



ONG-Cellule Ivoirienne pour le
Développement durable-CI 2D

Agence Suédoise de Coopération
au Développement international



RAPPORT FINAL DU PROJET INDIVIDUEL

.....

PROGRAMME INTERNATIONAL DE FORMATION SUR LE
CHANGEMENT CLIMATIQUE, ATTENUATION ET ADAPTATION
2010-2011

THÈME

ETUDE DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES
RESSOURCES EN EAU : APPLICATION A L'ANALYSE DU RISQUE
D'INONDATION DANS LE DEPARTEMENT DE SINFRA.

(CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE).

.....
N'GUESSAN BI Vami Hermann

*ONG-Cellule Ivoirienne pour le Développement Durable (CI 2D)/Centre Universitaire de
Recherche et d'application en Télédétection (CURAT), 22 BP 801 Abidjan 22, Côte
d'Ivoire, nguessanbiv@yahoo.fr / ci2d_info@yahoo.fr,*

Tel:(225) 49 21 63 35/(225) 09 74 21 63

10 OCTOBRE 2011

Table des matières

Liste des définitions et abréviations.....	2
Résumé.....	3
1. Préambule	4
2. Introduction et objectifs de l'étude	4
3. Perspective de changement climatique.....	7
4. Plan national d'adaptation/atténuation - changements climatiques en Côte d'Ivoire	17
5. Méthodologie.....	21
6. Résultats.....	28
7. Discussion.....	38
8. Conclusions	39
9. L'étape suivante.....	40
10. Remerciements.....	40
11. Références.....	41

Liste des définitions et abréviations

ANDE :	Agence Nationale de l'Environnement
ABN:	Autorité du Bassin du Niger
ABV:	Autorité du Bassin de la Volta
GES :	Gaz à Effet de Serre
BNETD :	Bureau National d'Etude Techniques et de Développement
CCNUCC :	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CCT :	Centre de Cartographie et de Télédétection
IPCC/GIEC:	Intergouvernemental Panel on Climate Change/Groupe Intergouvernemental d'Etudes sur le Climat
OMM :	Organisation Météorologique Mondiale
PANA :	Programme d'action National d'adaptation
PNAE :	Plan National d'Action Environnementale de la Côte d'Ivoire
PNRRGC:	Plateforme Nationale de Réduction des Risques et de Gestion des Catastrophes
POLLUMAR :	
PNRRGC :	Plateforme Nationale de Réduction des Risques et de Gestion des Catastrophes
PARRC :	Programmes d'Actions de Réduction des Risques de Catastrophes
RRC :	Réduction des risques de catastrophes
SODEMI :	Société de Développement Minier
SODEXAM :	Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
SIG:	Système d'Informations Géographiques
SIRS:	Système d'Informations à Référence Spatiale
WAPP :	West Africa Power Pool

ETUDE DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES
RESSOURCES EN EAU : APPLICATION A L'ANALYSE ET RISQUES
D'INONDATION DANS LE DEPARTEMENT DE SINFRA.
(CENTRE-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE).

Vami Hermann N'GUESSAN BI

Résumé

Les tendances pluviométriques régionales en Côte d'Ivoire, du fait du changement climatique, révèlent une baisse généralisée des précipitations sur l'ensemble du pays. Cela est de nature à perturber les régimes des cours d'eau réduisant ainsi la disponibilité des ressources en eau de surface. Dans un contexte de changement climatique, un des enjeux majeurs des recherches est de quantifier l'impact de cette variabilité sur le cycle hydrologique et les ressources en eau. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude. L'objectif assigné donc à ce travail de recherche est de montrer l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface et de proposer une méthode pour cartographier les zones à potentiel en eau souterraine exploitable. Pour l'analyse du champ de précipitation, la démarche adoptée suit une approche markovienne, qui est une approche stochastique très utilisée pour analyser et simuler l'évolution spatio-temporelle d'un système à partir des probabilités de transition. Elle a porté sur une série chronologique de données de pluies (1967-2000). Ce modèle a ensuite été étendu aux cas de données spatialisées à l'aide des automates cellulaires pour inclure le voisinage comme facteur modifiant les probabilités de changement de l'état d'une portion d'espace. La région de Sinfra étant située en zone de socle, le réseau de fractures qui constitue la voie privilégiée d'accès aux ressources en eaux souterraines a été établi par le traitement des images Landsat TM de la scène 197-055. La détermination de la perméabilité induite par ce réseau de fractures en utilisant la méthode de Francis (1970) vient en appoint, pour identifier les couloirs de circulation de l'eau souterraine de la région de Sinfra. Les valeurs de perméabilité induite obtenues, ainsi que les données hydrologiques et topographiques ont été analysées par une approche multicritère avec agrégation par codification des critères multi-sources considérés pour produire la carte de potentialité en eau souterraine du département de Sinfra. L'analyse par les chaînes des Markov de la série chronologique de données de pluies a révélé une grande variabilité interannuelle de la pluie qui traduit une alternance de phase humide et de phase sèche plus longue. Ce long déficit pluviométrique a provoqué une baisse importante de l'écoulement des principaux cours d'eau présents dans le département de Sinfra. Cette analyse montre également que les échos de précipitations sont bien décrits par les chaînes de Markov. Elles permettent, en effet, de mieux apprécier l'influence du passé sur le comportement du phénomène pluvieux et de donner une meilleure description des précipitations. L'analyse du réseau de fractures a révélé les directions principales empruntées par les fractures régionales et les fractures dans leur ensemble. La distribution spatiale des valeurs de perméabilités induites obtenues (comprises entre $1.7 \cdot 10^{-8}$ et $1.1 \cdot 10^{-6}$ m/h) a permis d'identifier les couloirs de circulation de direction : E-W, N-S et NW-SE. La carte des potentialités en eau souterraine montre que plus de la moitié (64%) du département de Sinfra est pourvue en eau souterraine exploitable. L'analyse multicritère réalisée a révélé que le risque d'inondation par débordement des cours d'eau dans le département de Sinfra est plus élevé et concerne environ 14 % du territoire départemental. Le risque lié à la remontée des nappes s'étend sur environ 3% département de Sinfra.

Mots clés : Télédétection, SIG, analyse multicritère, risque d'inondation, ressources en eau, Changements climatiques

1. Préambule

Ce présent document est un rapport final produit à l'issue d'un projet de développement exécuté par l'ONG dénommée la Cellule Ivoirienne pour le Développement Durable en abrégé (CI 2D). Ce projet a été exécuté dans le département de Sinfra, localité située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, un pays d'Afrique de l'Ouest. C'est un projet qui répond à la préoccupation des autorités en charge de la gestion des collectivités locales, qui est l'impact des effets des changements climatiques sur les ressources en eau dans le département de Sinfra. Ces effets sont surtout ressentis au niveau du manque d'eau d'une part et de l'excès d'eau d'autre part. L'excès d'eau conduit au problème d'inondation qui est une catastrophe naturelle qui entraîne des pertes en vies humaines, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques et de dégradations de l'environnement naturel. Il s'avère alors nécessaire d'évaluer le risque d'occurrence de cette catastrophe naturelle. C'est dans cette optique que s'inscrit cette étude qui porte sur l'évaluation du risque d'inondation dans le département de Sinfra. La CI 2D, en exécutant ce projet, met à la disposition des autorités un modèle spatial du risque d'inondation qui est un outil d'aide à la décision. La CI 2D a bénéficié lors de ce projet d'un appui remarquable de l'Agence Suédoise de Coopération au Développement International (ASDI). Cet soutien a été matérialisé par une formation avancée sur les Changements climatiques, atténuation et adaptation suivi d'un encadrement pendant la durée du projet.

2. Introduction et objectifs de l'étude

Tous les pays, qu'ils soient développés ou en développement, connaissent actuellement un mouvement sans précédent de concentration des populations et des activités dans les zones urbaines. Cette urbanisation croissante, préoccupe les collectivités territoriales, les élus locaux, les aménageurs du territoire et la communauté scientifique car elle entraîne la concentration des hommes dans des espaces plus ou moins réduits, avec toutes les conséquences possibles, provoquant ainsi des inondations en cas pluies. Les conséquences des inondations sont accentuées par le phénomène d'érosion qui mérite également une attention particulière. En effet la pression démographique responsable de la pression foncière conjuguée à l'utilisation du bois comme seule source d'énergie conduisent à la destruction du couvert végétal, à la dégradation des sols (Nébié, 1996). Ces différentes formes de dégradations rendent les terres plus vulnérables à l'inondation. Ainsi, pour toute action raisonnée, il est nécessaire d'identifier les zones à risque d'inondation nécessitant une intervention prioritaire aussi bien pour les populations que pour les décideurs politiques. Pour ce faire, l'utilisation couplée de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) peut être d'un grand apport pour une spatialisation du risque d'inondation. L'inondation par ruissèlement qui est un phénomène urbain et essentiellement tributaire de la qualité du réseau d'assainissement ne fait pas l'objet de cette étude. Ainsi la présente étude porte uniquement sur les inondations de plaine.

L'exécution de ce projet permettra de doter le département de Sinfra d'une carte de risque d'inondation qui peut être utilisée comme document de référence pour les décideurs, et comme un outil d'aide à la décision à la disposition des autorités en vue d'entreprendre les actions nécessaires. Ce projet permettra donc de combler cette lacune car un tel outil d'aide à la décision n'existe pas encore dans le département. Le phénomène d'inondation se présente généralement sous deux formes à savoir l'inondation de plaine et l'inondation de ruissèlement. La première forme comprend l'inondation par débordement et l'inondation par remontée de la nappe. La seconde forme étant un phénomène urbain essentiellement tributaire dû la qualité réseau d'assainissement. Les inondations en zone tropicale humide

sont principalement dues à des pluies intenses ou des pluies d'intensité moyenne et de longue durée (Saley *et al.*, 2005).

Ainsi l'objectif principal de ce projet est de spatialiser et cartographier le risque d'inondation en vue d'aider les collectivités territoriales dans la prévention et la gestion des catastrophes naturelles. Cette étude sera menée à travers plusieurs axes qui auront pour buts de :

- Reconstituer la base des données hydroclimatiques
- Analyser le champ de précipitation
- Cartographier la vulnérabilité à l'inondation par débordement
- Cartographier la vulnérabilité à l'inondation par remontée de la nappe
- Cartographier de l'aléa à l'inondation
- Cartographie du risque d'inondations par débordement et
- Evaluer du risque d'inondation par remontée et par débordement en vue cartographier les zones d'expansion des eaux, des zones susceptibles d'être inondées et
- Proposer des solutions d'atténuation et d'adaptation.

Le département de Sinfra, est une localité située dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Il fait partie de la région administrative de la Marahoué et comprend quatre (4) sous-préfectures : Sinfra, Bazré, Kouéinfla et Kononfla. Le département de Sinfra s'étend sur 1600 km² et est limité au Nord par le département de Bouaflé, au Sud par les départements d'Oumé et de Gagnoa, à l'Est par le département de Yamoussoukro et à l'Ouest par les départements de Daloa et d'Issia. Le département de Sinfra est situé entre les longitudes 5°38' et 6°15' Ouest et les latitudes 6°48' et 6°82' Nord. Il est à l'intersection des degrés carrés de Gagnoa et Daloa (figure 1) : une image satellitaire du département de Sinfra est présentée à la figure 2.

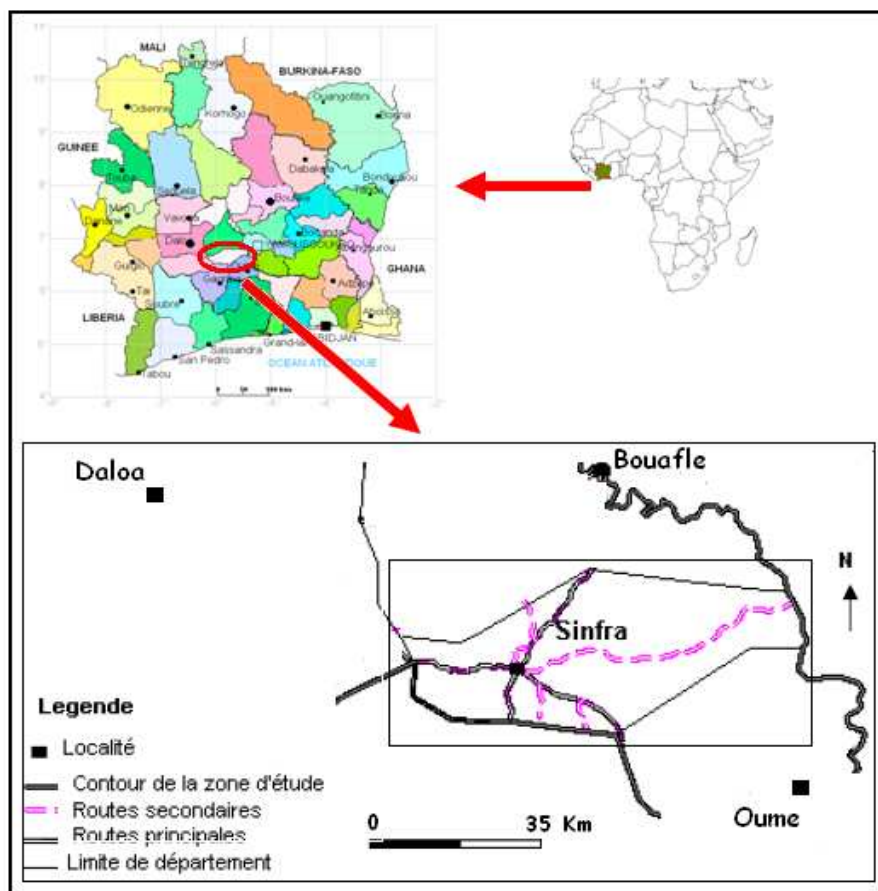


Figure 1- Localisation de la zone d'étude

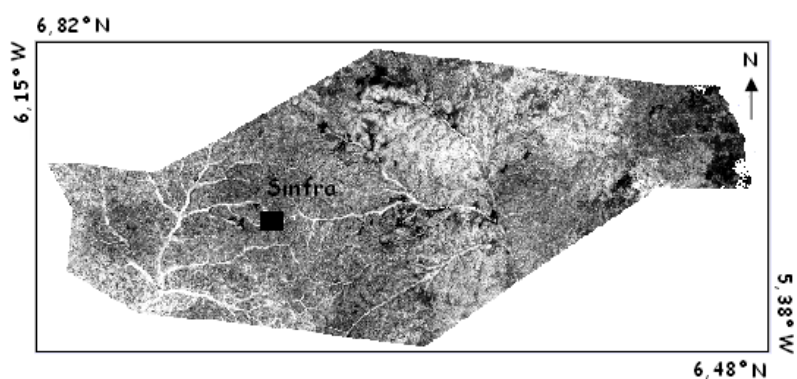


Figure 2 - Image de la zone d'étude extraite de la bande proche infra-rouge (TM4) des images Landsat TM

3. Perspective de changement climatique

La Côte d'Ivoire est située en Afrique de l'Ouest. Sa superficie est de 322 463km², soit près de 1% de celle du continent africain. Le pays se présente sous la forme d'un quadrilatère de 600 km environ de côté, entre 4° 30' et 10° 30' de latitude Nord, et 2° 30' et 8° 30' de longitude ouest. Il est bordé au sud par l'océan Atlantique sur une façade de plus de 550 km, représentant une frontière naturelle importante en même temps qu'une ouverture au commerce mondial et aux échanges diversifiés. Les pays frontaliers de la Côte d'Ivoire sont le Libéria et la Guinée à l'ouest, le Mali et le Burkina Faso au Nord, le Ghana à l'Est

Situé en Afrique de l'ouest, la Côte d'Ivoire est un pays côtier caractérisé du Sud au Nord par la forêt, la savane arborée et la savane herbeuse. L'économie du pays repose en grande majorité sur l'agriculture qui se pratique au détriment du couvert forestier. Comme la plupart des pays africains, la Côte d'Ivoire est en proie à une démographie galopante (environ 20 millions d'habitants) provoquant une pression anthropique sur l'environnement au sens large du terme entraînant la déforestation, l'urbanisation accrue, la pollution avérée de l'air, du sol et des eaux.

De nombreuses études et observations montrant que la température augmente quand la pluviométrie baisse sur toute l'étendue du territoire. De plus, les saisons des pluies sont réduites avec des débuts tardifs et de fins précoces, perturbant ainsi les calendriers culturels et les phénomènes météorologiques sont extrêmes et surviennent de façon hasardeuse ces dernières années.

Tous ces éléments montrent bien que la Côte d'Ivoire subit les conséquences du changement climatique et qu'elle n'est pas à l'abri d'une fréquence plus accrue des catastrophes naturelles.

La Côte d'Ivoire, qui sort progressivement d'une crise sociopolitique déclenchée depuis 2002, est un pays vulnérable surtout face aux changements climatiques dont les impacts consistent en une érosion côtière manifeste, des inondations fréquentes, des glissements de terrains, l'émergence de certaines maladies telles que la fièvre typhoïde, une dégradation des terres, et une perte de la biodiversité. Nous en voulons pour preuves l'érosion côtière qui détruit les établissements humains faisant déplacer les populations qui ont tout perdu à l'intérieur des terres. Chaque année, la capitale économique Abidjan et certaines villes subissent des inondations et des glissements de terrains pendant la grande saison des pluies provoquant de nombreuses pertes en vies humaines et de nombreuses pertes économiques. Du 12 au 15 juin 2009, des pluies diluviennes accompagnées de vents violents ont provoqué dans la ville d'Abidjan, des glissements de terrain, des inondations, la destruction de logements avec pour conséquences : 22 personnes décédées, 6 disparus, 7 blessés, 48 familles et 121 étudiants sans abris.

Bien que disposant de plans sectoriels d'interventions (plan ORSEC, plan POLLUMAR, Plan de lutte contre les feux de brousse). La Côte d'Ivoire a donc plus que jamais besoin d'une assistance internationale pour renforcer ses capacités en matière d'adaptation aux changements climatiques et de réduction des risques de catastrophes (RRC).

Conscientes de la problématique du changement climatique à la base de toutes ces catastrophes naturelles, les autorités ivoiriennes ont décidé de s'inscrire résolument dans un cadre d'action pour la recherche des solutions d'atténuation et des stratégies d'adaptation. Cette recherche de solution a conduit les autorités ivoiriennes à mettre en place des programmes

nationaux dont le Plan National d'Action pour l'Environnement (PNAE). A ce jour, un comité interministériel et multisectoriel s'est investi dans l'élaboration des textes indispensables à la mise en place de la Plateforme Nationale de Réduction des Risques et de Gestion des Catastrophes (PNRRGC) qui a pour tâche d'élaborer et de mettre en œuvre des Programmes d'Actions de Réduction des Risques de Catastrophes (PARRC).

L'un des objectifs du PARRC est d'évaluer le risque d'occurrence des catastrophes naturelles sur toute l'étendue du territoire Ivoirien. C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent projet qui a pour objectif d'évaluer le risque d'inondation dans le département de Sinfra qui est une localité située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire.

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le changement climatique se définit comme : «Toute forme d'inconstance climatique, quelle que soit leur nature statistique ou leur cause physique. Il sert souvent à désigner le passage à un autre état climatique caractérisé par des moyennes différentes des variables atmosphériques». Pour le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution de Climat (GIEC):

«Le changement climatique s'entend par toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines». Selon la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC):

«Des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine, altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables».

Par variabilité du climat, on entend généralement les variations de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écarts-types, apparition d'extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales autres que celle de phénomènes météorologiques particuliers (IPCC, 2001).

Comment observe-t-on ces changements climatiques sur le climat en Côte d'Ivoire?

Les études d'observation montrent que la Côte d'Ivoire s'est réchauffée en moyenne de 0,3°C depuis la décennie 1990 comme le montre les données de température de la station de Gagnoa qui est la station synoptique de la plus proche de notre zone d'étude (figure ci-dessous).

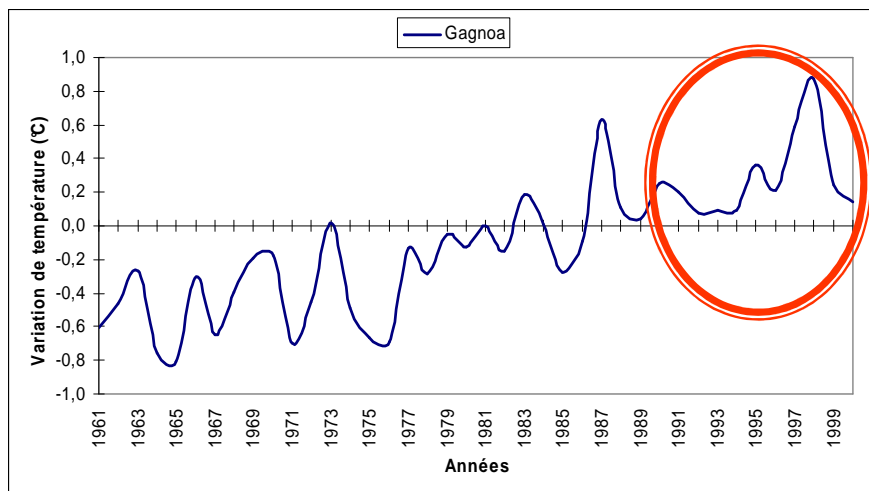


Figure 3 : Températures moyennes de 1961 à 2000 de la station synoptique de Gagnoa

L'encadré rouge montre une période au cours de laquelle la température au-dessus de la moyenne

Les écarts de précipitations par rapport à la normale 1971-2000 sont généralement négatifs depuis les années 80 qui révèlent la baisse générale des quantités annuelles de pluie à travers tout le pays. Les changements climatiques se manifestent également par un début tardif et une fin précoce des saisons de pluie amplifiés par un raccourcissement de la longueur des saisons de pluie, la persistance et l'intensité des périodes sèches couvrant tout le pays. Il y a en outre une forte occurrence de la brume sèche sur le Littoral (Abidjan, Sassandra) depuis les années 70. Dans l'ensemble se manifestent en Côte d'Ivoire par et en particulier dans la région de Sinfra par :

- Une baisse effective de la pluviométrie depuis les trois dernières décennies
- Une irrégularité des pluies (mauvaise répartition)
- Un raccourcissement de la longueur des saisons pluvieuses
- Une hausse des températures
- Une persistance et rigueur des saisons sèches
- des inondations
- érosions côtières

Les scientifiques pensent que l'atmosphère terrestre devrait encore se réchauffer de 1.4 à 5.8 °C de 1990 à 2100 (IPCC, 2001).

Ce qui accentuerait:

- la sécheresse et la désertification ;
- les inondations et les tempêtes;
- la fonte des glaciers;
- la réduction de la couverture neigeuse
- l'élévation des niveaux des mers ;
- la disparition d'espèces animales et végétales.

Plusieurs indicateurs permettent d'apprécier les changements climatiques en cours à sept niveaux:

- 1- **Eaux douces et eaux usées**
 - réserves en eaux souterraines,
 - concentration en coliformes fécaux,
 - demande biochimique en oxygène
- 2- **Océan et mer**
 - érosion côtière,
- 3- **Sol, végétation, désertification**
 - changements de conditions d'utilisation des sols,
 - indice de précipitation,
 - terres affectées par la désertification,
- 4- **Diversité biologique**
 - espèces menacées de disparition,
- 5- **Déchets solides, domestiques, industriels et dangereux**
 - composition des déchets municipaux,
- 6 – **Qualité de l'air**
 - Concentration en polluants atmosphériques dans les zones urbaines
- 7- **Risques naturelles et technologiques**
 - superficies de forêts incendiées
 - coûts économiques des catastrophes naturelles (ou technologiques)

- populations affectées par les catastrophes naturelles ou technologiques

Des études de vulnérabilité ont été menées pour déterminer les effets potentiels des changements climatiques sur quelques secteurs d'activités économiques en Côte d'Ivoire. A partir de l'analyse des impacts prévus, des mesures d'adaptation ont été préconisées pour y faire face. L'étude des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau dans le cas des bassins versant des fleuves Bandama et Sassandra qui couvrent notre zone d'étude a permis de mesurer l'impact d'un doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique sur la température et la pluviométrie. Il ressort de l'analyse de ces résultats que la température moyenne mensuelle sur ces deux bassins devrait augmenter de 2.28°C au minimum et de 4.10°C au maximum.

Ainsi, l'augmentation de température se conjuguera avec une baisse de la pluviométrie en zone de savane, tandis que dans les zones pré-forestières et de forêt dense, une alternance de hausse et de baisse de la pluviométrie. Toutes ces informations montrent que les changements climatiques entraîneraient une baisse des ressources en eau quelle que soit la zone phytogéographique. La baisse de la pluviométrie et des ressources en eau dans ces zones affecterait la production d'énergie hydroélectrique et la production agricole et d'autres secteurs socio-économiques.

Les barrages hydroélectriques de Buyo, Kossou et Taabo sont alimentés en eau par les fleuves N'zo et Sassandra pour le premier et par le Bandama pour les deux derniers. Une baisse des ressources en eau entraînerait une baisse dans la production totale d'électricité par ces barrages.

En effet, une baisse des ressources en eau dans les bassins versants considérés aura probablement un impact sur la productivité de l'agriculture pluviale notamment sur les cultures de riz et de soja.

Aussi, une baisse du volume des eaux superficielles pourrait rendre difficile l'accès de l'eau dans les puits voire les assécher.

En Côte d'Ivoire, l'éducation environnementale est en train d'être introduite dans le cursus scolaire au niveau des écoles primaires en tant que matière intrinsèque au même titre que les matières dites traditionnelles (français, mathématique, sciences physiques). Elle suit les principaux axes suivants:

- L'élaboration et la poursuite des programmes d'éducation, de formation scientifique et technique relatifs au changement climatique,
- L'éducation et la sensibilisation du public en assurant une promotion de l'importance du changement climatique et,
- La prise en compte des questions relatives aux différentes conventions dans les programmes d'enseignement.

Cette sensibilisation au changement climatique a pour but :

- d'éveiller la conscience environnementale des populations de façon à les conduire à inscrire la préservation de l'Environnement au nombre de leurs priorités ;
- d'amener les populations à adopter des comportements quotidiens favorables aux écosystèmes et ;

- de renforcer l'intégration de l'éducation relative aux changements climatiques et à l'environnement en général dans les programmes scolaires, notamment par l'insertion des matières en tant que telles dans le contenu des enseignements.

Cette sensibilisation est menée à travers deux grandes actions stratégiques à savoir :

- les campagnes de sensibilisation à travers les médias

Cette action s'inscrit dans la lignée de celles réalisées tous les ans par la Direction de l'Environnement, quand les ressources financières l'autorisent. Elle consiste à diffuser les messages de sensibilisation à l'environnement, à travers les canaux radio-télévisés. Les évaluations ont démontré la pertinence d'une telle approche par rapport aux objectifs de qualité de l'environnement.

- les campagnes de proximité

Ce sont des campagnes au cours desquelles les équipes de la Direction de l'environnement sillonnent les agglomérations urbaines et rurales à la rencontre des populations pour aborder les problèmes environnementaux les plus cruciaux de ces différentes localités. Ainsi, au moins une semaine par mois les équipes sont déployées pour les campagnes de proximité. À cet égard, les thèmes de sensibilisation sont variés parce que fonction des problèmes les plus aigus recensés dans les sites respectifs. 10 hommes pour les campagnes de sensibilisation sont prévus tous les ans.

Ce programme de sensibilisation se réalise selon les huit axes suivant :

- le renforcement des institutions et structures de recherche et la hiérarchisation des programmes thématiques ;
- le renforcement des institutions et centres chargés de la formation en matière d'environnement et des GES ;
- le renforcement des structures de formation et d'animation en faveur des femmes et des jeunes sur les GES ;
- le renforcement des capacités des ONG afin de permettre de remplir efficacement leur rôle d'encadrement et d'appui auprès des populations de base ;
- le développement des actions d'information et de sensibilisation des différentes régions administratives par l'utilisation appropriée des atouts socioculturels (langues locales, religions, etc.) et des médias ;
- la formation des agents et techniciens exerçant dans les installations classées pour une meilleure maîtrise des préoccupations environnementales au sein des entreprises.
- l'intégration de la dimension environnementale, notamment les changements climatiques dans les programmes des différents cycles d'enseignement (préscolaire, scolaire, secondaire, universitaire) ;
- une plus grande responsabilisation et une meilleure implication de tous les individus dans la lutte contre l'effet de serre pour la préservation de l'environnement.

La sensibilisation en milieu secondaire et universitaire est en cours.

L'Afrique de l'Ouest offre un environnement favorable à une approche de partage des coûts d'adaptation au changement climatique par la collaboration régionale. D'abord les pays de la région présentent des grandes similitudes du point de vue éco-géographique mais aussi du point de vue culturel et social (ethnies, langues). Ils font face à des enjeux de développement identiques et sont confrontés aux mêmes défis en ce qui concerne la variabilité et le changement climatiques. Il s'y ajoute que dans des secteurs tels que celui de l'eau, les pays de l'Afrique de l'Ouest sont si interdépendants que des stratégies cloisonnées de gestion des ressources partagées sont souvent contreproductives. Ensuite, du fait de leur faiblesse

économique, les pays de la sous-région ont souvent des difficultés à mobiliser de façon isolée les ressources dont ils ont besoin pour développer, mettre en valeur leurs ressources et se prémunir contre les risques climatiques. C'est dans cette optique qu'une stratégie régionale d'adaptation au changement climatique basée sur l'approche de partage des risques a été élaborée par les pays de l'Afrique de l'Ouest. Cette approche favorise le partage du fardeau de la conception et de la mise en œuvre des réponses appropriées pour éviter ou atténuer les impacts du changement climatique. Elle consiste donc à collaborer sur le plan international en particulier à l'échelle de pays contigus, de pays riverains d'un bassin fluvial, de pays appartenant à une organisation d'intégration régionale, dans la mise en œuvre de mesures d'adaptation au changement climatique. Les objectifs de cette approche de partage des risques sont variés :

- **Objectif 1.** Promouvoir la collaboration sous-régionale et régionale dans la mise en place et l'exploitation de bases de connaissances d'aide à la décision sur le changement climatique et ses impacts,
- **Objectif 2.** Promouvoir la collaboration sous-régionale et régionale dans le développement, l'exploitation durable de ressources naturelles et écosystèmes transfrontaliers.

En ce qui concerne les cours d'eau et aquifères transfrontaliers les actions suivantes sont envisageables :

- Appuyer et tirer avantage des efforts en cours dans le cadre du West Africa Power Pool (WAPP) à travers des actions spécifiques.
- Multiplier les exemples de projets transfrontaliers de lutte contre l'ensablement des cours d'eau en ciblant les fleuves Sénégal et Volta
- Promouvoir des programmes de développement intégré dans des sous-bassins transfrontaliers comme la zone frontalière Sénégal-Mali-Guinée autour du fleuve Sénégal ou la zone transfrontalière entre Niger et Bénin sur le fleuve Niger.
- Renforcer les capacités des organismes de bassins de la région (ABN, la CBLT, l'ABV, l'OMVG, l'OMVS) à prendre en charge le changement climatique
- Appuyer et accompagner les initiatives sur les eaux souterraines transfrontalières (composante Afrique de l'Ouest de l'Initiative UNESCO-ISARM) ou l'initiative de l'OSS sur le système aquifère de l'Iullemeden. Sur la base des résultats des recherches en cours dans le cadre de ces deux initiatives, il pourrait être envisagé d'aider à la création de cadres de concertation autour de certains des principaux aquifères transfrontaliers de la région.
- Aider au renforcement des mécanismes de prévention et gestion des conflits autour des eaux partagées par : (a) l'appui à la conception et à la mise en œuvre d'un programme de renforcement des capacités de prévention et de gestion des conflits de l'eau ciblant en particulier les organismes de bassin ; (b) un appui au processus GWP-UNESCO sur la promotion de la Convention Cadre des Nations Unies de 1997 sur l'Utilisation des cours d'eau transfrontaliers à des fins autres que la navigation.

Objectif 3. Identifier, promouvoir et diffuser des technologies, techniques et pratiques appropriées d'adaptation au changement climatique

Objectif 4. Mettre en place un cadre de concertation régionale sur le changement climatique et ses impacts

Cette démarche de partager des risques a également été mise en place afin de promouvoir les alliances transfrontalières qui pourraient être envisagées en vue de faciliter le développement et la mise en œuvre d'un cadre régional d'adaptation dans lequel les PANA pourraient être exécutés efficacement.

Contexte Socio-économique

Les inondations font partie des catastrophes naturelles les plus dévastatrices. Elles sont dues à une perturbation des régimes des cours d'eau et des régimes pluviométriques qui est provoquée par une perturbation du climat. Les pays en voie de développement ne disposent pas de moyens suffisants pour faire face à ce type de risque naturel par conséquent les dégâts engendrés sont plus énormes. Dans ce contexte, la prévention de ces risques naturels contribuerait à réduire considérablement les dégâts en cas d'occurrence. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude qui pour objectif d'évaluer le risque d'inondation dans le département de Sinfra au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, dans un souci de prévention. Les inondations correspondent à des aléas naturels susceptibles d'occasionner des pertes en vies humaines, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques et de dégradations de l'environnement. Parmi les catastrophes, les inondations sont les plus destructrices, particulièrement dans les régions à faibles et moyens revenus.

Contexte Hydrologique

Le département de Sinfra, est une zone dont l'activité économique principale est l'agriculture ainsi les habitations sont essentiellement situées aux abords des cours d'eaux. De surcroit le département de Sinfra présente un relief assez monotone et donc très peu contraste comme avec une altitude variant entre 200 et 300 m. Le département est également situé à l'intersection de deux grands systèmes hydrologiques, le bassin versant du fleuve Sassandra celui du fleuve Bandama qui parcourt tout le pays du Sud au Nord comme le montre la figure 4.

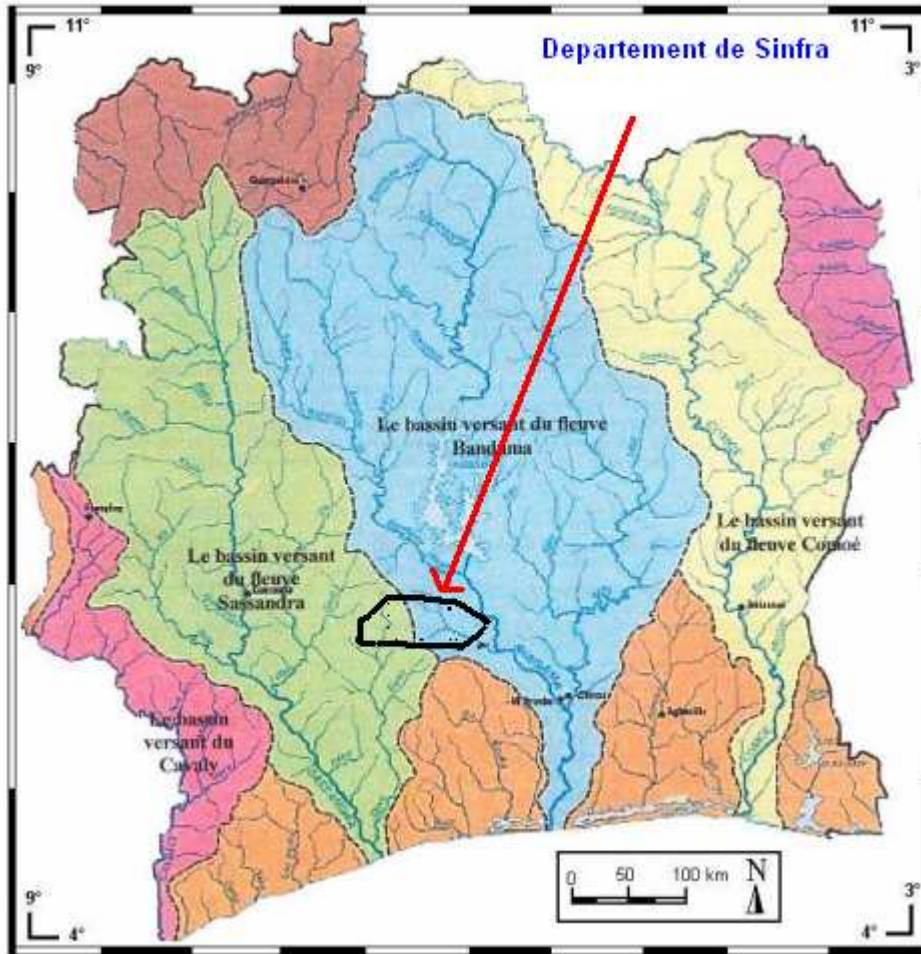


Figure 4 - Réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire (Atlas 1978)

En outre le chef-lieu du département, la ville de Sinfra est situé sur la ligne de partage des eaux entre deux cours d'eau principaux et permanents Tene au centre et Houba à l'Ouest comme le montre le réseau hydrographique du département (figure 5).

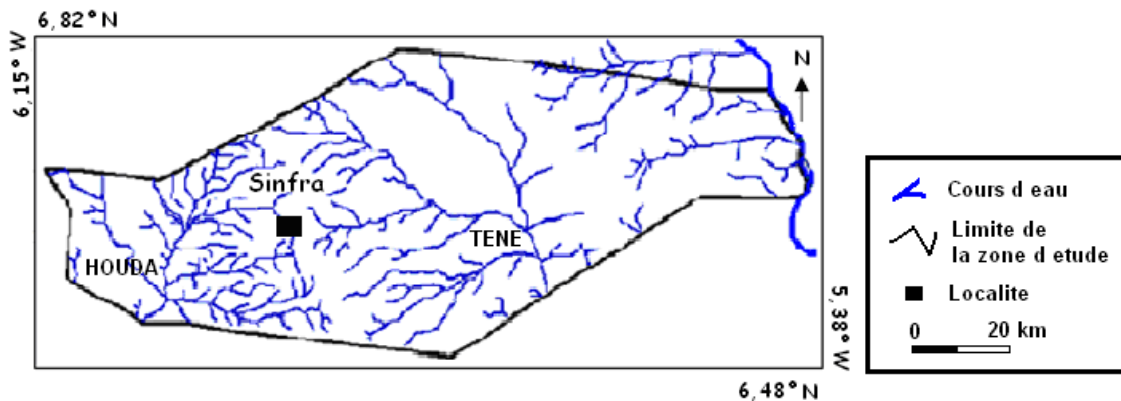


Figure 5 - Réseau hydrographique du département de Sinfra extraite des cartes topographiques des degrés carré de Gagnoa et Daloa

Contexte morphologique

La ville de Sinfra est également située dans une plaine comme le montre la carte du relief ombre de la figure 6 suivante :

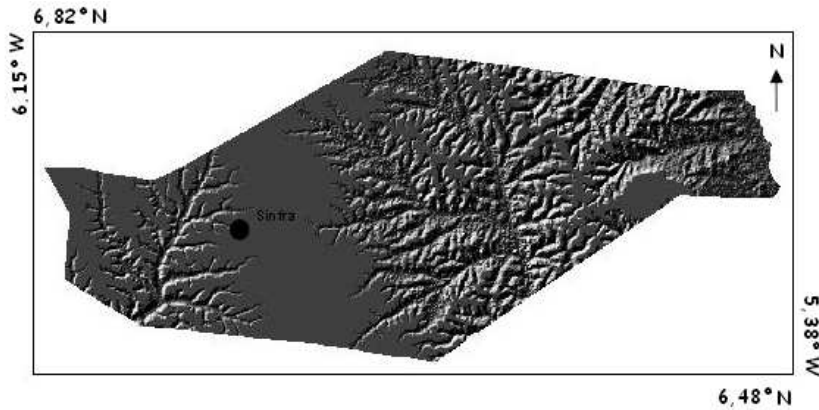


Figure 6 - Carte du relief ombre dérivé du Modèle Numérique de Terrain (MNT) du département de Sinfra

Contexte Hydroclimatique

Par ailleurs l'agressivité du climat du fait des changements climatiques révèle une diminution du nombre de jours de pluie ces dernières années (Figure 7), marquée par un retour des précipitations depuis 1994 (figure 8). Cette tendance pluviométrique à la hausse a également été constatée dans plusieurs localités du pays depuis 1994 (Kouame, 1999; Saley, 2003) occasionnant des cas d'inondation. Ainsi les tendances pluviométriques actuelles dénotent l'occurrence de pluies de plus en plus brusques et intenses qui ont déjà provoqué dans plusieurs localités en Côte d'Ivoire et dans la sous-région des cas d'inondations notamment à Abidjan, à Ouagadougou et à Dakar.

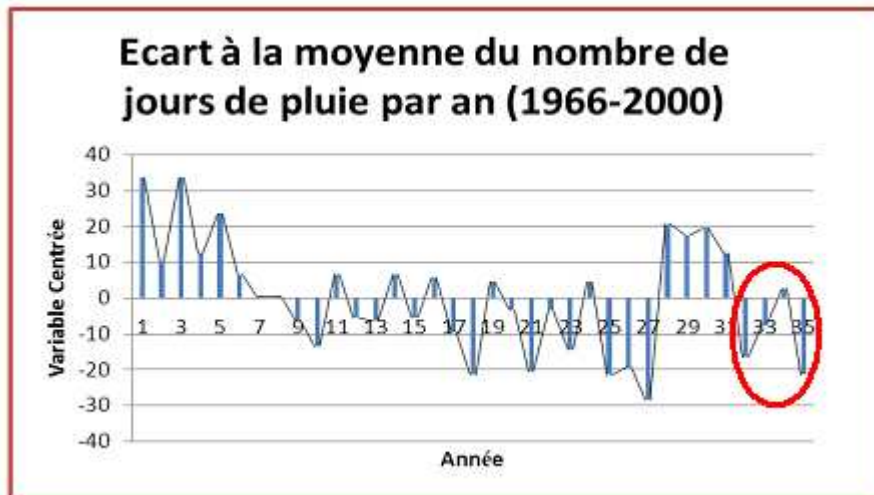


Figure 7- Nombre de jours de pluies par année dans le département de Sinfra de 1966 à 2000

Les numéros en abscisse indiquent les années. L'année 1966 a pour indice 1, l'année 1967, pour indice 2 jusqu'à l'année 2000 qui a pour indice 35. L'étude s'étend donc sur 35 années. L'encadré rouge met en évidence une période qui s'étend de 1996 à 2000. Cette période est caractérisée par une diminution du nombre de jours de pluie.

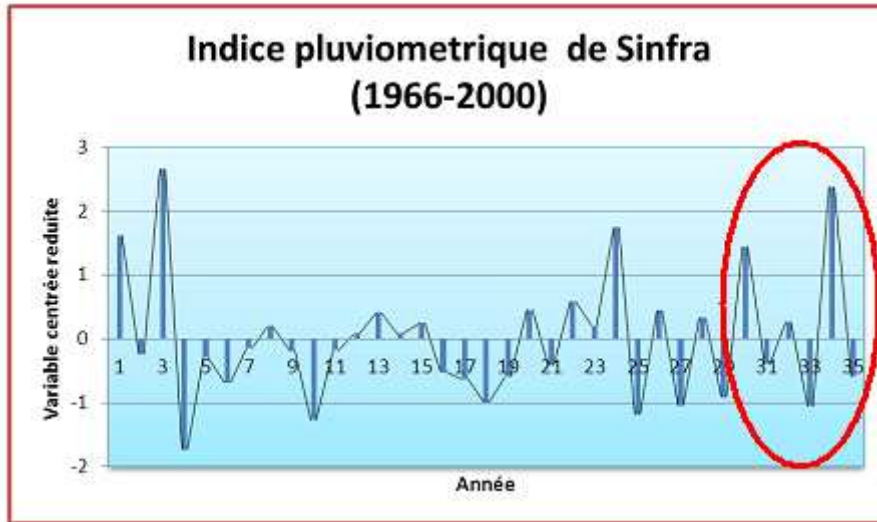


Figure 8 - Indice pluviométrique dans le département de Sinfra

L'encadré rouge met en évidence la même période qui révèle à ce niveau une hausse des hauteurs de pluies.

Ainsi la fin de la dernière décennie est marquée par une augmentation des hauteurs de pluie et une diminution des jours de pluies. Cela marque l'apparition de pluies brusques et de plus en plus intenses pouvant provoquer des inondations.

Et comme l'indique la carte du relief ombré, figure ci-dessous, la ville de Sinfra est située dans une plaine.

4. Plan national d'adaptation/atténuation - changements climatiques en Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire plusieurs initiatives conformes aux exigences de l'Agenda-21 ont été concrétisées à travers la réalisation d'actions parmi lesquelles :

- le Plan National d'Action Environnemental (PNAE),
- le Plan Directeur de Développement Agricole (PDDA),
- la stratégie de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE),
- la nouvelle politique forestière,
- le livre blanc du littoral,
- le Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté (DSRP).

La ratification de la Convention Cadre sur le changement climatique le 14 novembre 1994 par la Côte d'Ivoire justifie l'engagement pris par le pays à participer de manière significative à la lutte contre les changements climatiques. Cet engagement s'est manifesté par l'élaboration du Plan National d'Action Environnementale (PNAE), pour la réalisation de projets relatifs aux changements climatiques et la mise en place de structure à caractère environnemental. Le PNAE a été mis en place sous l'initiative du gouvernement Ivoirien et l'aide de bailleurs de fonds extérieurs. Ce code de l'Environnement a été et voté par l'Assemblée Nationale depuis 1997.

Les principaux objectifs de ce plan s'articulent autour des points suivants :

- Rechercher une cohérence de la politique de développement économique et social des actions de protection et de valorisation de l'Environnement selon une approche intégrée participative ;
- Recourir à la société civile pour qu'elle identifie des stratégies adéquates afin de garantir son implication à la mise en œuvre des politiques élaborées entreprendre ;
- Saisir l'opportunité de la proximité des bailleurs de fonds pour mettre en évidence des projets d'investissement fiables et viables. Ce plan a permis dans le cadre de la lutte contre changements climatiques l'élaboration d'un programme de sensibilisation de la femme à l'utilisation et à la formation aux techniques de construction des foyers améliorés.

En d'autres termes, les objectifs du PNAE sont les suivants :

1. Promouvoir une stratégie de développement durable et gérer de manière rationnelle les ressources naturelles ;
2. Protéger « la biodiversité » ;
3. Améliorer le cadre de vie.

Pour atteindre ces objectifs généraux, le Gouvernement ivoirien a prévu de les soutenir à l'aide des cinq piliers suivants :

- 1- Le renforcement du cadre institutionnel ;
- 2- Le renforcement de la réglementation ;
- 3- Le développement des ressources humaines et de la recherche
- 4- La mise en place d'un système national d'information et de suivi de l'environnement ;
- 5- L'implication effective de la société civile (sensibilisation/participation)

Le gouvernement ivoirien dans l'application du plan d'action accorde une place importante aux ONG à travers le dernier pilier (pilier 5) de ce programme. Ainsi les ONG jouent le rôle de sensibilisation et prennent également une part active quant à l'application sur le terrain des mesures prises dans le cadre du plan d'action. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude qui a pour objectif d'information et de sensibilisation quant au risque d'occurrence de catastrophe naturelle dans une zone importante du pays car étant l'ancienne boucle du cacao.

L'application du PNAE devrait permettre dans les années à venir de valoriser les ressources naturelles, renforcer les pratiques culturelles favorables à la conservation des milieux naturels (forêts, rivières). Ces dispositions favoriseraient une stratégie de développement durable et conduiraient à gestion de manière rationnelle les ressources naturelles. Le PNAE prévoit également la création d'un cadre cohérent qui crée les bases légales et institutionnelles pour une multitude d'interventions sectorielles.

Pour une application effective du PNAE le gouvernement Ivoirien a créé l'Agence Nationale de l'Environnement (ANDE) pour:

- .-Assurer la coordination de l'exécution des projets de développement à caractère environnemental
- Effectuer le suivi des projets du PNAE
- Evaluer les projets du PNAE
- Mettre en place et gérer un système national d'information environnemental et,
- Mettre en œuvre les conventions internationales dans le domaine de l'environnement.

Notre projet vise à mettre en place un système d'informations environnemental précisément un Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS) qui indique le risque d'inondation d'une zone située au centre-Ouest du pays. Notre travail s'inscrit donc parfaitement dans le cadre de l'une des missions de l'ANDE.

Dans le cas général, les PANA identifient les activités prioritaires à mettre en œuvre pour répondre aux besoins immédiats et urgents d'adaptation au changement climatique. Les mesures visées dans les PANA concernent celles qui consistent à renforcer le niveau d'adaptation à la variabilité actuelle du climat, ce qui par voie de conséquence permet de faire face aux premiers impacts du changement climatique.

Depuis la tenue de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement en 1972 à Stockholm, Conférence qui a donné naissance au Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), on observe une prise de conscience accrue de ce que la protection de l'environnement est un facteur important de la vie économique et sociale de notre planète.

Une étude sur le changement climatique a été menée en 1994 dans le cadre du programme US Country Studies. Cette étude visait essentiellement à améliorer les capacités de la Côte d'Ivoire à faire l'inventaire des gaz à effet de serre, à étudier l'état de vulnérabilité au changement climatique, à identifier les mesures correctives nécessaires et à proposer des actions pour atténuer les effets de ce changement Ceci s'est traduit par :

- la formation des personnes impliquées dans le projet aux techniques d'inventaire et d'évaluation des effets des changements climatiques, d'où le renforcement des capacités en ressources humaines ;
- la mise en place d'une banque et base de données sur les gaz à effet de serre ;

- l'incorporation d'un plan préparé dans le cadre de ce projet au Plan National d'Action pour l'Environnement (PNAE).

Consciente qu'elle ne peut parvenir à un développement durable sans une politique de limitation effective des effets des changements climatiques, la Côte d'Ivoire a ratifié la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Le Gouvernement a entrepris plusieurs actions aux plans institutionnel et juridique et au travers de programmes visant à mettre en œuvre des options d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

Très préoccupé par les problèmes environnementaux, le gouvernement ivoirien a choisi dès 1986 la voie de la maîtrise de l'énergie par l'exploitation de gisements d'économies en consommation d'énergie dans tous les secteurs à travers le renforcement des programmes en cours, notamment par des opérations d'amélioration des performances de la carbonisation, de la cuisson avec des biomasses, de la recherche développement en matière de bio-combustibles et de bio - énergies comme en matière d'économie d'énergie dans les bâtiments et l'éclairage public, dans le secteur des transports, de l'agriculture, celui de la commercialisation, des services, des industries et au plan domestique.

Plusieurs mesures d'adaptation ont été prises par le gouvernement ivoirien concernant les changements climatiques. En Côte d'Ivoire, la ressource d'énergie la plus utilisée demeure la biomasse dans ses différentes composantes. Représentant plus de 70% des besoins énergétiques nationaux, elle est la source d'émission de gaz à effet de serre la plus importante. Les efforts des pouvoirs publics pour vulgariser le butane à grande échelle dans les dix prochaines années pourraient inverser cette tendance et par là même contribuer à une meilleure maîtrise de la réduction des gaz à effet de serre. Le programme de maîtrise de l'énergie lancé dès 1986 comporte une série d'actions qui visent la réduction des consommations de combustibles fossiles par la recherche d'une efficacité énergétique accrue dans tous les secteurs d'activité :

-éclairage public (programme de remplacement des lampes classiques par des lampes à sodium HP et amélioration du rendement des réseaux électriques) ;

Industries (voir ci-dessus) ;

-ménages (recours au butane, amélioration des rendements de carbonisation ; foyers améliorés au bois et au charbon de bois, incitation au recours au solaire thermique pour les besoins en eau chaude sanitaire, éclairage domestique amélioré par le choix d'ampoules économes, de plans architecturaux et de normes d'habitat soucieuses de l'environnement, compteurs électriques à prépaiement) ;

-locaux à usage de bureaux, de résidences ou à usage artisanal, par l'amélioration de l'efficacité énergétique et le recours à des fluides caloporteurs non dommageables pour l'environnement ;

-transport (compteurs de vitesse et limiteurs, amélioration des rendements des moteurs, éducation - sensibilisation des conducteurs, contrôle de la vétusté du parc automobile, etc.) ;

- agriculture (amélioration des rendements, des variétés et des techniques culturales, gestion efficace des Terroirs, etc.) ;

Enfin, le programme de reboisement à grande échelle et les programmes de recours aux énergies renouvelables sur le moyen terme (hydro et solaire notamment) vont influencer de manière certaine les émissions futures en dopant le stockage de carbone sur l'ensemble du territoire national.

Des programmes de développement du recours aux énergies renouvelables telles que le solaire et la biomasse résiduelle ont été réalisés ou sont en cours : ils visent à pérenniser le recours à des sources d'énergie qui préservent l'environnement au bénéfice de la santé

durable des citoyens. Ces mesures encouragent également l'introduction de nouveaux types de fourneaux économes pour la cuisson, de fours et procédés économiques de carbonisation, l'introduction à terme des piles à combustible utilisant des gaz pauvres ou de pouvoir calorifique moyen issus de biomasses, et le développement de la biodigestion dans les zones rurales.

Un certain nombre d'options d'atténuation ont été mis en évidence dans le cadre de cette étude dans les secteurs de l'industrie, de la forêt, de l'énergie et de l'agriculture.

Les options d'atténuation dans le secteur de l'industrie concernent essentiellement :

- l'introduction des audits énergétiques dans l'industrie et des opérations (avec mesures incitatives et répressives) de maîtrise de l'énergie ;
- la valorisation énergétique des biomasses des agro-industries et le développement de systèmes en co-génération : un potentiel de 55 MW avait été identifié dès 1993, qu'il faudra réévaluer ;
- l'introduction des carburants issus de biomasses dans l'industrie et dans le transport ;
- l'amélioration des rendements de chaudières et des moteurs.

Pour la foresterie, il s'agira de :

- la reforestation : Elle porte sur la création de nouvelles plantations, l'enrichissement de la forêt et la reconstitution des plantations anciennes. Ainsi à partir du modèle COMAP en conformité avec le plan directeur forestier il sera possible d'atteindre 20% de couverture forestière en 2015, la superficie à re-coloniser serait de 1 800 000 ha ;
- la protection des forêts résiduelles: Les données de bases utilisées pour cette option d'atténuation montre qu'avec des actions efficaces de protection on arrivera à protéger à l'horizon 2034, environ 2,5 millions d'ha de toutes dégradations anthropiques ;
- la régénération naturelle des forêts dégradées : Elle se fait par l'aménagement des massifs dégradés, sur cette base, environ 1 200 000 ha soit 30% des forêts classées seraient concernées. A ce rythme, on estime que les formations forestières visées seraient de 10 000 ha / an sur l'horizon 1994-2015.
- le développement des ceintures vertes autour d'Abidjan, de Bouaké et des principales villes de la Côte d'Ivoire.

Il faudrait procéder à la substitution du gaz naturel au fuel des centrales de puissance, au recours aux ressources hydroélectriques (barrage de Soubré par exemple et mini-centrales hydroélectriques), enfin il conviendra de recourir à la pré-électrification par énergie photovoltaïque. Au niveau de la demande, on insistera sur l'introduction des techniques de maîtrise de l'énergie dans tous les domaines concernés, avec la création de l'Agence Ivoirienne de Maîtrise de l'Énergie qui doit voir bientôt le jour. Les programmes seront harmonisés pour adhérer aux contraintes environnementales et à celles du Plan de Développement de l'économie ivoirienne.

La stratégie de réduction des émissions de GES dans le secteur de l'agriculture doit être soutenue par une politique d'innovation technique dans tous les sous-secteurs agricoles.

Cette politique doit s'accompagner de mesures coercitives pour lutter contre la déforestation, le brûlis, au niveau des activités agricoles et surtout toutes formes de feu de brousse, générateurs de monoxyde de carbone.

Les innovations techniques doivent venir en alternative de l'actuel système de production basé sur l'agriculture itinérante sur brûlis. Les paysans qui en seront les bénéficiaires devront y adhérer et prendre une part très active dans leur mise en œuvre.

Les innovations à proposer devront par exemple viser au renforcement simultané de la fertilité des sols et de leur capacité à stocker le carbone. La conservation et la valorisation des produits agricoles seront également une priorité.

Au terme de l'application graduelle de ces différentes mesures, l'on pourra espérer une réduction annuelle de l'ordre de 10% du volume de gaz actuellement rejeté dans l'atmosphère.

5. Méthodologie

5-1 Matériel

Les données de notre étude proviennent de la direction de l'hydraulique, de l'Institut National de la Statistique, du Bureau National d'Etude et de Technique de Développement et de la SODEXAM qui sont des structures étatiques. Plusieurs types de données ont été nécessaires vu le caractère assez varié de cette étude. Des cartes topographiques des degrés carrés de Daloa et de Gagnoa au 1/ 200 000 provenant du Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT). Les images satellitaires utilisées proviennent des capteurs Thematic Mapper (TM) et Enhanced Thematic Mapper (ETM+) des satellites Landsat-5 et Landsat-7. Ces images datent respectivement de 16 Janvier 1986 et 20 Janvier 2003, de la Scène 197-055. Elles ont été enregistrées en période sèche, donc en l'absence de couverture nuageuse ce qui leur confère ainsi un niveau radiométrie satisfaisant facilitant ainsi les différents traitements. Des séries chronologiques des hauteurs de pluies journalières, mensuelles et annuelles de 1966 à 2000 ont fourni les informations nécessaires à l'analyse et à la prévision du champ de précipitations.

5-2 Méthodes

Les données utilisées provenant de plusieurs sources, divers types de traitements ont été nécessaires ce qui implique l'utilisation de plusieurs logiciels. La numérisation du réseau hydrographique a été réalisée avec le logiciel Mapinfo Professionnel 7.5 ainsi que l'extraction des informations contenues dans les cartes topographiques. Envi 4.5 et Idrisi Andes (15) ont servi pour le prétraitement et le traitement des images satellitaires, Arcgis 9.3, et Idrisi Andes (15), pour l'analyse multicritère. Le logiciel Arcgis 9.3 a également servi à l'analyse géostatistique des données et pour le traitement statistique des données, le logiciel Matlab a été nécessaire.

Il a été procédé d'abord à un contrôle et une analyse de ces données ensuite au traitement des données qui s'est fait essentiellement par une modélisation suivie d'une confrontation des résultats avec les réalités terrain. Deux méthodes de contrôle et d'analyse des données ont été utilisées ici : l'analyse en composante principale (ACP) et la méthode géostatistique. L'ACP pour les données continues et la géostatistique pour les données discrètes. Ainsi le comblement des lacunes contenues dans les séries chronologiques de pluie a été réalisé par la méthode géostatistique. Cette méthode est également retenue pour la reconstitution de la base des données hydroclimatiques. L'approche géostatistique est considérée comme la meilleure méthode linéaire d'estimation des données car elle tient compte de la structure spatiale des données. Plusieurs types de données ont été nécessaires vu le caractère assez varié de cette étude. Des cartes topographiques des degrés carrés de Daloa et de Gagnoa au 1/ 200 000 provenant du Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT) ont servi à l'extraction du réseau hydrographique. Le traitement des images satellitaires Landsat TM de 1986 et ETM+ 2003 ont permis de déterminer le réseau de fracture. L'exploitation de ce réseau de fracture et des fiches techniques de forages réalisés dans la zone d'étude a conduit à

la mise en place d'un SIG pour la détermination des zones d'accumulation des eaux souterraines. Des séries chronologiques de hauteurs de pluies journalières, mensuelles et annuelles de 1966 à 2000 ont fourni les informations nécessaires à l'analyse et à la prévision du champ de précipitations. Les données utilisées provenant de plusieurs sources, divers types de traitements ont été nécessaires ce qui implique l'utilisation de plusieurs logiciels. La numérisation du réseau hydrographique a été réalisée avec le logiciel Mapinfo Professionnel 7.5 ainsi que l'extraction des informations contenues dans les cartes topographiques. Envi 4.5 et Idrisi Andes (15) ont servi pour le prétraitement et le traitement des images satellitaires, Arcgis 9.3, et Idrisi Andes (15), pour l'analyse multicritère. Le logiciel Arcgis 9.3 a également servi à l'analyse géostatistique des données et pour le traitement statistique des données, le logiciel Matlab a été nécessaire.

5-2-1 Méthode de détermination du risque d'inondation par débordement des cours d'eau

Pour l'évaluation du risque d'inondation par débordement des cours d'eau les variables définies sont les suivantes : la densité de drainage, la lithologie, le domaine structural, le drainage souterrain, la pente, la perméabilité induite par le réseau de fracture, le type d'occupation du sol, et l'intensité pluviométrique. Les cartes topographiques au 1/200 ont été numérisées et actualisées par nos soins avant d'être utilisées pour extraire le réseau hydrographique qui a permis par la suite par un maillage régulier de 5kmx5km d'obtenir la densité de drainage. Le modèle numérique de terrain (MNT) échantillonné a été 30 m pour une conformité de résolution spatiale et d'échelle avec les images satellitaires utilisées. Aux produits dérivés du MNT à savoir la carte des pentes et celle de l'orientation des pentes, un effet combine de l'éclairage azimutal et oblique a été appliqué pour obtenir la carte des reliefs ombre. Les images Landsat TM et ETM+ (197-057) datant de 1986 et à 2003 ont été corrigées géométriquement ensuite les applications suivantes ont été nécessaires à savoir les combinaisons des bandes, le filtrage les compositions colorées et l'ACP. Cela a permis d'extraire le réseau de fracture qui a ensuite été valide par la carte photo géologique et les données de terrain. Les étapes de la démarche qui a abouti à la détermination du réseau de fractures sont données par la figure (Figure 9) :

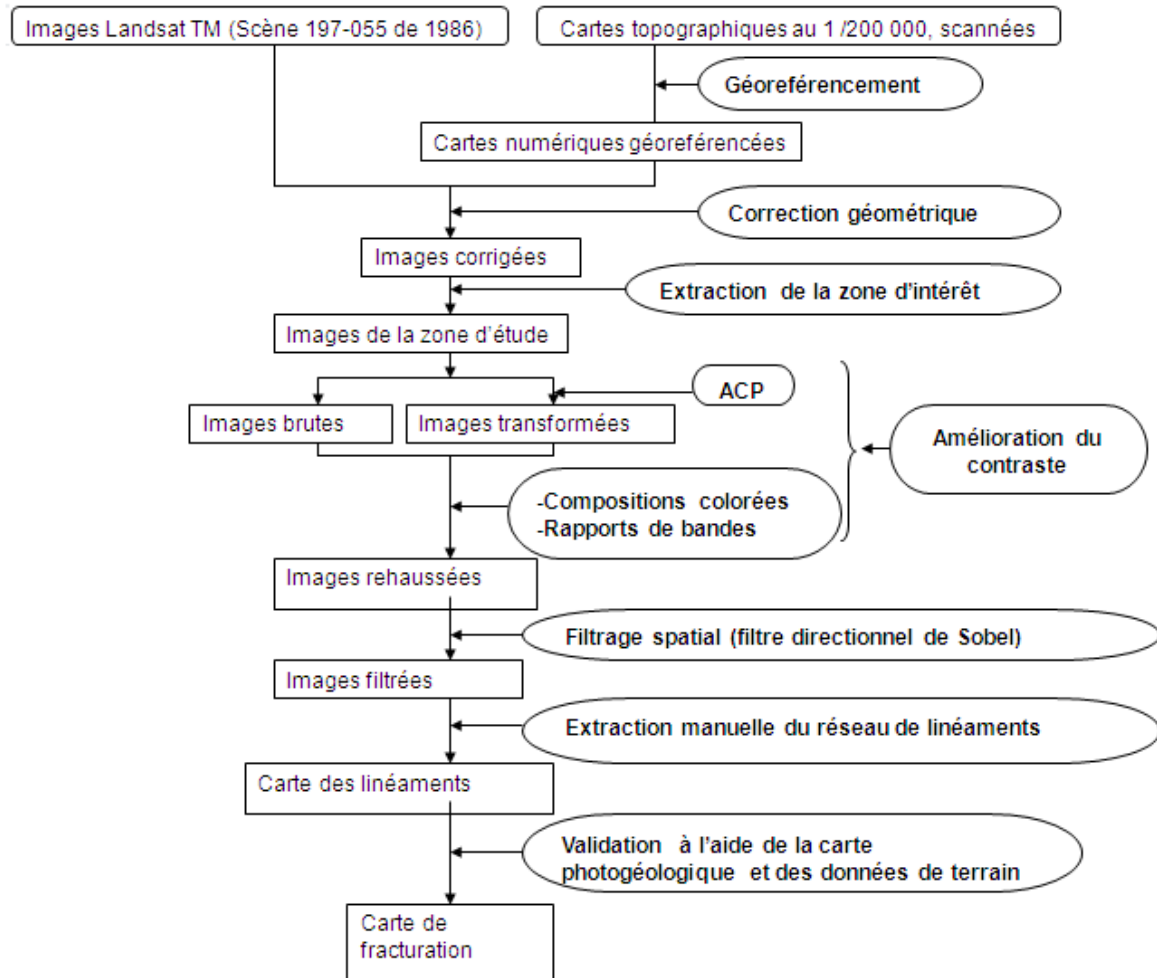


Figure 9-Organigramme d'élaboration de la carte de fracturation

L'application d'un maillage 5kmx5km, a permis de produire la carte de densité de fracturation et avec la méthode de Franciss elle a permis de produire la carte des perméabilités induites par le réseau de fractures. Une classification supervisée par les champs de Markov cachés a été appliquée aux images Landsat TM et ETM+, pour générer les cartes d'occupation du sol. Le traitement des données chronologiques de pluies de 1967 à 2000 ad une cinquantaine de stations météorologiques dans la région de Sinfra a conduit à l'élaboration de la carte d'intensité pluviométrique. Le traitement des cartes géologiques et photogéologiques appuyé de données de terrain a permis d'élaborer la carte lithologique. La modélisation a suivi l'approche d'un modèle doublement probabiliste basé sur des concepts mathématiques robustes : les Chaînes et les champs de Markov. Toutes ces variables ainsi obtenues qui représentent des critères ont été combinées par codification à travers un SIG pour générer la carte du risque d'inondation par débordement. Les carte de la densité de fracturation a été combine d'une part avec celle de la densité de drainage pour donner la carte de drainage souterrain et d'autre part avec celle du relief ombre pour donner la carte des domaines structuraux. Ces deux cartes thématiques intermédiaires ainsi obtenues sont croisées avec les cartes lithologique, de densité de drainage, des pentes et des perméabilités induites pour donner la carte du de vulnérabilité à l'inondation par débordement. La combinaison des cartes d'intensités pluviométrique et d'occupations du sol permettent d'apprécier l'aléa.

Pour obtenir la carte du risque d'inondations à l'inondation par débordement recherchée, la combinaison par codification des cartes de vulnérabilité et de l'aléa a été nécessaire. Les principales étapes de la détermination du risque d'inondation par débordement des cours d'eau sont résumées dans l'organigramme de la figure 10.

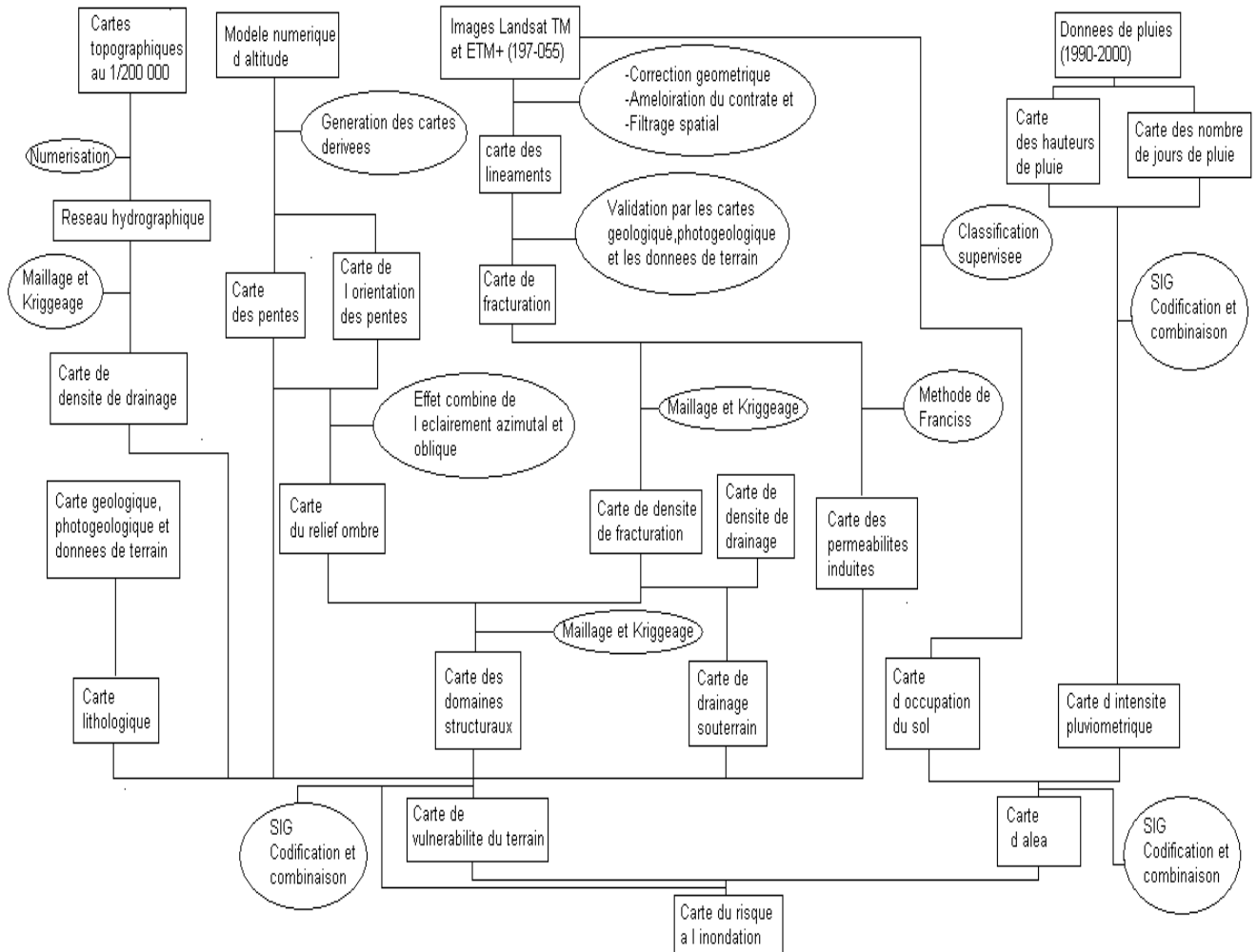


Figure 10-Organigramme d'évaluation du risque d'inondation par débordement des cours d'eau

6-2-2 Méthode de détermination du risque d'inondation par remontée de la nappe

Pour évaluer le risque d'inondations par la remontée de la nappe les variables suivantes ont été définies : la lithologie, la densité de drainage, les pentes, l'accessibilité des nappes, le mode d'occupation du sol, et l'intensité pluviométrique. Le critère accessibilité des nappes résulte de la combinaison par codification des sous-critères relief ombré et potentialité en eau souterraine qui, nécessite une validation comme tout modèle. Elle doit donc être testée afin d'être validée.

6.2.2.1 Validation de la carte des potentialités en eau souterraine

Il s'agit de réaliser la superposition de la carte des débits avec celle des potentialités en eau souterraine. L'on calcule alors pour chaque classe du critère d'évaluation, le pourcentage par rapport au total. L'on établit alors pour chaque classe de sensibilité (carte thématique) une courbe de tendance de sensibilité par rapport à chaque classe du critère d'évaluation dont l'allure est donnée par la figure ci-dessous (Jourda, 2005).

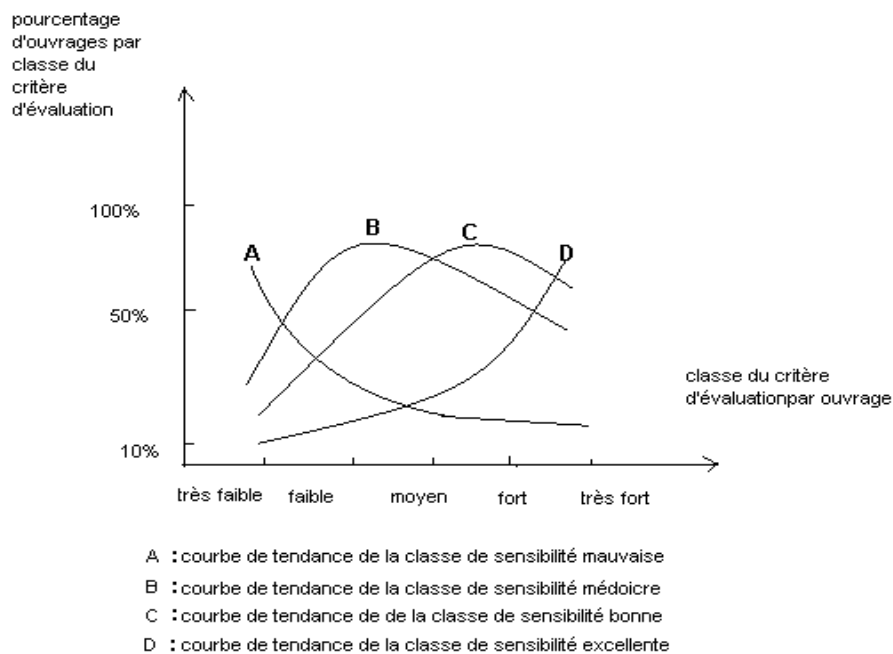


Figure 11 - Graphe des courbes de tendance des classes de sensibilité des cartes thématiques (cas général) , (Jourda, 2005)

Les principales étapes de l'élaboration de la carte des potentialités en eaux souterraines sont résumées par la figure 12 suivante :

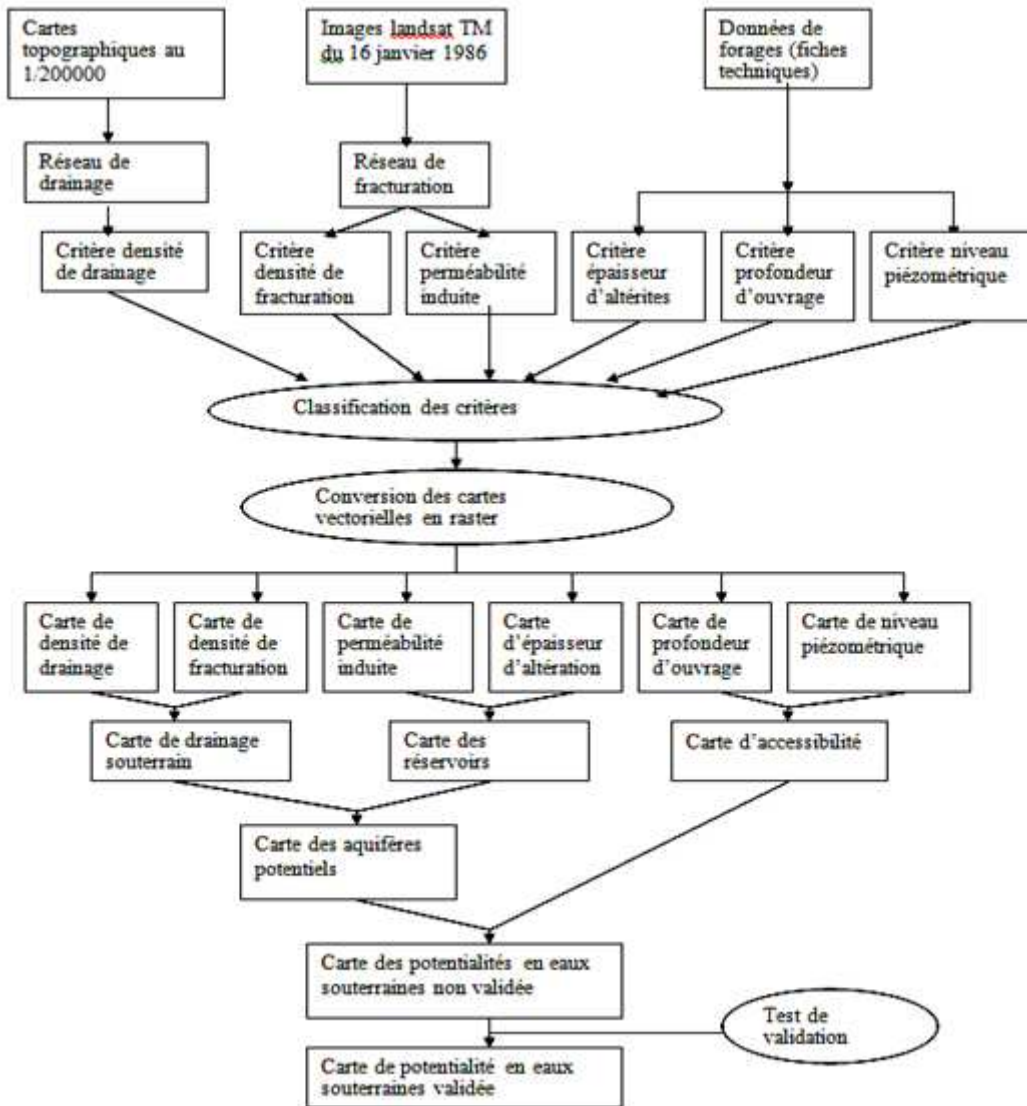


Figure 12 -Organigramme d'élaboration de la carte des potentialités en eau souterraine

La carte des potentialités en eau souterraine a été croisée avec celle du relief ombre pour donner la carte d'accessibilités des nappes. Cette carte révèle le niveau d'accessibilité des nappes. Cette carte thématique intermédiaire ensuite combinée avec le cartes lithologiques, de densité de drainage, et des pentes pour donner la carte de vulnérabilité à l'inondation par remontée de la nappe qui est croisée avec la carte d'aléas pour produire la carte du risque d'inondation par remontée de la nappe. Les grandes étapes de l'évaluation du risque d'inondation par remontée de la nappe sont résumées par la figure 13 suivante :

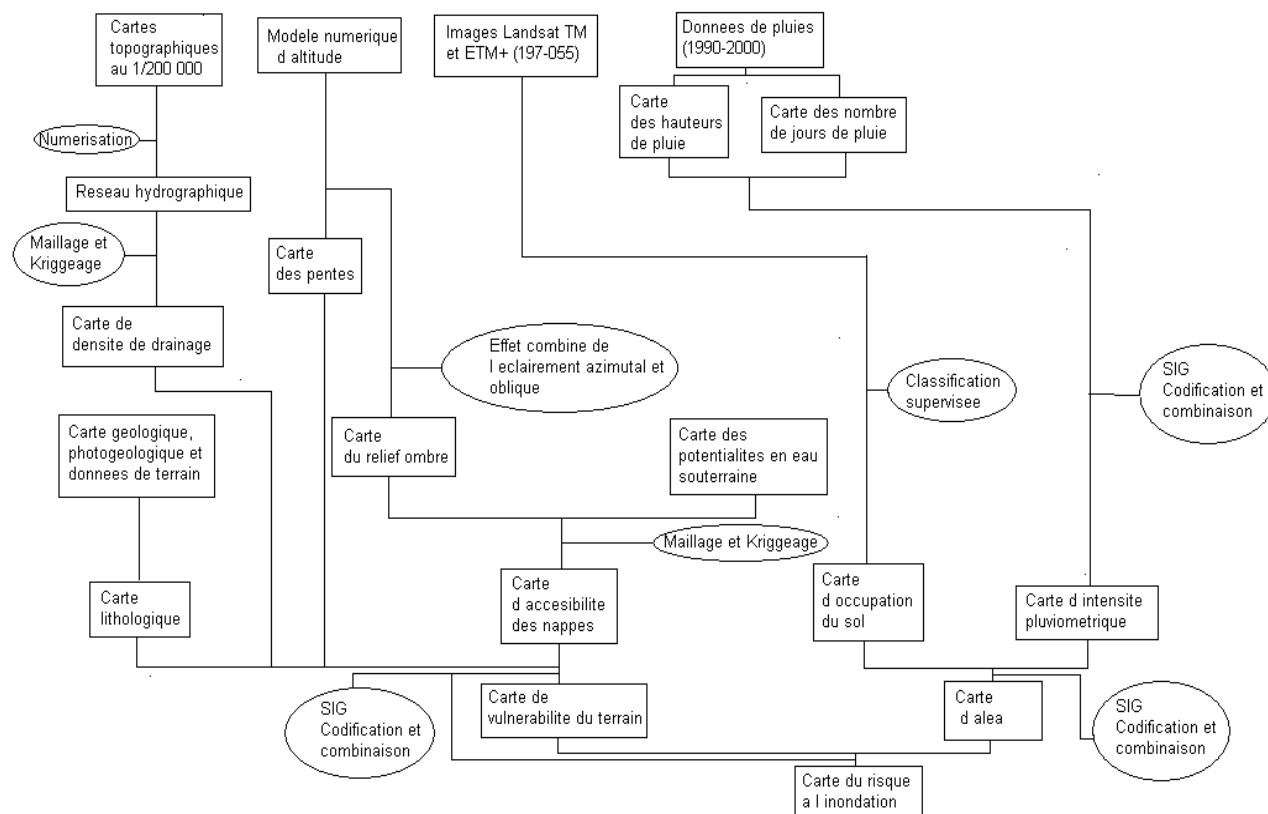


Figure 13 - Grandes étapes de l'évaluation du risque d'inondation par remonte de la nappe

Ces cartes du risque d'inondation de plaine, outils d'aide à la décision ainsi obtenues contribueront à l'élaboration des stratégies d'atténuation et d'adaptation des populations au aux risques naturels dus aux effets des changements climatiques.

6. Résultats

6-1 Reconstitution de la base de données

Le traitement des bases de données hydroclimatiques par la méthode géostatistique a permis de combler les lacunes comme le montrent les cases coloriées en bleu dans le tableau suivant. Ainsi reconstituée cette base de données Elle permettra de réaliser tous travaux de recherche concernant les ressources en eau dans le département de Sinfra.

Tableau I : Résultat du comblement des lacunes des données pluviométriques du département de Sinfra datant de 1966 à 2000

	Hauteur de pluie											
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1966	0	108.6	127.9	156.2	184.5	296	134.2	103.3	211	188.4	71.4	46.8
1967	0	40	249.5	64.7	228.3	219.7	31.6	56.4	191	30.2	48.5	61.9
1968	5	56.5	95.7	201.6	205.9	285	222.2	274.6	180.9	138.2	95.3	92.4
1969	0	37.3	57	74.6	103.2	146.5	22.9	53.4	52.5	199.6	143.2	5
1970	12	10	159.5	109.9	289.6	130.1	17.4	41.5	233.7	156.8	36.8	11
1971	13.5	114.3	273.9	94.8	98.1	103.9	75.7	75.2	161.5	79	31.1	4.1
1972	56.2	72.8	126.4	142.8	194.1	226.8	81.9	5.3	134.1	141.9	31.5	27.2
1973	0	52.8	111.1	134.5	112.4	134.9	25.3	273.6	232.1	114.3	75.8	49.8
1974	25.6	42.6	133.2	185.7	56.5	162.4	38.5	283.1	99.7	164.9	29.2	11
1975	0	58.1	68.9	110.4	109.8	136.3	118.8	74.8	216.6	62.7	36.4	3.7
1976	18	70.8	104.8	219.7	252.5	192.2	37.2	85	37.5	115.1	100.4	1.2
1977	2.5	16.1	190	106.7	203	138	35.6	149.6	242.9	185.3	12.3	9.5
1978	10	116	160.8	270	138.2	157.3	32.7	3	270.6	88.3	34.2	88.4
1979	52.9	54.3	98.8	159.1	182.4	226.5	117.6	41.9	179.9	108.6	45.8	23.3
1980	53.7	71.1	152.9	70.8	178.4	45.5	194.4	173.8	196.9	111.6	71.1	8
1981	22	82.9	148	206.5	81.5	109.8	131.1	76.8	139.8	143.7	35.4	2.4
1982	0	86.9	131.3	92.5	215.4	233.7	60.2	38	21.9	154.5	73.5	28.2
1983	0	25.9	45.8	143.6	173.8	232.6	25.1	17.1	241.5	37	70	44
1984	15.5	39.4	138.6	111.6	215.9	183.3	78.8	140.7	95.3	109.7	12.6	2.3
1985	13.7	40.6	152.7	216	161	156.3	76.5	253.3	176.1	67.9	30.4	28.4
1986	0	62.8	123	182.7	234	48.4	81.2	170.7	208.8	71.2	0.8	0
1987	84.4	133.9	133	59.4	248.3	85.1	29.1	231	276	90.3	10.3	20.4
1988	0	28.7	123.2	204.9	160	171.2	72.5	153.8	237.8	92.5	67.4	6.6
1989	0	5.2	193.1	168.8	68.1	316.1	249.4	178	319	108.9	2.2	45.7
1990	9.3	34.1	0	199.9	97.3	112.9	8.2	162.1	62.5	174.1	101.5	52.8
1991	0	50.3	145.4	227.1	206	33.9	205.3	123.9	114.7	104.6	121.6	38.5
1992	0	28.2	112	181.7	184.4	96	43.3	4.7	247.5	93.1	48.9	6
1993	12.1	71.5	245	109.8	192.4	115.5	35.6	8.8	190.2	224.5	138.5	0.9
1994	0	40.2	49.3	140.6	103.3	115.1	99.7	63.7	159.3	243.2	59.3	0
1995	0	48.1	220.1	213.4	143.5	231.4	61	174.7	317.8	93.5	30	54.3
1996	0	24.9	84.7	197.4	203.9	171.5	177.8	104.9	46	112.4	39.9	23.8
1997	36.8	1.1	98.1	171	182	246.4	63.4	85.5	71.1	316.1	30	30.5
1998	7.4	2.9	74.9	150.7	99.1	222.4	66.4	28.7	155	122.4	95.7	18.5
1999	6.2	189.4	170.2	58.9	203.2	410	116.5	95	212.5	168.5	161.6	0
2000	62.6	0	32.2	81.4	181.9	234	79.3	157.6	146.6	114.5	78.7	10.3

6.2 Analyse du champ de précipitation

6.2.1 Analyse de la période d'étude

Les graphes de l'indice pluviométrique de la figure 14 et de l'écart à la moyenne du nombre de jours annuels de pluie de la figure 14 révèlent trois grandes phases de la période d'étude :

- **La première phase: la phase humide**, elle moins longue et s'étend sur 6 ans, de 1966 à 1971. Elle caractérisée par des pluies annuelles avec un excédent.
- **La deuxième phase : la phase normale**, elle est plus longue et dure 18 ans, de 1972 à 1989. Elle est caractérisée par une alternance d'années faiblement déficitaires et faiblement excédentaires.
- **La troisième phase :** elle dure 11 ans et s'étend de 1990 à 2000. Cette période est caractérisée par une alternance de périodes sèches et humides courtes. Cette période est caractérisée par des pluies brusques et intenses (figure 14 et 15)

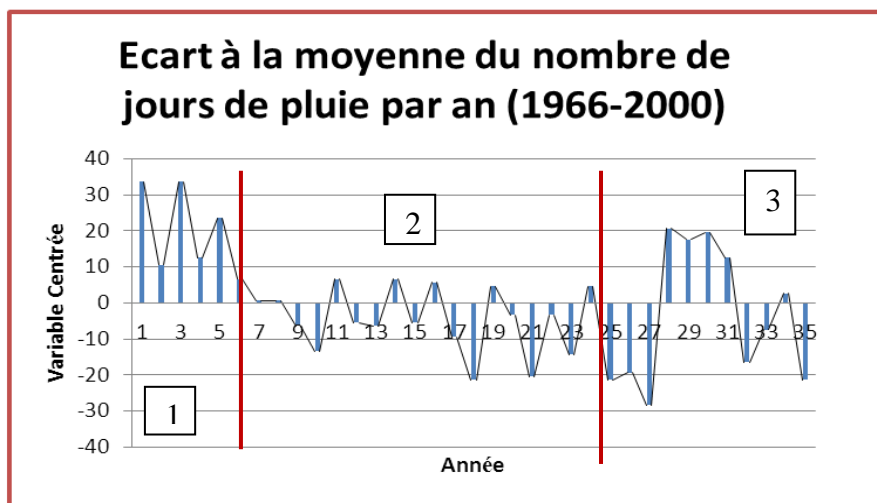


Figure 14 - Graphe des écarts à la moyenne de des hauteurs de pluie interannuelles la zone d'étude de 1966 à 2000

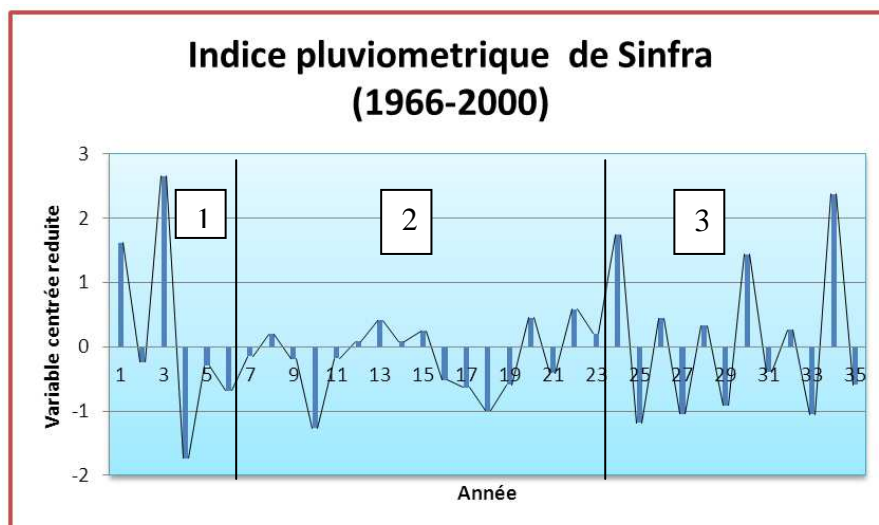


Figure 15 - Indice pluviométrique de 1966 à 2000

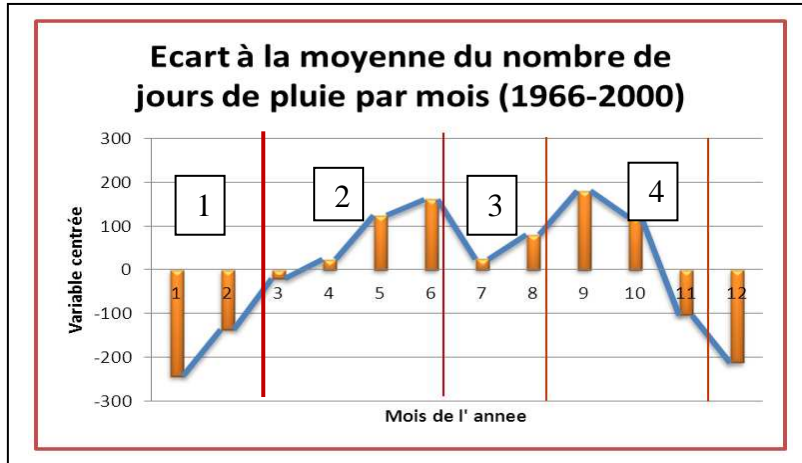


Figure 16 - Graphe des écarts à la moyenne du nombre de jours de pluie par mois 1966 à 2000

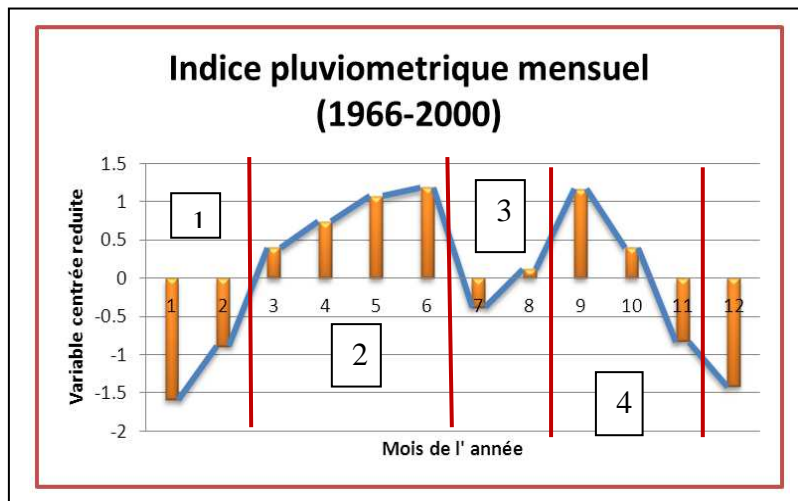


Figure 17 - Indice pluviométrique mensuel de 1966 à 2000

6.2.2 Intensité pluviométrique

L'intensité pluviométrique dans le chef-lieu du département et la localité de Kuetinfla est très élevée et cette portion représente environ 44 % du territoire départemental. Ces deux localités reçoivent une quantité de pluie plus élevée pouvant recharger la nappe phréatique.

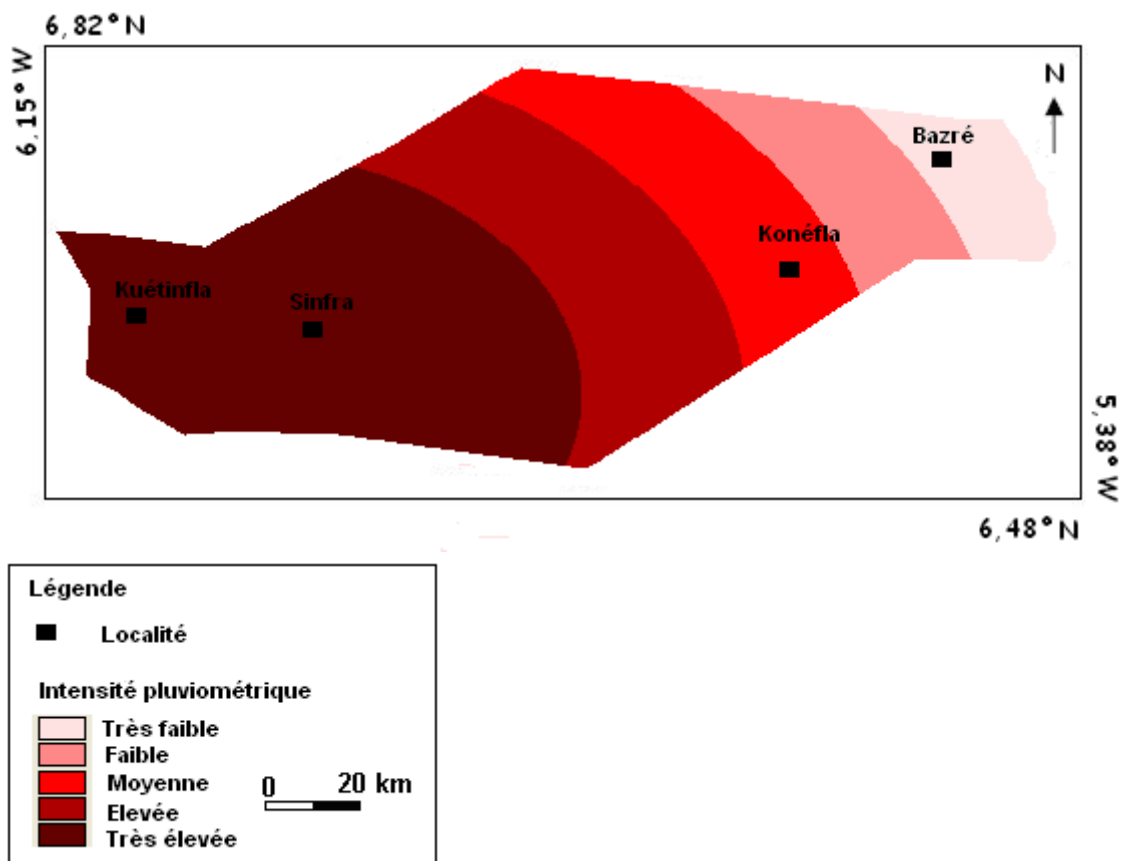


Figure 18-Carte de l'intensité pluviométrique

Cette carte a servi avec d'autres cartes intermédiaires et a travers une analyse multicritère à déterminer le risque d'inondation par la remontée de la nappe.

6.3 Cartographie structurale

Le réseau de fracture du département de Sinfra obtenu est dense et comprend 8877 fractures (figure 19)

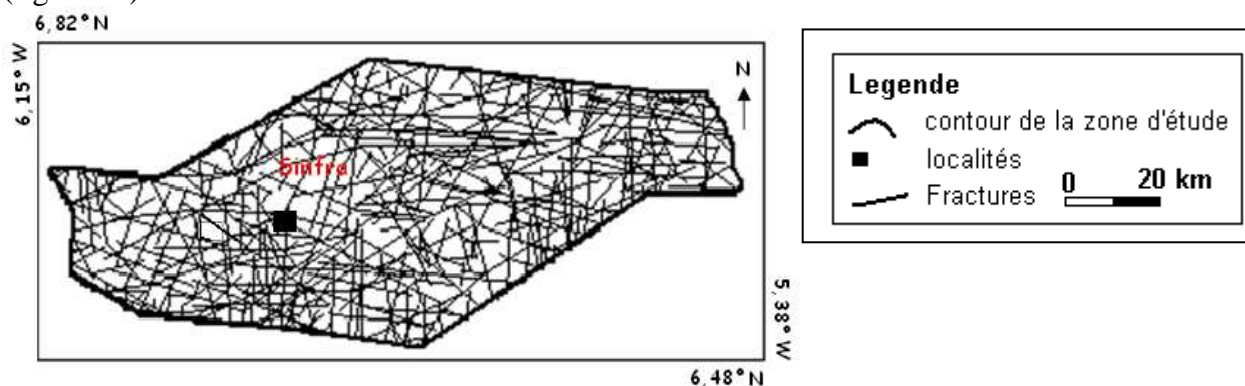


Figure 19- Carte du réseau de fracture du département de Sinfra

Le résultat de l'analyse des directions emprunte par les fractures est donne par le la figure ci-dessous (figure 20)

▪ Comparaison des rosaces directionnelles

L'analyse statistique du réseau de fractures a pour but d'identifier les directions principales des fractures dans leur ensemble et celle des fractures majeures qualifiées de directions prédominantes (figure 20).

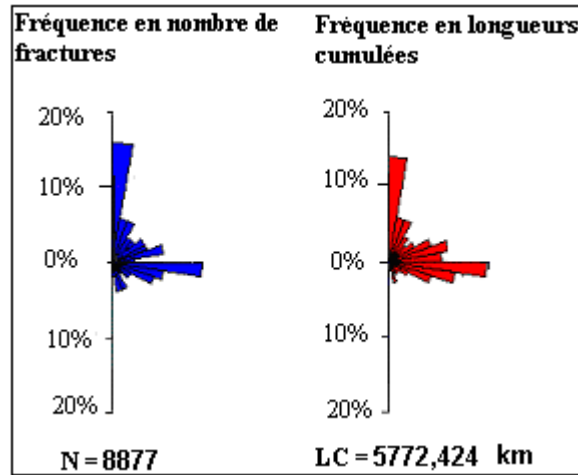


Figure 20 - Rosaces directionnelles du champ de fracturation globale.

La distribution des orientations en nombre de fractures du champ global de fracturation donne deux directions principales à savoir N0-10 et N90-100. En effet, il y a en proportion 16% de linéaments dans la direction N0-10 et 12% dans la direction N90-100. Ces mêmes résultats sont obtenus par Atchéremi (2006) dans la région de Dimbokro. Cinq (5) directions secondaires ont également été identifiées : N10-20, N20-30, N70-80, N100-110 et N110-120. La direction N20-30 a été identifiée, comme direction secondaire par Kouamé (1999) dans la région de Man-danané. Les autres directions présentent des directions de proportions comprises entre 2 et 5%.

La distribution des orientations des longueurs cumulées de fractures présente également deux directions principales, les mêmes que précédemment à savoir N0-10 et N90-100 avec respectivement 14% et 13% en proportion. Ainsi les megafractures sont-elles suivants les deux directions relevées précédemment : E-W et N-S.

Le second paramètre à analyser dans le cadre de cette analyse statistique est la corrélation entre les longueurs cumulées et le nombre de fractures (figure 21).

6.3.1 Corrélation entre longueurs cumulées et nombre de fractures

Comme l'indique la figure ci-dessous, la longueur cumulée des fractures et le nombre de fractures sont des paramètres qui sont liés. L'un implique l'autre. Le coefficient de corrélation

lineaire le montre bien, **R=0,68**.

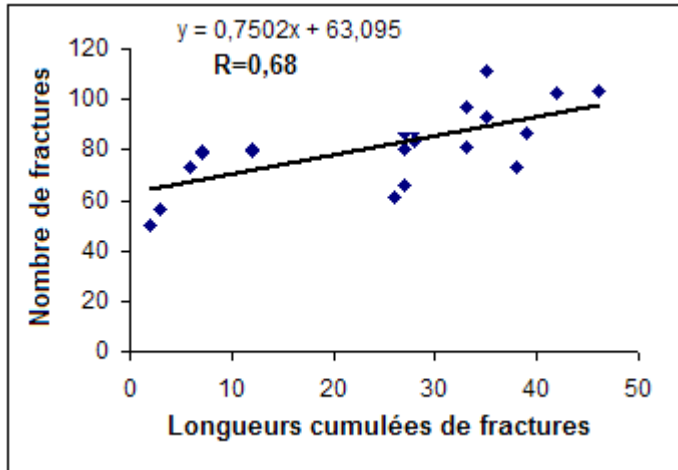


Figure 21 - Relation entre les longueurs de fractures et le nombre de fractures.

6.3.2 Perméabilité induite

6.3.2.1 Détermination des couloirs de circulation

La région de Sinfra étant située dans le bassin versant de la Marahoué, les paramètres (coefficient de proportionnalité et conductivité hydraulique) utilisés sont définis dans les travaux de Biémi (1992). En effet les travaux de Biémi (1992) se sont déroulés dans le bassin versant de la Marahoué. Les paramètres utilisés sont : le coefficient de proportionnalité C qui est de $3,8 \cdot 10^{-3}$ et la conductivité hydraulique Kf qui a pour valeur $3,5 \cdot 10^{-5}$ m/s. La Surface Elémentaire Représentative (SER) est de 5 x 5km et le nombre total de mailles s'élève à 417.

Tableau II - Ordre de grandeur des perméabilités induites pour quelques régions

Auteurs	Régions	Ordres de grandeur des perméabilités induites
Savadogo (1982)	Sissili (BurkinaFaso)	10^{-8} m/s
Biémi (1992)	Marahoué	10^{-6} à 10^{-4} m/s
Savané (1997)	Odiéné	10^{-11} à 10^{-10} m/s
Kouamé (1999)	Man-Danané	10^{-8} à 10^{-6} m/s
Adja (2001)	Korhogo	10^{-9} à 10^{-8} m/s (sur photographies aériennes)
Soro (2005)	Ferkessedougou	10^{-8} à 10^{-7} m/s
Jourda (2005)	Korhogo	$0,1 \cdot 10^{-6}$ à $0,5 \cdot 10^{-6}$ m/s
Atchéremi (2006)	Dimbokro	10^{-8} à 10^{-6} m/s

Ces résultats sont différents, car la densité de fracturation varie d'une région à une autre. Ainsi, plus la région est fracturée plus la perméabilité induite est forte.

La carte des perméabilités moyennes induites (figure 22) obtenue après interpolation, sur ARCVIEW permet d'identifier sept (7) principaux axes de drainage des eaux souterraines, suivant cinq (4) directions principales : N-S, E-W, SSW-NNE et W-SSE.

Le département de Sinfra est alimenté par un axe de direction W-SSE (4,5), qui traverse les localités de paabénéfla et Huafla, situées au sud de la ville de Sinfra avec un prolongement à Douagbo. Le département est également alimenté par un axe de direction SSW-NNE à partir du département de Bouafle situé au Nord de la zone d'étude. Les axes suivant la direction N-S (7) de Balefla, Djenedoufla et Doukouya, sont recoupés par un autre de direction E-W (6) parcourant la localité de Douagbo. Toutes ces quatre (4) directions ont été identifiées par plusieurs auteurs lors des travaux réalisés en Afrique de l'Ouest.

La figure (22) présente la distribution spatiale des perméabilités induites ainsi que la localisation géographique des couloirs de circulation de l'eau souterraine. Les chiffres sur la figure marquent la numérotation des couloirs de circulation de l'eau souterraine.

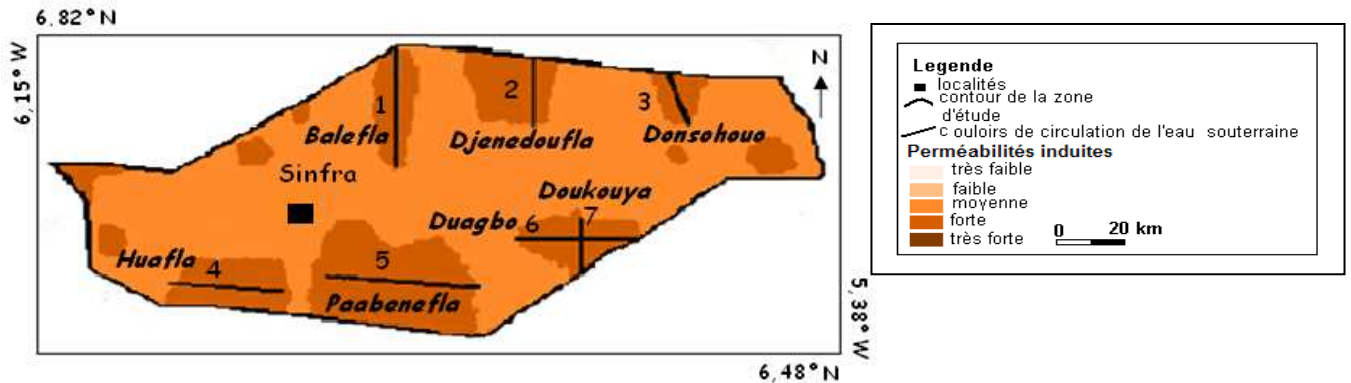


Figure 22 - Carte des perméabilités induites

Cette carte a été intégrée à travers un SIG avec d'autres cartes thématiques pour obtenir la carte des potentialités en eau souterraine donnée par la figure 22 ci-dessous :

6.4 Carte de potentialité en eau souterraine

L'établissement de cette carte est le but final de cette étude et elle renseigne sur la présence effective et l'exploitabilité de l'eau souterraine. Elle est dite non validée car elle n'a pas encore été évaluée. Elle représente la distribution spatiale du potentiel en eau souterraine de la région de Sinfra. Cette carte nous présente 4 sensibilités :

- potentialité mauvaise : Dans ces zones, l'accumulation en eau souterraine est pratiquement insignifiante. Le département de Sinfra ne présente pas cette sensibilité.
- potentialité médiocre : elle est représentée par des plages dispersées sur toute la région dont les plus importantes sont situées au Nord et au Sud du département et particulièrement dans la ville de Sinfra. Elle représente une proportion de 34,5%. Ce sont des zones de peu d'intérêt en Hydrogéologie;
- potentialité bonne : la probabilité de trouver de l'eau souterraine dans ces zones et en quantité suffisante est au-dessus de la moyenne et s'étend de l'Ouest à l'Est du secteur d'étude. Elles représentent environ 70% du département de Sinfra. Ces zones sont caractérisées par une bonne accumulation en eau souterraine d'où son intérêt en Hydrogéologie ;
- potentialité excellente : elle est très recherchée lors des campagnes de forages. Elle se situe à l'Ouest et au Sud du département ;
- La région de Sinfra zone d'étude présente dans son ensemble une bonne potentialité en eau souterraine (figure 23).

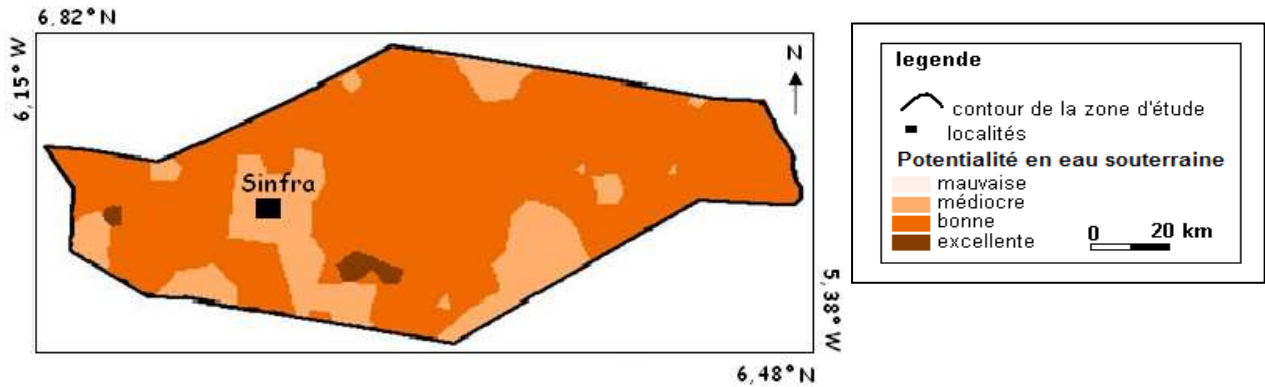


Figure 23 - Carte des potentialités en eau souterraine

Cette carte nécessite une validation qui montrera le degré de concordance des résultats obtenus avec la réalité terrain.

6.4.1 Résultat de la validation de la carte des potentialités en eau souterraine

6.4.1.1 Courbes de tendances de sensibilité

Il s'agit de réaliser la superposition de la carte des débits avec celle des potentialités en eau souterrain. Le calcul des pourcentages des classes des classes de débit se superposant aux classes thématique a permis de construire des graphes de pourcentages du nombre de forages en fonction des classes de débit. La figure 23 présente les courbes de tendances de classes de sensibilités courbes de tendance de classes de sensibilités obtenues.

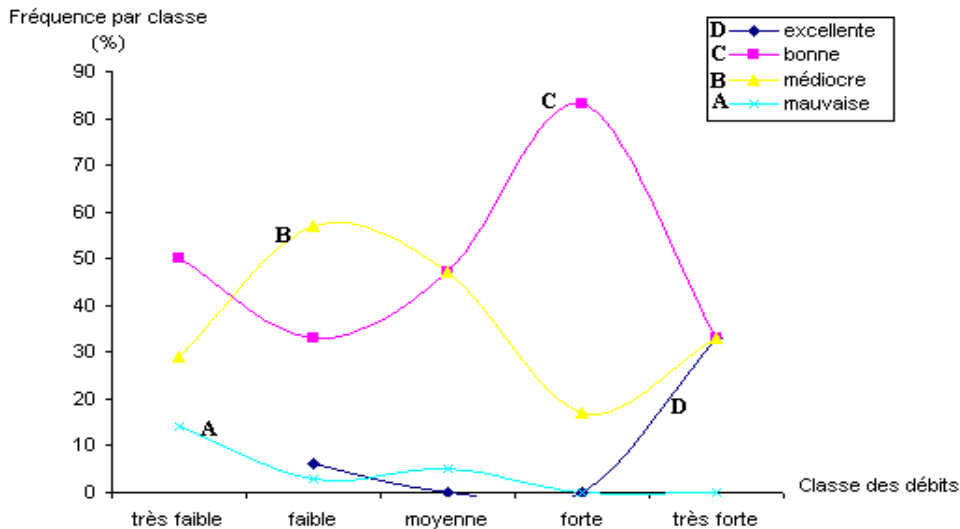


Figure 24 : Graphe des courbes de tendance des classes de sensibilité de la carte thématique potentialité en eaux souterraine

6.4.1.2 Comparaison entre les classes de sensibilité des cartes thématiques potentialité en eaux souterraine réalisées et théoriques

L'analyse des deux catégories de courbes montre que les différentes classes de sensibilité sont recouvertes en grande partie par les ouvrages à débits correspondants, résultats obtenus par Jourda (2005). 33 % des ouvrages à débit très fort se superposent à la classe de sensibilité excellente et 83 % des ouvrages à débit fort se superposent à la classe de sensibilité bonne. Ensuite 17% des ouvrages à débit faible et très faible se superposent à la classe de sensibilité mauvaise et enfin, 47 % des ouvrages à débit moyen se superposent à la classe de sensibilité médiocre. Ces résultats traduisent le fait que les classes de sensibilité expriment la

productivité des aquifères sur le terrain. Il faut cependant noter que c'est la classe de sensibilité bonne qui exprime le mieux la réalité du terrain, suivi des classes de sensibilité excellente et médiocre. Ces résultats démontrent que la classe de sensibilité bonne reflète fortement les zones à bonne potentialité en eaux souterraines des aquifères de la région Sinfra. Après comparaison, il ressort que les courbes issues des deux graphes ont la même allure.

Cela signifie clairement que la carte des potentialités en eaux souterraines obtenue est valable et rend fidèlement compte de la disponibilité et l'accessibilité de l'eau souterraine dans la région de Sinfra. La méthode de réalisation des cartes thématiques par l'analyse multicritère selon la codification des critères, donne des résultats qui après validation reflètent la réalité. Le test d'évaluation permet de montrer que la carte des potentialités en eau réalisée par la méthode par codification reflète la productivité des aquifères de socle de la région de Sinfra. Le test d'évaluation confirme donc les résultats obtenus. Conformément aux travaux de Jourda (2005) dans la région de Khorogo, cette étude réalisée dans la région de Sinfra reflètent la réalité.

Ainsi au terme de cette étude, il ressort que plus de la moitié de la région de Sinfra regorge de l'eau souterraine en quantité suffisante et surtout accessible. L'intensité pluviométrique donnera des informations quant à la recharge de la nappe phréatique.

6.5 Risque d'inondation par remontée de la nappe

La sous-préfecture de Konefla présente un risque d'inondation par remontée de la nappe Très élevé (figure 25). Cette zone est située au Sud de la sous-préfecture et représente 1.1 %. Dans l'ensemble le département de Sinfra présente un faible risque (88,9%) pour ce type d'inondation.

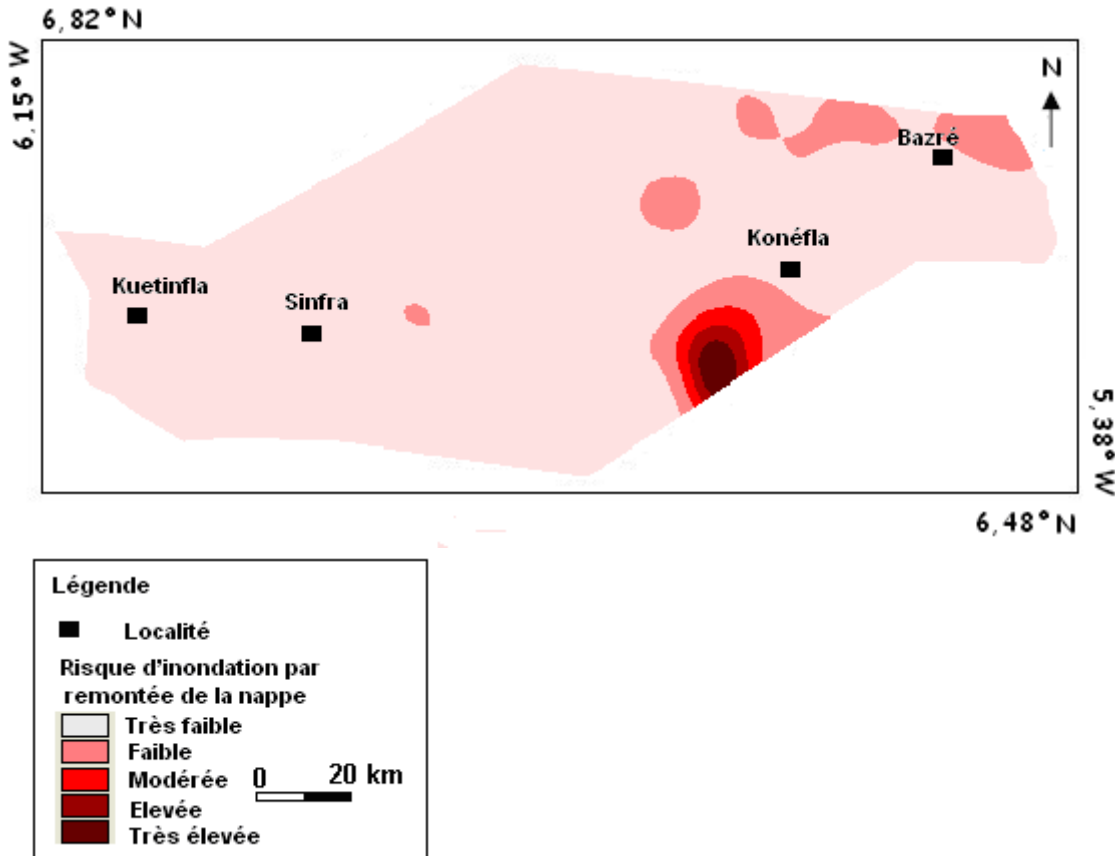


Figure 25 - Carte du risque d'inondation par remontée de la nappe

6.6 Risque d'inondation par débordement des cours d'eaux

Le chef-lieu du département, la ville de Sinfra présente un faible risque d'inondation par débordement des cours d'eaux (figure 26). La localité de Kueinfla présente un risque modéré. La sous-préfecture de Konefla ne constitue pas une préoccupation car elle présente un risque d'inondation faible. Alors que la sous-préfecture de Bazré mérite une attention particulière pour son risque d'inondation élevé. Les zones présentant un risque élevé se situent au Nord au Sud et au Nord-Est de la zone du département de Sinfra et représentent environ 11%.

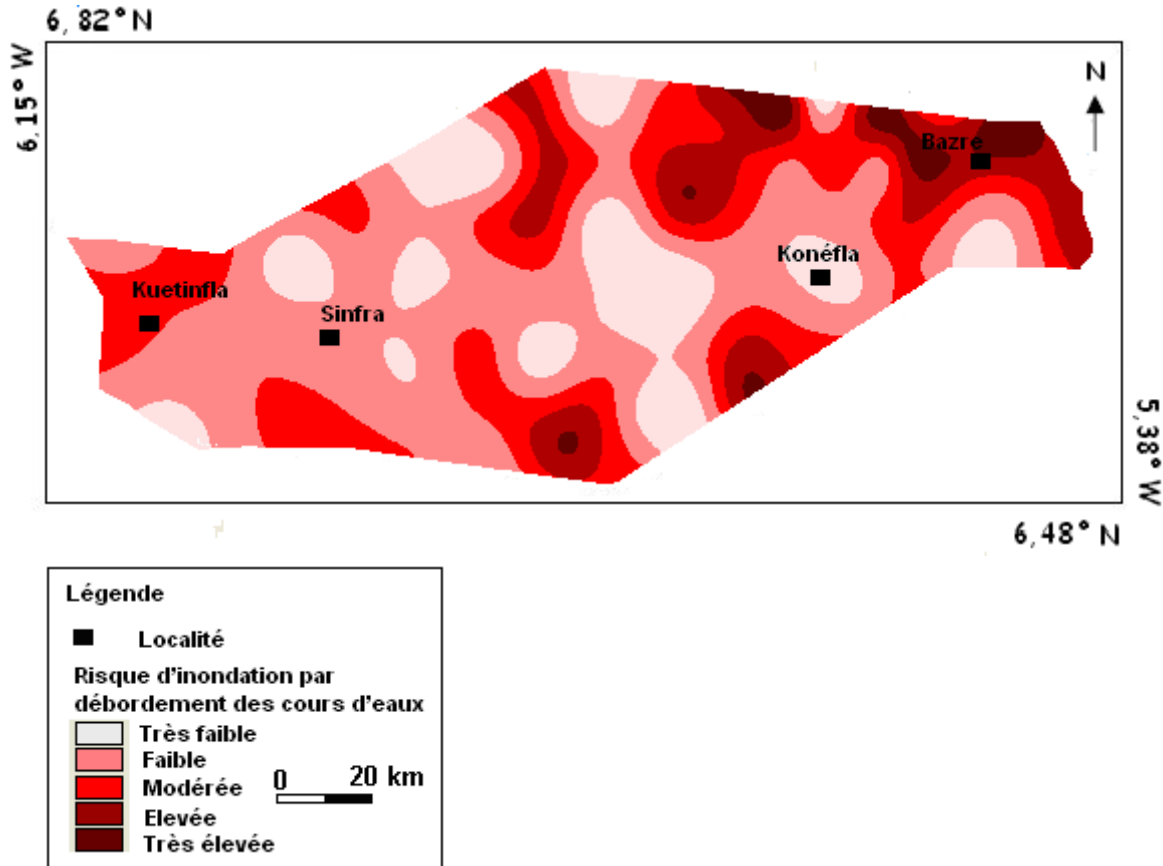


Figure 26-Carte du risque d'inondation par débordement des cours d'eaux

7. Discussion

La carte des potentialités en eau souterraine à rehausse le niveau de précision du risque d'inondation par remontée de la nappe. Elle donne des informations concernant les zones d'accumulation des eaux souterraines. L'accessibilité des nappes est mise en évidence par le modèle numérique de terrain qui donne la morphologie du terrain.

Les coefficients de corrélation linéaire déterminés par plusieurs auteurs à savoir Soro (2005) dans la région de Ferkessedougou, N'dri (2005) à aboisso et Atchérémi (2006) à Dimbokro sont du même ordre de grandeur que le coefficient de corrélation obtenu dans notre étude.

Les valeurs des perméabilités induites calculées varient de $1,7 \cdot 10^{-7}$ m/s à $1,1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Elles sont supérieures à celles obtenues par Savané (1997) à Odiénné variant de 10^{-10} à $1,7 \cdot 10^{-10}$ m/s, du même ordre que celles obtenues par Kouamé (1999) dans la région de Man-Danané comprises entre 10^{-8} et 10^{-6} m/s et celle obtenues par Atchérémi (2006) dans la région de Dimbokro, qui varient de 10^{-8} à 10^{-6} m/s. Elles sont cependant inférieures à celle obtenues par Biémi (1992) qui sont de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} m/s.

La carte des perméabilités induites renseigne sur le niveau de perméabilité induite par les fractures dans la zone d'étude. Elle a permis de déterminer les couloirs empruntés par les eaux souterraines. Le réseau de drainage souterrain déterminé situe quant à l'évacuation de l'eau par le réseau souterrain en cas d'inondation par débordement des cours d'eau.

Le couloir de direction N-S a été identifié par Kouamé (1999). La direction : N-S a également été identifiée à Dimbokro, à l'est de la zone d'étude, par Atchérémi (2006). La direction E-W a été mise en évidence par Biémi (1992), comme direction principale, dans la région de la Marahoué. La direction N-S a été identifiée par Kouamé (1999), comme direction principale dans la région de Man-Danané, à partir des images satellitaires, des photographies aériennes et des relevés de terrain. Les directions N-S et E-W ont été relevées par Saley (2003), dans la région de Man à partir du réseau hydrographique, comme directions principales. L'une de ces directions à savoir E-W a été déterminée plus au nord de la zone d'étude, précisément à Khorogo par Jourda (2005) et Adja (2001) et deux autres, N-S, et SSW-NNE à Ferkessedougou, par Soro (2005) à l'ouest de la zone d'étude précisément dans la région de Man-Danané.

Contrairement aux travaux de Jourda (2005) qui mettent l'accent sur la recharge des aquifères dans notre travail, l'accent a été mis sur dans cette étude sur l'accessibilité des aquifères, en vue d'une alimentation effective des populations en eau potable. Dans un contexte de situation financière difficile qui prévaut actuellement, l'analyse multicritère utilisée dans le cadre de ce travail a produit des résultats reflétant la réalité terrain. Cette méthode de modélisation spatiale du potentiel en eau souterraine a l'avantage de valider les cartes thématiques générées. Elle est par conséquent une révolution en Hydrogéologie, pour la cartographie. Il est important de mentionner que cette méthode ne s'applique que dans les milieux fissurés avec une profondeur maximum des aquifères se situant autour de 100 m et non pour les aquifères très profonds ou fossiles (Jourda et al., 2005).

Malgré les résultats satisfaisants obtenus, il n'en demeure pas moins que cette méthode présente des contraintes. Si elles étaient surmontées, les résultats obtenus seraient améliorés.

L'une des faiblesses de cette méthode est la définition des limites des classes des critères choisis. Pour chaque critère, la gamme de variation des valeurs est divisée par l'opérateur en

un certain nombre voulu de classes selon des valeurs de limites choisies, qui ne sont nécessairement pas équidistantes mais significatives du point de vue des applications pratiques (Jourda et *al.*, 2005). Les limites des classes des critères adoptées dans cette étude ne sont donc pas figées, mais dépendent des valeurs en présence, de la réalité du terrain et des objectifs à atteindre.

Le test de validation prouve que ces résultats reflètent la réalité ou du moins sont assez proches de la réalité afin de pouvoir faciliter la prise de décision tant au niveau de la recherche en eaux souterraines que dans leur exploitation. La méthodologie de validation des cartes thématiques proposée par Jourda (2005) est applicable dans notre étude et produit des résultats satisfaisants. (Jourda et *al.*, 2005).

La présente étude révèle le risque d'inondation dans le département de Sinfra à travers un Système d'Information à référence spatiale qui est un outil d'aide à la décision. Cet outil est important car il figure au nombre des recommandations du PNAE pour l'élaboration des stratégies d'atténuation et d'adaptation quant aux effets des changements climatiques.

8. Conclusions

Cette étude a permis de doter le département de Sinfra d'un SIRS, qui est un outil recommandé par le PNAE. Il permettra aux autorités en charge du développement du département d'entreprendre des actions nécessaires et adéquates quant aux stratégies d'atténuation et d'adaptation pour la réduction des risques d'inondation. L'étude du risque d'inondation dans le département de Sinfra révèle deux niveaux de risque. Le risque d'inondation par débordement des cours d'eaux est plus élevé que celui de l'inondation par remontée de la nappe. Le risque lié au débordement concerne environ 13% du département. Le risque lié à la remontée de la nappe est représenté environ 2.3%. Ainsi l'inondation due au débordement des cours d'eaux mérite une attention particulière vus la morphologie, l'hydrologie et hydrographique du terrain dans un contexte de changements climatiques.

La modélisation des phénomènes réels par les modèles Markoviens est efficace et traduit la réalité. La structure du champ de précipitation annuelle et interannuelle est bien décrite par une chaîne de Markov d'ordre 1 à espace d'états discret fini et une chaîne de Markov Cachée à 4 états et 5 observations. Le champ de précipitations mensuelles est bien décrit par une chaîne de Markov Cachée à 82%.

Les échos de précipitations sont bien décrits par les modèles de Markov, modèles stochastiques doublement probabiliste qui permettent une modélisation stochastique des structures des séquences sèches humides. Cette étude montre une alternance de séquences humides et sèches plus longues qui caractérisent une tendance générale à la baisse de la pluviométrie dans le département de Sinfra. Cela présage une tendance de ruptures conduisant à des pluies brusques et intenses. Les cartes thématiques ont été validées par une méthode valable dans les milieux fissurés avec une profondeur maximum des aquifères se situant autour de 100 m et non pour les aquifères très profonds ou fossiles.

Il serait intéressant de tenir compte de la variabilité spatiale des paramètres intervenant dans le calcul de la perméabilité induite (conductivité hydraulique K_f et coefficient de proportionnalité C). La pluviométrie étant très variable dans le temps et dans l'espace, l'utilisation des modèles de Markov non-homogènes ou les probabilités de transition varient dans le temps et ne sont pas les paramètres directs du modèle mais sont plutôt des fonctions « paramétrées » de l'état précédent et d'autres paramètres de conditionnement, améliorerait les résultats obtenus.

L'évaluation du risque d'érosion hydrique du terrain permettrait une meilleure appréciation du risque lie à l'inondation.

9. L'étape suivante

Les résultats de notre étude seront portés à la connaissance des autorités en charge du développement du département de Sinfra. Il est important de noter que le problème de l'inondation était une préoccupation réelle des autorités ainsi que la population locale. Les résultats de cette étude portant sur le risque d'inondation seront diffusées a travers des campagnes de sensibilisation et séries de rencontres avec les autorités en charge de la gestion des collectivités locales. Le secteur agricole étant le secteur clé de la région, pour la sensibilisation, nous travaillerons en collaboration avec les structures étatiques chargées du suivi et de l'encadrement de la population agricole. Nous organiserons également des séances de formation pour partager les connaissances acquises sur les effets des changements climatiques ainsi que les stratégies d'atténuation et d'adaptation. Pour plus d'efficacité nous envisageons de véhiculer le message des changements climatiques en langues locales. Une coopération avec la Suède est envisagée pour un transfert de technologie dans le domaine du développement durable étant donne que la Suède est l'un des pays les plus avancés en développement durable.

10. Remerciements

Nos remerciements vont à l'endroit de l'Agence Suédoise de coopération au Développement International (ASDI), pour nous avoir permis de participer au programme international de formation sur les changements climatiques. Toute notre gratitude à l'Institut Suédois de Météorologie et d'Hydrologie (SMHI) et au Swedish Consultants (SWECO) pour avoir organisé et assuré cette formation. Nous remercions également la Cellule Ivoirienne pour de Développement Durable (CI 2D) mon organisation d'affiliation pour nous avoir permis de la représenter à cette formation. Nous remercions également les structures qui nous ont fourni les données à savoir la SODEXAM pour les données hydroclimatiques, la Direction Nationale de l'Hydraulique pour fiches techniques des forages, la SODEMI (Société de Développement Minier) pour les cartes géologiques et le CCT(Centre de Cartographie et de Télédétection) pour les cartes topographiques.

11. Références

- ARNAUD M. (1985): Contribution à l'étude stochastique Markovienne des précipitations dans le bassin Adour-Garonne ; Thèse de Doctorat, Toulouse, (France).
- BARCZAK A. et GRIVAULT C.(2007). Système d'information géographique pour l'évaluation de la vulnérabilité au risque de ruissellement urbain, *NOVATECH 2007*, Session 1.2, p139-146.
- BARROCA B., POTTIER N., LEFORT E. (2005) : Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'orge aval, *Septièmes Rencontres de Théo Quant*, janvier 2005,12 p.
- GRAILLOT D., LONDICHE H., DECHOMETS R., BATTON-HUBERT M. Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations, 12p.
- BELLINGLEY P. (1960): Statistical methods in Markov chains. In Stanford meetings of the Institute of Mathematical Statistics, Chicago, USA.
- BOIS Ph., OBLED Ch., et ZIN I.(2007). Introduction au traitement de données en Hydrologie.7^e édition revue et complétée. Edition du millénaire, 265p.
- BOBEE B. (1978) Eléments de statistiques.159p.
- CHEZE I., JOURDAINS S. (2003): Calcul des quantiles de données de retour de la température par la méthode gev. In calcul des températures à risque; p.1-50, Météo France, DP/SERV/BEC ,Toulouse, France.
- DEQUIER J. (2005). Chaîne de Markov et application. Mémoire de probatoire en informatique, Université de Grenoble, France.35p.
- GARCIA C.C. (1990): El campo de Cartagena climate hidrologia de un medio semiarido. Univ. Murcia, ayuntamiento de Cartagena, 450p.
- HESS G.D., LESLIE L.M., GUYMER A.E., FRAENDRICH K. (1989): Application of markov techniques to the operational, short-term forecasting of rainfall; Australian Meteorological Magazine, 37, 2, 83-91.
- KOROTKOV V.,LOGOFET D., LOREAU M.(2001).« Succession in mixed boreal forest of Russia: Markov models an Non-markov effects » ecological Moddelling,142,2001, p.25-38.
- LAZRI M., AMEUR.S., HADDAD B. (2007): Analyse de données de précipitations par approche Markovienne ; Larhyss journal, n°6, décembre 2007. pp.7-20.
- LIANA C., ELENA C. (2004): Evaluation of the transition probabilities for daily precipitation time series using a Markov chain model; The 3rd International Colloquium Mathematics in Engineering and Numerical Physics, p.82-89, Oct 7-9, Bucharest, Romania.
- LADOY P. (1974): Etude des probabilités pour les types journaliers de distribution spatiale de la pluie; Actes du 3ème colloque sur l'analyse des données en géographie, Besan, 177-202.
- PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION (FAO), 1994. L'irrigation en Afrique en chiffre, Rome, « [http : www.fao.org/ag/aquast/](http://www.fao.org/ag/aquast/) ».
- WADE S., RUDANT J-P., BA K., NDOYE B. (2007) : Télédétection, SIG et géorisques : applications à l'étude des inondations urbaines de Saint -Louis et du ravinement à l'érosion hydrique à Nioro-du-Rip (Sénégal), *Actes des JSIRAUF, Hanoi*, 6-9 novembre 2007, 8p.

References bibliographiques (Internet)

- <http://la.climatologie.free.fr/inondation/inondation2.htm#pri71>
- <http://les-inondations.e-monsite.com/rubrique,i-types-d-inondations,196298.html>
- http://www.futura-sciences.com/fr/question-reponse/t/eau/d/les-causes-des-inondations_1314/
- <http://www.risques-meteo.ac-versailles.fr/Cruces-et-inondations>
- <http://www.brgm.fr/brgm/Risques/Antilles/guad/ipluie.htm>
- <http://www.inondationsnappes.fr/presentation.asp>