augmentation des paramètres de 0% à 20% au pas de 5% et des taux de diminution des mêmes paramètres de 0% à 20 % au pas de 5% (Tableaux 5.3 à 5.15 et Figures 5.7 à 5.22).

Pour chaque paramètre climatique et pour chaque sensibilité, nous avons fait la moyenne des valeurs sur la normale 1961-90 (Nor 61-90) sur les cinq sites. Ceci donne une image de la valeur moyenne sur l'ensemble des zones climatiques. La droite correspondante à cette moyenne est présentée sur les différentes Figures correspondant à la colonne Nor 61-90 sur les différents Tableaux.

5.2.1 Sensibilité de la température

Température moyenne

Pour l'ensemble des sites étudiés, la température moyenne normale 1961-90 est comprise entre 27°C et 30°C (Tableau 5.3 et Figure 5.7). Durant cette période, les températures dans les localités de Bougouni et Bamako sont les moins élevées et se trouvent en dessous de la valeur moyenne de la normale 1961-90. A partir d'une augmentation de 5%, les températures dans toutes les localités choisies deviennent

supérieures à celle de la moyenne 1961-90. elles sont alors comprises entre cette moyenne (28,32°C à Bougouni) et 35,29°C pour une augmentation de 20% à Kayes.

Cette augmentation se traduirait par l'élévation de l'évaporation et de l'évapotranspiration potentielle ; d'où une augmentation des besoins en eau.

Tableau 5.3 : Augmentation de la température moyenne par rapport à la normale 1961-90 par site.

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	26,97	27,84	28,32	29,41	28,48	28,91
5%	28,31	29,23	28,32	30,88	29,90	30,36
10%	29,66	30,62	28,32	32,35	31,33	31,80
15%	31,01	32,01	28,32	33,82	32,75	33,25
20%	32,36	33,40	28,32	35,29	34,18	34,69

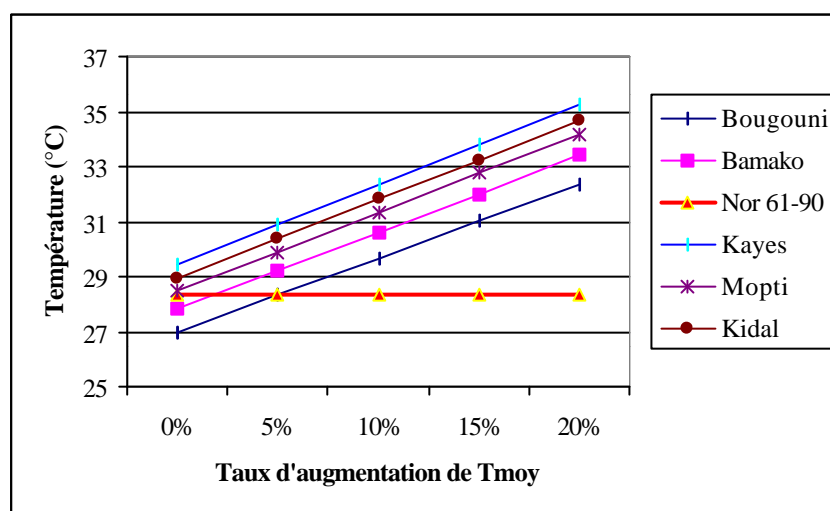


Figure 5.7: Augmentation de la température moyenne par rapport à la normale 1961-90 par site

A partir d'une diminution de 5%, toutes les températures moyennes deviennent inférieures à la valeur de la normale 1961-90 . Elles varient alors entre 28°C pour une diminution de 5% à Kayes à une valeur de 21, 57°C pour une diminution de 20% à Bougouni (Tableau 5.4 et Figure 5.8).

Tableau 5.4: Diminution de la température moyenne par rapport à la normale 1961-90 par site.

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	26,97	27,84	28,32	29,41	28,48	28,91
5%	25,62	26,44	28,32	27,93	27,06	27,46
10%	24,27	25,05	28,32	26,46	25,63	26,02
15%	22,92	23,66	28,32	24,99	24,21	24,57
20%	21,57	22,27	28,32	23,52	22,78	23,13

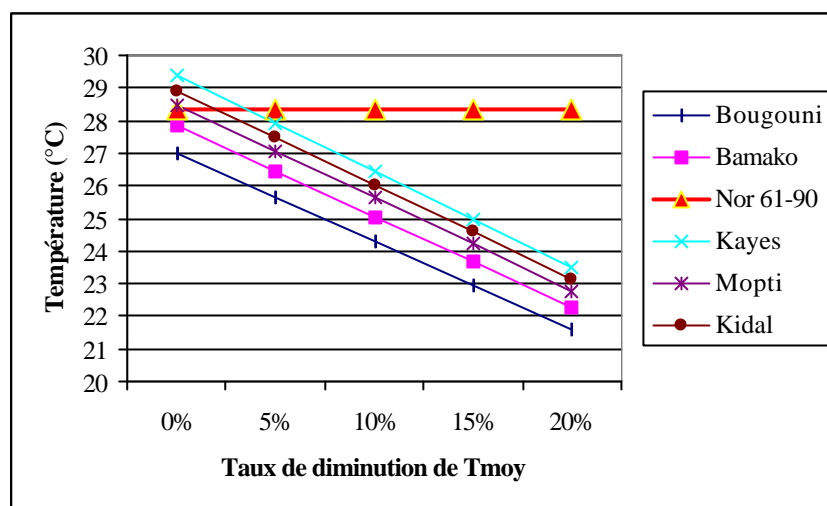


Figure 5.8 : Diminution de la température moyenne par rapport à la normale 1961-90 par site

Température maximale

La sensibilité de la température maximale est semblable à celle de la température moyenne. En effet, à partir d'une augmentation de 5% la température maximale dans toutes les localités devient supérieure à la moyenne de la normale 1961-90 (35,35°C) pour atteindre un maximum supérieur à 43°C à Kayes et à Kidal pour une augmentation de 20% (Tableau 5.5 et Figure 5.9). Sur la Figure 5.9, on peut constater également que pour une augmentation de 10% il fera plus chaud à Bougouni (situé dans la région la plus humide du pays) qu'il ne l'était en 1961-90 à Kayes et Kidal les localités les plus chaudes du pays.

Tableau 5.5 : Augmentation de la température maximale par rapport à la normale 1961-90 par site.

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	33,63	34,99	35,35	36,28	35,6	36,25
5%	35,31	36,74	35,35	38,09	37,38	38,06
10%	36,99	38,49	35,35	39,91	39,16	39,88
15%	38,67	40,24	35,35	41,72	40,94	41,69
20%	40,36	41,99	35,35	43,54	42,72	43,50

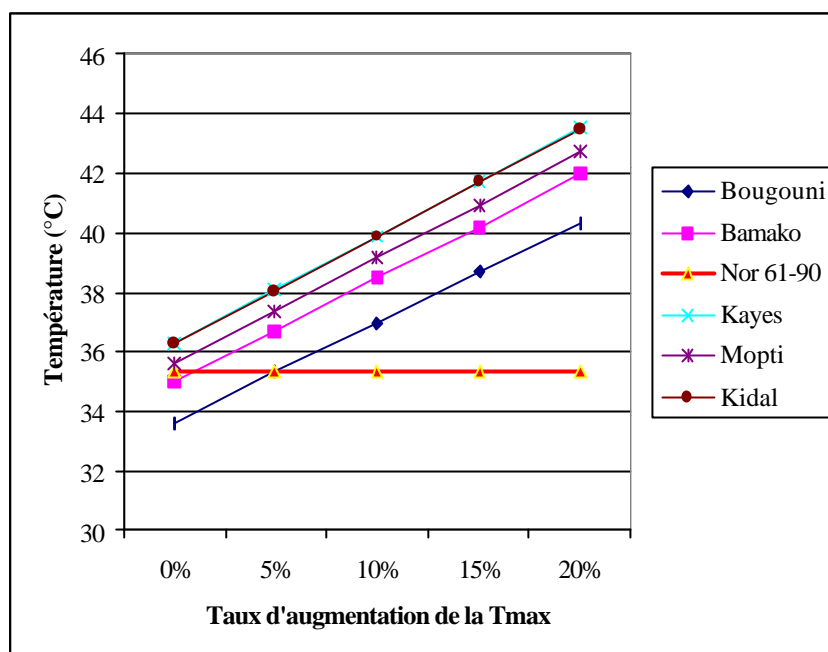


Figure 5.9: Augmentation de la température maximale par rapport à la normale 1961-90 par site.

Sur la Figure 5.10, on remarque que la probabilité d'occurrence des températures maximales supérieures à la moyenne des températures maximales (sur les cinq sites de l'étude) de la période 1961-90 croît rapidement et atteint la valeur 1 à partir d'une augmentation de 10% (Figure 5.10). C'est dire qu'à partir de cette augmentation la température maximale dans toutes les zones climatiques du pays sera toujours supérieure à celle de la moyenne 1961-90

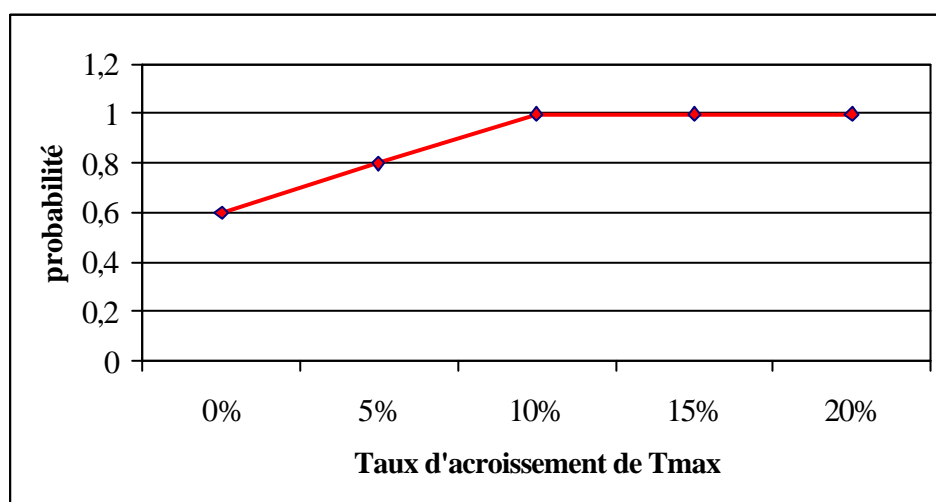


Figure 5.10: Probabilité d'avoir Tmax supérieure à la moyenne 1961-90 (des températures maximales) en fonction de son accroissement

Une diminution de la température maximale permet d'obtenir sur l'ensemble des zones climatiques du pays une plage de variation de 29 à 31°C pour un taux de diminution de 15% et de 27 à 29°C pour un taux de diminution de 20% (Tableau 5.6 et Figure 5.11).

Tableau 5.6: Diminution de la température maximale par rapport à la normale 1961 - 90 par site

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	33,63	34,99	35,35	36,28	35,6	36,25
5%	31,95	33,24	35,35	34,47	33,82	34,44
10%	30,27	31,49	35,35	32,65	32,04	32,63
15%	28,59	29,74	35,35	30,84	30,26	30,81
20%	26,90	27,99	35,35	29,02	28,48	29,00

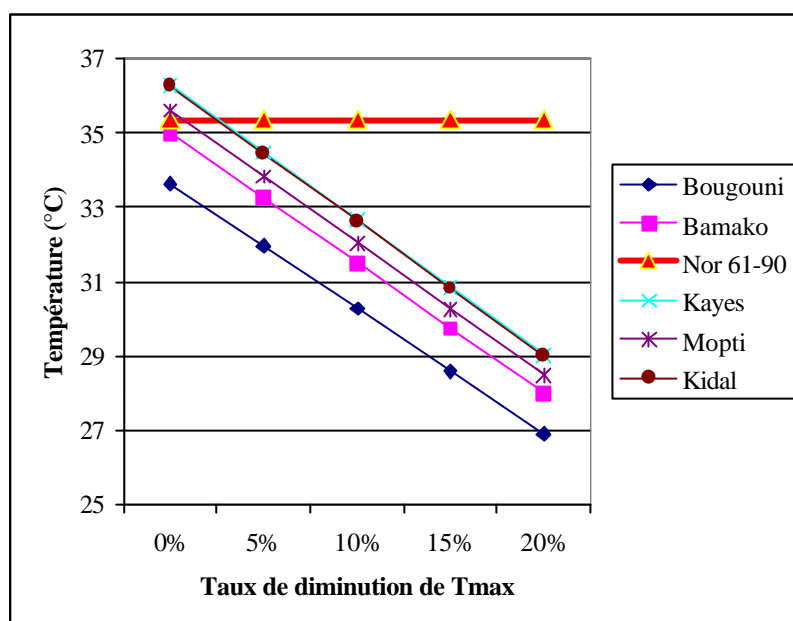


Figure 5.11 : Diminution de la température maximale par rapport à la normale 1961 - 90 par site

Température minimale

Jusqu'à une augmentation de 20%, la plage de variation de la température minimale varie entre 24°C et 27°C (Tableau 5.7 et Figure 5.12). Elle reste inférieure à la moyenne des températures moyennes (28,32°C) pour la période 1961-90 sur l'ensemble des sites étudiés. Si cette condition était réalisée, il ferait plus froid dans toutes les localités choisies que par rapport à la moyenne 1961 -90.

Tableau 5.7: Augmentation de la température minimale par rapport à la normale 1961-90 par site

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	20,30	20,68	21,29	22,53	21,36	21,57
5%	21,32	21,71	21,29	23,66	22,43	22,65
10%	22,33	22,75	21,29	24,78	23,50	23,73
15%	23,35	23,78	21,29	25,91	24,56	24,81
20%	24,36	24,82	21,29	27,04	25,63	25,88

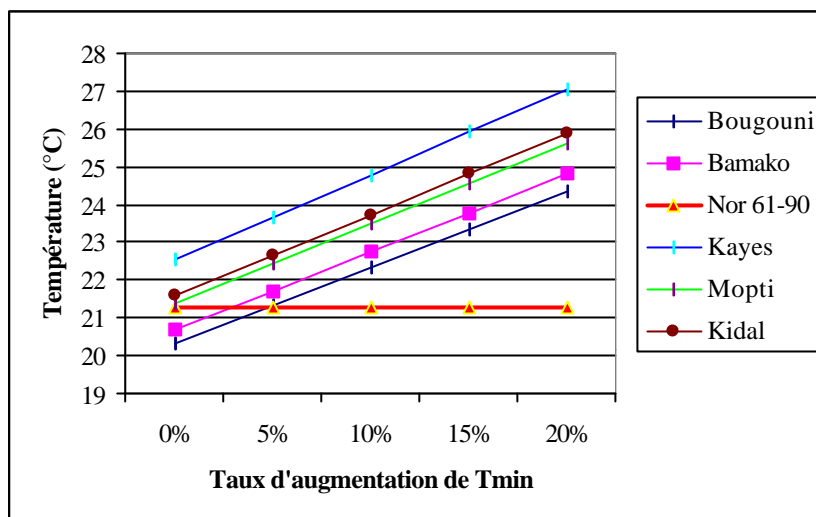


Figure 5.12: Augmentation de la température minimale par rapport à la normale 1961-90 par site

Pour une diminution de la température minimale de 20%, on assistera à une variation de température entre 16 et 18 °C (Tableau 5.8 et Figure 5.13). Ces conditions auraient beaucoup de conséquences sur le mode de vie des populations habituées à un climat sahélien. En effet, une première conséquence pourrait être l'accroissement de la consommation pour les activités de chauffage domestique et une remise en cause des variétés culturelles déjà existantes, etc.

Tableau 5.8: Diminution de la température minimale par rapport à la normale 1961-90 par site

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	20,30	20,68	21,29	22,53	21,36	21,57
5%	19,29	19,65	21,29	21,40	20,29	20,49
10%	18,37	18,72	21,29	20,39	19,33	19,52
15%	17,26	17,58	21,29	19,15	18,16	18,33
20%	16,24	16,54	21,29	18,02	17,09	17,26

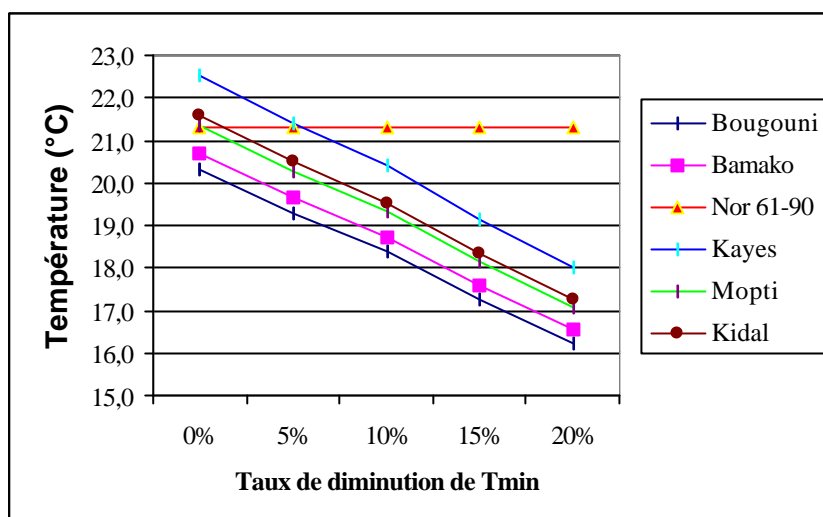


Figure 5.13 : Diminution de la température minimale par rapport à la normale 1961 - 90 par site

5.2.2 Sensibilité de la pluviométrie

Pour une augmentation de 5%, la pluviométrie dans les localités de Bougouni, Bamako et Mopti atteindront celle de la moyenne de la période humide constatée entre 1951 et 1969. On avoisinerait 1200 mm, 1000 mm et 500 mm respectivement à Bougouni, Bamako et Mopti (Tableau 5.9 et Figure 5.14). Pour le même taux d'augmentation par rapport à la normale 1961 -90, les localités de Kayes et de Kidal seraient largement déficitaires par rapport à la période humide.

Tableau 5.9 : Augmentation de la pluviométrie par rapport à la normale 1961 -90 par site

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	1123,8	995,3	665,5	632,8	461,6	113,9
5%	1180,0	1045,1	665,5	664,4	484,7	119,6
10%	1236,2	1094,8	665,5	696,1	507,8	125,3
15%	1292,4	1144,6	665,5	727,7	530,8	131,0
20%	1348,6	1194,4	665,5	759,4	553,9	136,7

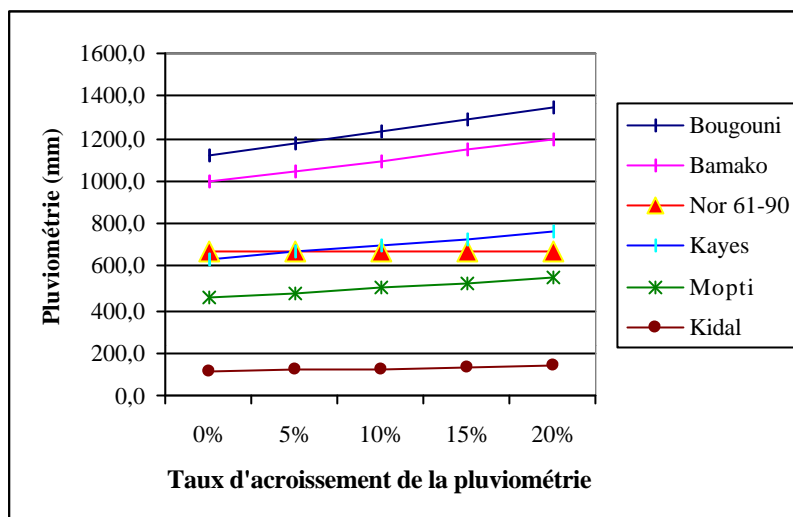


Figure 5.14 : Augmentation de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-90 par site

La probabilité d'avoir une pluviométrie supérieure à celle de la moyenne de la normale 1961-90 (sur les cinq sites de l'étude) serait certaine à partir d'un taux d'augmentation de 10% (Figure 5.15).

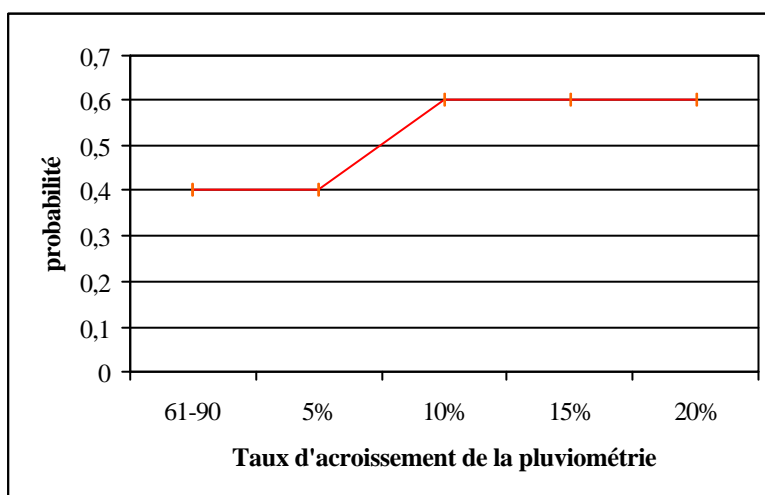


Figure 5.15 : Probabilité d'avoir la pluviométrie supérieure à la moyenne 1961-90 (des pluviométries moyennes) en fonction de son accroissement

Une diminution de 10% de la pluviométrie par rapport à la moyenne de la normale 1961-90 sur les cinq sites étudiés, se traduirait par une situation analogue à celle de la période sèche 1970 –1985 dans ces localités (Tableau 5.10 et Figure 5.16). La sécheresse serait cependant moins aiguë à Kayes et à Mopti par rapport à la moyenne de 1970-1985.

Tableau 5.10: Diminution de la pluviométrie par rapport à la normale 1961 -90 par site

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	1123,8	995,3	665,5	632,8	461,6	113,9
5%	1067,6	945,5	665,5	601,2	438,5	108,2
10%	1011,4	895,8	665,5	569,5	415,4	102,5
15%	955,2	846,0	665,5	537,9	392,4	96,8
20%	899,0	796,2	665,5	506,2	369,3	91,1

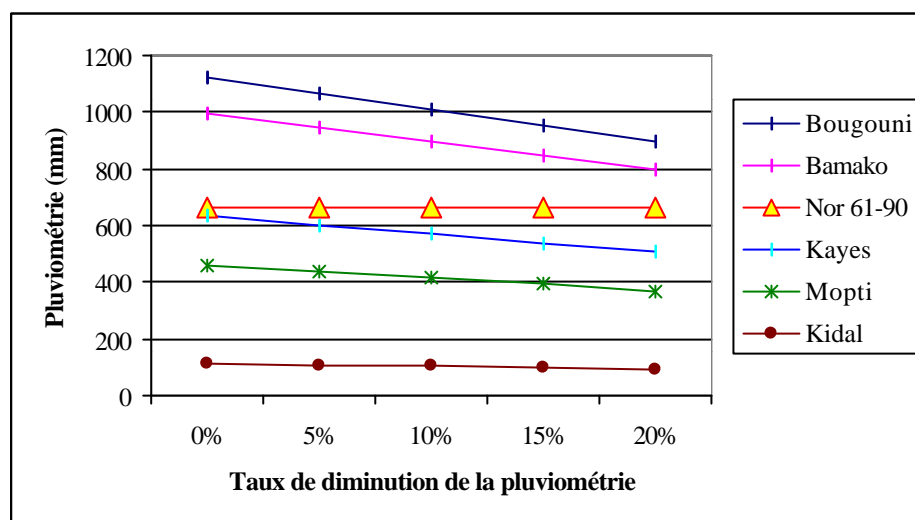


Figure 5.16: Diminution de la pluviométrie par rapport à la normale 1961 -90 par site.

5.2.3 Sensibilité de l'humidité relative

Humidité relative moyenne

Sur les cinq sites étudiés, les localités de Bougouni, Bamako et Kayes ont une valeur d'humidité relative moyenne supérieure à celle de la normale 1961-90 sur les sites étudiés c'est à dire 44%. Avec une augmentation de 10%, la valeur de l'humidité serait supérieure à 44% dans toutes les localités sauf à Kidal (Tableau 5.11 et Figure 5.17). Cette valeur n'excéderait pas 70% pour un taux d'augmentation de 20%.

Tableau 5.11 : Augmentation de l'humidité relative moyenne par rapport à la normale 1961-90 par site

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	57	53	44	45	40	26
5%	59	56	44	47	41	27
10%	62	58	44	49	43	29
15%	65	61	44	51	45	30
20%	68	64	44	53	47	31

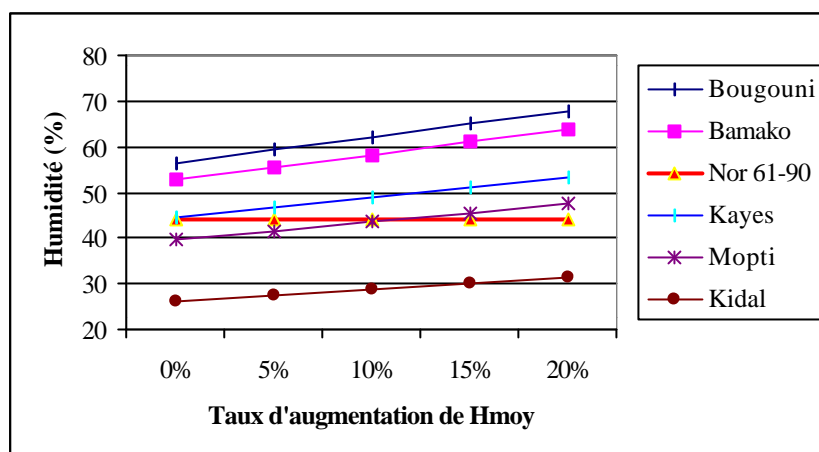


Figure 5.17 : Augmentation de l'humidité relative moyenne par rapport à la normale 1961-90 par site

Avec une diminution de 20% par rapport à la moyenne de la normale 1961-90 dans les cinq localités, la valeur de l'humidité relative moyenne serait inférieure à 45% sauf à Bougouni (Tableau 5.12 et Figure 5.18).

Tableau 5.12 : Diminution de l'humidité relative moyenne par rapport à la normale 1961-90 par site

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	57	53	44	45	40	26
5%	54	50	44	42	38	25
10%	51	48	44	40	36	23
15%	48	45	44	38	34	22
20%	45	42	44	36	32	21

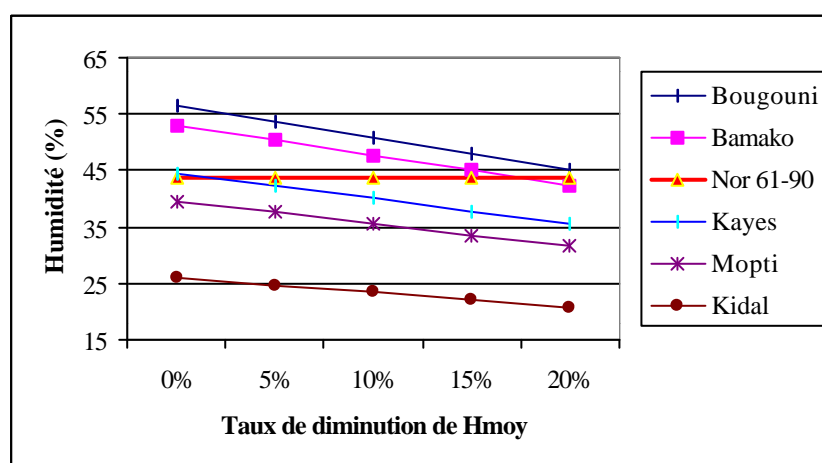


Figure 5.18 : Diminution de l'humidité relative moyenne par rapport à la normale 1961-90 par site.

Humidité relative maximale

La moyenne de l'humidité relative maximale est 60% sur les cinq sites étudiés pour la période 1961-90. Avec une augmentation de 20% la valeur de l'humidité maximale

serait comprise entre 60% et 91% pour toutes les localités sauf Kidal où elle ne serait que de 44% (Tableau 5.12 et Figure 5.19).

Tableau 5.12 : Augmentation de l'humidité relative maximale par rapport à la normale 1961-90 par site.

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	76	72	60	59	56	37
5%	80	76	60	62	59	39
10%	84	79	60	65	62	41
15%	87	83	60	68	64	43
20%	91	86	60	71	67	44

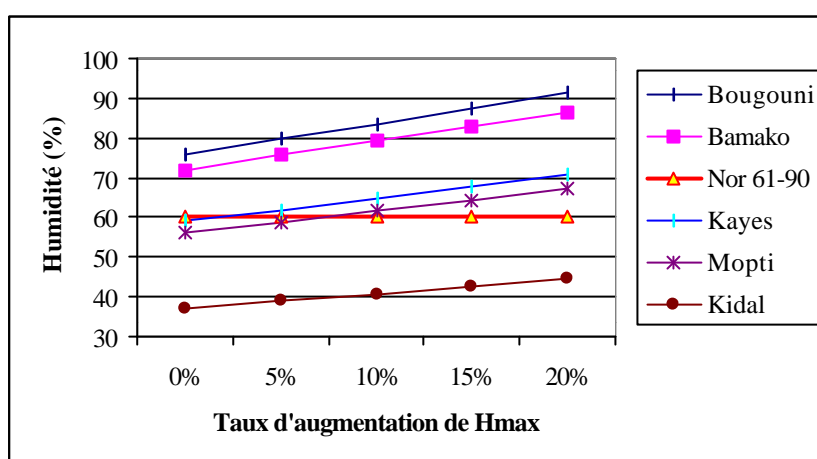


Figure 5.19 : Augmentation de l'humidité relative maximale par rapport à la normale 1961-90 par site

Une diminution de 20% aurait pour effet la limitation des valeurs d'humidité relative maximale entre 20 et 61% (Tableau 5.13 et Figure 5.20).

Tableau 5.13 : Diminution de l'humidité relative maximale par rapport à la normale 1961-90 par site.

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	76	72	60	59	56	37
5%	72	68	60	56	53	35
10%	68	65	60	53	50	33
15%	65	61	60	50	48	31
20%	61	58	60	47	45	30

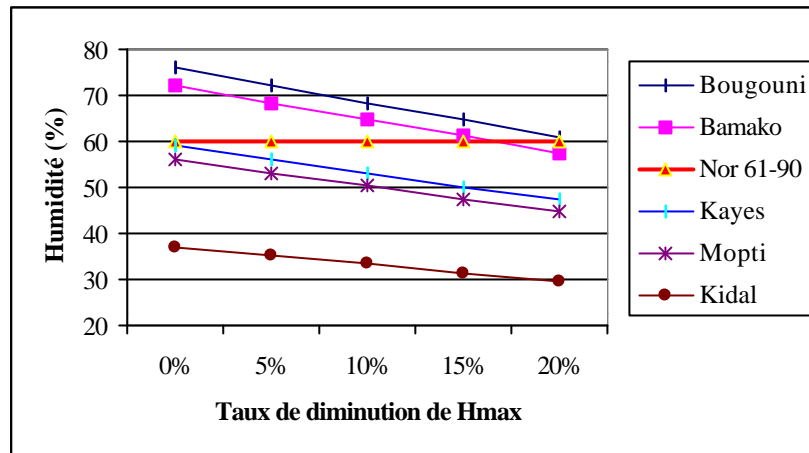


Figure 5.20 : Diminution de l'humidité relative maximale par rapport à la normale 1961-90 par site.

Humidité relative minimale

L'humidité relative minimale a une moyenne de 28% sur la normale 1961-90 au niveau des cinq sites étudiés. Pour une augmentation de 20%, la valeur de l'humidité minimale sera comprise entre 18 % (à Kidal) et 45% (à Bougouni) pour l'ensemble des cinq sites (Tableau 5.14 et Figure 5.21).

Tableau 5.14 : Augmentation de l'humidité relative minimale par rapport à la normale 1961-90 par site.

Taux	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	37	34	28	30	23	15
5%	39	36	28	32	24	16
10%	41	37	28	33	25	17
15%	43	39	28	35	26	17
20%	44	41	28	36	28	18

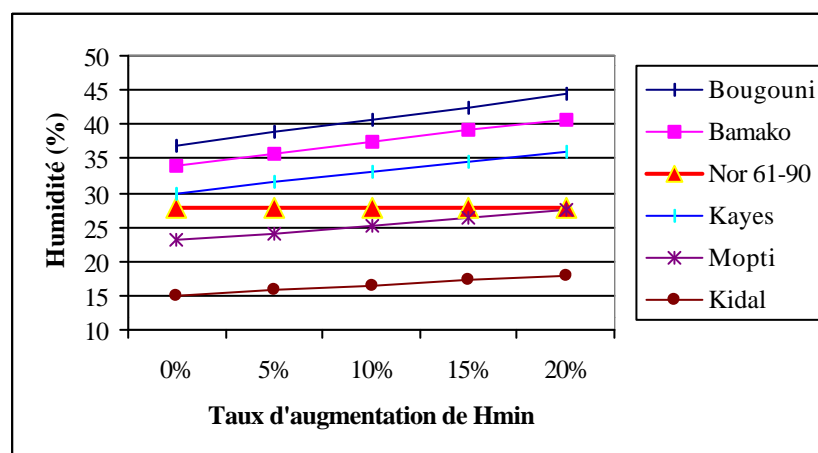


Figure 5.21 : Augmentation de l'humidité relative minimale par rapport à la normale 1961-90 par site.

Un taux de diminution de 20% par rapport à la moyenne 1961-90 sur les cinq sites, abaisserait toutes les valeurs de l'humidité relative minimale entre 12 et 30% pour les localités étudiées (Tableau 5.15 et Figure 5.22).

Tableau 5.15 : Diminution de l'humidité relative minimale par rapport à la normale 1961-90 par site

	Bougouni	Bamako	Nor 61-90	Kayes	Mopti	Kidal
0%	37	34	28	30	23	15
5%	35	32	28	29	22	14
10%	33	31	28	27	21	14
15%	31	29	28	26	20	13
20%	30	27	28	24	18	12

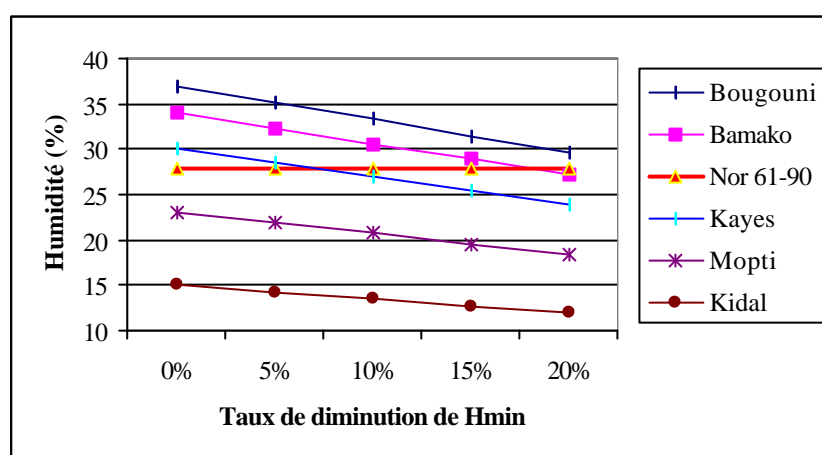


Figure 5.22 : Diminution de l'humidité relative minimale par rapport à la normale 1961-90 par site.

6. Evènements extrêmes

Les évènements extrêmes sont définis comme une occurrence de valeurs singulières de variables météorologiques supérieures (ou inférieures) à un certain seuil (Fargo et Katz, 1990).

Pour beaucoup d'études d'impacts des changements climatiques, la variabilité inter annuelle du climat n'est pas prise en compte. C'est seulement la valeur moyenne des variables climatiques qui est utilisée.

La dispersion des variables climatiques affecte plus la variabilité climatique que ne le fait leur moyenne.

La fréquence des évènements extrêmes est plus corrélée avec les changements de la variabilité climatique qu'avec les variations de la moyenne (Katz et Brown, 1992). Les études sur la variabilité climatique sont faites en perturbant le paramètre de variabilité qui est la variance. Les changements dans la variabilité climatique peuvent être considérés de trois façons :

- La variance actuelle reste constante ;
 - La variance a changé en fonction des expériences de changements climatiques ;
 - Un taux de variation est imposé à la variance.
- C'est ce dernier cas qui est utilisé dans notre étude.

6.1. Cas de la température

6.1.1. Distribution des fréquences relatives de la température maximale normale

Les distributions moyennes mensuelles des données d'observations de la période 1961-90 pour le mois de juillet à Bougouni sont ajustées par une loi normale (Figure 6.1).

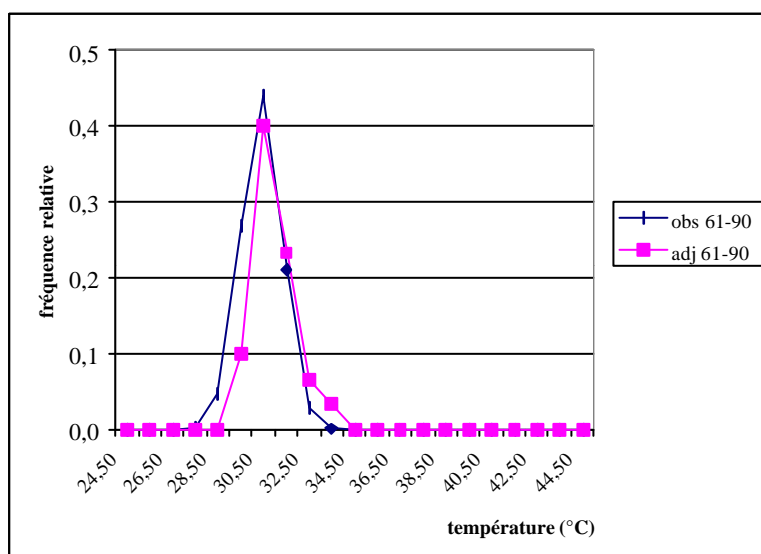


Figure 6.1 : Distribution de la température maximale à partir des observations de la période 1961-90 à Bougouni en juillet

La station est caractérisée par la moyenne et la variance des valeurs du paramètre observé (température maximale ou minimale). Pour effectuer le test de sensibilité, la valeur moyenne est perturbée en lui additionnant le réchauffement global obtenu à partir du scénario pour une année donnée. La variance est perturbée par un taux de variation par degré global de réchauffement.

Si nous considérons ce taux d'augmentation de la variance à +20%, la variance de la distribution de température pour une année postérieure à 1990 est obtenue par la formule (GAYE et al., 2000) :

$$\mathbf{Var}_n = \mathbf{Var}_a (1 + 0,2 \mathbf{DT}_n)$$

où \mathbf{Var}_a est la variance de la distribution 1961-90
et \mathbf{DT}_n le réchauffement global pour l'année n

De même, pour l'année 2100 par exemple, la température moyenne devient :

$$\mathbf{Tm}_{2100} = \mathbf{Tm}_{61-90} + \mathbf{DTm}_{2100}.$$

Une nouvelle distribution normale est ainsi obtenue et est définie par une nouvelle variance et une nouvelle valeur de la moyenne sous la forme $N (T_{2100}, \mathbf{Var}_{2100})$. La nouvelle distribution de température nous permet de suivre l'évolution du maximum et du minimum des températures en fonction du scénario choisi (Figure 6.2).

Dans cette nouvelle distribution, l'effet du réchauffement global et le changement de la variabilité climatique sont perceptibles. La valeur moyenne de la distribution correspondant à la valeur la plus probable est située dans les températures plus élevées que la température la plus élevée observée de 1961 à 1990.

En faisant la même opération pour l'année 2050, on obtient une courbe intermédiaire entre celle de la normale 1961-90 et celle de 2100. Dans tous les cas, il apparaît que la probabilité d'observation des températures extrêmes dans le futur (supérieures à celle de la moyenne 1961-90) sera de plus en plus élevée. Dans le cas d'une diminution de 20% de la variance par année, la probabilité correspondante à la moyenne est aussi plus élevée mais la forme de la distribution est plus rétrécie.

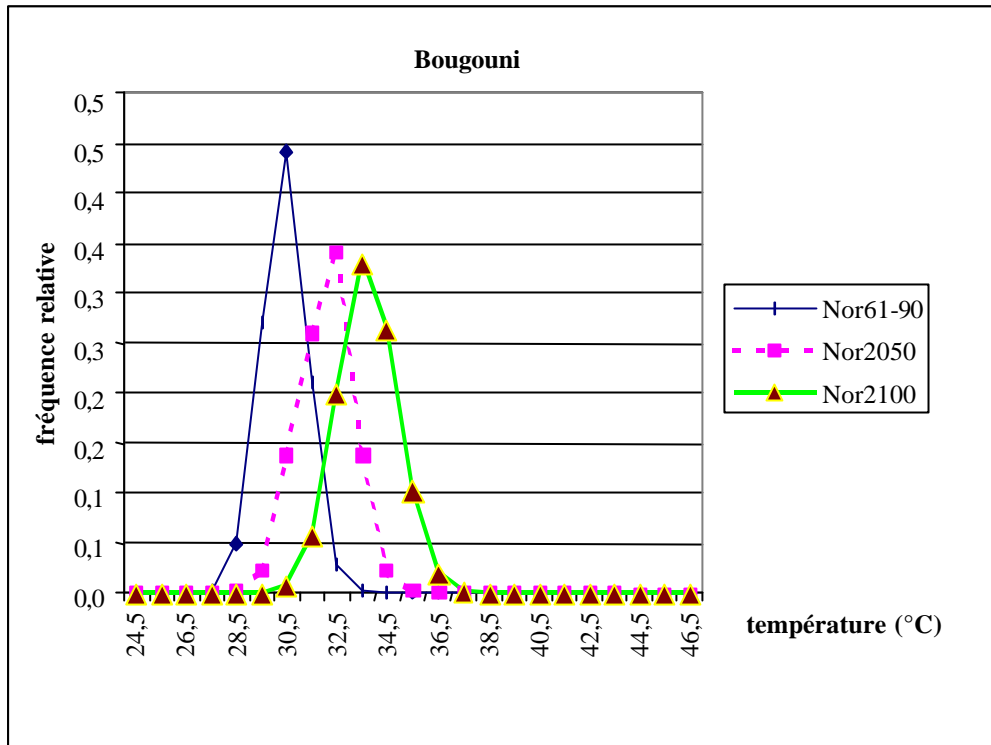


Figure 6.2 : Distribution de la température maximale à partir des observations de la période 1961-90 et pour les années 2050 et 2100 par un taux de variation de 20% par année et par degré de réchauffement global à Bougouni en juillet

6.1.2. Probabilité d'occurrence des températures extrêmes liée à la variabilité climatique

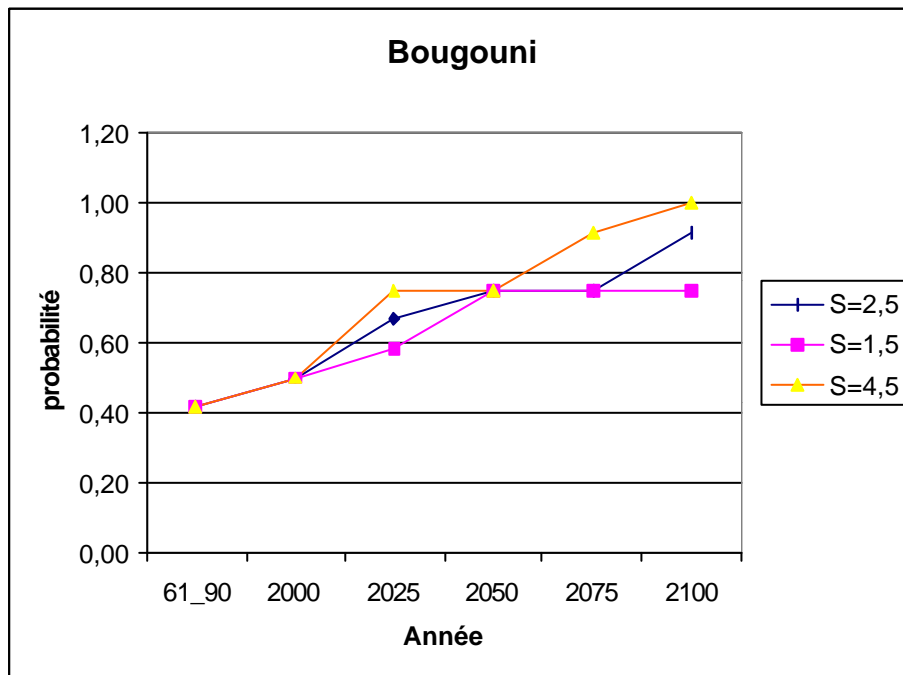


Figure 6.4 : Variation de probabilité



Figure 6.5 : Variation de probabilité

Nous avons considéré deux sites qui se situent dans les zones climatiques du pays plus favorables pour l'agriculture et l'élevage qui constituent la base de l'économie nationale. Nous avons présenté la variation annuelle de la probabilité d'occurrence des températures maximales supérieures à la moyenne des températures maximales pour la période 1961-90 pour les trois sensibilité du climat (Figures 6.3 et 6.4).

Pour les deux localités étudiées, on remarque une augmentation de la probabilité des températures maximales à partir de la moyenne 1961-90 avec des paliers entre 2050 et 2100 à la sensibilité 1,5 et entre 2050 et 2075 à la sensibilité 2,5.

On remarque aussi que pour chacune des deux localités, les trois sensibilités climatiques donnent la même probabilité à l'horizon 2050.

6.2. Cas de la pluviométrie

6.2.1 Principe

Il existe plusieurs méthodes d'analyse des changements dans la variabilité climatique, celle que nous allons utiliser ici consistera à appliquer différents taux de variation aux variances des pluviométries des deux zones d'étude (Bougouni et Sélingué). Le principe qui a été retenu est d'analyser la pluviométrie des années extrêmement sèches (cas de la sécheresse) ou pluvieuses (inondation) en nous focalisant spécialement sur le mois d'août qui est le plus pluvieux de l'année.

Chacune des stations étant caractérisée par la moyenne mensuelle des données de pluviométrie de 1960 à 1990 (normale), nous allons effectuer un test de sensibilité en appliquant différents taux de variation à la moyenne du mois d'août. Cette nouvelle pluviométrie sera utilisée dans les deux modèles (CRIWAR et RAINRU) pour analyser les impacts des variabilités climatiques comme la sécheresse ou les inondations sur les besoins en eau des récoltes et le degré de remplissage des bassins.

6.2.2 Choix d'un modèle de distribution

Nous avons dans un premier temps, étudié la distribution de la pluviométrie du mois d'Août à Bougouni. Pour cela nous avons d'abord cherché à voir si la pluviométrie du mois d'Août observée de 1960 à 1996 à Bougouni peut être décrite à l'aide d'une loi de distribution normale. Comme les fréquences cumulées fournissent beaucoup d'informations sur une série statistique par rapport à l'effectif total, elles ont été déterminées pour chaque année.

Les différentes étapes de la détermination des fréquences historiques et cumulées de la série de Bougouni sont résumées comme suit :

1. Les données de pluviométrie du mois d'août de la série observée (1960 – 1996 dans le cas de la station de Bougouni) ont été classées par ordre croissant ;
2. La fréquence historique de cette série statistique a été calculée à l'aide de la formule proposée par Weibull :

$$f_k = N_k / N + 1$$

où N_k est le numéro d'ordre de la pluviométrie du mois d'août de l'année considérée (selon le classement effectué au point I .) et N le nombre total d'échantillons (d'années).

3. La fréquence théorique a été déterminée en utilisant la fonction LOI NORMALE : LOI.NORMALE(N_k ; Espérance; Ecart_Type ; Cumulative)

Cette fonction renvoie la probabilité d'une variable aléatoire continue suivant une loi normale pour la moyenne et l'écart type spécifiés. L'option Cumulative est une variable logique qui prend la valeur VRAI pour la fonction de distribution cumulative et FAUX pour la fonction probabilités.

Les valeurs de fréquences obtenues sont consignées dans le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Valeurs des fréquences historiques et théoriques de la pluviométrie du mois d'août de 1960 à 1996 à Bougouni.

Année	Pluie août	Année	N° d'ordre	Pluie août	Fréq. Historique	Fréq. Théorique
1960	402.1	1985	1	120.4	0.026315789	0.032295146
1961	361.9	1984	2	142.3	0.052631579	0.054698551
1962	316.6	1977	3	172.4	0.078947368	0.103620941
1963	349.5	1992	4	175.3	0.105263158	0.109638076
1964	288.8	1996	5	181.3	0.131578947	0.122874549
1965	239.0	1969	6	189.3	0.157894737	0.142209561
1966	368.2	1972	7	197.1	0.184210526	0.162948813
1967	351.8	1968	8	209.6	0.210526316	0.200081564
1968	209.6	1973	9	226.4	0.236842105	0.257291771
1969	189.3	1976	10	232.8	0.263157895	0.281131362
1970	340.4	1988	11	237.9	0.289473684	0.300862035
1971	349.5	1965	12	239.0	0.315789474	0.305198206
1972	197.1	1991	13	239.9	0.342105263	0.308766471
1973	226.4	1986	14	252.1	0.368421053	0.358805004
1974	307.8	1980	15	258.6	0.394736842	0.386561322
1975	267.6	1975	16	267.6	0.421052632	0.42594216
1976	232.8	1987	17	277.3	0.447368421	0.469217822
1977	172.4	1979	18	277.7	0.473684211	0.471013823
1978	307.3	1964	19	288.8	0.5	0.520958157
1979	277.7	1993	20	289.7	0.526315789	0.525003799
1980	258.6	1995	21	298.6	0.552631579	0.564806016
1981	381.2	1990	22	301.8	0.578947368	0.578979046
1982	306.5	1983	23	305.5	0.605263158	0.595238785
1983	305.5	1982	24	306.5	0.631578947	0.599606468
1984	142.3	1978	25	307.3	0.657894737	0.603091697
1985	120.4	1974	26	307.8	0.684210526	0.605265811
1986	252.1	1962	27	316.6	0.710526316	0.642937559
1987	277.3	1970	28	340.4	0.736842105	0.73726627
1988	237.9	1963	29	349.5	0.763157895	0.769635512
1989	593.4	1971	30	349.5	0.789473684	0.769635512
1990	301.8	1967	31	351.8	0.815789474	0.777448929
1991	239.9	1961	32	361.9	0.842105263	0.809919341
1992	175.3	1966	33	368.2	0.868421053	0.828614344
1993	289.7	1981	34	381.2	0.894736842	0.863335315
1994	395.7	1994	35	395.7	0.921052632	0.895999483
1995	298.6	1960	36	402.1	0.947368421	0.908457222
1996	181.3	1989	37	593.4	0.973684211	0.99975882
		Moyenne		284.1		
		Ecart type		88.6016978		

Enfin nous avons tracé les courbes de variation des fréquences historiques et cumulées ensemble comme illustré sur la Figure 6.6. Pour que les fréquences cumulées commencent à zéro, on ajoute une classe vide avant la première classe. On obtient une courbe de fréquence qui, en chaque point de l'axe horizontal (pluviométrie totale du mois d'août), permet de lire en ordonnée la fréquence cumulée.

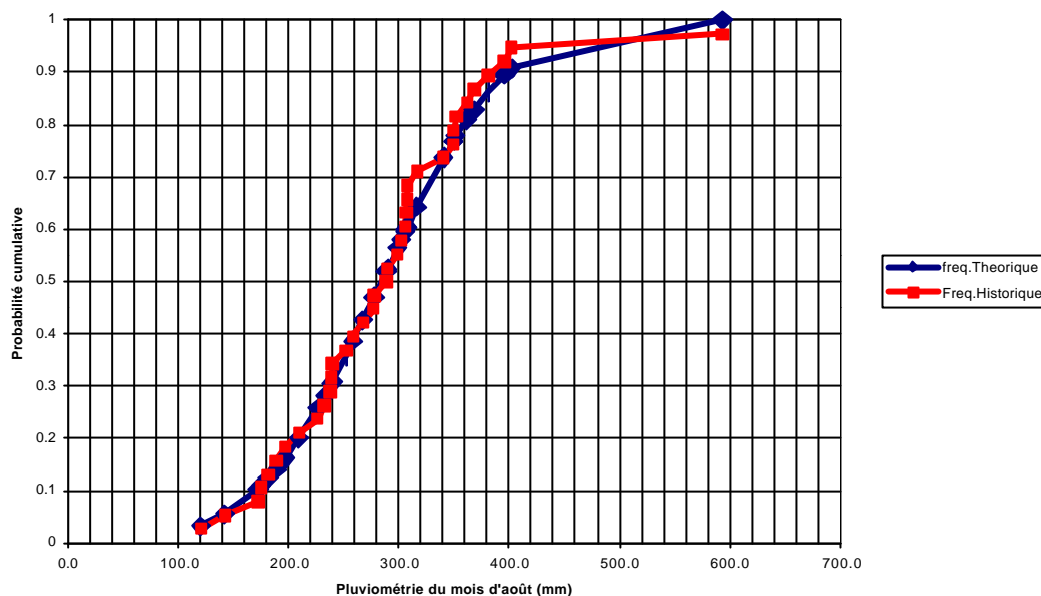


Figure 6.6 : Courbes de variations des fréquences historiques et théoriques de la pluviométrie du mois d'août pour Bougouni.

Nous remarquons qu'il y a une bonne corrélation entre ces deux courbes, ce qui montre que la pluviométrie du mois d'août de 1960 à 1996 peut être parfaitement décrite à l'aide d'une loi de distribution normale.

6.2.3 Détermination des seuils de pluviométries

L'étude de la pluviométrie du mois d'août de 1960 à 1996 à Bougouni, a montré qu'une loi de distribution normale peut convenablement décrire cette série statistique. Nous allons utiliser ces propriétés pour déterminer les fréquences de différents seuils de pluviométrie susceptibles de se produire dans le cas de phénomènes extrêmes.

Pour cela nous avons supposé que la variation de précipitation par rapport à la précipitation moyenne d'une série de données peut être appliquée à la précipitation de chacune des années intervenant dans la détermination de cette valeur moyenne. Pour étudier par exemple les impacts d'une baisse de pluviométrie de 20% par rapport à la valeur moyenne 1961 – 1990, nous allons appliquer ce taux de baisse de 20% à la pluviométrie de chacune des années de 1960 à 1996. Cela va donner une nouvelle série de précipitations dont les propriétés statistiques peuvent être ensuite analysées.

En appliquant une baisse de 20% à la pluviométrie de chacune des années de la série 1960-1996 pour Bougouni, nous obtenons une nouvelle distribution dont la courbe de variation est montrée sur la Figure 6.7.

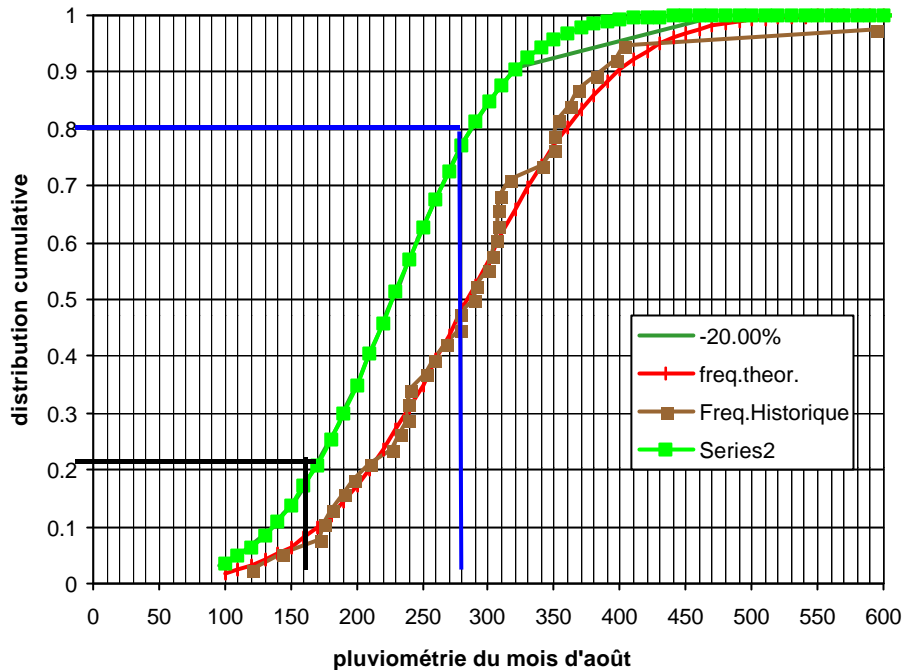


Figure 6.7 : Courbes de variation des fréquences historiques et théoriques dans le cas normal et courbe de fréquence théorique dans le cas d'une situation extrême (diminution de pluviométrie de 20%).

Sur la Figure 6.7, nous voyons que dans le cas d'une baisse de 20% de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-1990 :

- La probabilité d'avoir une pluviométrie inférieure ou égale à **284 mm** (valeur moyenne de la normale pour le mois d'août) à Bougouni est de **80%** ;
- La probabilité d'avoir une pluviométrie inférieure ou égale à **168 mm** à Bougouni est de **20%** ;

Nous pouvons ainsi étudier la sensibilité de la pluviométrie dans le cas de changements dans la variabilité climatique.

Pour les besoins de l'étude, nous avons retenu quatre niveaux de baisse (20%, 15%, 10% et 5%) ainsi que quatre niveaux d'augmentation (20%, 15%, 10% et 5%) de la pluviométrie du mois d'août par rapport à la normale. Dans chacun de ces cas les seuils de pluviométrie (maximum) pour une probabilité de 50% ont été déterminés.

Les résultats sont présentés dans les Tableaux 6.2 et 6.3.

Tableau 6.2 : Seuils probables de pluviométrie au mois d'août pour différents scénarios extrêmes d'augmentation de la pluviométrie à Bougouni.

Taux Augmentation	0%	5%	10%	15%	20%
Août	289,99	300,11	317,83	332,00	340,10

Tableau 6.3 : Seuils probables de pluviométrie au mois d'août pour différents scénarios extrêmes de diminution de la pluviométrie à Bougouni.

Taux Baisse	0%	5%	10%	15%	20%
Août	289,99	270,00	260,13	245,71	231,03

6.2.4 Détermination des pluviométries des autres mois

Le modèle CRIWAR tout comme le modèle RAINRU utilise des données de pluviométrie mensuelles pour déterminer les besoins en eau des plantes ou les débits dans les bassins. Pour cette raison il est nécessaire de déterminer les pluviométries des autres mois de l'année pour chacun des scénarios à la baisse ou à la hausse.

Les poids de la pluviométrie des différents mois de l'année dans la pluviométrie moyenne annuelle de la normale 1961-1990 ont été déterminés à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Poids}_k = P_k / P_{\text{Total}}$$

où :

- Poids_k : est le poids moyen du $k^{\text{ième}}$ mois sur la période 1961-1990 ;
- P_k : est le cumul moyen de pluie du $k^{\text{ième}}$ mois sur la période 1961-1990 ;
- P_{Total} : est le cumul moyen de pluie sur la période 1961-1990.

Les Poids_k ainsi définis sont supposés constants.

En utilisant cette formule, la pluie totale pour chaque scénario peut être déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$P_{\text{Total}} = P_{\text{Août}} / \text{Poids}_{\text{Août}}$$

Partant de cette pluviométrie totale (P_{total}), les pluviométries des autres mois ont été calculées à l'aide de la formule ci-dessous :

$$P_k = P_{\text{Total}} \times \text{Poids}_k$$

Les seuils probables de pluviométrie pour différents niveaux d'augmentation et de baisse de la pluviométrie sont présentés dans les Tableaux 6.4 et 6.5.

Tableau 6.4 : Seuils probables de pluviométrie mensuelle pour différents niveaux d'augmentation à Bougouni.

Taux Aug	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Cumul
0%	0,41	0,41	9,08	47,01	102,07	147,75	251,96	289,99	215,86	73,82	6,93	0,71	1 146
5%	0,42	0,42	9,39	48,65	105,63	152,91	260,75	300,11	223,40	76,40	7,18	0,74	1 186
10%	0,45	0,45	9,95	51,52	111,87	161,93	276,14	317,83	236,58	80,91	7,60	0,78	1 256
15%	0,47	0,47	10,39	53,82	116,85	169,15	288,46	332,00	247,13	84,52	7,94	0,82	1 312
20%	0,48	0,48	10,64	55,13	119,70	173,28	295,49	340,10	253,16	86,58	8,13	0,84	1 344

Tableau 6.5 : Seuils probables de pluviométrie mensuelle pour différents niveaux de baisse à Bougouni.

Taux Baisse	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Cumul
0%	0,41	0,41	9,08	47,01	102,07	147,75	251,96	289,99	215,86	73,82	6,93	0,71	1 146
5%	0,38	0,38	8,45	43,77	95,03	137,56	234,59	270,00	200,98	68,73	6,46	0,66	1 067
10%	0,37	0,37	8,14	42,17	91,56	132,54	226,02	260,13	193,64	66,22	6,22	0,64	1 028
15%	0,35	0,35	7,69	39,83	86,48	125,19	213,48	245,71	182,90	62,55	5,87	0,60	971
20%	0,32	0,32	7,23	37,45	81,32	117,71	200,73	231,03	171,97	58,81	5,52	0,57	913

Ces estimations de la pluviométrie seront utilisées dans le modèle RAINRU pour évaluer les débits pour les mêmes horizons temporels considérés dans l'étude sur les ressources en eau (CNRST/Projet Climat/Etude 3, 2002).

6.2.5 Evolution récente de la pluviométrie

Depuis 1968, l'Afrique de l'Ouest dans son ensemble a été affectée par une nette diminution de la pluviométrie (Courel et al., 1992). Il ressort de l'analyse des données de trois stations soudaniennes du bassin du Bani, Bougouni, Sikasso, Koutiala, et de deux stations sahéliennes du bassin du Niger, Ségou et Mopti, les faits suivants :

- Les années à pluviométrie déficitaire (déficit >5%) ont été les plus nombreuses : 16 années sur 23 ans à Bougouni, 15 à Sikasso, 17 à Koutiala, 15 à Mopti et 14 à Ségou ;
- Chacune de ces stations a connu une à trois périodes de sécheresse aggravée, Bougouni : 1970-1975 (6 ans) et 1979-1988 (10 ans) ; Sikasso : 1971-1975 (5 ans) et 1982-1990 (9 ans) ; Koutiala : 1977-1989 (13 ans) ; Ségou : 1971-1974 (4 ans) et 1980-1985 (6 ans) ; Mopti : 1972-1974 (3 ans), 1977-1979 (3 ans) et 1984-1990 (7 ans) ;
- Les déficits absolus et relatifs ont atteint des valeurs record : 398 mm et 31% à Bougouni en 1973 ; 447 mm et 37,3% à Sikasso en 1983 ; 438 mm et 45,9% à Koutiala en 1984 ; 278 mm et 41,5% à Ségou en 1982 ; 180 mm et 35,5% à Mopti en 1973. Les déficits moyens annuels et les déficits cumulés de la période 1968-1983 ont été eux-mêmes considérables ;
- L'évolution décennale des précipitations moyennes depuis 1950 est confirmée et précisée par les variations inter annuelles des pluies aux stations de Bougouni, Ségou et Mopti (Tableau 6.6 et Figure 6.7) ;

- La durée de la saison des pluies et le nombre de jours de pluie ont peu diminué mais les interruptions des pluies ont été plus fréquentes et plus longues qu'en période pluvieuse ;
- Les pluies individuelles d'une hauteur égale ou inférieure à 20 mm demeurent majoritaires et des chutes exceptionnelles par leur abondance et leur intensité ont été observées à de multiples reprises dans la région étudiée.

Tableau 6.6 : Evolution décennale de la pluviométrie annuelle exprimée en millimètre pour cinq stations du Mali

Stations	Période				Moyenne générale
	1950-59	1960-69	1970-79	1980-89	
Mopti	642	522	452	411	506
Ségou	801	703	637	542	669
Koutiala	1116	1016	882	776	954
Sikasso	1368	1216	1149	1009	1198
Bougouni	1331	1225	1083	1067	1224

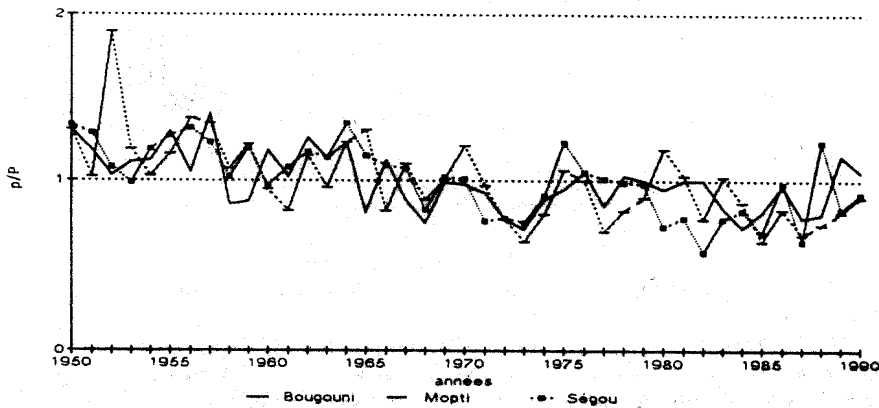


Figure 6.7 : Pluviométrie à Bougouni, Mopti et Ségou de 1950 à 1990 (source Courel et al., 1992).

7. RESUME DES DONNEES PRODUITES POUR LES AUTRES ETUDES

La présente étude intitulée « Elaboration des scénarios de changement climatique pour le Mali » nous a permis de produire un ensemble de données pour les études sur l'agriculture (CNRST/Projet Climat/Etude 2, 2002) et les ressources en eau (CNRST/Projet Climat/Etude 3, 2002). Ces données proviennent, soit des résultats de l'interpolation spatiale effectuée sur les projections avec le GCM retenu CSIRO – TR, soit de l'analyse de sensibilité des paramètres climatiques qui sont la température, la pluviométrie et l'humidité relative.

7.1 Données de projection

7.1.1 Données pour l'étude sur le maïs et le coton

Maïs

Pour réaliser l'étude sur le maïs dans les localités qui sont Bougouni et Koutiala, nous avons utilisé les résultats de projection aux horizons temporels 2025, 2050, 2075 et 2100 pour la pluviométrie (Tableau 7.1) et la température (Tableau 7.2). Ces projections ont été faites à la sensibilité moyenne du climat (S=2,5).

Tableau 7.1 : Projections de la pluviométrie moyenne mensuelle.

Mois	Bougouni					Koutiala				
	Pluie normale 1961-90	Pluie estimée (mm)				Pluie normale 1961-90	Pluie estimée (mm)			
		2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,55	0,51	0,46	0,41
Février	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,8	0,70	0,62	0,53	0,44
Mars	8,9	7,8	7,4	6,6	5,8	4,1	3,73	3,42	3,08	2,71
Avril	46,1	39,3	37,8	33,7	29,0	23,0	21,11	19,55	17,80	15,92
Mai	100,1	89,8	87,0	80,0	73,3	65,6	60,16	55,50	50,51	44,94
Juin	144,9	128,6	123,0	112,3	100,0	125,6	114,42	104,88	94,83	83,52
Juillet	247,1	221,2	212,5	195,2	176,4	217,0	201,59	188,14	174,47	159,06
Août	284,4	274,2	277,1	273,0	268,8	241,1	239,22	237,72	236,28	235,07
Septembre	211,7	204,3	197,9	197,9	191,0	164,7	158,11	152,51	146,58	140,00
Octobre	72,4	72,4	81,8	86,2	91,2	45,8	51,98	57,71	63,20	65,04
Novembre	6,8	6,7	7,5	7,8	8,2	3,5	3,44	3,97	4,20	4,45
Décembre	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,6	1,58	1,56	1,54	1,51
Cumul	1123,9	1045,5	1033,4	994,0	944,9	893,4	856,60	826,09	793,48	753,05

Tableau 7.2 : Projections de la température moyenne mensuelle.

Mois	Bougouni					Koutiala				
	Temp. normale 1961-90	Température estimée (°C)				Temp. normale 1961-90	Température estimée (°C)			
		2025	2050	2075	2100		2025	2050	2075	2100
Janvier	24,7	25,6	26,4	27,2	28,2	23,1	24,0	24,9	25,7	26,7
Février	27,6	28,5	29,3	30,2	31,1	26,1	27,1	27,9	28,8	29,7
Mars	29,9	30,9	31,7	32,6	33,6	29,3	30,3	31,1	32,0	33,1
Avril	31,0	31,9	33,0	33,9	34,9	31,4	32,4	33,4	34,3	35,4
Mai	29,8	30,8	31,6	32,5	33,5	31,0	32,0	32,9	33,8	34,8
Juin	27,6	28,5	29,3	30,2	31,1	28,6	29,5	30,3	31,2	32,1
Juillet	26,0	26,9	27,6	28,4	29,3	26,5	27,4	28,2	29,0	29,9
Août	25,6	26,5	27,1	27,8	28,6	25,9	26,7	27,4	28,2	29,0
Septembre	26,0	26,9	27,6	28,4	29,2	26,4	27,3	28,0	28,8	29,7
Octobre	27,2	28,2	29,0	29,9	30,9	27,8	28,9	29,8	30,7	31,8
Novembre	26,3	27,2	28,0	28,9	29,8	26,0	27,0	27,9	28,8	29,7
Décembre	24,3	25,2	26,0	26,9	27,8	23,3	24,3	25,1	26,1	27,0
Moyenne/AN	27,2	28,1	28,9	29,8	30,7	27,1	28,1	28,9	29,8	30,7

Coton

Les localités concernées par l'étude sur le coton sont Bougouni, Koutiala, Dioï la et Yanfolila. Les années 2005, 2010, 2015, 2020 et 2025 correspondent aux horizons temporels de projection utilisés. Nous présentons l'ensemble de ces données dans les Tableaux 7.3 à 7.10.

Bougouni

Tableau 7.3 : Projections de la pluviométrie moyenne mensuelle à Bougouni.

Mois	Pluie Normale	Pluie estimée (mm)					
	1961-90	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Janvier	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Février	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
Mars	8,9	8,6	8,6	8,4	8,3	8,0	7,8
Avril	46,1	44,5	44,0	43,5	43,1	42,3	39,3
Mai	100,1	97,5	96,8	96,0	95,0	94,0	89,8
Juin	144,9	140,7	139,6	138,1	136,9	134,8	128,6
Juillet	247,1	240,5	238,4	236,2	233,6	231,7	221,2
Août	284,4	283,1	282,5	282,1	281,6	281,2	274,2
Septembre	211,7	209,9	207,6	208,5	207,2	207,5	204,3
Octobre	72,4	71,7	72,0	75,3	72,8	73,1	72,4
Novembre	6,8	6,9	7,0	7,0	7,1	7,1	6,7
Décembre	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Cumul	1123,9	1197,0	1189,6	1187,9	1177,5	1171,1	1045,5

Tableau 7.4 : Projections de la température moyenne mensuelle à Bougouni.

Mois	Températ.	Température estimée (°C)					
	Normale	2000	2005	2010	2015	2020	2025
	1961-90						
Janvier	24,7	25,0	25,1	25,2	25,3	25,5	25,6
Février	27,6	27,9	28,0	28,1	28,3	28,4	28,5
Mars	29,9	30,2	30,3	30,5	30,6	30,7	30,9
Avril	31,0	31,4	31,5	31,6	31,7	31,9	31,9
Mai	29,8	30,2	30,2	30,4	30,5	30,6	30,8
Juin	27,6	27,9	28,0	28,1	28,3	28,4	28,5
Juillet	26,0	26,3	26,4	26,5	26,6	26,8	26,9
Août	25,6	25,9	26,0	26,1	26,2	26,3	26,5
Septembre	26,0	26,3	26,4	26,5	26,6	26,7	26,9
Octobre	27,2	27,5	27,6	27,8	27,9	28,0	28,2
Novembre	26,3	26,6	26,7	26,8	27,0	27,1	27,2
Décembre	24,3	24,6	24,7	24,8	25,0	25,1	25,2
Moyenne/AN	27,2	27,5	27,6	27,7	27,9	28,0	28,1

*Koutiala***Tableau 7.5** : Projections de la pluviométrie moyenne mensuelle à Koutiala.

Mois	Pluie estimée (mm)					
	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Janvier	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Février	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
Mars	4,0	3,9	3,9	3,8	3,8	3,7
Avril	22,3	22,1	21,9	21,7	21,3	21,1
Mai	63,7	63,1	62,5	61,7	61,0	60,2
Juin	121,6	120,5	119,1	117,7	116,2	114,4
Juillet	211,6	210,0	208,1	206,2	204,0	201,6
Août	241,1	240,4	240,1	239,9	239,7	239,2
Septembre	162,4	161,6	160,9	160,1	159,1	158,1
Octobre	43,4	48,7	49,5	50,4	51,1	52,0
Novembre	3,6	3,6	3,6	3,7	3,7	3,7
Décembre	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
TOTAL	876,6	877,0	872,5	868,0	862,6	856,9

Tableau 7.6 : Projections de la température moyenne mensuelle à Koutiala.

Mois	Température estimée (°C)					
	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Janvier	23,4	23,5	23,6	23,8	23,9	24,0
Février	26,5	26,6	26,7	26,8	27,0	27,1
Mars	29,6	29,7	29,9	30,0	30,1	30,3
Avril	31,8	31,9	32,0	32,1	32,3	32,4
Mai	31,4	31,5	31,6	31,7	31,8	32,0
Juin	28,9	29,0	29,1	29,3	29,4	29,5
Juillet	26,8	26,9	27,0	27,1	27,3	27,4
Août	26,2	26,3	26,3	26,5	26,6	26,7
Septembre	26,7	26,8	26,9	27,0	27,1	27,3
Octobre	28,2	28,3	28,5	28,6	28,7	28,9
Novembre	26,3	26,4	26,6	26,7	26,8	27,0
Décembre	23,7	23,8	23,9	24,0	24,1	24,3
Moyenne /AN	27,5	27,6	27,7	27,8	27,9	28,1

Dioï la**Tableau 7.7** : Projections de la pluviométrie moyenne mensuelle à Dioï la.

Mois	Pluie estimée (mm)					
	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Janvier	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,44
Février	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mars	3,19	3,15	3,12	3,08	3,03	2,87
Avril	24,49	24,51	24,23	23,97	23,45	21,52
Mai	54,25	53,82	53,37	52,80	52,25	49,85
Juin	113,59	112,69	111,60	110,19	108,79	103,63
Juillet	189,35	187,55	185,61	183,70	181,55	173,18
Août	270,66	270,39	270,12	269,84	269,57	260,89
Septembre	128,62	128,18	127,79	127,14	126,75	126,75
Octobre	49,04	52,21	52,71	53,22	53,82	51,31
Novembre	2,35	2,46	2,48	2,50	2,52	2,34
Décembre	0,70	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
Moyenne /AN	815,79	811,39	807,16	801,52	795,71	790,48
TOTAL	836,72	836,14	832,19	827,60	822,89	793,46

Tableau 7.8 : Projections de la température moyenne mensuelle à Dioï la.

Mois	Température estimée (°C)					
	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Janvier	25,9	26,0	26,1	26,2	26,4	26,5
Février	27,4	27,5	27,6	27,8	27,9	28,0
Mars	31,0	31,1	31,3	31,4	31,5	31,7
Avril	32,6	32,8	32,9	33,0	33,2	33,3
Mai	31,4	31,5	31,7	31,8	31,9	32,0
Juin	29,5	29,6	29,7	29,9	30,0	30,1
Juillet	27,7	27,8	27,9	28,0	28,2	28,3
Août	26,4	26,5	26,5	26,7	26,8	26,9
Septembre	27,2	27,3	27,4	27,5	27,6	27,8
Octobre	27,6	27,7	27,8	27,9	28,1	28,3
Novembre	27,0	27,1	27,2	27,4	27,5	27,6
Décembre	25,2	25,3	25,4	25,6	25,7	25,8
Moyenne /AN	28,3	28,3	28,5	28,6	28,7	28,9

*Yanfolila***Tableau 7.9** : Projections de la pluviométrie moyenne mensuelle à Yanfolila.

Mois	Pluie estimée (mm)					
	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Janvier	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
Février	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0
Mars	8,0	8,0	7,9	7,8	7,5	7,2
Avril	37,4	36,8	36,6	36,1	35,6	33,1
Mai	93,2	92,5	91,7	90,8	89,8	85,9
Juin	150,9	149,7	148,0	146,9	144,5	137,6
Juillet	227,1	225,2	223,0	220,6	218,2	208,5
Août	310,9	310,6	310,0	309,4	308,9	300,8
Septembre	237,4	234,8	235,7	234,0	234,1	232,1
Octobre	92,0	93,3	97,4	94,3	95,5	93,8
Novembre	6,9	7,0	7,0	7,0	7,1	6,6
Décembre	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
TOTAL	1166,2	1160,3	1159,4	1149,0	1143,5	1107,8

Tableau 7.10 : Projections de la température moyenne mensuelle à Yanfolila.

Mois	Température estimée (°C)					
	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Janvier	25,8	25,9	26,0	26,1	26,3	26,4
Février	27,3	27,4	27,5	27,7	27,8	27,9
Mars	30,8	30,9	31,1	31,2	31,3	31,5
Avril	32,5	32,6	32,7	32,8	33,0	33,0
Mai	31,1	31,2	31,4	31,5	31,6	31,8
Juin	29,1	29,2	29,3	29,5	29,6	29,7
Juillet	27,4	27,5	27,6	27,7	27,9	28,0
Août	26,4	26,5	26,5	26,6	26,7	26,9
Septembre	27,2	27,3	27,4	27,5	27,6	27,8
Octobre	27,9	28,0	28,1	28,2	28,4	28,5
Novembre	26,9	27,0	27,1	27,3	27,4	27,5
Décembre	25,0	25,1	25,2	25,4	25,5	25,6
Moyenne /AN	28,1	28,2	28,3	28,5	28,6	28,7

7.1.2 Données pour les ressources en eau

La localité de Sélingué n'ayant pas de séries de données météorologiques importantes, nous avons utilisé les données de la station de Yanfolila qui est suffisamment proche. Ces données ont été utilisées avec les projections issues du scénario pour Sélingué.

Les localités de la zone d'étude pour les ressources en eau sont Bougouni, Dioï la et Yanfolila. Les années 2005, 2010, 2015, 2020 et 2025 correspondent aux horizons temporels de projection utilisés. Nous présentons l'ensemble de ces données dans les Tableaux 7.3 et 7.4 ainsi que dans les Tableaux 7.11 à 7.14.

Bougouni

Les données de projection sont celles utilisées dans l'étude sur le coton (Tableaux 7.3 et 7.4).

Dioï la

Tableau 7.11 : Projections de la pluviométrie moyenne mensuelle à Dioï la.

Mois	Pluie Estimée (mm)								
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2050	2075	2100
Janvier	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,44	0,43	0,39	0,35
Février	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mars	3,19	3,15	3,12	3,08	3,03	2,87	2,72	2,44	2,13
Avril	24,49	24,51	24,23	23,97	23,45	21,52	21,68	19,89	17,85
Mai	54,25	53,82	53,37	52,80	52,25	49,85	48,18	44,28	40,29
Juin	113,59	112,69	111,60	110,19	108,79	103,63	98,95	90,17	79,92
Juillet	189,35	187,55	185,61	183,70	181,55	173,18	166,16	151,94	136,36
Août	270,66	270,39	270,12	269,84	269,57	260,89	269,84	265,78	268,76
Septembre	128,62	128,18	127,79	127,14	126,75	126,75	122,53	118,73	115,27
Octobre	49,04	52,21	52,71	53,22	53,82	51,31	58,35	62,88	65,73
Novembre	2,35	2,46	2,48	2,50	2,52	2,34	2,64	2,78	2,93
Décembre	0,70	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,68	0,67	0,66
Moy_AN	815,79	811,39	807,16	801,52	795,71	790,48	755,21	720,35	680,52
Cumul	836,72	836,14	832,19	827,60	822,89	793,46	792,15	759,94	730,24

Tableau 7.12 : Projections de la température moyenne mensuelle à Dioï la.

Mois	Température estimée (°C)								
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2050	2075	2100
Janvier	25,9	26,0	26,1	26,2	26,4	26,5	27,3	28,1	29,1
Février	27,4	27,5	27,6	27,8	27,9	28,0	28,8	29,7	30,6
Mars	31,0	31,1	31,3	31,4	31,5	31,7	32,5	33,4	34,4
Avril	32,6	32,8	32,9	33,0	33,2	33,3	34,3	35,2	36,3
Mai	31,4	31,5	31,7	31,8	31,9	32,0	32,9	33,8	34,8
Juin	29,5	29,6	29,7	29,9	30,0	30,1	30,9	31,8	32,7
Juillet	27,7	27,8	27,9	28,0	28,2	28,3	29,0	29,8	30,7
Août	26,4	26,5	26,5	26,7	26,8	26,9	27,6	28,3	29,1
Septembre	27,2	27,3	27,4	27,5	27,6	27,8	28,5	29,3	30,1
Octobre	27,6	27,7	27,8	27,9	28,1	28,3	29,1	30,0	31,0
Novembre	27,0	27,1	27,2	27,4	27,5	27,6	28,4	29,3	30,3
Décembre	25,2	25,3	25,4	25,6	25,7	25,8	26,6	27,5	28,4
Moyenne / AN	28,3	28,3	28,5	28,6	28,7	28,9	29,6	30,5	31,5

Yanfolila

Tableau 7.13 : Projections de la pluviométrie moyenne mensuelle à Yanfolila.

Mois	Pluie estimée (mm)								
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2050	2075	2100
Janvier	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5
Février	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7
Mars	8,0	8,0	7,9	7,8	7,5	7,2	6,9	6,2	5,3
Avril	37,4	36,8	36,6	36,1	35,6	33,1	31,8	28,3	24,8
Mai	93,2	92,5	91,7	90,8	89,8	85,9	82,8	76,4	69,4
Juin	150,9	149,7	148,0	146,9	144,5	137,6	131,4	119,7	106,9
Juillet	227,1	225,2	223,0	220,6	218,2	208,5	200,5	184,4	165,7
Août	310,9	310,6	310,0	309,4	308,9	300,8	304,7	301,3	296,9
Septembre	237,4	234,8	235,7	234,0	234,1	232,1	223,6	223,7	217,8
Octobre	92,0	93,3	97,4	94,3	95,5	93,8	106,0	111,6	118,2
Novembre	6,9	7,0	7,0	7,0	7,1	6,6	7,4	7,8	8,1
Décembre	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Cumul	1166,2	1160,3	1159,4	1149,0	1143,5	1107,8	1097,1	1061,2	1014,6

Tableau 7.14 : Projections de la température moyenne mensuelle à Yanfolila.

Mois	Température estimée (°C)								
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2050	2075	2100
Janvier	25,8	25,9	26,0	26,1	26,3	26,4	27,2	28,0	28,9
Février	27,3	27,4	27,5	27,7	27,8	27,9	28,7	29,6	30,5
Mars	30,8	30,9	31,1	31,2	31,3	31,5	32,3	33,2	34,2
Avril	32,5	32,6	32,7	32,8	33,0	33,0	34,1	35,0	36,0
Mai	31,1	31,2	31,4	31,5	31,6	31,8	32,6	33,5	34,5
Juin	29,1	29,2	29,3	29,5	29,6	29,7	30,5	31,4	32,3
Juillet	27,4	27,5	27,6	27,7	27,9	28,0	28,7	29,5	30,4
Août	26,4	26,5	26,5	26,6	26,7	26,9	27,5	28,3	29,1
Septembre	27,2	27,3	27,4	27,5	27,6	27,8	28,5	29,3	30,1
Octobre	27,9	28,0	28,1	28,2	28,4	28,5	29,4	30,3	31,2
Novembre	26,9	27,0	27,1	27,3	27,4	27,5	28,3	29,2	30,1
Décembre	25,0	25,1	25,2	25,4	25,5	25,6	26,4	27,3	28,2
Moyenne /AN	28,1	28,2	28,3	28,5	28,6	28,7	29,5	30,4	31,3

7.2 Données d'analyse de sensibilité et d'évènements extrêmes

Elles sont utilisées à la fois dans l'étude sur le coton et dans celle des ressources en eau. Dans les Tableaux 7.15 et 7.16, nous indiquons ces données d'analyse utilisées dans le modèle CRIWAR où la simulation a été faite pour Bougouni en exemple avec:

- Une augmentation de 5% de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-90 ;
- Une diminution de 10% de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-90.

Ces deux cas correspondraient respectivement à la période de forte pluviométrie et à la période sèche.

Tableau 7.15 : Augmentation de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-90 pour Bougouni.

Taux	0%	5%	10%	15%	20%
Bougouni	1123,8	1180,0	1236,2	1292,4	1348,6

Tableau 7.16: Diminution de la pluviométrie par rapport à la normale 1961-90 pour Bougouni.

Taux	0%	5%	10%	15%	20%
Bougouni	1123,8	1067,6	1011,4	955,2	899,0

8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a porté sur trois aspects essentiels :

1. La construction d'un scénario climatique le plus plausible pour le Mali. Ceci a été possible avec l'utilisation de MAGICC/SCENGEN. En effet le choix d'un GCM approprié et sa validation par des données locales ont permis de générer à partir de SCENGEN des scénarios climatiques. Ces scénarios ont été utilisés pour faire des projections aux horizons temporels 2025, 2050, 2075 et 2100. La validation a été faite en comparant les données d'observation et les valeurs de projection de température et de précipitation pour les localités de Bougouni et de Sélingué. Cette comparaison a montré une bonne concordance entre les valeurs observées et les résultats du scénario sur les sites étudiés.

Pour les besoins de l'étude sur le coton et sur les ressources en eau, nous avons fait des projections issues du scénario climatique aux horizons temporels de 2005 à 2025 dans les localités concernées par ces études.

2. Le test de la sensibilité du scénario climatique par rapport aux changements climatiques en introduisant un taux de variation dans la variance et dans la moyenne par rapport à la normale 1961-1990 pour les horizons temporels 2025, 2050 et 2075. Ceci a donné de nouvelles distributions. Ces distributions ont été ajustées suivant une loi normale pour chaque année. Les courbes de ces distributions ont montré un déplacement des températures maximales vers les températures supérieures à la maximale moyenne de la normale 1961-1990. Ainsi par rapport à cette maximale de 30,5°C, la probabilité d'avoir des températures supérieures à la moyenne de la normale 1961-90 a été de 0,5. Cette probabilité a été de 0,4 pour une valeur maximale de 32, 5°C à l'horizon 2050 et de 0,36 pour une valeur maximale de 34,5°C à l'horizon 2100. La sensibilité a été également étudiée en adoptant un scénario théorique d'augmentation et de diminution de 0 à 20% au pas de 5% des paramètres climatiques dans les différentes localités.
3. L'étude des températures et précipitations extrêmes en étudiant la probabilité d'apparition des températures extrêmes par rapport à la normale 1961-90 pour les horizons temporels 2025, 2050, 2075 et 2100. L'analyse effectuée a montré une augmentation de cette probabilité entre 2025 et 2100.

De même, nous avons fait une comparaison des possibilités de pluviométries extrêmes (augmentation et diminution) par rapport aux périodes sèche et humide survenues depuis 1968, en utilisant un scénario théorique. Cette comparaison montre que pour une augmentation de 20% par rapport à la normale 1961-90, nous assisterons à une pluviométrie semblable à celle de la période humide dans les zones pré-guinéenne et soudanienne. Pour une diminution analogue, on obtiendra une pluviométrie semblable à celle de la période sèche dans les mêmes zones climatiques.

Les résultats de cette étude ont montré que pour toutes les localités on assisterait à une diminution de la pluviométrie qui se traduirait par un déplacement des isohyètes vers le nord.

Des situations de sécheresse seraient constatées sur la première moitié de l'hivernage (mois de mai, juin et juillet) à partir de l'horizon 2025 sur toutes les stations de la zone d'étude pour une sensibilité climatique moyenne. Les mêmes situations pourraient s'installer dès l'horizon 2020 si la réaction du climat aux perturbations devenait plus rapide.

Suite au déficit pluviométrique, les sources d'approvisionnement naturelles en eau des communautés constituées par les eaux de surface et les eaux souterraines superficielles seront affaiblies dans une certaine proportion et les populations auront recours au transport, au stockage et aux forages. Les coûts que nécessiteront ces activités de transport, de réalisation de forages équipés constitueront un facteur limitant pour l'approvisionnement en eau. Des mouvements de populations pour se regrouper autour des points d'eau pérennes et un exode rural des populations vers les centres urbains et les pays voisins seront à prévoir.

Les résultats ci-dessus mentionnés de cette étude financée par le NCCSAP constituent une nette amélioration par rapport aux études précédentes financées par le PNUD/FEM. En effet, celles-ci n'avaient pas permis de quantifier les impacts dus aux changements climatiques et d'évaluer les aspects socio-économiques de ces impacts dans les secteurs concernés par ces études. Cette lacune a été occasionnée par l'absence d'informations climatiques locales de prospective et d'outils d'évaluation des impacts comme cela a été le cas dans la présente étude.

Les incertitudes pouvant affecter les résultats de la présente étude concernent entre autres :

- Les incertitudes liées aux perspectives de développement qui ont conditionné le choix du scénario de référence ;
- Les erreurs liées au "downscaling " du GCM notamment à cause du rapport de réduction de la maille ;
- Les incertitudes liées à la technique de spatialisation ;
- Les erreurs et incertitudes liées aux données statistiques et aux résultats de projection.

Enfin, une comparaison avec d'autres pays voisins montre que les pays ont utilisé des modèles différents. C'est par exemple le cas du Mali, du Sénégal et de l'Algérie.

Dans une prochaine phase de l'étude, il serait intéressant de refaire le scénario climatique à partir du downscaling d'autres modèles plus précis (que MAGGIC/SCENGEN) qui sont actuellement en expérimentation au niveau international et sous-régional.

Dans le même contexte d'une seconde phase du projet, on pourrait faire des études comparatives au niveau de la sous-région en utilisant un scénario élaboré à partir d'un downscaling à mailles beaucoup serrées.

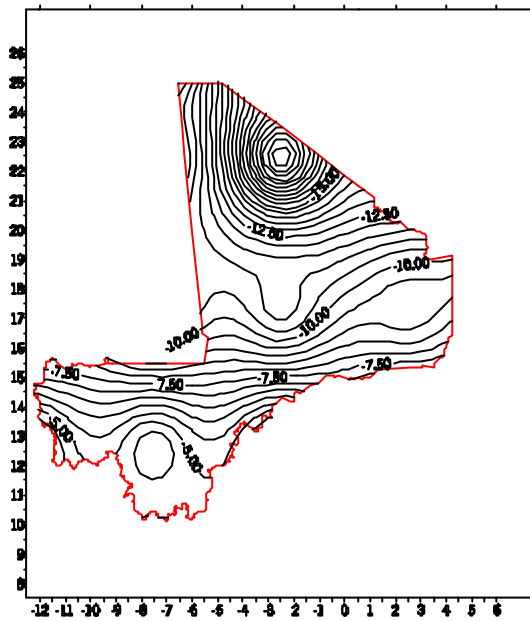
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. BANQUE MONDIALE, 2000: The World Bank little databook 2000.
CERPOD- INSAH- CILSS, 1996 : Réseau Migration et Urbanisation en Afrique de l'Ouest – Rapport National Descriptif de l'Enquête Malienne sur les Migrations et l'Urbanisation (EMMU) 1992-1993.
2. CNRST/Projet Climat/Etude 2, 2002: Vulnérabilité et Adaptation du maïs et du coton face aux changements climatiques au Mali ; Bamako (Mali).
3. CNRST/Projet Climat/Etude 3, 2002: Vulnérabilité et Adaptation des ressources en eau aux effets des changements climatiques dans les bassins du Sankarani et du Baoulé ; Bamako (Mali).
4. COUREL, M.F., CHAMARD, P.C., Le RHUN, J., TOGOLA, M. & JACQUEMINET, C., 1992: Evolution hydro-pluviométrique récente du delta intérieur du Niger (Mali).
5. DNSI, 1998: Perspective de la population résidente du Mali de 1987 à 2002.
6. DNSI, 1999: Recensement général de la Population et de l'Habitat du Mali en 1998 – Résultats provisoires.
7. FARAGO, T. & KATZ, R.W., 1990: Extreme and design values in climatology, Wold Climate Program, Wold Meteorological Organization, WMO/TD –No 386.
8. GAYE, Th.A., FONGANG, S., DABO, E.M.F., SAMBOU, E. & SALL, S.M., 2000: Downscaling global climate models outputs to build climate change Scenarios in Senegal, Word Resource Review, Vol. 12, No.2, 224-236.
9. HULME, M., WIGLEY, T.M.L., BARROW, E.M., RAPER, S.C.B., CENTELLA, A., SMITH, S. & CHIPANSHI, A.C., 2000 : Using a climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments - MAGICC and SCENGEN version 2.4 Workbook, Climatic research Unit, Norwich, UK, 52 pages.
10. IPCC/WMO/UNEP, 2000: IPCC special report; Emissions Scenarios – Summary for Policymakers, 21 pages.
11. MEP / DNP, 1991: Déclaration de politique nationale de population, Mai 1991.
12. Présidence de la République du Mali, Secrétariat Général, 1999: Etude Nationale Prospective (ENP) Mali 2025 – Rapport général, juin 1999.
13. Projets PNUD/RAF/93/G31 et MIL/97/G32 CNRST (Bamako): Communication initiale du Mali, 2000.
14. Projets PNUD/RAF/93/G31 et MIL/97/G32 CNRST (Bamako): Atténuation dans le secteur de l'Agriculture, 1999.

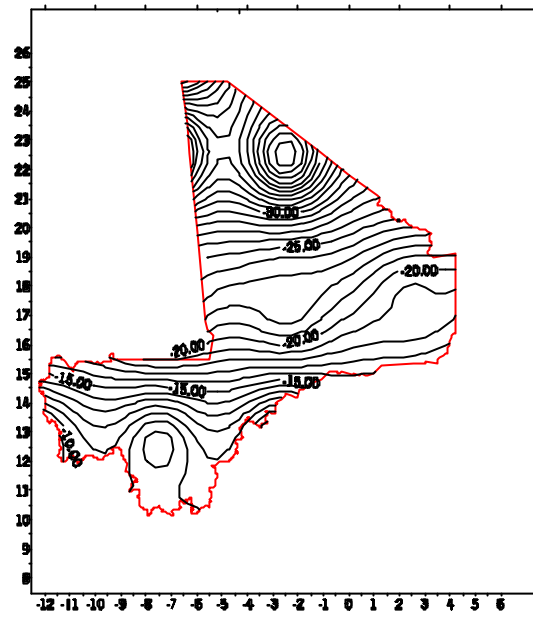
15. Projets PNUD/RAF/93/G31 et MIL/97/G32 CNRST (Bamako) : Atténuation dans le secteur des Ressources en Eau, 1999.
16. Projets PNUD/RAF/93/G31 et MIL/97/G32 CNRST (Bamako) : Inventaire des émissions de gaz à effet de serre au Mali.
17. SIVAKUMAR, M.V.K., KONATE, M. & VIRMANI, S. M.1987:
Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : le Mali ; Bulletin d'information n° 19, ICRISAT, Niamey.
18. VINER, D. & HULME, M., 1992: Climate change Scenarios for Impacts Studies in the UK: General Circulation Models, Scenario Construction Methods and Applications for Impacts Assessment. Report prepared for the UK Departement of the Envrionnement, Climatic Reseach Unit, Norwich, 70 pp.

ANNEXES

1. Variations de la moyenne pluviométrique saisonnière à l'horizon 2050.

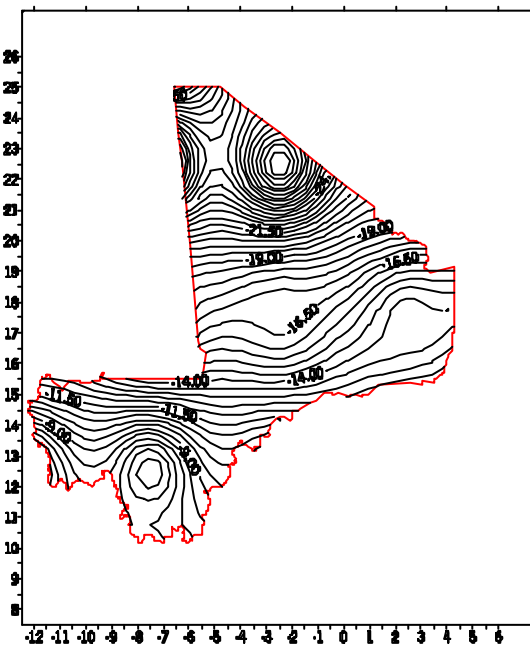


a) S= 1,50

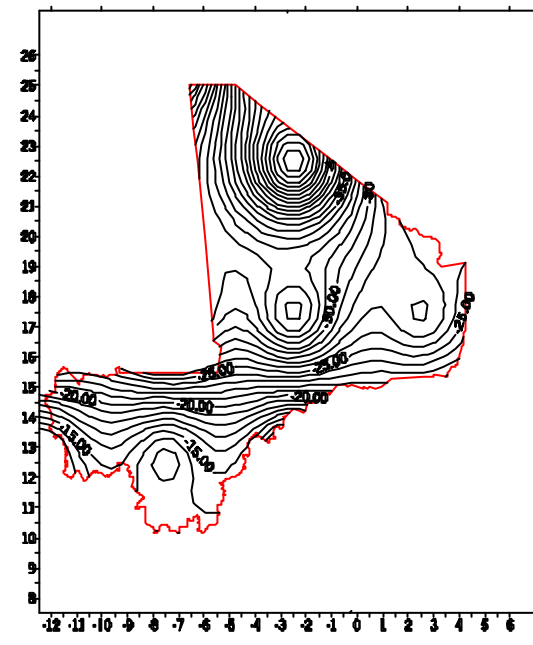


b) S= 4,50

2. Variations de la moyenne pluviométrique saisonnière à l'horizon 2075.

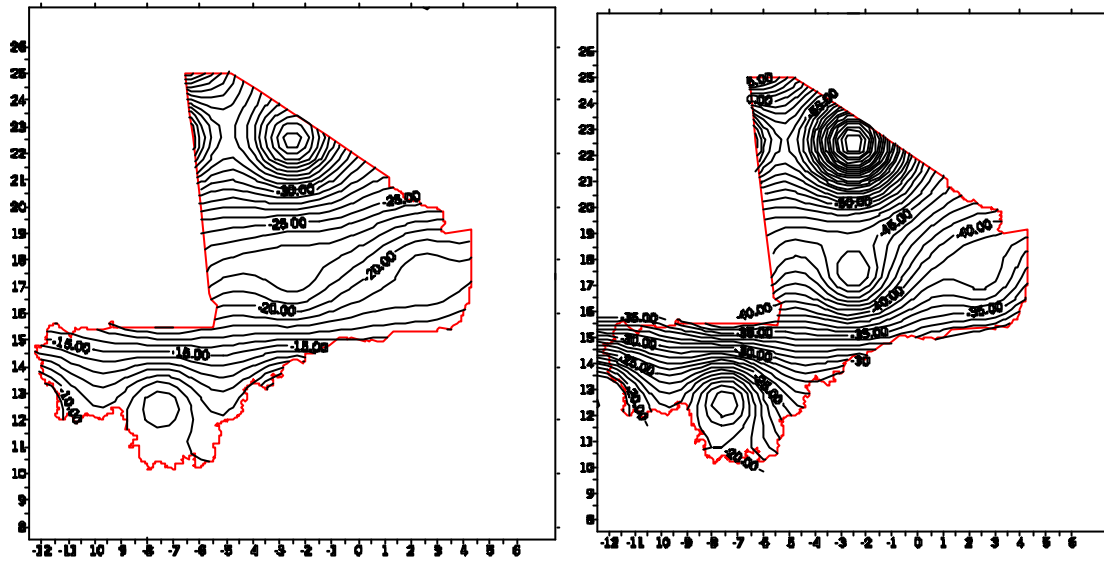


a) S= 1,50



b) S= 4,50

3- Variations de la moyenne pluviométrique saisonnière à l'horizon 2100



a) S= 1,50

b) S= 4,50