

Diplôme Universitaire de Troisième Cycle
“Cartographie des Territoires et Systèmes d’Information Géographique”

Atlas de cartes de pluviométrie sur la Mauritanie, Gambie et Sénégal de 1947 à 2003 pour un suivi de propagation de la Borréliose



Rapport de stage

Yannick HAEDENS

Sous la direction de

**Claudine DIEULIN, responsable Base de Données cartographiques, chargée de
mission cartographie numérique UMR HydroSciences Montpellier**

Frédéric LEONE, Maître de Conférences

Septembre 2005

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord toute l'équipe VAHYNE de l'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier pour son chaleureux accueil et son aide précieuse tout au long de ce stage.

Je remercie tout particulièrement Claudine Deulin pour son accueil, sa bonne humeur et sa gentillesse, sa disponibilité, son attention, et toute l'aide qu'elle a pu m'apporter lors de ces cinq mois passés à la Maison des Sciences de l'Eau.

Mes remerciements s'adressent aussi à Frédéric Léone, pour avoir accepté de m'encadrer à l'Université Paul Valéry - Montpellier III tout au long de ce stage.

Merci également à Agnès Cres pour son aide, ses remarques et conseils avisés sur les « macros » Excel ; François-Noël Cres pour la formation qu'il m'a donné sur le langage de programmation Visual Basic ; Sandra Ardoin-Bardin pour ses précieux conseils, son soutien, mais aussi pour ses bons cafés matinaux ; un grand merci également à Gil Mahé.

Je tiens aussi à remercier Téléphore Yaou-Brou pour son extrême gentillesse et sa bonne humeur. Merci aussi à Laurence Vial pour son aide et son soutien lors de mes dernières semaines de stage.

Je tiens enfin à remercier Jean-François Boyer, Vincent Guinot, et Kristine Gudja.

Introduction

Les problèmes liés aux changements climatiques occupent une place de plus en plus importante parmi les préoccupations majeures de ces dernières décennies. Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat, tant pour les populations que pour les écosystèmes. Depuis plus de trente ans maintenant, on observe en Afrique de l'Ouest une importante diminution de la pluviométrie, dont les conséquences sont parfois dramatiques pour l'équilibre naturel et pour les hommes. L'Afrique de l'Ouest est très vulnérable à la variabilité et aux changements climatiques, ceux-ci sont perçus à travers l'observation de longues séries pluviométriques. Ce sont surtout les pays du Sahel qui souffrent le plus de ces changements et de la sécheresse. Cette dernière sécheresse est exceptionnelle dans la mesure où c'est la plus longue et la plus intense observée en Afrique, depuis que les premières stations pluviométriques ont été installées (fin du XIX^e siècle).

Les impacts de ces changements climatiques sur les ressources en eaux ont un intérêt particulier pour les scientifiques ; mais il existe probablement une autre conséquence préoccupante de ces changements sur le continent africain, notamment dans les pays du sahel, celle sur les épidémies endémiques, beaucoup moins médiatiques.

Une équipe de l'Institut de Recherche et de Développement, dans le cadre de l'Action Thématique Interdépartementale « Évolution climatique et Santé » coordonnée par Jean-François Trape (directeur de recherche à l'IRD), étudie soigneusement en Afrique les impacts possibles des changements climatiques sur les maladies à transmission vectorielle comme le sont le paludisme et la borréliose, qui restent des freins majeurs au développement.

Les études sur la borréliose commencèrent à une période où la fille de Jean-François Trape avait tous les symptômes du paludisme mais que les traitements ne faisaient pas effet. Jean-François Trape, médecin, a voulu approfondir le problème et avait détecté qu'elle était atteinte de la borréliose. C'est donc en se rendant compte de la méconnaissance de cette maladie que Jean-François Trape a voulu l'étudier plus profondément.

Dans le cadre de l'ATI « Évolution climatique et Santé », Jean-François Trape a sollicité l'équipe VAHYNE de l'UMR HydroSciences Montpellier pour établir un atlas de cartes de

données climatiques sur une zone couvrant la Mauritanie, le Sénégal, et la Gambie, cartes à différents pas de temps et selon certains critères. Il était notamment demandé de dessiner des cartes concernant la pluviométrie, les températures et l'humidité.

Ce travail m'a été confié par l'équipe VAHYNE dans le cadre d'un stage d'une durée de 5 mois du (1^{er} mars 2005 au 31 juillet 2005) à la Maison des Sciences de l'Eau.

Ce stage a été réalisé dans le cadre de ma formation en Diplôme d'Université de troisième cycle de Cartographie des Territoires et Système d'Informations Géographiques, de l'Université Paul Valéry - Montpellier III.

Mme Claudine Dieulin, assistant ingénieur dans le groupe Vahyne, responsable du développement de la banque de données spatialisées de SIEREM (Système d'Informations Environnementales pour les Ressources en Eau et leur Modélisation), et également chargée de mission cartographie numérique pour l'UMR HydroSciences Montpellier, a assuré l'encadrement de ce travail à la Maison des Sciences de l'Eau à Montpellier.

Mr Frédéric Leone, Maître de Conférences et co-responsable du Master 2 Pro Gestion des catastrophes et des risques naturels à l'Université Paul-Valéry Montpellier III, a assuré l'encadrement de ce travail à l'Université.

Ce rapport de stage précise les éléments contextuels et techniques de ce travail en plusieurs parties :

- La première partie présente le contexte de ce travail : la présentation des équipes pour lesquelles je travaillais, la présentation de la zone d'étude et les outils utilisés.
- La seconde partie présente les différentes étapes m'ayant permis de trier les données et menant à l'optimisation des jeux de données.
- La troisième partie concerne la réalisation des cartes permettant l'étude de la variabilité de la pluviométrie annuelle et mensuelle.
- Enfin, la dernière partie traite des étapes menant à la production de ce travail sur support multimédia.

1. Le contexte

1.1. Présentation de la Maison des Sciences de l'Eau et de l'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier

1.1.1. La Maison des Sciences de l'Eau

La MSE accueille actuellement, dans un bâtiment de 3000 m², plus de 130 personnes dont une trentaine de doctorants et stagiaires.

Les locaux de la Maison des Sciences de l'Eau appartiennent à l'Université Montpellier II.

La MSE est composée :

- de l'UMR HydroSciences Montpellier (environ 100 personnes) ;
- de chercheurs de l'IRD ;
- ainsi que du personnel de la MSE elle-même (6 personnes : la direction, la secrétaire, la documentation, et l'accueil).

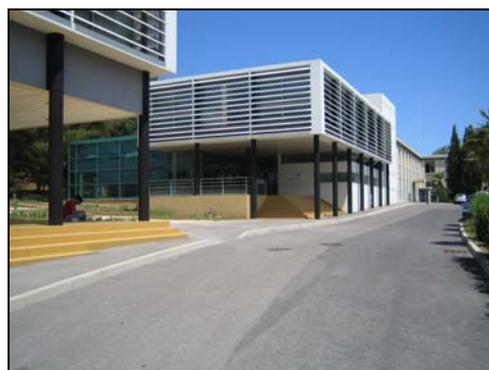


Figure 1 : La Maison des Sciences de l'Eau
(Cliché Y.Haedens)

Les unités de l'Institut de Recherche pour le Développement dont l'implantation principale est la Maison des Sciences de l'Eau sont aux nombres de quatre : Divha, Obhi, Ariane et Great Ice.

Leurs champs de recherches principaux sont :

- les climats : variabilité et impacts (Great Ice)
- les écosystèmes terrestres en cours de dégradation (Ariane)
- l'eau en tant que ressource et sa gestion durable (Obhi et Divha)

La MSE comprend aussi tout ce qui concerne la logistique, ainsi que le réseau informatique.

Mon stage s'est déroulé au sein de l'UMR Hydrosiences Montpellier, plus précisément au sein de l'équipe VAHYNE, composante de l'axe 3 de l'UMR HSM.

1.1.2. L'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier

Cette Unité Mixte est issue de relations anciennes entre les Universités de Montpellier I et II, le CNRS et de relations étroites avec les équipes d'hydrologie de l'IRD installées à Montpellier depuis une vingtaine d'années.

Le creuset des diverses formations en sciences de la terre et de l'environnement (Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (option hydrologie), Ecole doctorale Sciences de la Terre et de l'Eau) permet de renforcer les liens entre les finalités de recherche et de formation. La concrétisation de ce rapprochement renforce très sensiblement le potentiel de l'Unité dans le domaine de l'Hydrologie. En retour, il permet de déboucher sur des convergences d'intérêt tant méthodologiques que géographiques autour du bassin méditerranéen.

Les travaux développés au sein de l'UMR HydroSciences Montpellier portent essentiellement sur l'étude des impacts climatiques et anthropiques sur les ressources en eau en milieux méditerranéen et tropical. La finalité de ces travaux passe à la fois par l'analyse et la modélisation des processus mis en jeu et par la caractérisation de phénomènes régionaux et de modélisation conceptuelle. La prise en compte d'échelles de temps différentes (depuis l'événement hydrologique jusqu'à l'intégration sur des temps géologiques des phénomènes régissant les structures dans lesquelles s'effectuent les écoulements) permet de différencier les différents types d'impacts.

1.1.2.1. L'organisation des recherches au sein de l'UMR HydroSciences Montpellier

Ces recherches s'organisent autour de quatre axes comprenant chacun plusieurs thèmes, dont les nombreuses interactions sont à la base d'une forte synergie.

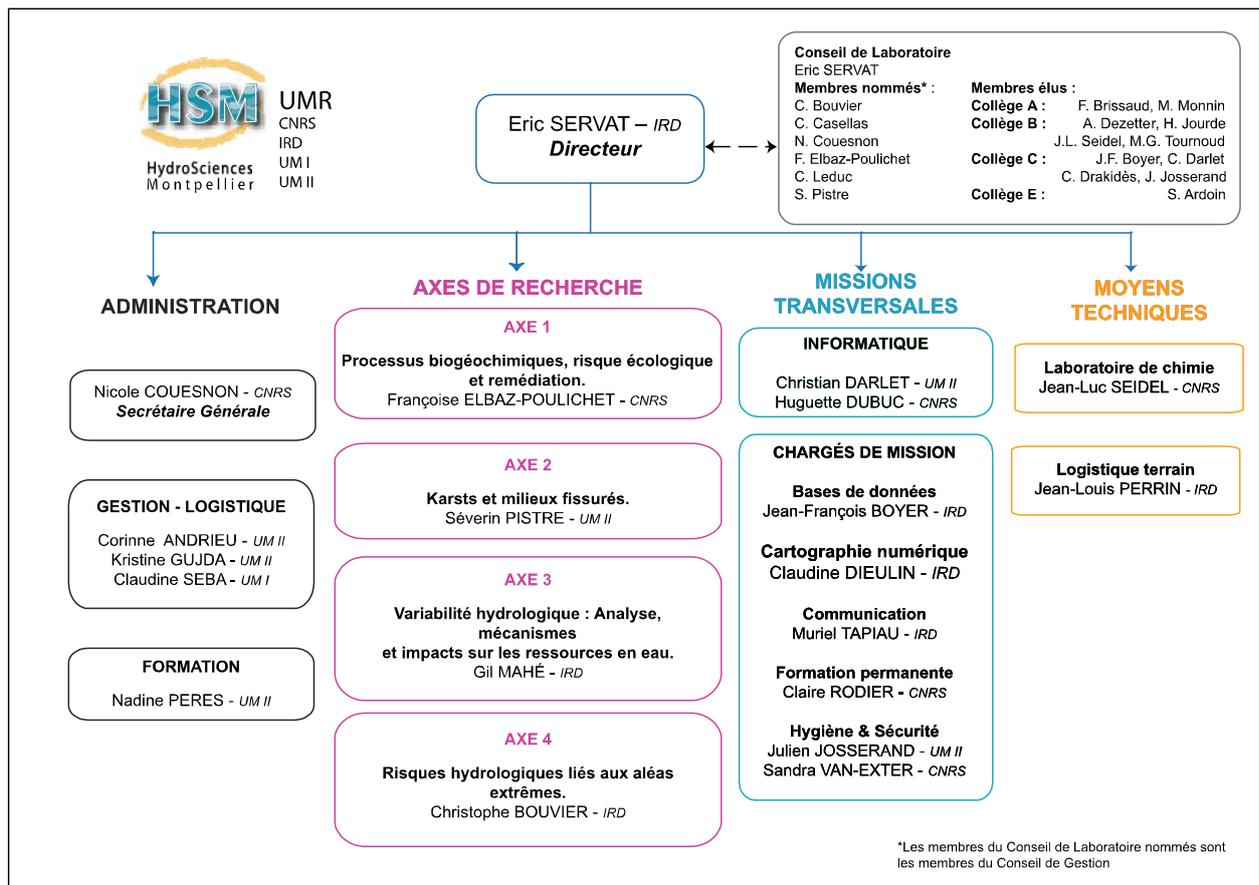


Figure 2 : L'organigramme d'HydroSciences Montpellier

- **L'Axe 1** (plutôt constitué de personnels du CNRS et l'Université Montpellier I) aborde les questions de pollution et de toxicité pour les écosystèmes aquatiques en prenant également en compte les aspects de remédiation et de recyclage des eaux, thématiques importantes dans les zones méditerranéennes et semi-arides tropicales.
- **L'Axe 2** (plutôt constitué de personnels de l'Université Montpellier II) s'intéresse aux roches fissurées et, particulièrement, aux karsts et aux roches carbonatées dont l'importance est considérable en tant qu'aquifères et qui constituent, par conséquent, des ressources en eau privilégiées. Les enjeux sont donc forts et justifient les travaux entrepris pour caractériser et modéliser la géométrie puis les écoulements et les processus de transport dans les milieux pro-perméables fracturés.
- **L'Axe 3** (plutôt constitué de personnels de l'IRD) poursuit ses travaux dans le cadre de l'étude des changements hydrologiques, d'origine climatique et/ou anthropique,

dans les zones tropicales et semi-arides. La notion de ressource est omniprésente dans les thématiques retenues dans cet axe qui est également centré sur des problématiques faisant intervenir la modélisation, qu'elle soit de processus ou de fonctionnement des bassins versants.

- **L'Axe 4** (constitué de personnels de l'Université Montpellier II ainsi que de l'IRD) fait explicitement apparaître la notion de risque. Celui-ci, qu'il soit lié à des aléas extrêmes ou aux pollutions associées aux flux qu'ils génèrent, est une constante dans les milieux méditerranéen ou tropical. Les conditions climatiques y sont, en effet, souvent génératrices de situations difficiles aux conséquences sérieuses sur un environnement fréquemment fragilisé et soumis à une pression anthropique forte.

Les activités scientifiques de l'UMR HSM ont une forte implication méditerranéenne et tropicale. C'est, bien entendu, la conséquence de sa localisation géographique, de sa volonté de s'impliquer fortement dans les problématiques de son environnement méditerranéen et, enfin, de s'inscrire dans la dynamique des centres de recherche montpelliérains proches d'AGROPOLIS. Son implication dans des réseaux scientifiques tels que FRIEND AMHY ou AOC (Programme Hydrologique International de l'UNESCO) amène une dimension supplémentaire à son engagement méditerranéen et ouest-africain.

L'UMR HydroSciences Montpellier a pour ambition d'enrichir et de dynamiser les réflexions mutuelles de ses différentes composantes en les plaçant dans un cadre commun de recherches d'excellences sur les questions de l'eau du XXI^e siècle. Élément clé de la Maison des Sciences de l'Eau, HydroSciences a également pour ambition de contribuer à la structuration des nombreuses compétences locales et régionales dans le domaine de l'Eau.

1.1.2.2. L'Axe 3 de l'UMR HSM : La Variabilité hydrologique

Mon stage s'est déroulé au sein de l'équipe VAHYNE, composante de l'axe 3 de l'UMR HSM. L'objectif de cet axe de recherche est de décrire et de comprendre la variabilité hydrologique, que son origine soit climatique ou anthropique, à différentes échelles d'espace

(du bassin versant de quelques km² aux ensembles continentaux) et de temps (de l'événement pluvieux à la dizaine de milliers d'années). La discipline fondamentale de l'axe est l'hydrologie (étude des transferts d'eau à la surface des bassins, à travers la zone non saturée et dans les nappes phréatiques). S'y ajoutent des compétences en géologie et géochimie (isotopes majeurs et traces), accrues par la collaboration avec d'autres équipes.

Les trois actions de recherche sont :

- Mécanismes de la variabilité hydrologique en zone sahélienne (MEVHYS)

Au Sahel, depuis 50 ans est étudiée l'évolution hydrologique dans une zone de 2 000 km² constituée de multiples petits bassins endoréiques subissant une forte anthropisation. Les modélisations physiques sont réalisées à de multiples échelles, tant en surface qu'au niveau des nappes phréatiques.

- Analyse de la variabilité hydrologique et impacts sur les ressources en eau (VAHYNE)

L'équipe VAHYNE étudie les grands bassins d'Afrique de l'Ouest (dépassant le millier de km²) pour :

- apprécier la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques ;
 - modéliser la production des ressources en eau ;
 - lier la variabilité du climat et la relation pluie-débit pour tester différents scénarios et permettre l'estimation et la gestion durable des ressources en eau.
- Paléohydrologie et salinité de l'eau continentale (PALHYSADE)

Les changements hydrologiques face aux modifications du climat et à l'anthropisation des milieux sont étudiés de la dernière ère glaciaire jusqu'à nos jours. Les principaux sujets d'étude sont l'extension des zones humides, les flux d'évaporation depuis les aquifères et la salinité de l'eau continentale.

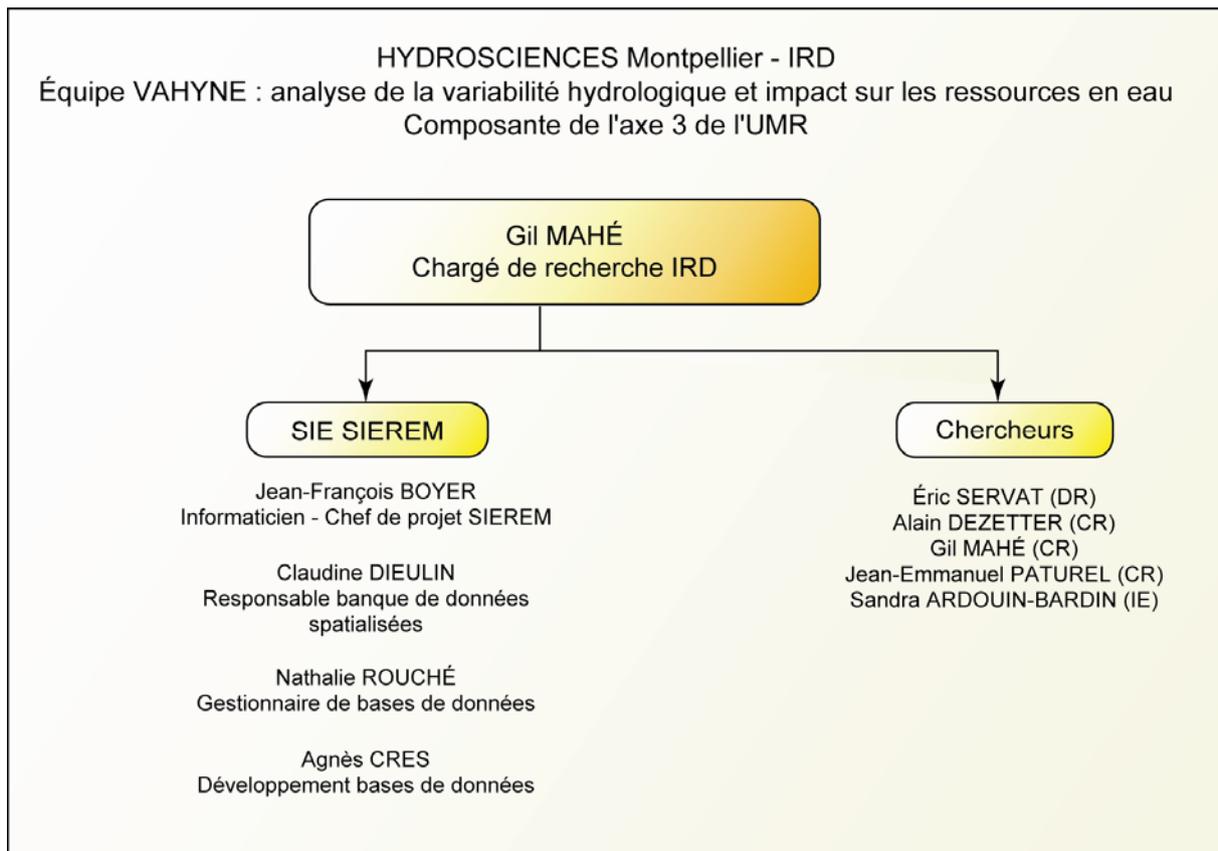


Figure 3 : L'organigramme de l'équipe VAHYNE

1.2. Environnement technique et logiciels utilisés pendant le stage

Dès mon arrivée, un ordinateur a été mis à ma disposition dans un des bureaux de la MSE. Cet ordinateur était pratiquement vide de tout logiciel et une session a été créée à mon nom, protégée par un mot de passe que j'ai du choisir moi-même et par conséquent que j'étais le seul à connaître. Le système d'exploitation était Windows XP Pro.

L'administrateur réseau m'a dès mon arrivée créé une adresse de messagerie (ma boîte aux lettres était elle aussi protégée par un mot de passe que j'ai pu choisir) me permettant de communiquer de façon professionnelle, avec toute l'équipe VAHYNE notamment. Mon adresse a de suite été rentrée dans la liste de diffusion de l'équipe VAHYNE mais aussi d'HydroSciences Montpellier, me permettant de recevoir toutes les informations concernant ces équipes (dates de réunions...); j'ai évidemment interprété ceci comme un signe d'intégration à l'équipe VAHYNE. Il m'était aussi possible d'accéder à Internet si besoin.

Il a fallu dans un premier temps installer sur mon ordinateur tous les logiciels indispensables à la réalisation de mon travail dans le cadre du stage :

- **Orion :**

C'est un petit logiciel qui permet de questionner la base de donnée SIEREM, de sélectionner des données en fonction de différents paramètres et de les extraire sous forme de listes ou de fichiers exploitables sous Excel notamment.

- **Microsoft Office 2002**, pour me permettre de travailler sur les logiciels Word et Excel.

Le logiciel **Excel** a été indispensable tout au long de mon stage, je l'ai utilisé pour tous les traitements effectués sur les données, et la création des jeux de données nécessaires à la réalisation des cartes.

Le logiciel Excel a aussi été utilisé pour les « macros », permettant une meilleure efficacité (énorme gain de temps, minimisation des risques d'oublis...) lors du traitement et le tri des données.

Les macros permettent d'écrire ses propres algorithmes, Excel servant alors d'interface utilisateur à travers notamment les cellules d'une feuille de calcul et les graphiques. Les macros sont écrites dans un langage de programmation, Visual Basic (VBA), commun à toutes les applications de la suite Microsoft Office (Word, Access, Excel, Outlook, FrontPage et PowerPoint). Elles sont écrites sous Excel dans Visual Basic Editor (« *Outils/macro/Visual Basic Editor* »), il faut programmer dans des « modules ».

- **ArcGIS 8.2 :**

La gamme SIG ArcGIS, développée par ESRI, est une suite modulable de logiciels pour la création, la gestion, le traitement et la diffusion de données géographiques.

ArcGis 8.2 s'articule autour de différents produits parmi lesquels figure **ArcGIS Desktop**, ensemble intégré d'applications SIG bureautiques puissantes et extensibles permettant de remplir toutes les fonctions attendues d'un Système d'Information Géographique. Les applications utilisées lors de ce stage ont été :

- *ArcMap* : c'est l'application charnière d'ArcGIS Desktop pour toutes les tâches associées aux cartes, y compris la cartographie, l'analyse spatiale et la mise à jour.
- *ArcCatalog* : L'application ArcCatalog facilite l'organisation et la gestion de toutes les données SIG, telles que les cartes, les globes, les jeux de données, les modèles, les métadonnées et les services.
- *ArcInfo Workstation* : c'est l'application NT des modules Unix d'ESRI. C'est avec le module GRID que la spatialisation est faite et avec le module vecteur que les courbes d'isovaleurs sont calculées. C'est le noyau dur de calcul de ce SIG.

ArcMap permettait la visualisation des données, ainsi que celle des fichiers et grilles de pluies créés par ArcInfo, et leur cartographie. ArcMap permettait aussi l'exportation des cartes vers d'autres logiciels comme Adobe Illustrator pour leur mise en page, ou Macromédia Flash.

- **Adobe Illustrator 10 :**

Ce logiciel standard développé par Adobe a servi à la mise en page des cartes mais aussi à la création de la plupart des fichiers servant à la mise en page du support multimédia contenant l'atlas de données climatiques (création de boutons, des fonds d'écran...).

- **Adobe Photoshop 7 :**

Ce logiciel de traitement d'image a notamment servi à retoucher quelques images mais aussi à gérer les problèmes de transparence qui existaient lors de l'exportation des cartes d'ArcMap vers le logiciel Flash.

- **Macromédia Flash MX :**

La création du CD multimédia, support choisi pour la diffusion de l'atlas cartographique, s'est essentiellement faite à partir du logiciel Flash. Ce logiciel a permis de créer des animations multimédia, des boutons interactifs, de créer des liens permettant de naviguer facilement d'une carte à une autre...

Tout au long de mon stage, il m'a donc été possible de travailler sur de nombreux logiciels assez différents et très intéressants.

1.3. L' Action Thématique Interdépartementale « Évolution climatique et Santé »

L' Action Thématique Interdépartementale « Évolution climatique et Santé », coordonnée par Jean-François Trape, directeur de recherche à l' IRD (Unité de Recherche « paludologie afro tropicale »), réunit les départements « Sociétés et Santé » et « Milieux et Environnements » de l'IRD.

L'ATI est en quelque sorte l'objet de recherche en favorisant une réflexion interdisciplinaire et inter UR sur des thèmes communs et sur des terrains partagés.

1.3.1. L'institut de Recherche pour le Développement

L' Institut de Recherche pour le Développement, créé en 1944 (anciennement intitulé ORSTOM) est depuis 1984 un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), placé sous la tutelle des ministres chargés de la Recherche et des Affaires Étrangères. Depuis plus de soixante ans, l'Institut conduit des recherches sur les milieux intertropicaux qui sont devenues des références internationales.

L' IRD a pour vocation de développer des projets scientifiques centrés sur les relations entre l'homme et son environnement dans la zone intertropicale et méditerranéenne, dans la perspective d'un développement durable de ces régions.

Une étude de l'impact des changements climatiques sur les maladies à transmission vectorielle en Afrique de l'Ouest est menée par l' IRD dans le cadre de l' Action Thématique Interdépartementale « Évolution climatique et Santé ». Cette étude concerne la borréliose à tiques et le paludisme.

1.3.2. La borréliose à tiques

Le paludisme et la borréliose à tiques constituent les deux premières causes de morbidité par maladie vectorielle dans les régions de savane de l'Afrique subsaharienne. Elles constituent aussi les deux maladies tropicales dont l'épidémiologie a été le plus affectée ces dernières années par le changement climatique.

Les patients atteints de la borréliose souffrent de « fièvre récurrente », c'est-à-dire d'épisodes de fièvre espacés de quelques jours chacun. Les complications, parfois fatales, peuvent survenir à tout moment de l'évolution de la maladie.

Dans la plupart des cas, la borréliose, maladie oubliée ou peu connue, n'est pas diagnostiquée ; par conséquent, l'incidence réelle de cette maladie est mal connue et il est difficile d'en appréhender la fréquence, et sa mortalité réelle.

Il a été montré au Sénégal que la persistance du déficit pluviométrique depuis le début des années 1970 avait été associée à une extension considérable de la distribution géographique de la maladie et de la tique vectrice *Alectorobius sonrai*, espèce autrefois limitée aux régions sahariennes et sahéliennes et également signalée en zone méditerranéenne. Cette tique, qui vit habituellement dans les terriers des rongeurs et petits mammifères constituant le réservoir de la maladie, pique occasionnellement l'homme et lui transmet ainsi la borréliose. Au Sénégal, cette maladie est maintenant présente en zone de savane soudanienne et elle constitue désormais en zone rurale la seconde cause de consultation en dispensaire pour une maladie à transmission vectorielle.

L' *Alectorobius sonrai* appartient à la famille des *Argasidae*, qui se caractérise par l'absence de tégument sclérifié à tous les stades d'où son nom de « tique molle », et à la famille des *ornithodorinae*. Cette tique peut avoir une durée de vie pouvant atteindre plusieurs années.

Les populations d'*A. sonrai* sont plus abondantes en fin de saison des pluies (en septembre-octobre il y a en particulier plus de nymphes) ; les conditions climatiques doivent être plus favorables au développement des œufs à cette période et les hôtes rongeurs plus abondants.

Ces tiques se gorgent principalement de rongeurs ; cependant, on ne peut pas parler de spécificité d'hôte. En effet on la retrouve aussi dans des terriers de petits mammifères tels que le renard des sables et des expériences ont prouvé qu'elles pouvaient aussi se gorger sur

divers reptiles ; mais elle peut en outre s'adapter aux milieux anthropisés en s'installant dans des terriers de rongeurs domestiques et alors se gorger plutôt sur l'homme.

Les terriers de rongeurs permettent d'amortir les variations climatiques extérieures et créer un microclimat présentant des températures et une humidité relative suffisamment élevées et propices au développement de cette tique.

Aussi, cette tique est thermophile, elle préfère les températures chaudes et est bien adaptée aux milieux extrêmes désertiques.

Jusqu'à récemment, on considérait que la répartition géographique de la borréliose en Afrique de l'Ouest se limitait aux régions sahariennes et à la zone sahélienne, depuis la Mauritanie et le nord du Sénégal jusqu'au Tchad. L'ensemble des données recueillies depuis les premières études épidémiologiques dans les années 1930 indiquait la présence d'*A. sonrai* uniquement au nord du 14° parallèle, dans des régions où la pluviométrie moyenne était habituellement inférieure à 500 mm. Aucune localité de capture n'atteignait l'isohyète 750 mm qui était considérée comme la limite maximum d'extension du vecteur.

En 1989, à la suite de l'observation d'un cas de fièvre récurrente chez un enfant ayant voyagé dans une région du Sénégal où la borréliose était inconnue, une série d'enquêtes épidémiologiques a été entreprise dans ce pays.

Les résultats de ces études ont montré en zone soudanienne une extension considérable (nouvelle localité la plus au sud: 13°15'N, 13°12'W, soit plus d'un degré de latitude) de l'aire de répartition connue d'*A. sonrai* dans les terriers.

L'extension de la borréliose à tiques correspondait très exactement au déplacement vers le sud de l'isohyète 750 mm pendant cette période, suggérant que la persistance de la sécheresse, en permettant au vecteur de coloniser de nouveaux espaces en zone de savane soudanienne, était responsable de l'extension de cette endémie en Afrique de l'Ouest.

L'ATI « Évolution climatique et Santé » étudie donc les facteurs proximaux de répartition et d'abondance, notamment quelles sont les influences des modifications macroclimatiques.

Cette recherche vise en premier lieu à comprendre l'épidémiologie et la distribution géographique de la borréliose à tiques ; compte tenu des questions posées, la priorité est donnée au caractère multidisciplinaire de la recherche. Outre la climatologie, elle associera un grand nombre de disciplines : acarologie, mammalogie, bactériologie, écologie, géographie humaine, épidémiologie, génétique et biologique des populations.

Bien que les maladies à transmission vectorielle soient potentiellement susceptibles d'être affectées par les changements climatiques dans toutes les régions du monde, c'est dans les pays en développement de la ceinture tropicale du globe, et notamment en Afrique, que l'impact le plus grave en termes de santé publique est prévisible, ceci pour deux raisons :

- d'une part la faible capacité de ces pays à mobiliser rapidement et efficacement les ressources humaines et financières nécessaires au dépistage, à la surveillance et à la lutte contre ces maladies ;

- d'autre part les températures élevées de ces régions, qui assurent un fort potentiel épidémique à la plupart des maladies à transmission vectorielle dès qu'un déséquilibre écologique survient. Ainsi, des modifications modestes de certains facteurs climatiques (en particulier la pluviométrie moyenne) ou de la fréquence ou de l'amplitude d'événements extrêmes (en particulier sécheresse et pluies diluviennes) sont susceptibles d'occasionner des phénomènes épidémiques de grande ampleur.

1.4. La zone d'étude

La zone retenue pour cette étude couvre la Mauritanie, le Sénégal et la Gambie (fig. 4 p18), pour une superficie totale de 1 287 347 km² (1 080 000 km² pour la Mauritanie, 197 000 km² pour le Sénégal et 10 347 km² pour la Gambie). L'ensemble de ces trois pays est situé dans l'hémisphère Nord du continent africain, entre les latitudes 27°N et 12°N.

En Afrique de l'Ouest, du point de vue géographique, on distingue les deux grandes entités suivantes :

- Les pays du Sahel, au nombre de neuf : le Burkina Faso, le Cap-Vert, la Gambie, la Guinée-Bissau, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Sénégal, et le Tchad.
- Les pays du Golfe de Guinée, au nombre de huit : le Bénin, la Côte d'Ivoire, le Ghana, la Guinée, le Libéria, le Nigeria, la Sierra Leone et le Togo.

1.5. Le climat de l'Afrique de l'Ouest

En Afrique de l'Ouest, les régions climatiques sont surtout fonction de la pluviométrie annuelle, qui varie d'environ 50 mm au nord à plus de 2000 mm au sud, avec des isohyètes orientées Ouest-Est. La température moyenne annuelle varie entre 25 et 30°C.

En Afrique de l'Ouest, il existe deux différentes masses d'air :

- la première humide : la mousson
- la seconde sèche : les alizés qui sont de deux types, un continental (aussi appelé « Harmattan ») et un maritime.

1.5.1. Les alizés

Les alizés sont des vents d'est de basses latitudes, lents et constants, dont la circulation est entièrement comprise dans le même hémisphère géographique. Ils soufflent toute l'année dans la zone intertropicale du à la quasi permanence des anticyclones sur les régions subtropicales et de basses pressions sur les régions équatoriales. Dans l'hémisphère nord, les alizés soufflent du nord-est en direction du sud-ouest ; dans l'hémisphère sud, ils prennent une direction sud-est vers le nord-ouest.

L'alizé maritime provient d'un anticyclone océanique. En Afrique occidentale, les alizés maritimes proviennent de l'anticyclone de Sainte-Hélène ; l'alizé continental ou Harmattan, lui, est issu de l'anticyclone saharo-méditerranéen. L'air polaire initial de l'Harmattan se tropicalise et il devient instable en survolant le Sahara, c'est un vent chaud et sec.

L'Afrique et la Zone d'étude

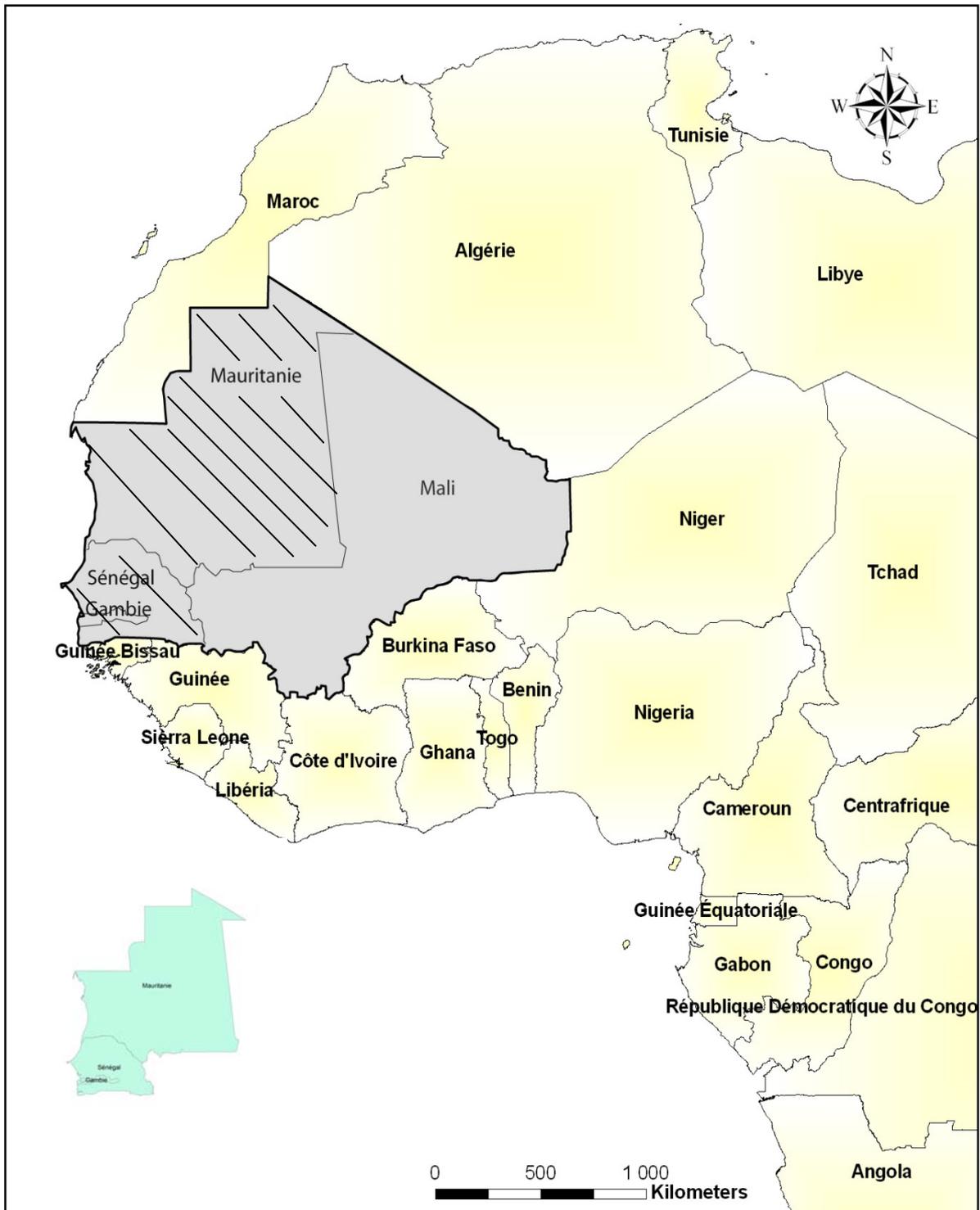


Figure 4 : Localisation de la zone d'étude - Partie hachurée : Mauritanie, Sénégal, Gambie

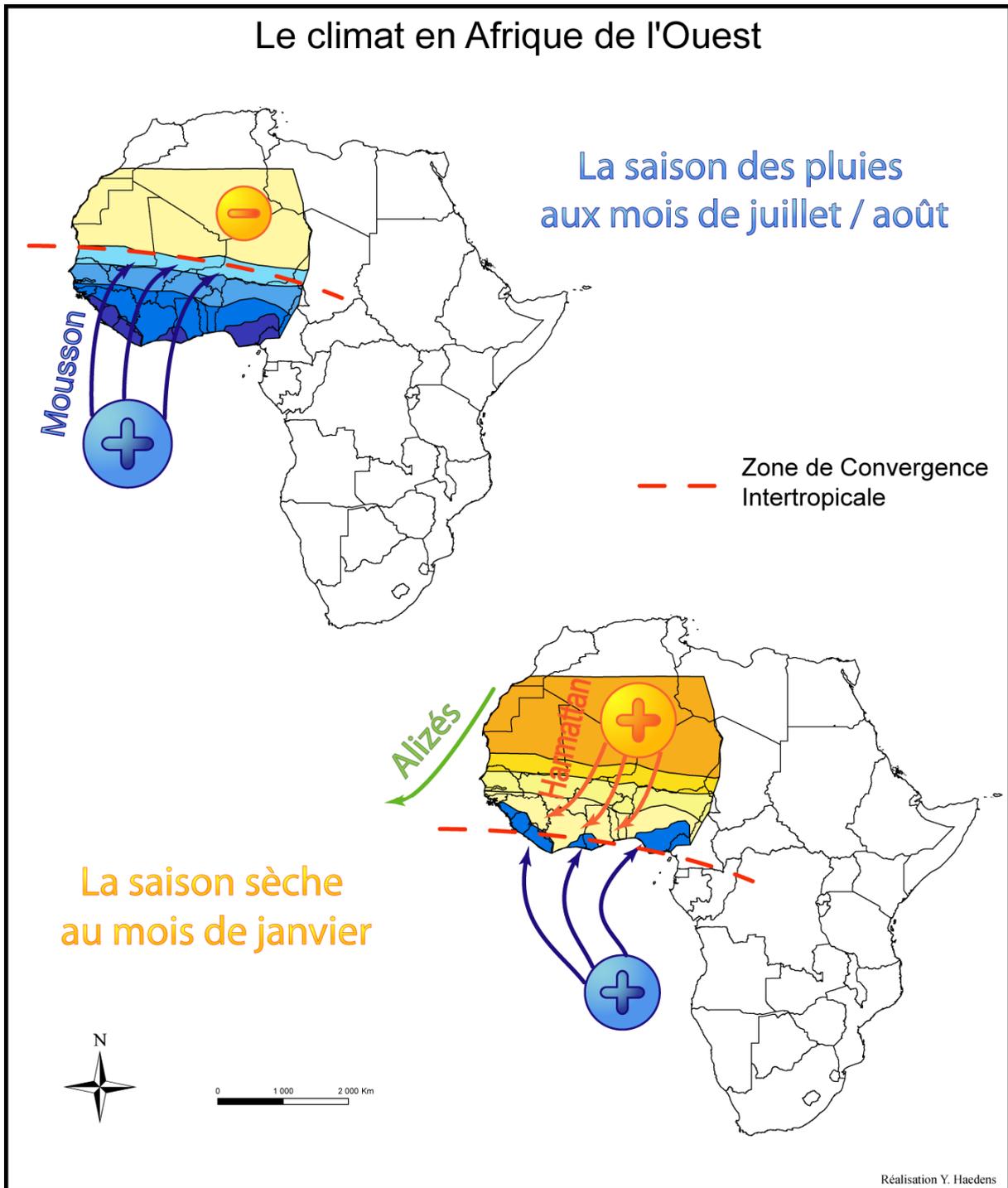
1.5.2. La mousson

La pénétration progressive de l'alizé dans l'hémisphère opposé provoque une déviation du flux de l'est en mousson. Une mousson est donc le prolongement dans un hémisphère d'un alizé issu d'un anticyclone de l'autre hémisphère. La transformation d'un alizé en mousson modifie la direction mais ne change pas dans l'immédiat les caractères thermiques et hydriques du flux. Ceci a pour conséquence le transfert d'humidité océanique vers l'intérieur des terres.

En Afrique de l'Ouest, où le continent est opposé à l'Atlantique sud, le processus zénithal n'est respecté qu'en été boréal : la mousson atlantique remonte vers les dépressions sahariennes. Ce flux est permanent sur le sud de l'Afrique de l'Ouest. Sur le continent, la mousson devient un flux peu épais, qui se réchauffe et se dessèche devenant inapte à provoquer des pluies (Ardoin-Bardin).

1.5.3. La Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT)

En Afrique de l'Ouest, la pluviométrie, facteur déterminant du climat, est liée au mouvement nord-sud de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) qui est la zone de rencontre entre masses d'air humide austral et masse d'air sec septentrional. C'est cette confrontation entre ces deux masses d'air qui engendre les précipitations. La migration de la ZCIT dépend du mouvement zénithal du soleil. Elle atteint sa position la plus septentrionale en août (vers 20°N), ce qui correspond à la période où la pluviométrie maximale est enregistrée dans la région sahélienne. En hiver, le déplacement de la ZCIT se fait vers le sud, pour atteindre sa position méridionale vers 5°N, c'est le début de la saison sèche au Sahel (Ardoin-Bardin).



**Figure 5 : Schématisation et explication du climat en Afrique de l'Ouest
(D'après Atlas Jeune Afrique et Estienne P., Godard A., 1992)**

1.5.4. Les différentes zones climatiques en Afrique de l'Ouest

On pourrait diviser l'Afrique de l'Ouest en différentes zones climatiques en fonction du facteur pluviométrique. Il est cependant difficile de délimiter précisément ces zones, les auteurs définissant généralement chacune de ces zones de façon différentes. Néanmoins, on pourrait définir grossièrement plusieurs zones climatiques :

- la **zone désertique saharienne** qui enregistre des valeurs inférieures à 150 mm de pluie par an en moyenne,
- la **zone sahélienne aride** qui enregistre des valeurs de précipitations moyennes entre 150 et 400 mm par an,
- la **zone soudano-sahélienne** qui enregistre des totaux annuels moyens entre 400 et 700 mm,
- la **zone soudanienne** qui enregistre entre 700 et 1100 mm de pluie par an,
- la **zone guinéenne humide** où la pluviométrie annuelle est supérieure à 1100 mm.

Dans les zones arides, semi-arides, et sub-humides, la période pluvieuse est concentrée sur une seule saison de deux à cinq mois contrairement aux pays du Golfe de Guinée qui ont deux saisons des pluies.

2. La constitution des jeux de données

2.1. La Base de Données

Dès la création en 1943 du Service hydrologique de l'ORSTOM (devenu l'IRD), les chercheurs et les techniciens se sont attachés à collecter les relevés journaliers de l'ensemble des stations météorologiques et pluviométriques des Etats d'Afrique occidentale et centrale (Mahé *et al.*, 2001).

SIEREM (Système d'Information Environnementale sur les Ressources en Eau et leur Modélisation) est le produit des recherches et des développements de l'équipe VAHYNE de

l'UMR HydroSciences Montpellier. C'est un Système d'Information Géographique qui gère les données hydro-climatiques et environnementales récoltées par l'IRD, constituant une Base de Données impressionnante.

La Base de Données SIEREM comprend :

- Données météo : 27412 années pour 342 postes.
- Données de pluie : 70651 années pour 2737 postes.
- Données de débit: 19749 années pour 891 stations.

2.2. L'extraction des données à partir d'Orion

La première étape de mon travail consistait à extraire les données qui allaient servir à réaliser les cartes de pluviométrie pour cette zone d'étude. L'extraction des données s'est faite à l'aide du logiciel Orion qui permet de questionner la base de données SIEREM.

Les données que l'on décide d'extraire sont stockées dans des « paniers », il est possible de créer et nommer plusieurs paniers différents (fig. 6). Dans mon cas, trois paniers ont été créés, correspondant aux trois pays correspondant à la zone d'étude : un pour le Sénégal, un pour la Mauritanie, et un pour la Gambie.

Nom du pays	Identifiant	Superficie en Km ²
NAMIBIA	NA	824269
NIGER	NE	1267000
NIGERIA	NG	923768
RWANDA	RW	26338
SAO TOME AND PRINCIPE	ST	965
SENEGAL	SN	196722
SEYCHELLES	SC	454
SIERRA LEONE	SL	72325

Nom du panier	Nombre de séries du panier
Mauritanie pmm/an	108
Senegal pmm/an	724
Utilisé lors de la visualisation sans panier	9

Longitude et latitude par degré décimaux , ou , suivant votre configuration

Point 1 : Longitude : [0] Latitude : [0]

Point 2 : Longitude : [0] Latitude : [0]

Rechercher les Stations

Sélection de la carte

- Carte des bassins sans degré
- Carte des bassins avec degré
- Carte des bassins avec isohyètes
- Carte générale Afrique et Europe

Figure 6 : La création des paniers sur le logiciel Orion

Après avoir créé les paniers, Orion propose de sélectionner les types de données que nous voulons garder parmi la Base de Données (fig. 7). Pour les pluies en mm, il suffit ensuite de sélectionner le pas de temps pour lesquels on veut extraire ces données de pluies (journalier, décadaire, et mensuel). Nous avons décidé de retenir les séries ayant un pas de temps journalier et mensuel. Enfin Orion nous demande de choisir quelles sources vont être utilisées pour constituer les paniers.

Les séries sont affichées dans une nouvelle fenêtre (fig. 8), et sont alors exportables en fichiers textes sous la forme de listes ou en format X, Y, Z sur des fichiers exploitables sous Excel. Il est possible de faire de nouveaux changements en effaçant certaines séries si on le désire, ces séries pouvant être rajoutées dans les paniers ultérieurement, si nécessaire.

Nombre de stations sélectionnées : <input type="text" value="290"/> Nombre de séries sélectionnées : <input type="text" value="1632"/>	Info sur le panier choisi : Nom du panier : <input type="text" value="Senegal pmm/an"/> Nombre de séries dans le panier : <input type="text" value="724"/>
Sélectionnez les types de résultats que vous voulez garder :	
<input type="checkbox"/> Température (moyenne) en : degrés celsius : 12 séries se moyennant <input type="checkbox"/> Humidité relative moyenne en : % : 13 séries se moyennant <input type="checkbox"/> Humidité relative minimum en : % : 13 séries se moyennant <input type="checkbox"/> Humidité relative maximum en : % : 13 séries se moyennant <input checked="" type="checkbox"/> Pluie en : mm : 1435 séries se cumulant <input type="checkbox"/> Température maximum moyenne en : degrés celsius : 22 séries se moyennant <input type="checkbox"/> Température minimum moyenne en : degrés celsius : 22 séries se moyennant <input type="checkbox"/> Température moyenne (max+min) /2 en : degrés celsius : 22 séries se moyennant	
<input type="button" value="Valider les types"/> <input type="button" value="RETOUR"/>	
Sélectionnez les pas de temps que vous voulez garder :	
<input checked="" type="checkbox"/> Decadaire : 26 séries <input checked="" type="checkbox"/> Journalier : 729 séries <input checked="" type="checkbox"/> Mensuel : 877 séries	
<input type="button" value="Valider les pas de temps"/> <input type="button" value="Retour étape précédente"/>	
Sélectionnez les sources que vous voulez garder :	
<input checked="" type="checkbox"/> AGENCE POUR LA SÉCURITÉ DE LA NAVIGATION AÉRIENNE EN AFRIQUE ET À MADAGASCAR. CONTACT : inconnu : 118 séries <input checked="" type="checkbox"/> données transmises par Abou Amani CONTACT : Abou Amani : 4 séries <input checked="" type="checkbox"/> données transmises par Bonaventure Somé CONTACT : Bonaventure Somé : 42 séries <input checked="" type="checkbox"/> données transmises par Jean-Emmanuel PATUREL CONTACT : PATUREL : 11 séries <input checked="" type="checkbox"/> données transmises par le SGPPE CONTACT : Astou Fall Faye : 1 séries <input checked="" type="checkbox"/> Données AGRHYMET fournies par MAHE CONTACT : MAHE Gil : 26 séries <input checked="" type="checkbox"/> Données banque Pluviom (livres blancs CIEH) ou banque Hydrom CONTACT : Nathalie : 471 séries <input checked="" type="checkbox"/> Données Crusc complétées par les hydrologues Orstom CONTACT : Nathalie : 51 séries	
<input type="button" value="Valider et visualiser"/> <input type="button" value="Retour étape précédente"/>	

Figure 7 : Le choix des données à extraire de la Base de Données avec le logiciel Orion

Une extraction des données est possible en X, Y, Z (longitude, latitude, valeurs). Dans ce cas, le pas de temps de l'extraction doit être choisi (mois, années). Orion propose différents choix de gestion des lacunes (par exemple lorsqu'une donnée de pluie mensuelle est manquante dans une année donnée). On peut ignorer ces lacunes, les remplacer par une valeur qui va nous permettre de les repérer dans les fichiers textes, ou alors les calculer (les valeurs recalculées seront alors mises entre parenthèses dans les fichiers issus de l'extraction). Il faut ensuite paramétrer la date de début de l'exportation du panier ainsi que la date de fin.

Nous avons décidé d'extraire les données en format X, Y, Z. Agnès Cres a alors utilisé un petit outil permettant de synthétiser l'information au niveau mensuel sur les stations, en permettant de n'avoir qu'une seule série pour chaque station ; alors que sinon, après l'extraction des données par Orion, on se retrouvait avec x séries par stations (même pour un même pas de temps), et on ne savait pas laquelle garder.

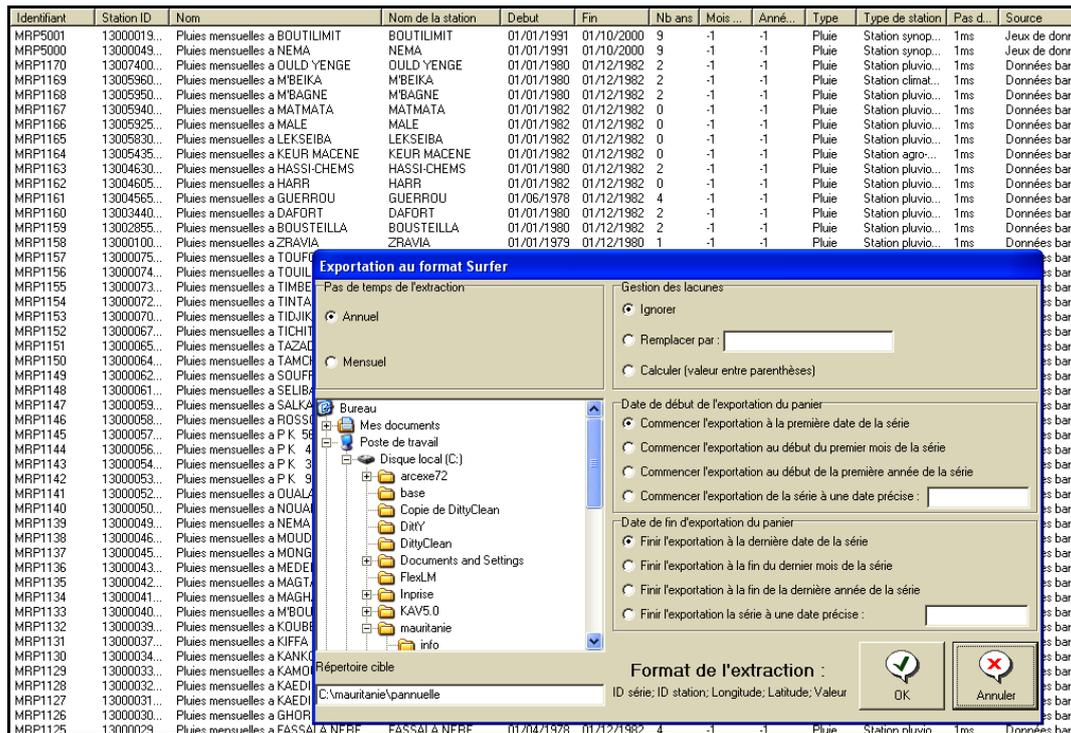


Figure 8 : L'exportation des séries en fichier texte à partir d' Orion

Concernant les sources à retenir en priorité, après discussion avec Claudine Dieulin et Agnès Cres, il a été convenu de retenir dans l'ordre les séries ayant comme source « Borréliose » tout d'abord (ce sont, pour la zone d'étude, des données récoltées pour les années suivant 1980 par Jean-François Trape sur la Mauritanie), et de les compléter ensuite avec les « données pluviométriques du Livre Blanc du CIEH », les données du « Climate Research Unit » (CRU), et enfin avec les données Agrhymet (« AGR4 » et « AGR2 ») ; les trois premières sources fournissant la quasi-totalité de notre jeu de données.

Pour que l'étape de spatialisation soit significative il a été nécessaire ensuite d'extraire sur Orion les données de pluies concernant toutes les stations situées dans une zone que nous avons délimité, pour les pays voisins. Par conséquent, pour le Maroc, l'Algérie, le Sahara Occidental, le Mali, la Guinée, le Burkina Faso, et la Guinée-Bissau, les stations retenues pour cette étude ont été tout d'abord (la zone d'étude a été légèrement raccourcie quelques jours plus tard, lors du tri des données sur les fichiers Excel) celles situées :

- Pour la longitude : entre -18° Ouest et - 4° Ouest
- Pour la latitude : entre 29° Nord et 12° Nord

2.3. L'optimisation de la qualité des jeux de données

La mise en forme des jeux de données et la critique de ces données se sont révélés être une étape minutieuse et relativement longue. Ce fut une des étapes les plus importantes de ce stage, dans la mesure où la valeur des cartes que nous allions produire reposait fortement sur la qualité des données qui allaient servir à leur réalisation. La qualité des jeux de données est primordiale dans la réalisation d'une carte, c'est pour cela qu'il a été décidé sans hésitation de consacrer un temps suffisamment important au tri et à la critique de ces données, de façon à ce que la qualité de celles-ci soit la meilleure possible. Il a été parfois impossible de vérifier la pertinence de certaines données, mais dans le doute certaines stations ayant des valeurs plutôt « douteuses » étaient quelquefois enlevées du jeu de données, ceci dans le but de ne pas fausser l'interpolation lors de la spatialisation des données et donc la réalisation des cartes. Ces choix de suppression de certaines stations se sont généralement réglés au « cas par cas » en observant les valeurs sur chaque année pour chaque station.

La première carte que j'ai pu réaliser est une carte de pluviométrie pour 1947, avant cette date, les données ne sont pas assez denses (voire quasi inexistantes) pour obtenir une bonne spatialisation, les stations ayant des données de pluies sont trop peu nombreuses ou alors mal réparties sur la carte.

2.3.1. Les différentes étapes pour le tri des données

Ce tri des données et ce « nettoyage » des jeux de données ont nécessité de nombreuses semaines, et il a fallu passer par de nombreuses procédures grâce au logiciel Excel. En effet, les premières manipulations pouvaient être réalisées tout de suite sur les fichiers .txt de pluies annuelles (un fichier pour chaque année). D'autres, elles, nécessitaient la production des premières cartes, pour ainsi observer sur celles-ci de possibles anomalies dues à des données douteuses, ou d'autres problèmes qui n'étaient pas « détectables à l'œil » sur les fichiers de données.

2.3.1.1. Les données de pluies annuelles

Les premières étapes concernant la mise en forme des jeux de données de pluies annuelles, effectuées avec le logiciel Excel, ont été tout d'abord, pour chaque fichier texte :

- Intituler les différents champs en créant une ligne contenant « code_station », « pays », « nom_station », « latitude », « longitude », p01, p02, p03, p04, p05, p06, p07, p08, p09, p10, p11, p12, pour les 12 mois de l'année, et enfin « pa » pour les pluies annuelles. Sans ces champs, le logiciel ArcMap n'ouvre pas les fichiers texte.
- Faire un tri sur les colonnes latitude et longitude pour garder les stations qui nous intéressent, c'est à dire situées entre -18° et -4° en longitude, 11° et 28° en latitude. En effet, lors de l'extraction des données avec le logiciel Orion, les stations retenues avaient été celles situées entre -19° et -4° pour la longitude et entre 11° et 29° pour la latitude, il a donc fallu retirer quelques stations des fichiers Excel.
- Calculer les pluies annuelles (la colonne « pa ») en faisant la somme des précipitations des 12 mois de l'année en question.
- Trier la colonne « pa » ; toutes les stations ayant un total de précipitations égal à -12 (une lacune est représentée par -1 sur Excel) peuvent être retirées des fichiers.
On peut aussi enlever les stations pour lesquelles les totaux sont égaux à $-11, -10, -9$.
- Retirer ensuite les stations pour lesquelles les données sont manquantes pour les mois pluvieux (juin, juillet, août, septembre), en faisant là aussi un tri pour chaque mois pluvieux, l'un après l'autre. On va aussi enlever les stations ayant une lacune (donnée de pluie manquante) pour les mois de mai et octobre, lorsqu'elles se situent au Sénégal, Gambie, Guinée, Guinée Bissau, Burkina Faso ou Mali, car des pluies significatives peuvent se produire ces mois-ci dans ces pays.
- Changer les valeurs -1 en 0 (grâce à l'outil « *remplacer par* » dans Excel), après avoir pris soin de ne sélectionner que les colonnes de pluies (sans sélectionner les colonnes longitude et latitude bien sûr).

- Ensuite il faut effectuer un « *copier* » sur la colonne « pa » puis un « *collage spécial* » sur une nouvelle colonne en prenant l’option « *valeurs* » pour le collage spécial, sinon ArcMap ne comprend pas les formules comme la « *somme* ».
- Trier les stations par « code-station ».
- Enregistrer enfin les fichiers en .txt, ceci nous permettra de les ouvrir sur ArcMap sous forme de « shape ».

2.3.1.2. *Les données de pluies mensuelles moyennes*

Pour les pluies mensuelles, il s’agissait de moyennes à calculer pour différentes périodes. Il fallait donc créer 12 fichiers Excel pour chaque période, ces fichiers représentent, pour chacun des 12 mois de l’année, les moyennes de précipitations de chaque station.

On fait d’abord un tri pour garder les stations situées dans la zone d’étude, il reste 627 stations. On va donc tout le temps travailler sur ces 627 stations.

Seulement, il fallait aussi gérer un autre paramètre qui compliquait fortement les choses : le nombre de lacunes pour chaque mois. En effet, pour chaque stations il fallait calculer la pluviométrie moyenne pour la période concernée, il fallait donc faire un somme des pluies de chaque année pour un mois, mais il existait des lacunes pour certaines années.

Prenons un exemple : on veut calculer pour la période 1947-1969 la pluviométrie moyenne d’une station, pour le mois de janvier. Pour chaque mois, il existe donc pour cette station 23 années de pluies à ajouter ; or dans ces 23 années de pluies, un certain nombre d’années sont des « lacunes » (années sans donnée de pluie). La moyenne mensuelle est donc égale à la somme des 23 années de pluies, divisée par le nombre d’années moins le nombre de lacunes (23 – lacunes).

Aussi, il fallait déterminer une limite pour les lacunes, une fois cette limite dépassée, je considérais que la moyenne de cette station n’était plus significative. J’ai fixé une limite de 5 lacunes, une fois qu’une station dépassait le nombre de 5 lacunes pour le mois traité, je supprimais cette station (pour cette période 47-69, il fallait donc au moins 18 années de données pour que la station soit gardée dans le jeu de données, sinon elle était supprimée).

La constitution des jeux de données pour les pluies mensuelles moyenne fut difficile car il fallait penser à beaucoup de paramètres en même temps en essayant de ne rien oublier (Annexe 2).

Pour les pluies annuelles, il était nécessaire d'effectuer toutes ces étapes sur chaque fichier texte de chaque année, ce qui aurait pris un temps beaucoup trop important. Comme il s'agissait des mêmes traitements pour tous les fichiers textes, il a été possible d'utiliser les macros grâce au logiciel Excel et son outil Visual Basic Editor. En ce qui concerne les pluies mensuelles moyennes, les macros servaient aussi à créer de nouveaux fichiers Excel en allant piocher des données dans les autres classeurs et en calculant des moyennes, en faisant des compteurs de lacunes, etc.

Le langage de programmation pour écrire les macros est Visual Basic (VBA).

2.3.2. Les macros Excel en VBA

Visual Basic (VBA) est un langage de programmation orienté objet. Il est commun à toutes les applications de la suite Microsoft Office (Word, Access, Excel, Outlook, FrontPage et PowerPoint). « VBA » Excel est une extension très puissante d'Excel, puisqu'elle ouvre la porte à des macros « hors Excel », où l'on peut écrire ses propres algorithmes, Excel servant alors d'interface utilisateur à travers notamment les cellules d'une feuille de calcul et les graphiques. Les macros m'ont permis d'effectuer les mêmes traitements sur chacun des fichiers textes que j'avais préalablement sélectionnés.

Ne connaissant pas le langage de programmation Visual Basic, ni la fonction « macro » du logiciel Excel, Agnès Cres m'a beaucoup aidé à comprendre comment cela fonctionnait, notamment grâce à des exemples imprimés sur papier lors de précédents travaux qu'elle avait réalisés sur des jeux de données. Apprendre à utiliser les macros sous Excel n'était pas simple et m'a nécessité un long moment d'adaptation avant d'en comprendre le fonctionnement, il m'a fallu parfois plusieurs jours pour arriver à réaliser correctement ce que je voulais faire. Au départ, j'avais plutôt le sentiment de perdre du temps, vu la difficulté à comprendre le langage Visual Basic sans avoir eu de formation précédemment, et à l'appliquer correctement

sous forme de macro Excel ; mais au fil du temps je me suis vraiment rendu compte de l'apport que pouvait amener les macros dans mon travail.

Durant mon stage, François-Noël Cres, Maître de conférences à Polytech' Montpellier, suite à l'aide qu'il me donnait régulièrement pour la réalisation des macros Excel, m'a gentiment proposé ainsi qu'à deux autres personnes intéressées par l'apprentissage du langage de programmation Visual Basic, de suivre une formation de quelques heures chaque semaine. Cette formation fut très enrichissante, aussi bien au point de vue de l'aide qu'elle allait m'apporter tout au long de ce stage, mais aussi bien entendu de me permettre d'apprendre un langage de programmation très intéressant que je ne connaissais pas auparavant. Cette formation sur VBA durait généralement deux heures par semaine et nous devions faire de petits exercices que nous corrigions ensemble lors de la séance suivante, ceci permettant un suivi constant et une réflexion individuelle hors des heures de la formation.

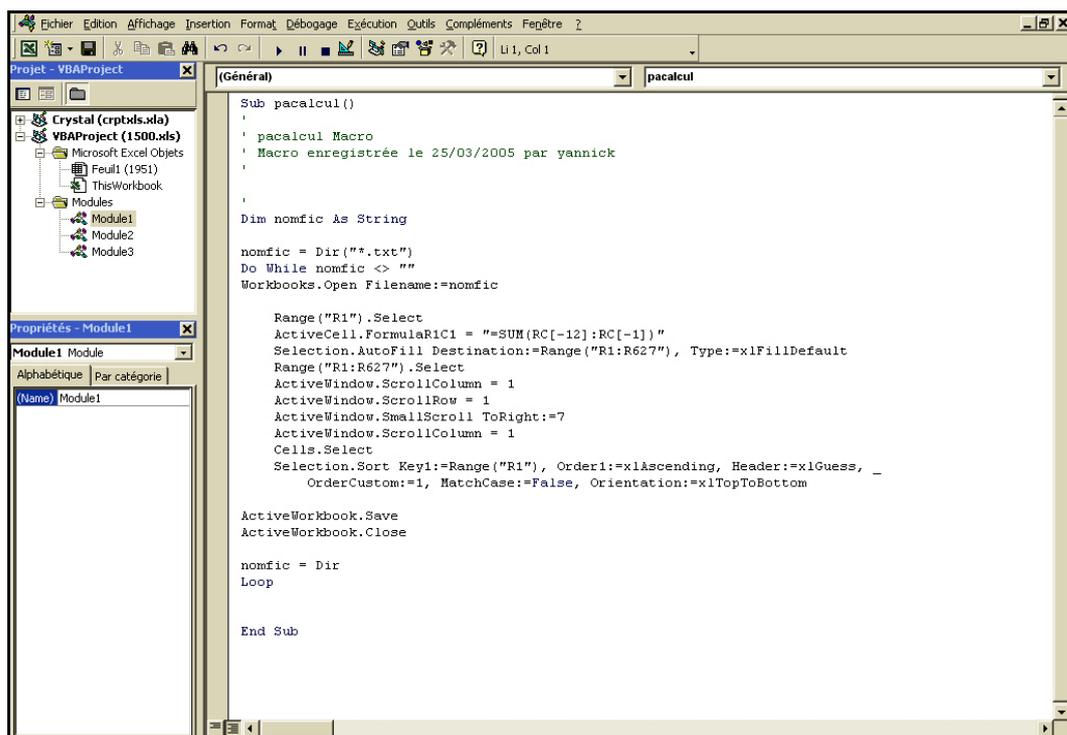


Figure 9 : L'outil Visual Basic Editor du logiciel Excel

Pour réaliser les opérations voulues sur les fichiers textes grâce aux macros, il fallait que ces fichiers soient tous situés dans le même dossier sous Windows. Il suffisait ensuite de

cibler le dossier sur lequel on voulait que la macro soit exécutée, l'opération était effectuée sur tous les fichiers textes contenus dans ce dossier.

Un nouveau dossier était créé régulièrement, contenant des copies des fichiers .txt de données de pluies, pour pouvoir réaliser des tests ou pour pouvoir avancer étape par étape sans prendre le risque d'avoir à reprendre toutes les opérations en cas d'erreur dans la macro.

Ces macros m'ont apporté un gain de temps considérable dans la mesure où de nombreuses opérations devaient être effectuées parfois sur plusieurs dizaines de fichiers (sur chaque fichier de pluies annuelles par exemple) ; aussi il était parfois nécessaire de tout reprendre au point de départ lorsque je me rendais compte plus tard que certaines erreurs avaient pu être commises dans les fichiers de données de pluies, dans ce cas la macro (enregistrée dans un « module » sous Visual Basic Editor) me permettait de reprendre l'opération très rapidement.

2.3.3. La critique des données

La critique de données n'était possible que seulement après avoir réalisé les premières interpolations avec ArcInfo, en effet beaucoup d'erreurs et d'incohérences n'étaient pas visibles sur les fichiers de données sous Excel. Il y eu dans un premier temps des « doublons » de stations détectées par ArcInfo, qui étaient en fait des stations différentes mais avec les mêmes coordonnées, qu'il a fallu corriger.

C'est surtout lors de la visualisation des grilles de pluies créées par ArcInfo et de l'observation des isolignes sur chaque carte que je pouvais m'apercevoir que certaines données de pluies pour quelques stations semblaient discutables.

2.3.3.1. Les doublons supprimés par ArcInfo

Lorsque que je lançais les interpolations sous ArcInfo, il arrivait généralement que des messages d'erreur apparaissent lors de la création de chaque grille de pluie pour chaque année, comme par exemple :

```
" duplicated point( 57 -8.033 12.633) is deleted"
```

Ce message apparaissait pour quelques points lors de chaque création de grille de pluie. L'interpolation allait jusqu'à son terme mais apparemment il existait un problème pour certaines stations qui étaient considérées comme des doublons et qui étaient supprimées par ArcInfo.

En observant ces stations sur les fichiers de pluies originaux, je me suis rendu compte qu'il s'agissait de stations ayant des coordonnées identiques, mais ces stations étaient bien distinctes (les données de pluies étaient bien différentes pour ces stations), le problème venait probablement de la proximité de celles-ci les unes avec les autres, et Orion ne permettait pas d'obtenir des coordonnées plus précises. J'ai tout d'abord vérifié si les corrections pouvaient se faire grâce au « Getty Thesaurus of Geographic Names » mais ceci ne m'a pas apporté plus de précisions.

Après en avoir parlé avec Claudine Dieulin et Agnès Cres, le choix a été de modifier légèrement les coordonnées de certaines stations (on change la valeur de la longitude de 0.0001) sous Excel pour éviter leur suppression (Annexe 3). Là encore j'ai utilisé une macro de manière à ce que l'opération s'effectue sur tous les fichiers textes. Une fois les changements sur les coordonnées réalisés, il fallait reprendre pratiquement toutes les étapes à partir de la création des fichiers Shape sous ArcMap(cf. 2.3.1. p 26).

J'ai décidé de travailler en groupant les années à traiter par lot de 10 années. Les macros tournent ainsi plus rapidement, et en cas de problème, nécessitant la modification de la macro et le retraitement des années du dossier courant, il était plus rapide de relancer les processus sur ces dossiers plus restreints (par rapport à la totalité des données à traiter).

2.3.3.2. *Les données de pluies discutables*

Une fois les grilles de pluies et les fichiers « isolignes » créés par ArcInfo, il fallait les visualiser sur ArcMap pour vérifier si aucune anomalie n'apparaissait sur les cartes. Deux méthodes étaient possibles pour détecter les valeurs de pluies discutables :

- A l'aide des grilles de pluies :

Il est possible de distinguer des anomalies dans les valeurs de pluies sur les grilles créées par ArcInfo, par rapport à la valeur de chaque pixel. La valeur de pluie pour chaque pixel était calculée de façon différente suivant la méthode de spatialisation appliquée. Plus une valeur est

élevée, plus la teinte de la cellule va tendre vers le blanc ; et inversement plus une valeur sera faible, plus la teinte de la cellule tendra vers les foncés.

Les anomalies sont visibles lorsque :

- Une cellule ayant une teinte très claire se trouve dans une zone sombre. Cela indique qu'une station ayant un total de pluies beaucoup plus élevé que les autres stations se situant autour de celle-ci se trouve dans cette cellule.
- Une cellule ayant une teinte très foncée se trouve dans une zone claire ; alors une station ayant un total de pluies beaucoup plus faible se trouve dans cette cellule.

Avec l'option « *identifiant* » d'ArcMap, en cliquant sur les stations se trouvant dans ces cellules, un certain nombre d'informations sur ces stations s'affichent dans une nouvelle fenêtre (le nom de la station, ses coordonnées, les totaux mensuels ainsi que le total annuel de pmm...). En observant ces informations, il est très simple de distinguer quelle station possède des données discutables.

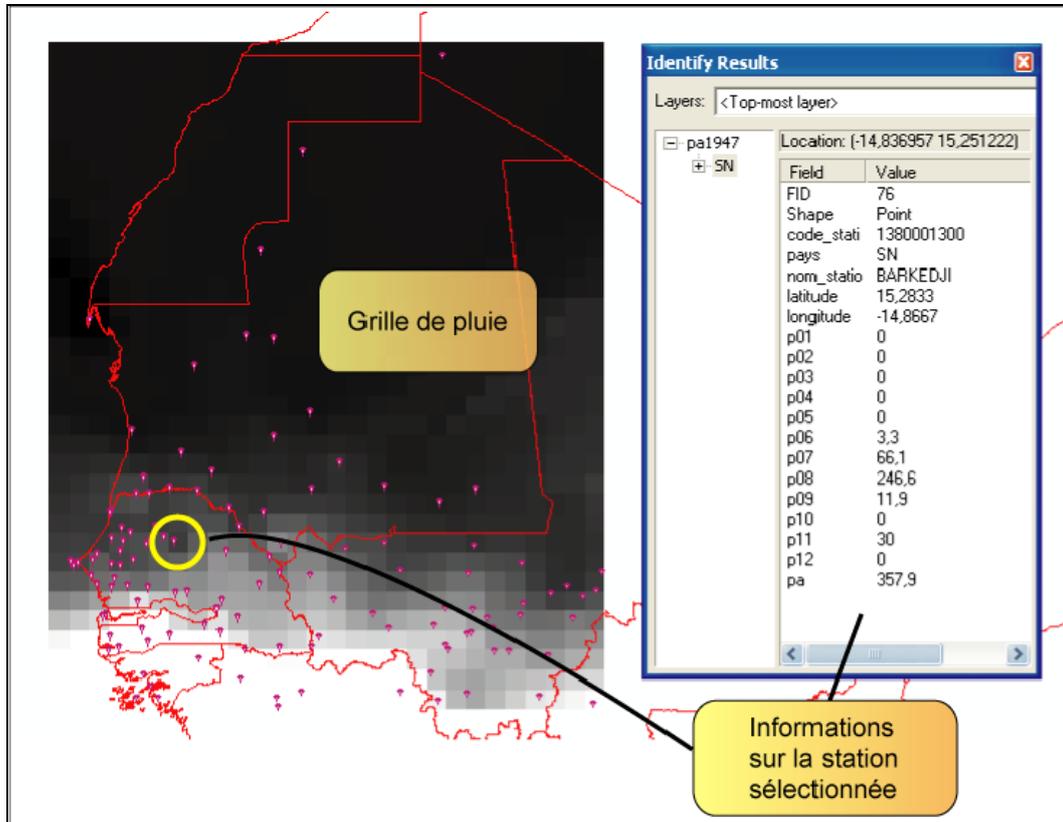


Figure 10 : Le repérage des données douteuses grâce aux grilles de pluies créées par ArcInfo

- A l'aide des isohyètes :

Il était aussi possible de distinguer des anomalies en observant les isohyètes pour chaque année, sous ArcMap. Lorsqu'une valeur était fortement différente de celle des autres stations environnantes, on avait un effet « toile d'araignée » autour de cette valeur, avec des isohyètes très resserrées.

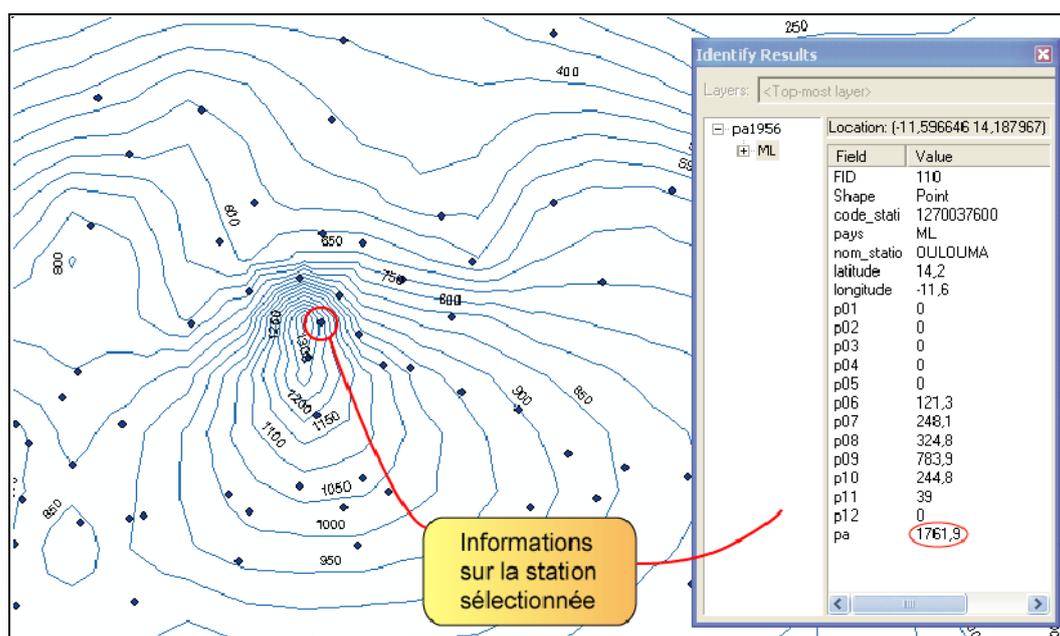


Figure 11 : Le repérage des données douteuses grâce aux isolignes créées par ArcInfo

La difficulté était, une fois avoir noté toutes les stations ayant des valeurs se distinguant de celles des autres stations situées aux alentours de celles-ci, de choisir s'il fallait les supprimer ou les garder dans le jeu de donnée. Cette réflexion devait se faire au cas par cas, pour chacune des stations concernées. Cette étape fut longue et minutieuse, dans la mesure où il existait des difficultés avec certaines stations, et ce pour chaque année. (Annexe 4)

Avec Claudine Dieulin, il a tout de même été décidé de supprimer les stations situées au Mali, en Guinée et en Guinée Bissau pour lesquelles il y avait des valeurs de pluies causant un îlot, sauf si elles étaient **la station** qui pouvait servir en bordure de spatialisation.

Dans certains cas, je vérifiais également grâce au Modèle Numérique de Terrain (MNT SRTM30 de l'USGS) si les stations concernées se trouvaient dans une zone de relief qui aurait pu expliquer des taux de précipitations supérieurs aux autres stations environnantes.

2.3.3.3. *Le cas des pluies annuelles de 1980 à 1991*

Les données de pluies annuelles de 1980 à 1981 ont été traitées plus tardivement au cours de mon stage. En effet, nous étions en attente de ces données qui devaient être récoltées au Sénégal, mais celles-ci ne sont arrivées que tardivement, après un réel effort de la part de Gil Mahé et Sandra Ardoin pour se les procurer à temps.

En revanche, ce jeu de données a été traité de façon encore plus fine que les jeux de données précédemment traités. J'ai en effet aussi supprimé les stations du Sénégal, Guinée, Guinée Bissau, Gambie, et Burkina Faso qui possédaient des données de pluies égales à 0 dans un des mois pluvieux, (mois de juillet, août et septembre, pas pour le mois de juin) ; ceci dans le but d'éliminer des stations qui auraient des données de pluies douteuses. En consultant les livres blancs du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), je m'étais rendu compte qu'il était impossible de ne pas avoir de précipitations pendant les mois pluvieux pour ces pays ; en revanche, pour le Mali, des valeurs nulles étaient possibles à une certaine latitude.

J'ai donc tout d'abord trié les stations dans les fichiers Excel par latitude pour isoler les stations maliennes comprises entre les latitudes 15.3°N et 16.3°N dans un nouveau fichier Excel, les pmm égales à 0 dans un des mois pluvieux dans cette zone étant rares, mais possibles. J'ai ensuite lancé une macro pour supprimer les stations possédant des valeurs égales à 0 pour les mois pluvieux dans les pays cités précédemment ; puis j'ai réinséré dans ces nouveaux fichiers les stations que j'avais mise de côté avant de lancer cette macro. Pour cette période j'ai également supprimé un certain nombre d'autres stations ayant des données douteuses, en observant les grilles de pluies et les isohyètes (Annexe 4).

2.4. Le choix de la méthode de spatialisation

Une des étapes les plus importantes a été de déterminer quelle méthode de spatialisation allait apporter les meilleurs résultats pour notre étude.

La spatialisation est réalisée à partir du logiciel ArcInfo. Il existe de nombreux choix de méthodes de spatialisation à partir de ce logiciel.

Les différentes méthodes de spatialisation sont les suivantes :

- Krigeage :

Il existe plusieurs méthodes de spatialisation pour le Krigeage :

- Sphérique : avec un modèle de semi variogramme sphérique. C'est la méthode par défaut.
 - Circulaire : modèle de semi-variogramme circulaire.
 - Exponentielle : modèle de semi-variogramme exponentiel.
 - Gaussienne : modèle de semi-variogramme avec une distribution normale ou Gaussienne.
 - Linéaire : modèle de semi-variogramme linéaire.
 - Universal1, Universal2.
- Inverse Distance Pondérée (IDW).
 - Spline.
 - Trend.
 - Thiessen.

Pour chacune de ces méthodes il est ensuite possible de jouer sur de nombreux paramètres grâce à ArcInfo pour améliorer la spatialisation suivant le type de données que l'on va traiter et leur répartition dans l'espace. Dans notre cas il s'agit de données ponctuelles qui sont des totaux de précipitations en mm pour des stations données, que l'on va vouloir spatialiser en calculant des isohyètes. Il a fallu effectuer de nombreux tests pour petit à petit éliminer les méthodes qui ne correspondaient pas à ce type de données et à cette répartition des stations (le détail des procédures est expliqué à partir d'un exemple en Annexe 5).

Les différents résultats des tests ont été exposés à toute l'équipe VAHYNE lors de la réunion hebdomadaire. Le choix étant trop difficile à faire pour ma part, c'est finalement Vincent Guinot qui étudia les données avec Claudine Dieulin et moi-même, et qui nous conseilla sur la méthode à choisir.

C'est ainsi que ce choix s'est porté sur le **Krigeage** avec une méthode Sphérique, fait sur un rayon correspondant à 3 fois la valeur de la cellule en sortie, et un nombre de 5 points minimum pour mener à bien l'interpolation.

2.5. Les macros sous ArcInfo

Comme pour le traitement des fichiers textes sous Excel, il est aussi possible d'enregistrer les commandes que l'on rentre sous ArcInfo. Les commandes peuvent être enregistrées dans un fichier AML (« ArcInfo Macro Langage »), que l'on va pouvoir modifier, et rendre exécutable. Ces macros ArcInfo sont, tout comme les macros Excel qui ont servi au traitement des fichiers textes, indispensables en ce qui concerne le gain de temps et la limitation des erreurs lors de la répétition des tâches.

Lors des tests de spatialisation (Annexe 5), il était en effet nécessaire de reprendre régulièrement les commandes ArcInfo, en ne changeant qu'un ou deux paramètres de l'interpolation ; la création de fichiers .aml modifiable à notre guise (en les ouvrant grâce au bloc-notes de Windows) a permis des traitements bien plus rapides.

Pour les pluies annuelles, j'ai créé des enregistrements par décennie, pour faciliter la lecture et la modification de ceux-ci lorsque l'on ouvre le fichier .aml avec le bloc-notes.

Pour lancer un enregistrement on rentre la commande suivante sous ArcInfo :

Prenons l'exemple de la décennie 1960-1969

```
Arc : &watch 60-69.wat (60-69 est donc le nom que j'ai choisi pour ce fichier)
```

Une fois cette commande rentrée sous ArcInfo, il suffisait d'écrire toutes les commandes habituelles pour le traitement d'une seule année. Quand toutes les commandes à enregistrer sont exécutées, pour arrêter l'enregistrement :

```
Arc : &watch &off
```

Un fichier .wat a été créé, c'est un fichier ASCII, donc éditable avec le bloc-notes. Pour convertir ce fichier .wat en fichier .aml (exécutable sous ArcInfo), il faut rentrer la commande suivante :

```
Arc : &cwta 60-69.wat 60-69.aml
```

En ouvrant ces fichiers .aml avec le bloc-notes, il suffisait de remplacer très rapidement quelques paramètres (à l'aide de l'outil « *remplacer par* ») pour gagner un gain de temps considérable lors des tests pour le choix de la méthode de spatialisation. Une fois les

modifications faites sur ces fichiers .aml, la commande à rentrer sous ArcInfo pour l'exécution de ceux-ci étaient :

```
Arc : &run 60-69.aml
```

Avant de lancer la macro Arcinfo, il est nécessaire de ranger les fichiers shape sur lesquels vont être effectuées les opérations dans le répertoire où l'ont va lancer la macro.

Les macros ArcInfo ont aussi beaucoup servi lors de la création des grilles de pluies ainsi que la création des fichiers vecteurs en isolignes pour chaque année et chaque mois, dans la mesure où la même méthode de spatialisation était utilisée pour toutes les cartes réalisées tout au long de ce stage, elles ont donc fortement servi à la réalisation de toutes les cartes.

3. La réalisation des cartes

Une fois les jeux de données constitués, je pouvais passer à la réalisation des cartes que Jean-François Trape nous avait demandées. L'ATI Santé nous avait demandé un grand nombre de cartes (Annexe 1), toutes n'ont pu aboutir, à la fois par manque de temps, par manque de données, mais aussi pour certaines par manque de « concertation » avec les « demandeurs » de ces cartes. Nous avons eu en effet quelques problèmes pour contacter Jean-François Trape qui se trouvait au Sénégal tout au long de mon stage. Nous avons envoyé plusieurs e-mails qui sont restés sans réponses. Ces e-mails demandaient soit des renseignements sur certaines cartes demandées (nous ne comprenions pas précisément certains intitulés), soit contenait les premières cartes en pièces jointes pour montrer un aperçu de mon travail à Jean-François Trape. Des précisions nous ont été apportées par Laurence Vial sur ces cartes en mi-juillet, mais il était trop tard pour les réaliser à ce moment là.

Au cours de ce stage, j'ai pu réaliser 73 cartes, parmi lesquelles :

- 45 cartes de la pluviométrie annuelle totale (de 1947 à 1991),
- 2 cartes de pluviométrie annuelle moyenne (périodes 1947-1969 et 1970-1985),
- 24 cartes de pluviométrie mensuelle moyenne (périodes 1947-1969 et 1970-1985),
- 2 cartes d'évolution de la pluviométrie entre les différentes périodes 1947-1969 et 1970-1985.

3.1. Mode opératoire

Une fois que les grilles de pluies et les lignes d'isohyètes ont été créées pour chaque année (ou chaque mois pour les pluies mensuelles) (Annexe 5), il va falloir créer des polygones, en fonction de ces isohyètes, auxquels on pourra attribuer des classes de couleur correspondant à des zones ayant la même pluviométrie. Les polygones vont représenter des zones qui correspondent à des valeurs de précipitations se trouvant entre la valeur de la première isohyète et la valeur de la seconde isohyète.

Pour créer ces polygones, il faut découper la zone d'étude avec les isohyètes qui sont une couche de lignes. Cette opération va se faire sur ArcInfo :

- Avec ArcInfo, Claudine Dieulin a créé une couche « contourl2.e00 », correspondant au pochoir en polygones de la réunion des frontières de la Mauritanie, du Sénégal et de la Gambie, ces trois pays formant la zone d'étude. Elle a aussi créé à partir d'ArcInfo la couche « contourp.e00 » qui correspond à la même zone, mais en polygones.

- On va importer ces deux fichiers .e00 sous l'espace de travail où se trouvent les couches d'isohyètes :

```
Arc : import cover contourp.e00 contourp.  
Arc : import cover contourl2.e00 contourl2.
```

- Il faut découper les lignes d'isohyètes avec la couche « contourp »

Exemple sur l'année 1947 :

```
Arc : intersect pa1947lk contourp pa1947lkd line  
(« l » comme lignes, « k » comme krigeage, « d » comme découpé).
```

- La couche pa1947lkd contient les courbes d'isohyètes découpées aux limites de la zone. Il faut maintenant ajouter les contours :

```
Arc : append pa1947fin no test
```

Après avoir validé cette ligne de commande, une nouvelle ligne s'affiche demandant le nom de la première couche à compacter, on rentre donc le nom de l'année d'isohyètes (ex : pa1947lkd). Une deuxième ligne s'affiche demandant le nom de la deuxième couche à compacter, on tape alors le nom de la couche « pochoir » ligne (contourl2). ArcInfo nous demande ensuite si l'on a terminé la liste des couches à compacter puis si ce sont bien les couches qu'on veut utiliser, après avoir accepté cette commande, on récupère une couche de ligne.

- La commande clean permet ensuite de construire la topologie :

```
Arc : clean pa1947fin
```

Le problème est que la construction de la topologie fait perdre l'information « pluie » de la couche ligne. Il faudra alors créer un nouveau champ catégorie qui va correspondre à la « classe » couleur de la carte finale.

```
Arc : additem pa1947fin.pat pa1947fin.pat couleur 3 3 N 0
```

J'ai utilisé également pour toutes ces étapes les enregistrements en fichier .aml sous ArcInfo, pour éviter de retaper toutes les commandes pour chaque année (ou chaque mois pour les pluies mensuelles).

Une fois ces opérations effectuées sous le logiciel ArcInfo, on ouvre sous ArcMap les couches que l'on vient de créer (ex : pa1947fin), on les exporte en fichier .shp, on ouvre une session de mise à jour et on va maintenant pouvoir alimenter le champ couleur.

3.2. L'habillage de la carte

Grâce au champ couleur, on va pouvoir établir des classes pour chaque polygone sur la carte finale. Il faut donc avant tout ouvrir la couche sous ArcMap (par exemple pa1947fin, qui est à ce moment là une couche ArcInfo) que l'on va exporter en fichier .shp (pa1947fin.shp). On ajoute ce fichier shape et on va ouvrir une session de mise à jour pour alimenter le champ couleur. Il faut aussi afficher sous ArcMap les couches de lignes et afficher les valeurs des isohyètes pour avoir la référence de pluie correspondante.

3.2.1. La charte graphique

En fonction des classes de couleur, il était nécessaire de définir différentes chartes graphiques, suivant le type de carte que je réalisais.

- *Cartes de pluviométrie annuelle*

Pour établir la charte graphique concernant les cartes de pluies annuelles, je me suis aidé de la carte qu'avait produite Gil Mahé sur la pluviométrie annuelle moyenne en Afrique de l'ouest et centrale pour la période 1951-1989.

Carte pmm annuelles moyennes Période 1951-1989 (Gil Mahé)	Couleur	Atlas Pluviom. Maur./Sen./Gambie Pluies annuelles	Couleur	Classe	Valeurs RVB
0 à 200 mm	Jaune	0 à 50 mm	Jaune	1	R 255 V 255 B 0
		50 à 250 mm		2	R 255 V 255 B 110
		200 à 400 mm		3	R 255 V 255 B 170
		400 à 700 mm		4	R 255 V 255 B 215
700 à 1000 mm	Bleu	700 à 1000 mm	Bleu	5	R 190 V 250 B 250
1000 à 1200 mm		6		R 125 V 220 B 245	
1200 à 1500 mm		7		R 80 V 165 B 235	
1500 à 2000 mm		8		R 0 V 90 B 230	
2000 à 2500 mm		9		R 55 V 55 B 180	

Tableau 1 : La charte graphique pour les cartes de pluies annuelles

J'ai décidé pour les cartes de pluviométrie annuelle de garder les isohyètes 50 mm, 100, 200, 250, 300, 400, 500, et ainsi de suite tous les 100 mm jusqu'à 3000 mm (certaines stations servant à la spatialisation avaient parfois des pmm annuelles allant jusqu'à 3000 mm).

En ce qui concerne les classes, j'ai décidé d'en créer une pour la pluviométrie annuelle inférieure à 50 mm, pour faire ressortir les valeurs extrêmement faibles qui touchent une partie de la Mauritanie en saison sèche.

Nous avons décidé de passer dans les couleurs bleues à partir de l'isohyète 700 mm. Au moment où nous avons choisi cette limite des 700 mm, nous ne savions pas que les études effectuées par l'ATI Santé démontraient que l'isohyète 750 mm était considérée comme la limite maximum d'extension du vecteur. La différence étant relativement faible, il ne devrait pas y avoir de gêne pour la comparaison des cartes.

J'ai aussi décidé de définir les différentes couleurs pour chaque classe en valeurs Rouge Vert Bleu (RVB) plutôt qu'en Cyan Magenta Jaune Noir (CMJN) dans la mesure où ces

cartes étaient destinées à une production sur CD multimédia et non à être imprimées sur papier (tableau 1).

- *Cartes de pluviométrie mensuelles*

Les isohyètes que j’ai retenues pour faire les cartes de pluviométrie mensuelles sont : 1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, et 900 mm. Les totaux mensuels de pluies peuvent dépasser les 800 mm pour certaines stations ayant servi à la spatialisation (notamment au mois d’août), mais sur la zone d’étude, ils n’excèdent pas les 600 mm.

Atlas Pluviom. Maur./Sen./Gambie Pluies annuelles	Couleur	Classe	Valeurs RVB	Atlas Pluviom. Maur./Sen./Gambie Pluies annuelles	Couleur	Classe	Valeurs RVB
0 à 1 mm	Orange	1	R 255 V 190 B 0	50 à 100 mm	Bleu	6	R 190 V 250 B 250
1 à 5 mm	Jaune	2	R 255 V 255 B 0	100 à 200 mm		7	R 125 V 220 B 245
5 à 15 mm		3	R 255 V 255 B 110	200 à 300 mm		8	R 80 V 165 B 235
15 à 30 mm		4	R 255 V 255 B 170	300 à 400 mm		9	R 0 V 90 B 230
30 à 50 mm		5	R 255 V 255 B 215	400 à 500 mm		10	R 55 V 55 B 180
						500 à 600 mm	11

Tableau 2 : La charte graphique pour les cartes de pluies mensuelles moyennes

J’ai décidé de faire ressortir les valeurs de pluies mensuelles moyennes inférieures à 1 mm en orange, ceci car elles représentent des totaux de pluies infimes, et que leur répartition sur la carte est fortement étendue en saison sèche.

- *Cartes d'évolution des pluies*

Différences période 47-69 et 70-85 (val. absolues)	Couleur	Classe	Valeurs RVB	Différences période 47-69 et 70-85 (pourcentages)	Couleur	Classe	Valeurs RVB
0 à -50 mm	Bleu	1	R 180 V 240 B 240	-15 à -20 %	Mauve	1	R 180 V 180 B 255
-50 à -100 mm		2	R 150 V 210 B 240	-20 à -25 %		2	R 150 V 150 B 240
-100 à -150 mm		3	R 115 V 180 B 232	-25 à -30 %		3	R 120 V 120 B 220
-150 à -200 mm		4	R 80 V 155 B 230	-30 à -35 %		4	R 90 V 90 B 210
-200 à -250 mm		5	R 30 V 130 B 225	-35 à -40 %		5	R 65 V 65 B 190
-250 à -300 mm		6	R 30 V 100 B 205	-40 à -45 %		6	R 45 V 45 B 175
-300 à -350 mm		7	R 30 V 70 B 185	-45 à -50 %		7	R 30 V 30 B 160
-350 à -400 mm		8	R 20 V 40 B 165	-50 à -60 %		8	R 15 V 15 B 145
-400 à -450 mm		9	R 10 V 10 B 115	-60 à -70 %		9	R 0 V 0 B 130

Tableau 3 : La charte graphique pour les cartes d'évolution des pluies annuelles

Sous ArcMap, une fois qu'on a alimenté le champ « couleur », il faut rentrer les valeurs RVB correspondant à chaque classe. Pour cela il faut aller dans les *propriétés* de la couche (ex : pa1947fin) et dans *symbologie*, ensuite on va dans *quantités/couleurs graduées*, comme *valeur* on rentre « couleur », on choisit aussi le nombre de *classes*, en fonction de la carte (9 pour les pluies annuelles) et on rentre chaque couleur (*couleurs supplémentaires*) en rentrant les valeurs RVB. Une fois avoir rentré les couleurs pour la première carte, j'enregistrais la charte graphique dans un fichier .lyr, et je l'importais pour chaque autre carte une fois avoir défini les classes de couleur, ceci m'évitait de rentrer pour chaque nouvelle carte les mêmes valeurs RVB.

3.2.2. La symbologie

Pour chaque carte, on va créer un fichier .mxd sous ArcMap, comprenant un certain nombre de couches, ajoutées à cette couche finale de polygones (ex : pa1947fin). Il a fallu définir une symbologie pour les différentes couches de points, lignes et polygones ajoutés à chaque carte:

- Les stations utilisées pour la spatialisation (couche de points). Pour représenter les stations pluviométriques, j'ai créé un symbole à partir d'Adobe Illustrator représentant un pluviomètre, que j'ai pu importer sur ArcMap. La taille des symboles est plus grande pour les stations situées dans les pays de la zone d'étude.
- Les pays d'Afrique frontaliers à la zone d'étude (polygones).
- Le contour de la zone d'étude (lignes) ;
- Les capitales des pays de la zone d'étude et pays frontaliers (points) : un fichier shape a été créé pour ajouter les capitales. Pour cela j'ai édité un fichier texte sous Excel avec les noms des capitales et leurs coordonnées géographiques (trouvées grâce au Getty Thesaurus). On ouvre ce fichier texte sous ArcMap, on *affiche les coordonnées X et Y*, et on exporte les données en shape. Les symboles utilisés pour les capitales sont des carrés rouges.
- Les isohyètes (lignes) : les isohyètes 400 mm et 700 mm pour les cartes de pluies annuelles sont plus foncées et plus épaisses pour les faire ressortir un peu plus sur la carte, car elles correspondent à des limites de zone climatique. J'ai aussi affiché les étiquettes des isohyètes pour pouvoir lire les précipitations.
- Les pochoirs désignant une zone d'incertitude, où les stations étaient trop peu nombreuses pour obtenir une spatialisation significative (couche de polygones) : deux fichiers de forme ont été créés grâce à ArcCatalog (en polygones). Ces deux fichiers sont deux pochoirs que j'ai dessinés sous ArcMap, représentant des zones non significatives dues à l'absence de données dans la partie nord-est de la Mauritanie. Un des deux pochoirs est légèrement plus étendu, du fait de l'absence pour certaines années de la station algérienne Tindouf des fichiers .txt de pluies. Les pochoirs sont des polygones légèrement transparents pour ne pas gêner la lecture de la carte.

Pour ces différentes couches, des fichiers .lyr ont été enregistrés pour permettre un gain de temps lors de la réalisation des cartes suivantes.

3.3. La pluviométrie annuelle

Durant toute la durée du stage, j'ai réalisé des cartes de pluviométrie annuelle totale pour les années 1947 à 1991, ainsi que des cartes de pluviométrie annuelle moyenne pour les périodes 1947-1969 et 1970-1985. Jean-François Trape nous avait demandé un nombre plus élevé de cartes, puisque je devais réaliser des cartes annuelles pour chaque année de 1947 à 2003, mais aussi les cartes de pluviométrie annuelles moyennes pour 6 périodes : 1900-1946, 1947-1969, 1970-1985, 1986-2003, 1947-2003, 1986-2003.

Je n'ai pas pu réaliser toutes ces cartes dans la mesure où, pour les années précédant 1947, les stations pluviométriques n'étaient pas assez nombreuses et mal réparties sur la zone d'étude. Il était bien sûr « possible » de réaliser des cartes pour les périodes antérieures à 1947, mais elles n'auraient pas été significatives du tout. En effet, les mesures des premières données climatologiques en Afrique de l'Ouest (observations pluviométriques) remontent au milieu du XIX^e siècle mais ne sont sérieusement suivies qu'après 1920, et il faut attendre les années 50 pour voir se développer les réseaux de mesures hydrométriques (Sircoulon, 1987). Le choix des sites et leurs changements fréquents, de même que la qualité des premiers relevés des premières stations jusqu'au début du XX^e siècle confèrent une qualité et une fiabilité douteuse aux données pluviométriques de l'époque. Même si le nombre de stations a continué à augmenter depuis lors, la qualité des relevés n'est pas toujours assurée à cause d'un manque de moyens des Etats qui ont la charge de gérer les réseaux de mesures. Peu de stations avant et au début du siècle en Afrique de l'Ouest ont été soigneusement suivies ce qui rend l'histoire climatique difficile à retracer.

Pour ce qui est des années suivant 1991, les données existent mais sont beaucoup difficiles à se procurer pour certains pays, nous n'avons des données que pour la Mauritanie ; par conséquent je n'ai pas pu réaliser les cartes pour les années allant de 1991 à 2003.

3.3.1. Les cartes de pluies annuelles de 1947 à 1991

Il m'a donc été demandé de faire des cartes de pluviométrie annuelle, sur ces cartes on peut distinguer des années relativement sèches et des années relativement pluvieuses. L'orientation des isohyètes est dans un sens général est-ouest, les isohyètes de pluies les plus

faibles se situent au nord de la Mauritanie, et les isohyètes de pluies les plus élevées se trouvent dans la partie sud du Sénégal (le plus souvent sur la pointe sud-ouest du pays).

On se rend compte que les années les plus pluvieuses appartiennent le plus souvent à la décennie des années 50, l'année la plus pluvieuse sur la zone d'étude semble être l'année 1958 (notamment concernant la Gambie et le sud ouest du Sénégal), en revanche c'est en 1950 que l'isohyète 700 mm a atteint sa position la plus septentrionale (fig. 12 p 48, fig. 13 p 49).

On retrouve les années les plus sèches dans les années 80, l'année 1983 ayant les totaux de pluies les plus faibles sur la période 1947-1991 (fig. 14 p 50). En 1983, on se rend compte sur la carte que la majeure partie de la Mauritanie reçoit moins de 50 mm d'eau, ce qui représente un total annuel extrêmement faible. Nouakchott, la capitale de la Mauritanie, n'aurait même reçu que 7 mm de pluies durant toute l'année (la totalité durant le mois d'août). Dakar, capitale du Sénégal, n'aurait reçu que 156 mm durant cette année, et la capitale de la Gambie Banjul environ 400 mm (tableau 4). On remarque notamment que la quasi-totalité de la Gambie a reçu moins de 700 mm de précipitations cette année là.

	1950	1958	1983
Nouakchott (MR)	182 mm	221 mm	7 mm
Dakar (SN)	800 mm	750 mm	156 mm
Banjul (GM)	1550 mm	1800mm	400 mm

Tableau 4 : Totaux annuels de pluies dans les 3 capitales de la zone d'étude en 1950, 1958 et 1983.

PLUIES ANNUELLES

1950

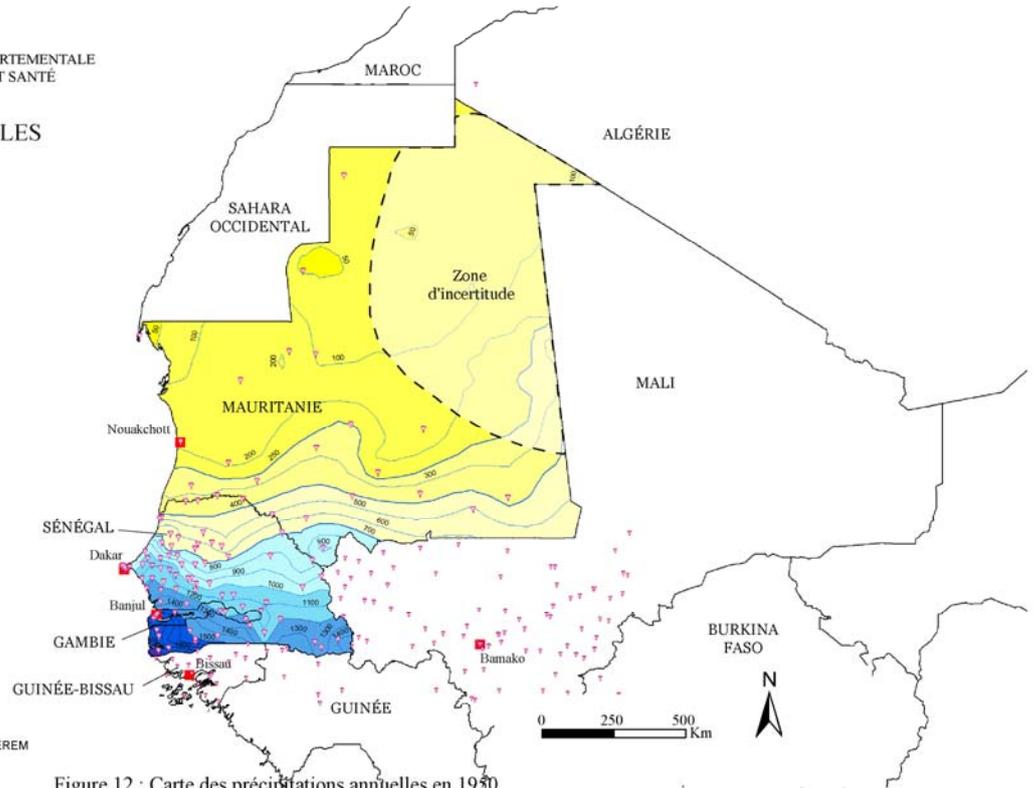
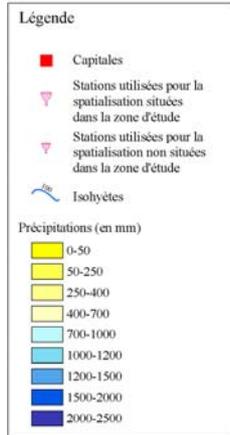


Figure 12 : Carte des précipitations annuelles en 1950

Figure 12 : Carte des précipitations annuelles en 1950

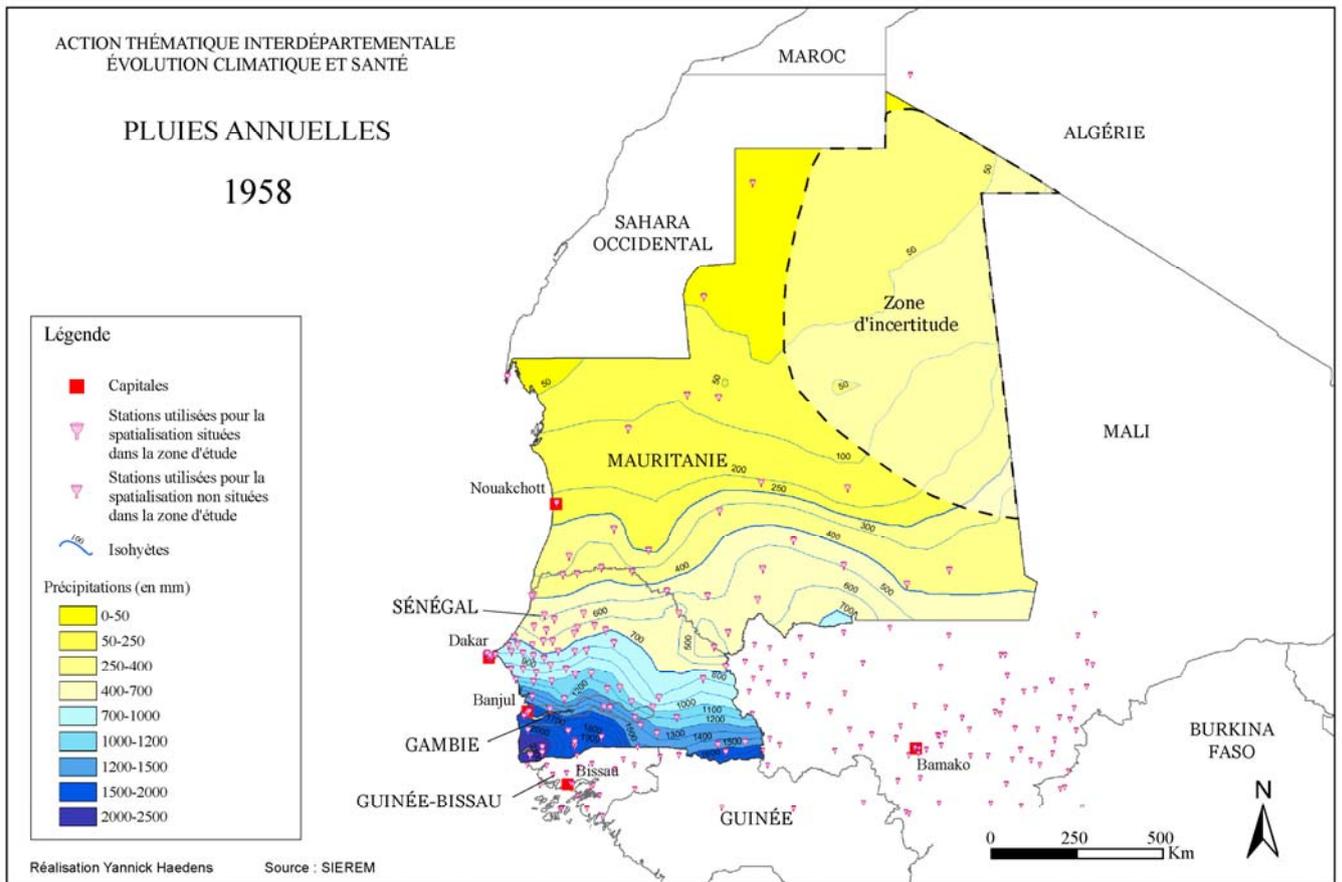


Figure 13 : Carte des précipitations annuelles en 1958

Figure 13 : Carte des précipitations annuelles en 1958

PLUIES ANNUELLES

1983

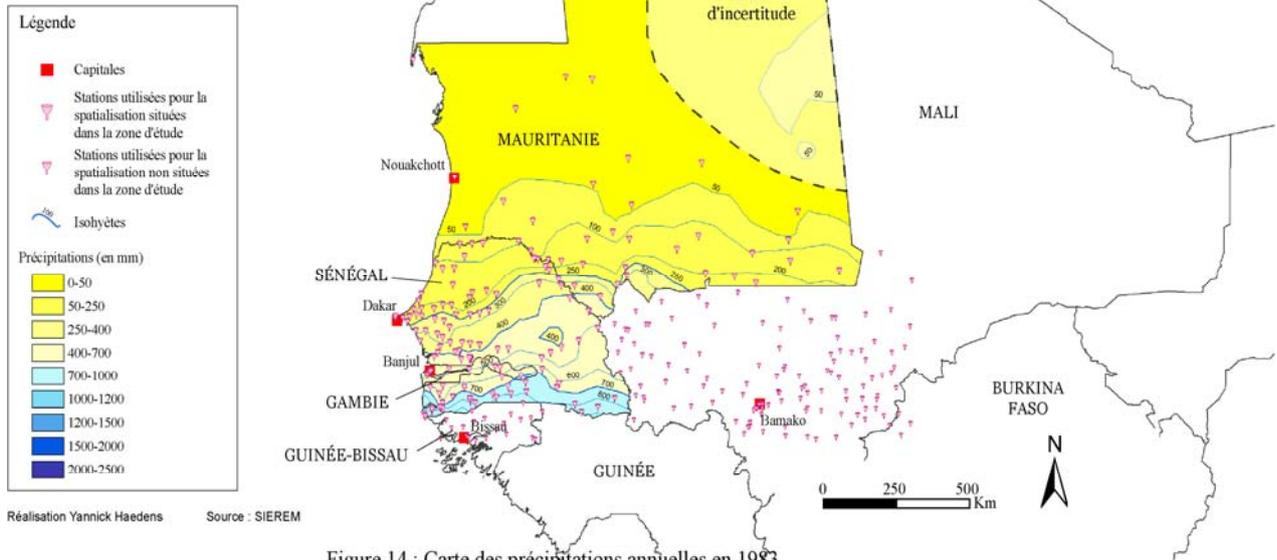


Figure 14 : Carte des précipitations annuelles en 1983

Figure 14 : Carte des précipitations annuelles en 1983

3.3.2. La variabilité de la pluviométrie annuelle

Pour réaliser les cartes de pluies annuelles moyennes (fig. 15 p 52 et fig. 16 p 53), j'ai utilisé les deux jeux de données de pluies mensuelles moyennes pour les deux mêmes périodes (1947-1969 et 1970-1985) (cf. 2.3.1.2. p 28 et 1ère macro de l'Annexe 2).

Comme pour les données de pluies annuelles, j'ai retiré sur ces deux jeux de données les stations pour lesquelles les données étaient manquantes pour les mois pluvieux (juin, juillet, août, septembre), ainsi que pour les mois de mai et octobre, lorsqu'elles se situent au Sénégal, Gambie, Guinée, Guinée Bissau, Burkina Faso ou Mali, car des pluies significatives peuvent se produire ces mois-ci dans ces pays. J'ai ensuite changé dans ces fichiers les lacunes restantes (valeurs -999 ici) en 0 et j'ai calculé la somme des douze mois de l'année pour obtenir une valeur annuelle moyenne pour chaque station, pour les deux périodes 1947-1969 et 1970-1985.

3.3.2.1. Une rupture à la fin des années 1960

En observant les deux cartes de pluviométrie annuelle moyenne pour les périodes 1947-1969 (fig. 15) et 1970-1985 (fig. 16), on se rend compte qu'il existe une grande différence de pluviométrie sur ces deux périodes pour les trois pays de la zone d'étude.

En Afrique de l'Ouest, la période 1947-1969 est considérée comme une période relativement pluvieuse. On se rend compte en observant la carte que le Sénégal reçoit en moyenne durant cette période des taux de précipitations annuelles allant de 350 à 1700 mm, et que la Gambie, elle, recevait en moyenne entre 900 et 1500 mm. Sur la carte de précipitations annuelles moyennes pour la période 1970-1985, la pluviométrie a fortement chuté sur toute la zone d'étude sans aucune exception, le nord du Sénégal est passé sous la barre des 250 mm, et les totaux de pluies ne dépassent pas 1300 mm sur la pointe sud-ouest du pays, partie la plus humide du pays, et de la zone d'étude. En Mauritanie, les pluies sont devenues quasi inexistantes sur une bonne partie du pays ; en effet la majeure partie du nord du pays reçoit dans la période 1970-1985 moins de 50 mm de pluies, ce qui est extrêmement faible.

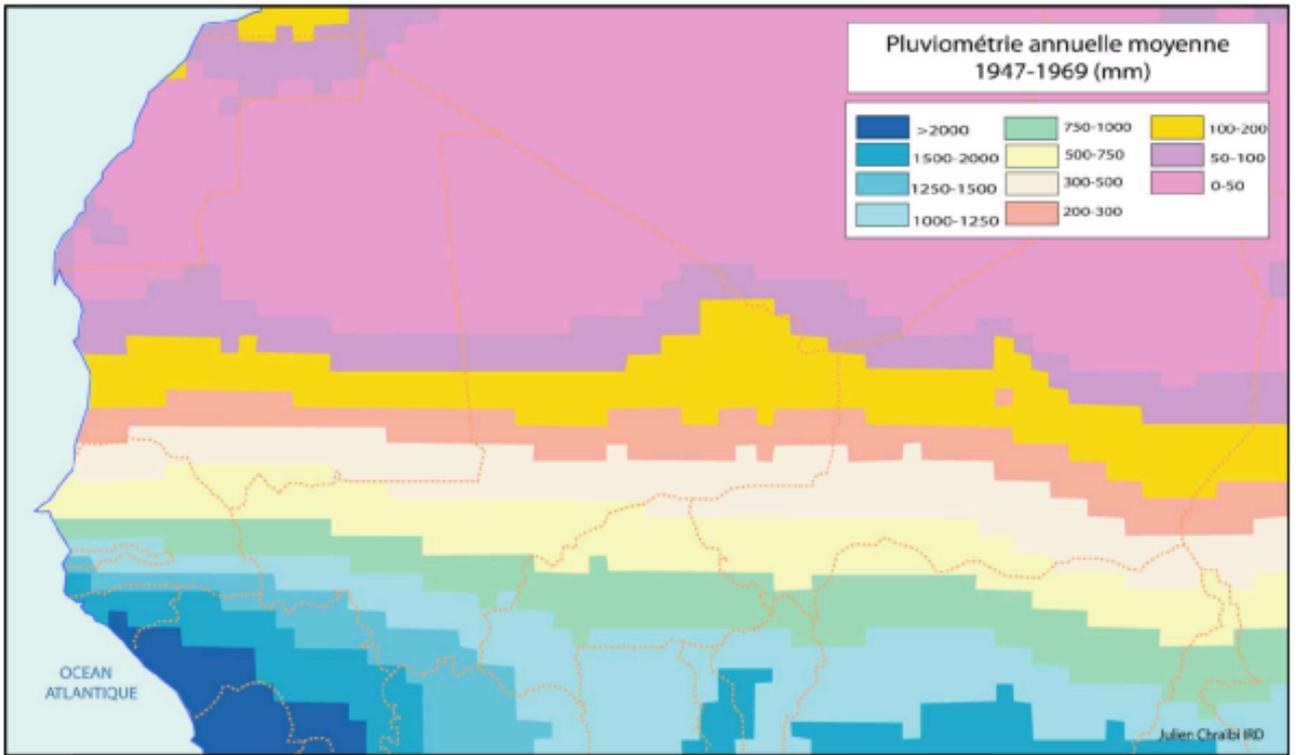


Figure 15 : Carte de pluviométrie annuelle moyenne pour la période 1947-1969

Figure 16 : Carte de pluviométrie annuelle moyenne pour la période 1970-1985
Carte PA MOY 70-85

En Afrique subsaharienne, un cycle de sécheresse sans précédent historique connu sévit en effet depuis plus de 35 ans, avec un déficit moyen de 20% à 30% selon les régions par rapport à la pluviométrie moyenne de la période 1947-1968. Depuis 1969, les « bonnes années » ont reçu une pluviométrie qui aurait été qualifiée de médiocre ou de moyenne dans les années 1920 à 1968. Pour Nicholson, cette situation déficitaire depuis les années 1970 est particulièrement prononcée dans les régions soudano-sahéliennes (fig. 17 p 55).

Cette première manifestation de grande ampleur des changements climatiques en cours a été fortement médiatisée au début des années 1970, quand elle a provoqué plusieurs centaines de milliers de victimes humaines (notamment en Éthiopie) et décimé la majeure partie des troupeaux de bovins, ovins, caprins et chameaux, depuis la Mauritanie et le Sénégal jusqu'au Soudan et à l'Érythrée. Depuis, la migration massive vers les villes des populations du Sahel et la multiplication des forages dans ces régions ont permis d'effacer les conséquences les plus dramatiques du changement climatique. L'oubli médiatique est retombé sur ce phénomène qui se poursuit et dont l'impact éco-épidémiologique ne cesse d'augmenter (Vial).

Concernant notre zone d'étude, il semblerait que la rupture au niveau de la pluviométrie se situe dans la période 1967-1969 (tableau 5 p 55) ; mais cette période de rupture n'est pas facile à déterminer précisément ; en effet, l'année 1968 est une année très sèche par rapport aux années précédentes, notamment pour le Sénégal et la Gambie, mais l'année suivante a une pluviométrie que l'on pourrait considérer de « normale ».

En observant l'évolution de la pluviométrie grâce aux deux cartes que j'ai réalisé durant ce stage (fig. 18 p 56 et fig. 19 p 57), on se rend compte que la pluviométrie a diminué de 15 à 60 % sur notre zone d'étude suivant les régions. Les régions ayant la régression de précipitations la plus faible en pourcentage se situent au sud-est du Sénégal ainsi qu'au sud-est de la Mauritanie, puisque la chute des précipitations représente entre 15 et 25 %.

Sur la carte de diminution des pluies en pourcentage, on distingue clairement que le gradient se fait dans un sens sud-est vers le nord-ouest de la zone d'étude. On distingue en effet que les chutes de la pluviométrie les plus élevées se trouvent au nord-ouest du Sénégal (la région de la capitale Dakar ainsi que plus au nord) ainsi qu'à l'ouest de la Mauritanie (la région de la capitale Nouakchott notamment). Au nord-ouest du Sénégal on observe une régression des pluies annuelles moyennes entre les deux périodes 47-69 et 70-85 de l'ordre de plus de 40 % ; Dakar a vu sa pluviométrie moyenne annuelle chuter de plus de 250 mm,

passant de 570 mm en 1947-69 à environ 300 mm en 1970-1985. Nouakchott a quant à elle vu sa pluviométrie chuter de plus de moitié (de 140 mm à 60 mm), la région située au nord de la capitale, qui connaissait déjà de grosse difficultés à cause du manque de pluies, a même connu des diminutions de plus de 60 %.

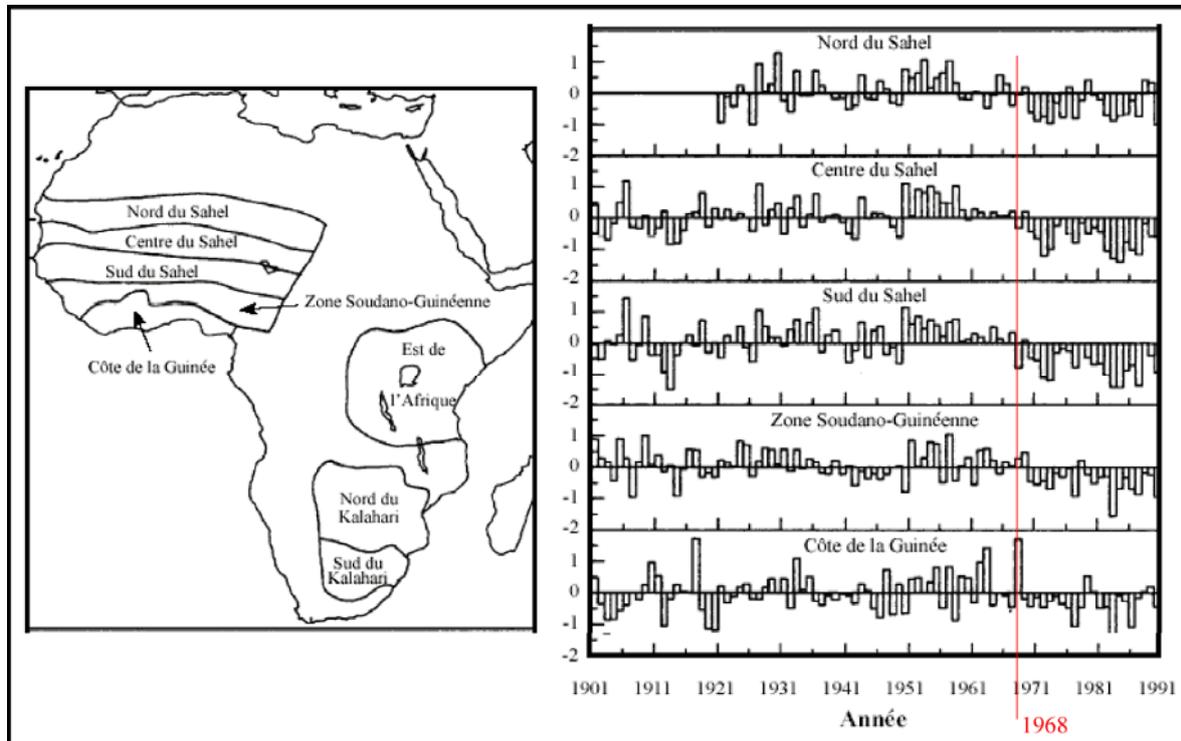


Figure 17 : Fluctuation des précipitations pour certaines régions d'Afrique, exprimée en écart type moyen par région (Nicholson, 1993)

Pays	Baisse des précipitations (%)	Période de rupture
Togo	16	1968-1970
Bénin	19	1968-1970
Ghana	19	1968-1969
Nigeria	19	1967-1970
Guinée	20	1969-1970
Tchad	20	1970-1971
Côte d'Ivoire	21	1966-1971
Burkina Faso	22	1968-1971
Guinée Bissau	22	1967-1969
Mali	23	1967-1970
Sénégal	25	1967-1969

Tableau 5 : Diminution des précipitations en Afrique de l'Ouest (Moyenne de la période 1970-1989 comparée à la période 1950-1969) (d'après Servat *et al.*, 1998)

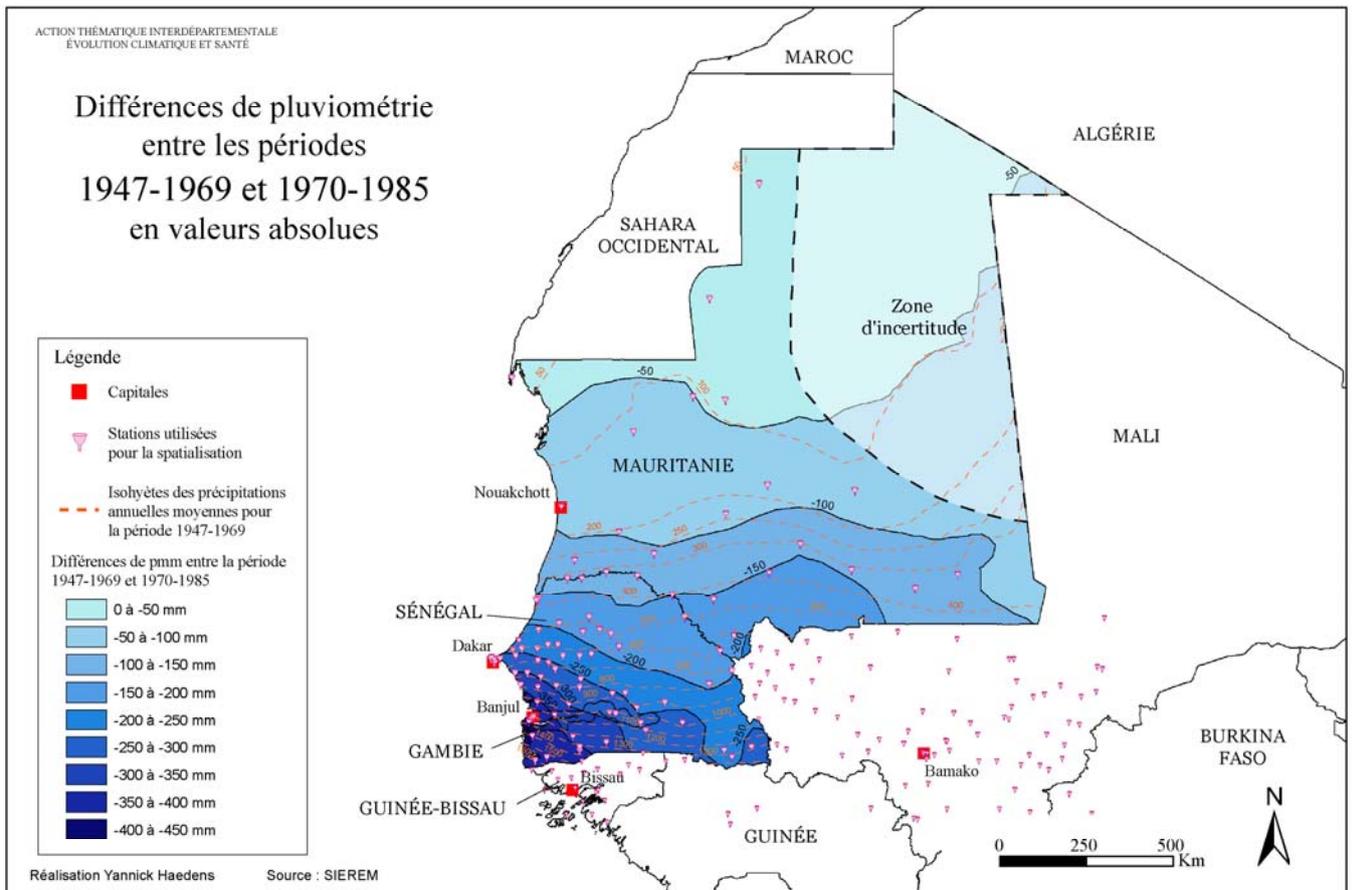


Figure 18 : Carte de différences de pluviométrie entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 en valeurs absolues

Figure 18 : Carte de différences de pluviométrie entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 en valeurs absolues

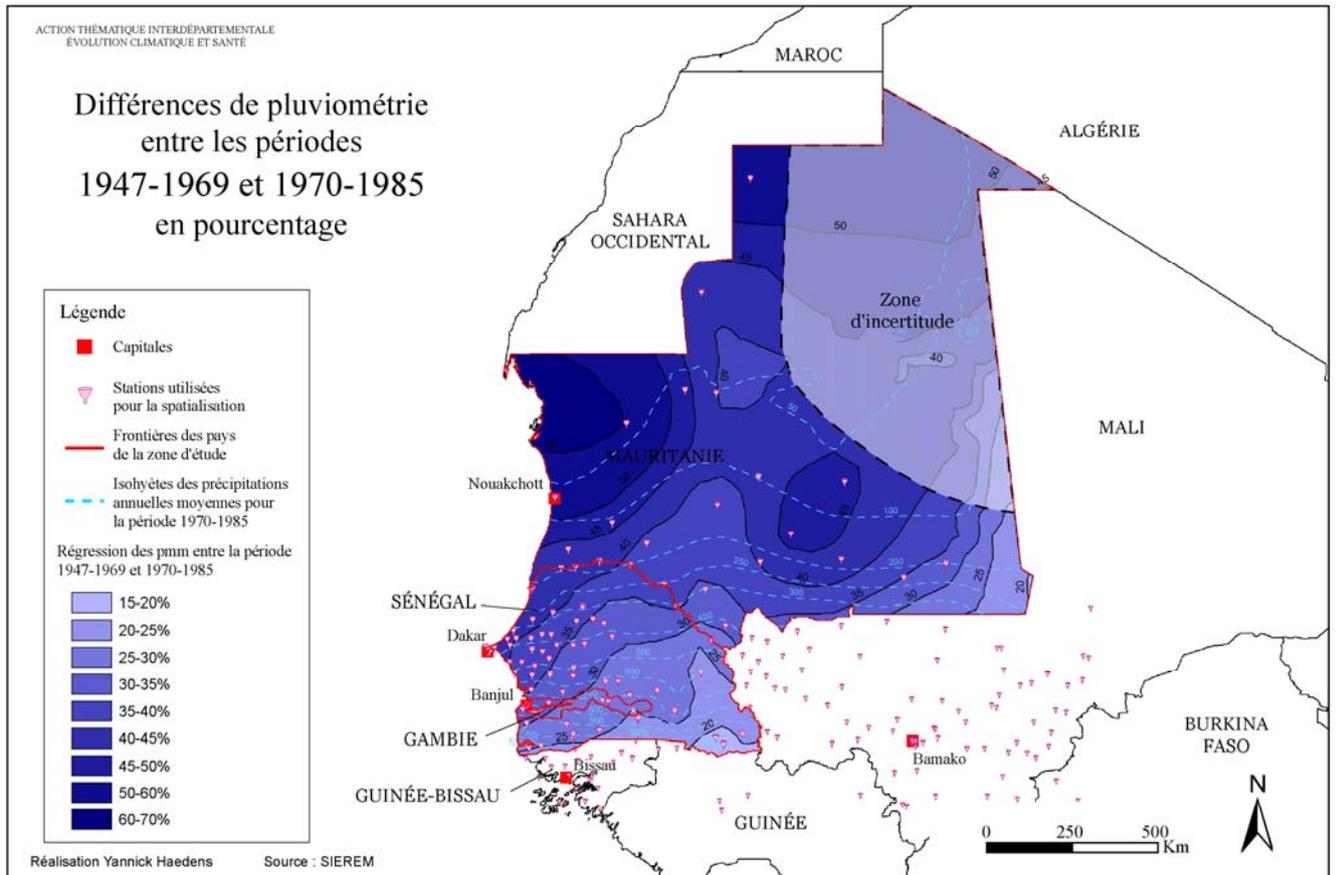


Figure 19 : Carte de différences de pluviométrie entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 en pourcentage

Figure 19 : Carte de différences de pluviométrie entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 en pourcentage

3.3.2.2. *Le glissement des isohyètes vers le sud*

Cette situation de rupture nette des séries pluviométriques en Afrique de l'Ouest autour des années 1968-1972, avec 1970 comme année charnière, et cette baisse importante de la pluviométrie moyenne après cette date a pour conséquence le glissement des isohyètes d'une centaine de kilomètres vers le sud.

En effet, selon Sircoulon et Olivry (1986), la baisse de la pluviométrie a entraîné au Sahel une migration vers le sud des isohyètes 300, 400 et 500 mm, d'environ 100 à 200 km, par rapport aux isohyètes établies à partir de la normale 1931-1960.

La carte de Gil Mahé et Yann L'Hôte (fig. 20) représentant le glissement des isohyètes, réalisée à partir de la pluviométrie moyenne pour la période 1951-1969 ainsi que la période 1970-1989, montre également que ce glissement vers le sud a eu pratiquement la même importance pour les isohyètes 1000 et 1500 mm que pour les isohyètes 250 et 500 mm.

Sur notre zone d'étude le constat est le même, on constate en effet sur la carte d'évolution des pluies annuelles moyennes (fig.21 p60) que les isohyètes ont glissé d'une centaine de kilomètres vers le sud entre les périodes 1947-69 et 1970-85. En Mauritanie, l'isohyète 100 mm est même descendue de plus de 200 km dans la région de Nouakchott.

C'est le glissement de l'isohyète 750 mm (on peut se baser sur cette carte sur l'isohyète 700 mm, sensiblement à la même latitude) qui inquiète le plus concernant la borréliose, dans la mesure il est considéré comme la limite maximum de la tique transmettant la borréliose. Le glissement de cette isohyète entraîne donc une extension considérable de la distribution géographique de la maladie et de la tique vectrice vers le sud. Or ces populations n'avaient pas connu cette maladie avant cette rupture climatique des années 70 et pourraient donc être beaucoup moins immunisées que les populations situées dans la précédente zone de répartition du vecteur.

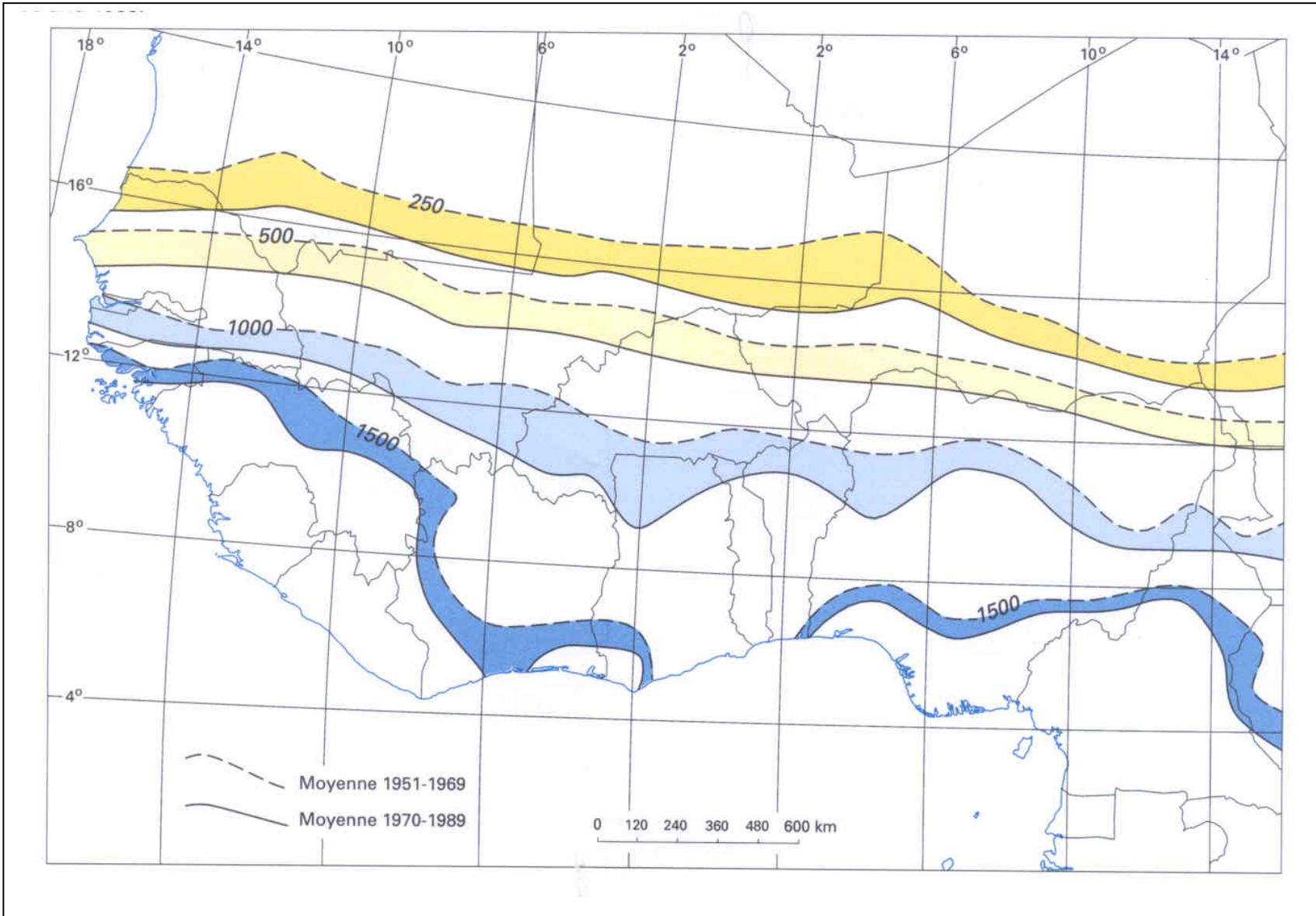


Figure 20 : Déplacements vers le sud des isohyètes 250, 500, 1000, et 1500 mm en Afrique de l’Ouest entre les périodes 1951-1969 et 1970-1989 (D’après L’Hôte et Mahé, 1996)

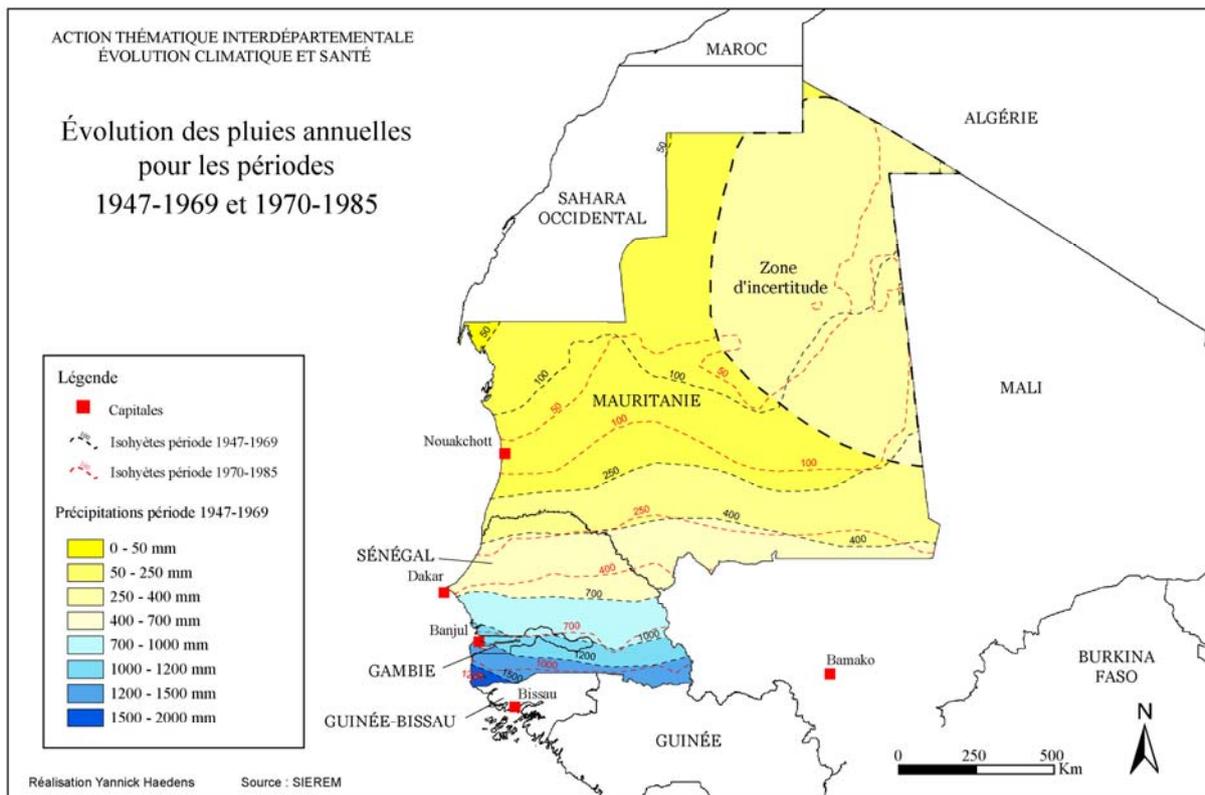


Figure 21 : Déplacement des isohyètes vers le sud entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 au Sénégal, en Mauritanie et en Gambie

Figure 21 : Déplacements des isohyètes vers le sud entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 au Sénégal, en Mauritanie et en Gambie

3.4. La variabilité de la pluviométrie mensuelle

J'ai également réalisé un certain nombre de cartes dans le cadre de ce stage concernant les pluies mensuelles moyennes pour ces deux périodes 1947-1969 et 1970-1985 (24 cartes au total).

La variabilité pluviométrique se manifeste également par une modification importante de la pluviométrie mensuelle au cours de ces dernières décennies. Le changement ne s'est pas fait uniformément sur toute l'année même si, globalement, sur chacun des mois la pluviométrie a diminué. En Afrique de l'Ouest, après la fin des années 60, la baisse des précipitations est plus importante au mois d'août (le mois le plus pluvieux), et à un degré moindre, au mois de septembre (Denett *et al.*, 1985). Ces deux mois sont les plus pluvieux et par conséquent le cumul pluviométrique de ces deux mois est fortement corrélé aux pluies annuelles. La persistance de ce phénomène est beaucoup plus nette durant la période août-septembre que pendant toute autre période de la saison des pluies (Nicholson et Palao, 1993). On évalue à près de 27% le déficit moyen des pluies des mois de juillet, août et septembre depuis 1968 par rapport à la période 1931-1960.

Sur notre zone d'étude, ce sont aussi les mois d'août (mois le plus pluvieux) et de septembre qui ont vu leurs cumuls pluviométriques le plus chuter entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985. C'est surtout au mois d'août que le glissement des isohyètes se fait le plus ressentir (fig. 22 p 62, fig.23 p 63).

Il semblerait que la saison des pluies ait désormais un déroulement un peu différent qu'il l'était précédemment. Elle semble en effet plus courte qu'auparavant, débutant plus tardivement et s'arrêtant parfois plus précocement.

Grilles de pluies moyennes au mois d' Août pour les périodes 1947-1969 et 1970-1985

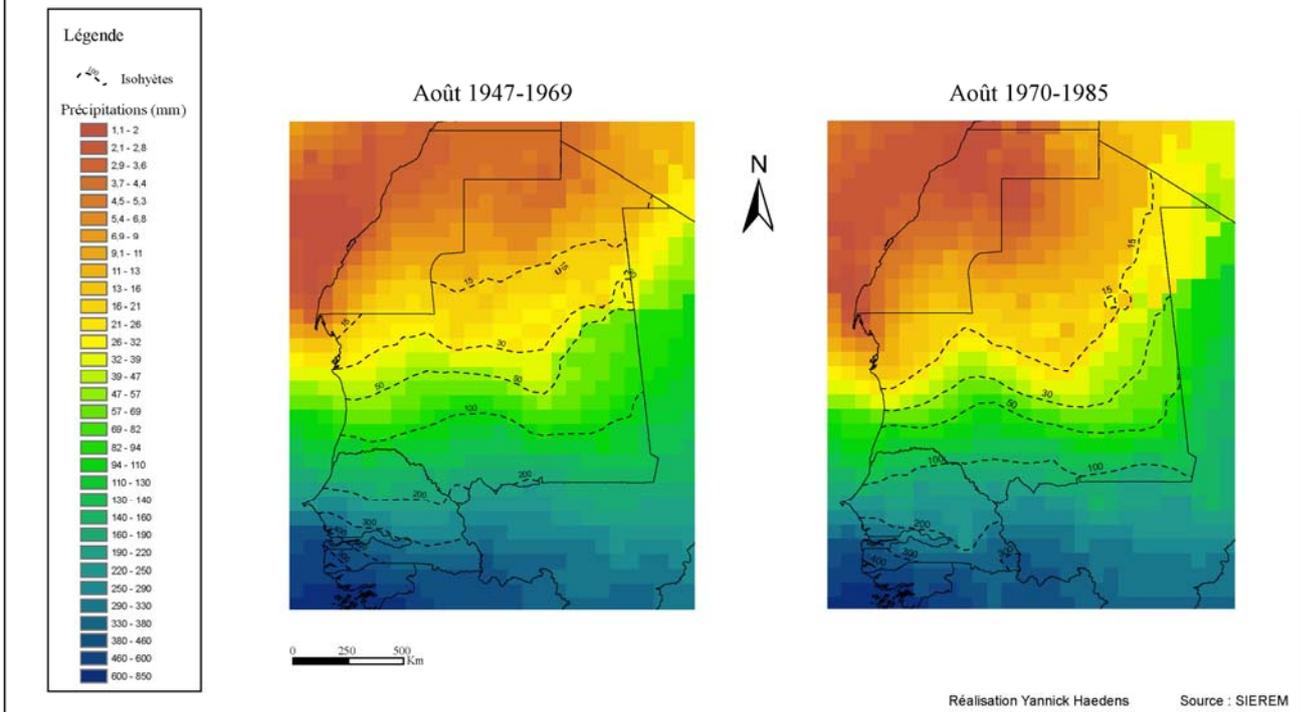


Figure 22 : Grilles de pluies moyennes au mois d'août pour les périodes 1947-1969 et 1970-1985

Figure 22 : Grilles de pluies moyennes au mois d'août pour les périodes 1947-1969 et 1970-1985

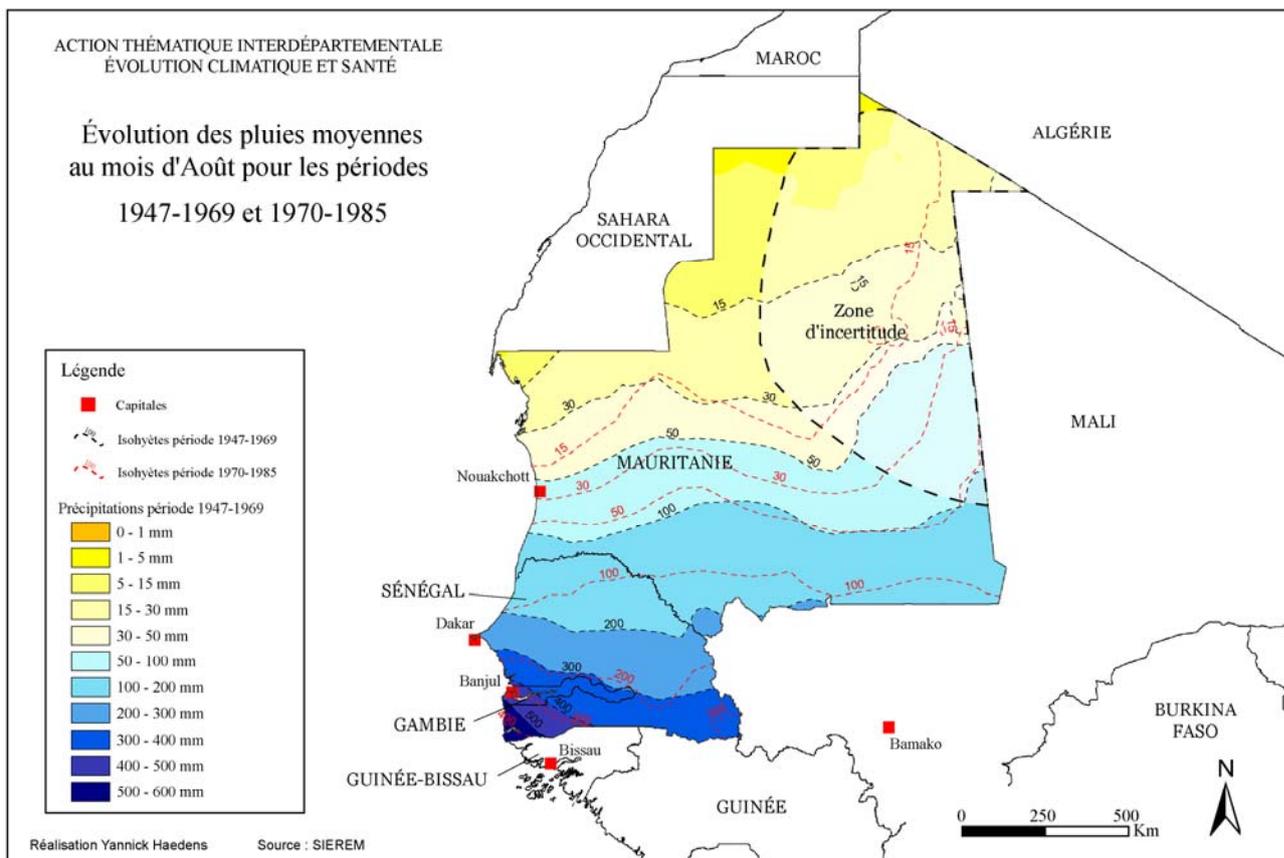


Figure 23 : Déplacement des isohyètes vers le sud entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 pour le mois d'août au Sénégal, en Mauritanie et en Gambie

Figure 23 : Déplacements des isohyètes vers le sud entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 pour le mois d'août au Sénégal, en Mauritanie et en Gambie

Les cartes nous montrent donc que des changements relativement importants ont eu lieu dans la fin des années 60 et début des années 70. A partir de cette rupture climatique, les années pluvieuses ont laissé place à une période de sécheresse de longue durée.

Cette situation déficitaire depuis les années 1970 est particulièrement prononcée dans les régions soudano-sahéliennes. Les hauteurs annuelles de précipitations ont le plus souvent des valeurs inférieures aux médianes des séries précédentes. Certains auteurs (Sircoulon, 1990 ; Olivry *et al.*, 1993 ; Nicholson, 1994 ; Paturel *et al.*, 1997) montrent que cette situation a perduré depuis lors, du moins jusqu'en 1995, malgré quelques séquences de « rémission » qui jalonnent cette période 1970-1995. La légère augmentation qui a marqué la décennie 90 n'a en effet jamais permis d'atteindre les valeurs « pré-rupture » caractérisant les années 50 et 60 (Ardoin-Bardin, 2003 ; L'Hôte, 2003 ; Xue, 1997)

Après avoir réalisé ces cartes, nous avons décidé de les exporter sur un support multimédia, ceci notamment dans le but de faciliter l'accès aux cartes.

4. La production de l'atlas de données climatiques sur support multimédia

Il était prévu dans le cadre de ce stage de produire cet atlas de données climatiques sur support multimédia. Je trouvais ceci très intéressant dans la mesure où de nos jours, de plus en plus de travaux sont produits sur CD-Rom, DVD-Rom, ou site Internet ; par conséquent, cette étape pouvait elle aussi efficacement compléter la formation que j'avais reçue au cours de mon année universitaire sur Flash et Adobe Illustrator, les deux logiciels dont je me suis plus particulièrement servi pour produire de CD. Aussi, Claudine Dieulin m'avait fait part de toute sa confiance concernant la bonne réalisation de ce CD, tout en me conseillant sans hésitation lorsque nécessaire ; ceci me laissait par conséquent une grande liberté et me permettait d'exprimer ma créativité.

Adobe Illustrator me permettait de dessiner des figures qui allaient être utilisées pour créer des boutons interactifs avec Flash, mais aussi pour l'élaboration de fonds d'écrans ainsi que toutes autres illustrations permettant la mise en page de ce support multimédia. Flash m'a permis de créer la mise en forme du CD, d'organiser et classer les cartes par thèmes dans des menus différents.

4.1. L'organisation du support multimédia

Il a fallu avant tout réfléchir à la façon dont on allait organiser ce support multimédia et penser à certains paramètres comme son arborescence et la résolution que nous allions choisir.

4.1.1. L'arborescence

Avant de commencer à travailler sur Flash, il fallait tout d'abord définir l'organisation du CD-ROM, son arborescence. En quelque sorte il fallait réaliser une maquette de ce CD en déterminant un plan qui allait nous servir de base pour organiser et classer toutes ces cartes grâce au logiciel Flash.

La figure 23 décrit l'arborescence que nous avons choisie pour ce CD. Une page d'accueil correspondant au menu principal, permet de nous diriger vers cinq sous-menus :

- les pluies annuelles comprenant 45 cartes ; cette page permettra d'accéder à quatre nouveaux sous-menus correspondants aux cartes classées suivant les décennies ;
- les pluies mensuelles moyennes qui nous dirigent vers 24 cartes correspondant aux périodes 1947-1969 et 1970-1985 ;
- les pluies annuelles moyennes qui ouvre sur les deux cartes correspondant aux périodes 1947-1969 et 1970-1985 ;
- l'évolution des pluies, comprenant les deux cartes de différences de précipitations (en valeurs absolues et en pourcentage) entre ces deux mêmes périodes ;
- et enfin un sous-menu correspondant aux cartes de températures. Je n'ai pas eu le temps de faire de cartes de températures au cours de ce stage, mais il était question d'en réaliser plus tard et d'en ajouter sur le CD, j'ai donc préféré tenir compte de ce sous-menu sur la page d'accueil pour éviter une réorganisation de cette page ultérieurement.

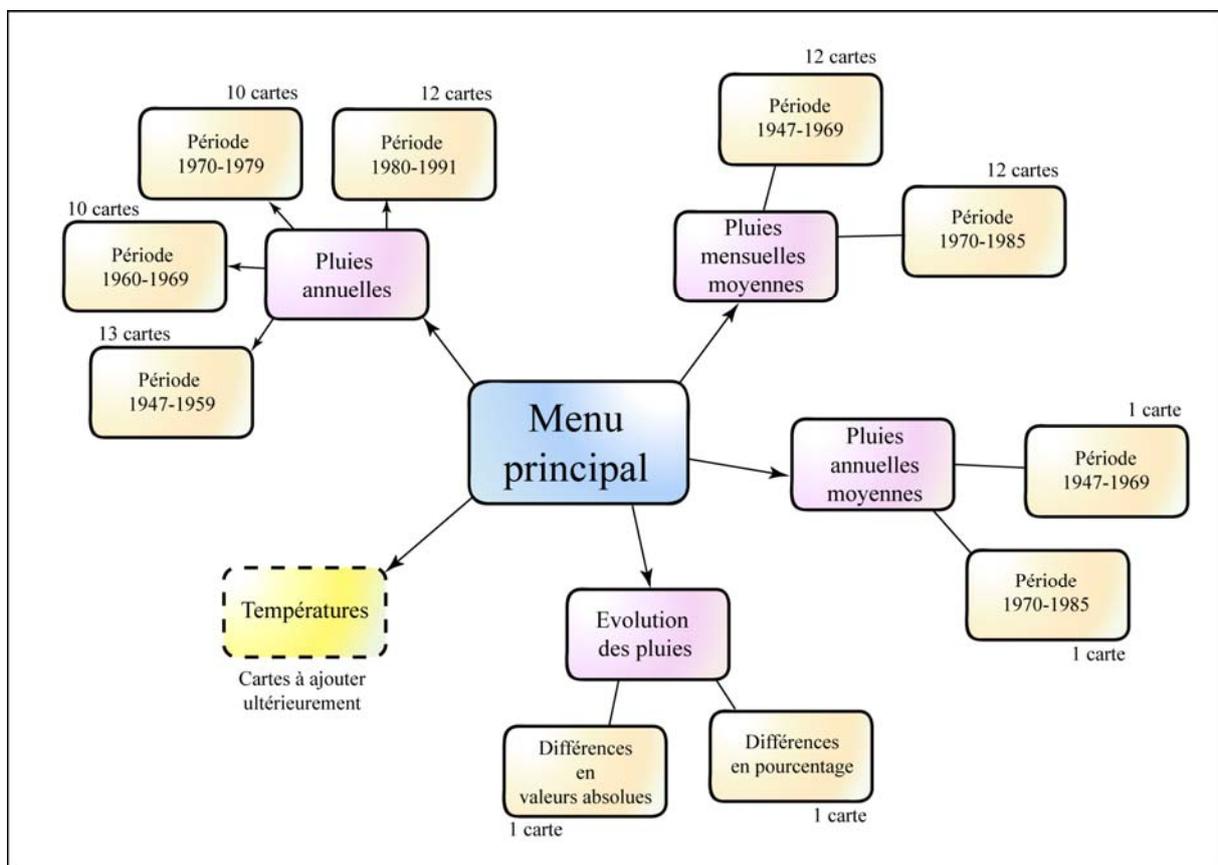


Figure 24 : Arborescence du support multimédia

4.1.2. La résolution des cartes interactives

Le premier paramètre qu'il a fallu définir avant de commencer toute mise en page, était la taille de la « scène » sur le logiciel Flash. La scène est l'endroit auquel on va composer le contenu des images de l'animation, soit en y dessinant directement les illustrations, soit en organisant des illustrations importées. La taille de cette scène (définie en pixels) va déterminer la résolution des fichiers .html (en hauteur et en largeur) que nous allons créer lors de l'étape finale. Il est important de la déterminer dès le départ dans la mesure où les images et animations que l'on va créer ensuite vont être dimensionnées en fonction de cette scène. Nous avons décidé de définir la taille de la scène à 768 x 1024 pixels, ce qui correspond à l'affichage d'un écran 15 pouces.

Après avoir réfléchi à l'organisation du CD, j'ai commencé à penser à élaborer son design.

4.2. Le design

J'inclus dans le design la création des boutons interactifs, la mise en page des menus et des pages contenant les cartes, ainsi que les animations.

4.2.1. La création des boutons interactifs

L'accès aux différentes cartes va se faire par l'intermédiaire de boutons interactifs. Pour créer ces boutons, on va dessiner des illustrations sous Adobe Illustrator, qu'on va ensuite importer avec Flash, et transformer ces illustrations en boutons sur ce logiciel.

Pour dessiner les illustrations qui allaient servir à créer les boutons, je voulais trouver une idée à la fois plutôt originale et qui collerait bien au sujet que je traitais dans le cadre de ce stage. Par conséquent j'ai pensé à reprendre les contours de la zone d'étude pour dessiner les boutons qui allaient servir de menus sur la page d'accueil, et aux contours de l'Afrique pour les boutons qui allaient servir à accéder aux différentes périodes sur la page de menu des pluies annuelles. Pour cela, il a fallu ouvrir ces contours sous ArcMap et les exporter en

fichier .ai pour pouvoir les retravailler sous Adobe Illustrator. J'ai notamment redessiné les contours à l'aide de l'outil « *styles* » de ce dernier logiciel, aidé par Claudine Dieulin, pour leur donner un aspect plus original.

Pour créer un bouton il est préférable d'importer sous Flash deux illustrations ; une va représenter le bouton lors de l'affichage simple de la page HTML lorsque l'utilisateur de l'Atlas pluviométrique naviguera sur le CD, et l'autre va représenter le bouton lorsque le pointeur de la souris passera dessus. Si on utilise qu'une seule illustration, l'utilisateur ne saura pas à quel endroit il pourra cliquer sur la page HTML.

J'ai donc créé pour chaque bouton deux fois la même illustration en changeant quelques paramètres à chaque fois comme la couleur notamment (fig. 25). Pour les boutons de la page d'accueil, j'ai aussi joué sur la transparence pour la seconde illustration.

Il faut ensuite les exporter en .PNG, qui est le format le mieux accepté sur le logiciel Flash, en définissant la taille de ces illustrations en pixels (il va falloir choisir la taille en fonction de l'espace qu'on veut que les boutons prennent sur la scène de Flash). Une fois la taille des illustrations définie, on va les importer dans la bibliothèque sous Flash. On va les transformer en boutons en définissant quelle est l'image que l'on va avoir lorsque le pointeur de la souris survole le bouton.

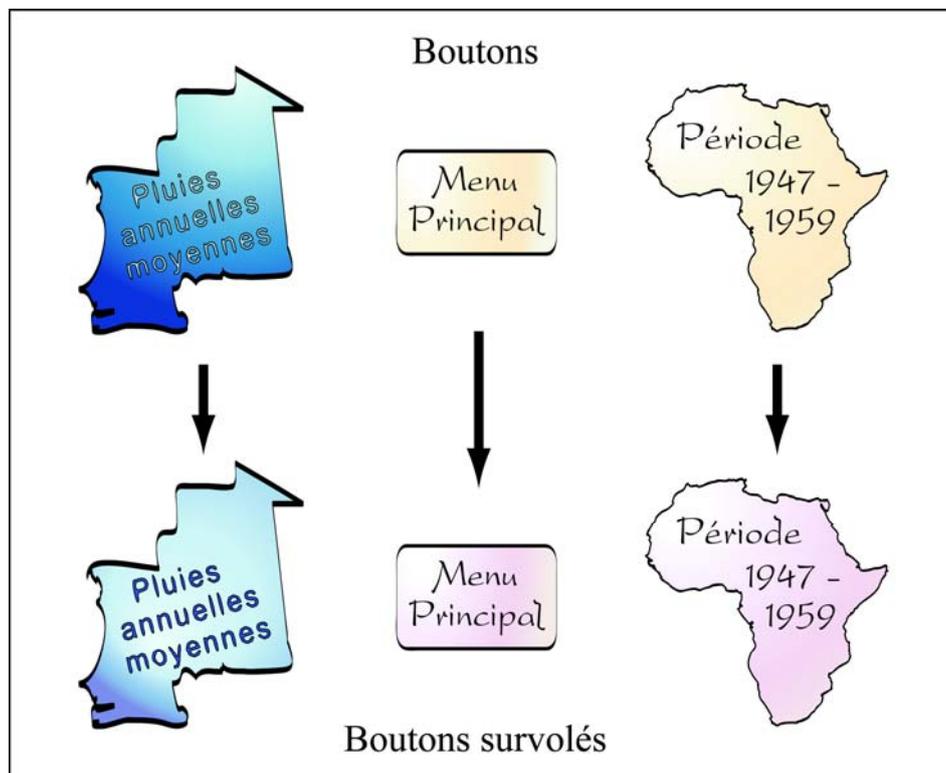


Figure 25 : Illustrations permettant de créer les boutons sous Flash

4.2.2. La mise en page

On va pouvoir ensuite organiser la mise en page des différentes pages de menus. J'ai aussi dessiné des fonds d'écran grâce à Adobe Illustrator, avec des couleurs en dégradé ce qui n'est pas possible sur Flash.

Concernant la page d'accueil, il fallait penser à faire apparaître les logos de l'IRD ainsi que de HSM ; sachant qu'il n'existe pas de logo spécifique à l'ATI Santé, j'en ai dessiné un moi-même. J'ai aussi décidé de faire apparaître en fond d'écran l'Afrique avec la zone d'étude dessinée sur cette dernière. Les cinq boutons sont disposés sur les contours de l'Afrique (fig.26).

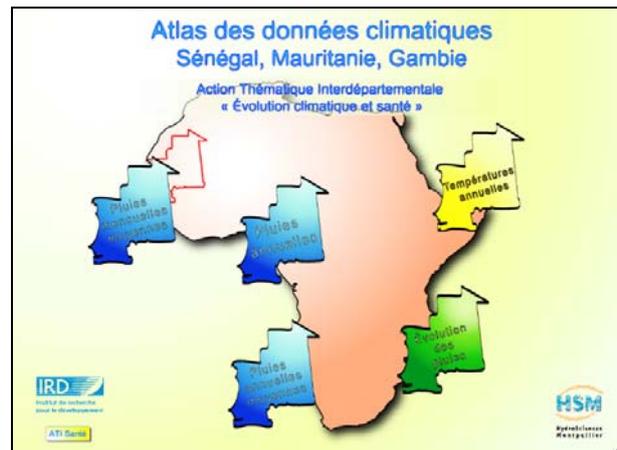


Figure 26 : Mise en page de la page d'accueil

Pour la page de menus des pluies annuelles, j'ai utilisé quatre boutons créés avec l'illustration de l'Afrique pour chacune des décennies, que j'ai positionnés sur la gauche de la page, et j'ai laissé un espace au centre pour y faire défiler les cartes de pluies annuelles d'année en année.

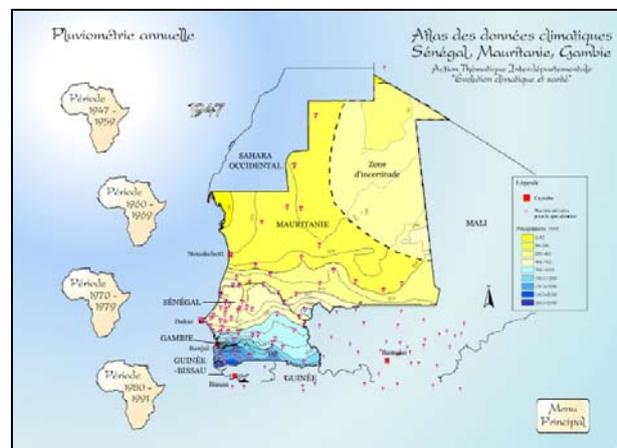


Figure 27 : Mise en page pour la page de menus des pluies annuelles

Pour mentionner les dates pour chaque carte, j'ai dessiné des chiffres sous Adobe Illustrator que j'ai assemblé ensuite afin de dessiner chacune de ces dates (fig.28). J'ai utilisé plusieurs outils d'Adobe Illustrator pour créer des couleurs et formes originales

(transformations en vecteurs, déformations, dégradés de couleurs...). J'ai utilisé les mêmes procédés pour certains titres.



Figure 28 : Création des boutons permettant la mise en forme des dates

4.2.3. Les animations

Flash est un logiciel qui permet de créer des animations image par image, dans lesquelles on va insérer chacune de ces images, il permet également de créer des animations interpolées dans lesquelles on va créer la première et la dernière image d'un effet animé et demander au logiciel de créer les images intermédiaires. Les animations se font à l'aide du « scénario » de Flash, qui est l'endroit où on stocke les images dans des calques. Le scénario organise et contrôle le contenu d'une animation au fil du temps dans des calques et des images.

J'ai tout d'abord utilisé les animations sur la page de menu des pluies annuelles (fig.27) ; pour cela il a juste suffi d'insérer les images (les différentes cartes) les unes après les autres pour une durée déterminée chacune.

J'ai utilisé une autre animation pour la page d'accueil, qui permettait de faire sortir les boutons de la zone d'étude dessinée en fond d'écran grâce à un effet « zoom ». Ces boutons vont ensuite se placer à différents endroits sur la page d'accueil (fig. 26). Cette animation fut assez difficile à réaliser car il fallait gérer de nombreux calques différents dans le scénario sous Flash, utiliser la fonction « *interpolation de mouvement* » du logiciel, les « *guides* » pour diriger le mouvement, ainsi que les positions de chaque boutons à chaque étape de l'animation.

4.3. L'importation des cartes sous Flash

Pour disposer toutes les cartes au même endroit sur chaque image, il a fallu utiliser un repère pour caler chacune de celles-ci. J'ai utilisé comme repère les frontières des pays de la

zone d'étude et ceux frontaliers. Pour fonctionner comme ceci, il a fallu fixer une échelle que j'ai gardée pour l'exportation de toutes les cartes d'ArcMap, en tenant compte également de la taille des cartes que je voulais avoir sur la scène de Flash, ce qui a nécessité quelques tests. Il fallait ensuite exporter les cartes une par une à la même échelle, en format .PNG. Il était nécessaire d'utiliser un outil du logiciel Photoshop à cause d'une mauvaise gestion de la transparence d'ArcMap lors de l'exportation des cartes au format .png. Après avoir importé ces cartes sous Flash, il suffisait ensuite de les recalculer par rapport aux contours de la zone d'étude qui avaient été positionnés sur un calque à part.

4.4. Les liens vers les menus et les cartes

Une fois que toutes les cartes sont mises en place dans les différents fichiers Flash, on va créer des liens qui vont permettre à l'utilisateur de naviguer d'image en image (c'est-à-dire d'un menu à un autre, et de carte en carte). C'est au niveau des boutons qu'on va créer les liens. Il a fallu procéder de deux façons différentes :

- pour les liens menant à des images contenues dans un même fichier .fla (menant à la carte suivante ou précédente), il a fallu tout d'abord dans le scénario découper le calque contenant les boutons à chaque fois qu'on avait un changement de carte (en y insérant une « *image-clé* »). Il fallait ensuite nommer chaque carte sur le calque qui les contenait (« *étiquette d'image* »). Après avoir nommé les cartes on allait pouvoir créer les liens dans les boutons de chaque image, à l'aide d'un petit script à insérer grâce à l'outil « *action* » :

Par ex : lorsque l'on veut créer un lien sur le bouton « suivant » menant de la carte 1960 à la carte 1961

```
on (press) {  
    gotoAndStop("1961");  
}
```

- pour les liens menant à des images contenues dans un autre fichier .fla (menant à un menu différent), il était aussi nécessaire d'insérer un script pour créer le lien, en indiquant la future adresse HTML (qui est la même que le nom du fichier .fla) créée par Flash de la page de menu correspondante :

Par ex : pour être redirigé
vers le menu principal

```
on (press)
{getURL("index.html");
}
```

4.5. La finalisation sur CD

L'étape définitive consistait à finaliser la production de l'atlas de données climatiques sur CD multimédia. Les fichiers que l'on doit graver sur un CD doivent être les fichier .swf et les fichier .html.

Les fichiers .swf sont créés par le logiciel Flash lorsque l'on teste l'animation (« *Contrôle/Tester l'animation* »), ce qu'il fallu faire pour chaque fichier .fla.

Les fichiers .html eux, sont créés par le logiciel Flash en publiant chaque fichier .fla (« *Fichier/publier* »).

Avec Claudine Dieulin, nous avons pensé qu'il était plus intéressant que le CD se lance automatiquement lorsque l'utilisateur l'insérerait dans le lecteur CD de son ordinateur, plutôt que d'aller le lancer à partir de l'Explorateur Windows. Pour que ceci soit possible, j'ai édité un fichier texte contenant une formule qu'Agnès Cres et Claudine Dieulin m'ont aidé à trouver :

```
[Autorun]
```

```
Shellexecute = index.html
```

Ce fichier texte devait être transformé en « autorun.inf » pour pouvoir lancer le CD automatiquement.

Il ne manquait plus qu'à graver le CD contenant les fichiers SWF, HTML, et « autorun .inf ».

Ce support multimédia peut être à tout moment modifié et complété en agissant sur les fichiers .fla, il suffit à ce moment là de recréer les fichier SWF et HTML, et les graver à nouveau sur le CD. Des cartes de températures pourront donc être ajoutées ultérieurement.

Conclusion

L'Afrique de l'Ouest est sujette à des variations climatiques importantes depuis plusieurs décennies. Une équipe de l'Institut de Recherche et de Développement étudie dans le cadre de l'Action Thématique Interdépartementale « Évolution climatique et Santé », coordonnée par Jean-François Trape, les impacts de ces changements climatiques sur les maladies à transmission vectorielle. Parmi ces maladies, la borréliose à tiques, maladie encore peu connue et oubliée, constitue avec le paludisme la maladie tropicale la plus affectée ces dernières années par le changement climatique.

Depuis plus d'une trentaine d'années, un cycle de sécheresse exceptionnel de part sa durée sévit en Afrique de l'Ouest. Cette situation déficitaire de la pluviométrie depuis les années 1970 est particulièrement prononcée en Mauritanie, au Sénégal et en Gambie, ainsi que dans tous les autres pays du Sahel. Les précipitations ont chuté de 15 à environ 60% sur la zone regroupant ces trois pays entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985. Cette diminution de la pluviométrie a entraîné un glissement des isohyètes d'une centaine de kilomètres vers le sud. La légère augmentation de la pluviométrie qui a marqué les années 90 n'a jamais permis d'atteindre les valeurs de précipitations caractérisant les années 50 et 60, avant la rupture.

Les études de l'ATI « Évolution climatique et Santé » démontrent que le déplacement de l'isohyète 750 mm a entraîné une extension considérable de la distribution géographique de la maladie et de la tique vectrice vers des régions situées plus au sud qui n'avaient jusque là jamais connu cette maladie, comme dans certaines régions du Sénégal notamment.

Ce stage m'a personnellement beaucoup apporté dans la mesure où il m'a permis d'aborder tous les aspects de la réalisation d'une carte. J'ai du en effet passer tout d'abord par les étapes de l'extraction des données de la base de donnée, du tri et de la critique de ces données ; ces étapes nécessitant une réflexion minutieuse de ma part, la qualité d'une carte dépendant fortement de la qualité du jeu de donnée ayant servi à sa réalisation. J'ai ensuite réalisé la spatialisation des données grâce au logiciel SIG puissant ArcInfo, et la réalisation graphique des cartes avec le logiciel ArcMap. Enfin, j'ai du produire ces cartes sur un support

multimédia grâce aux logiciels Flash MX et Adobe Illustrator, ce qui m'a beaucoup appris en terme de mise en forme d'un produit et de mise en page.

Ce stage m'a aussi permis de découvrir le langage de programmation Visual Basic.

Outre le fait d'aborder les différents aspects de la réalisation d'une carte et la découverte d'outils extrêmement puissants, ce stage m'a aussi appris à trouver ma place au sein d'une équipe à la fois très professionnelle et très agréable. Ce stage fut donc aussi une expérience humaine très intéressante.

ANNEXES

Annexe 1

Liste des cartes demandées par l'ATI « Evolution climatique et Santé »

PLUVIOMETRIE

Cartes de la pluviométrie annuelle totale

- chaque année de 1947 à 2003 50 cartes

Cartes de la pluviométrie annuelle moyenne

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003
1947-2003 1970-2003 6 cartes

Cartes de la pluviométrie mensuelle moyenne

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003
1947-2003 1970-2003 72 cartes

Cartes décennales de la date de la première pluie de plus de 5 mm

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003
1947-2003 1970-2003 6 cartes

Cartes décennales de la date du premier cumul de plus de 20 mm

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003
1947-2003 1970-2003 6 cartes

Cartes décennales de la date du premier cumul de plus de 50 mm

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003
1947-2003 1970-2003 6 cartes

Cartes décennales de la date du premier cumul de plus de 100 mm

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003
1947-2003 1970-2003 6 cartes

Cartes décennales de la date où est atteinte la moitié de la pluviométrie annuelle

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003
1947-2003 1970-2003 6 cartes

Cartes de la date du dernier cumul décennal de plus de 5 mm

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003
1947-2003 1970-2003 6 cartes

Cartes de la durée moyenne entre la première et la dernière pluie de plus de 5 mm

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003

1947-2003 1970-2003

6 cartes

Cartes de la fréquence d'une pluie de plus de 5 mm pendant les mois secs

- périodes 1900-1946 1947-1969 1970-1985 1986-2003

1947-2003 1970-2003

6 cartes

HUMIDITE & TEMPERATURE

Je n'ai pas pu faire certaines cartes dans la mesure où je ne comprenais pas à quoi correspondaient celles-ci.

Par exemple pour les cartes décennales de la date du premier cumul de plus de 5 mm nous avons déduit grâce à Laurence Vial (malheureusement trop tardivement pour que je puisse réaliser ces cartes) qu'il s'agissait de cartes ayant pour isolignes des dates et non plus des données de précipitations et que ces dates représentaient le premier cumul de plus 5 mm.

Annexe 2

Méthode utilisée pour constituer le jeu de données de pluies mensuelles moyennes

Une première macro est utilisée sur les fichiers textes grâce à Excel. Exemple pour la période 1947-1969 :

Option Explicit

Sub MoyennesMensuelles47_69()

Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim somme As Single
Dim lacune As Integer
Dim cl As Integer
Dim valeur As Single

For j = 6 To 17 (mois de janvier à décembre)

For i = 1 To 627 (nombre de stations dans les fichiers toujours le même nombre)

somme = 0 (on démarre le compteur à zéro)

lacune = 0

For cl = 2 To 24

valeur = Workbooks(cl).Worksheets(Mid(Workbooks(cl).Name 1 4)).Cells(i j)

If valeur <> -1 Then

somme = somme + valeur

Else

lacune = lacune + 1 (compteur du nombre d'années avec une lacune)

End If

Next cl

If lacune < 6 Then

somme = somme / (23 - lacune)

Else: somme = -999 (lorsqu'il y avait plus de 5 lacunes la somme était égale à -999 il fallait les supprimer ultérieurement)

End If

Workbooks("moymens47_69.xls").Worksheets("feuille1").Cells(i j) = somme

Next i

Next j

Columns("A:E").Select

Selection.Delete Shift:=xlToLeft

End Sub

Une fois cette macro effectuée on obtient les moyennes des différentes stations pour chaque mois on a donc 12 colonnes avec les 12 mois de l'année. A partir de ce fichier Excel on va recréer 12 fichiers différents un pour chaque mois. Une fois qu'on a ces 12 fichiers on va pouvoir enlever les stations pour lesquelles on a des valeurs -999 qui correspondent à des stations pour lesquelles il existait plus de 5 lacunes (plus de 5 années de données de pluies manquantes). Cette opération se fait grâce à la macro suivante :

```

Sub effacementlacunes()

Dim nomfic As String

Application.DisplayAlerts = False

nomfic = Dir("c:\mauritanie\fichiersagnes\pmensuelles\47-69\*.txt")
ChDir "c:\mauritanie\fichiersagnes\pmensuelles\47-69"

Do While nomfic <> ""

Workbooks.Open Filename:=nomfic

    Cells.Select
    Selection.Sort Key1:=Range("F2") Order1:=xlAscending Header:=xlGuess _
        OrderCustom:=1 MatchCase:=False Orientation:=xlTopToBottom _
        DataOption1:=xlSortNormal

    Do While Range("F2") = -999

        Rows("2:2").Select
        Selection.Delete Shift:=xlUp
    Loop

    Cells.Select
    Selection.Sort Key1:=Range("A2") Order1:=xlAscending Header:=xlGuess _
        OrderCustom:=1 MatchCase:=False Orientation:=xlTopToBottom _
        DataOption1:=xlSortNormal
    Range("H11").Select

ActiveWorkbook.Save
ActiveWorkbook.Close

nomfic = Dir

Loop

Application.DisplayAlerts = True

End Sub

```

On utilise cette macro pour les 12 fichiers textes pour chaque période. Ces fichiers textes sont ensuite prêts à être ouvert sous ArcMap et on va pouvoir les exporter en fichier shape.

Annexe 3

Stations ayant eu leurs coordonnées modifiées pour éviter leur suppression lors de l'étape de spatialisation avec ArcInfo

1380001000	Bambey Météo	14.7	-16.4667	>> transformé en	-16.4668
1380001100	Bambey ISRA (ancien IRAT)				
1270002900	Bamako-Bamako (Ville)	12.6333	-8.0333	>> transformé en	-8.0334
1270003000	Bamako-Sénou (Aéro)				
1270009100	Diema	14.55	-9.1833	>> transformé en	-9.1834
1270009200	Diema Bis (Kayes)				
1270103000	Adrao-Projet (Mopti)	14.5167	-4.1	>> transformé en	-4.1001
1270031900	Mopti-Aéro				
1300003100	Kaedi 1	16.133	-13.5167	>> transformé en	-13.5168
1300003200	Kaedi-Irat ASECNA depuis 1982				
1380015400	Louga	15.6167	-16.2167	>> transformé en	-16.2168
1380015500	Louga-Irho				
1270029000	Longorola	11.350	-5.6833	>> transformé en	-5.6834
1270042100	Sikasso				
1190040000	Cade-Pitche	12.3167	-13.9667		
1190081000	Pitche	12.3167	-13.9667	>> transformé en	-13.9668
1381299003	Thyssen Kaymor (sine saloum) P3	15.5583	-13.7583		
1381299008	Thyssen P8 sine saloum = ndiba	15.5583	-13.7583	>> transformé en	-13.7582
1381299009	Thyssen Kaymor P9 bv ndiba	15.5583	-13.7583	>> transformé en	-13.7584
1270035200	Niantjila	11.8	-6.55		
1270668400	Niantjila	11.8	-6.55	>> transformé en	-6.5501
1270008200	Cinzana	13.2833	-5.95		
1270008200	Cinzana	13.2833	-5.95	>> transformé en	-5.9501
1270013100	Farako	11.2167	-5.4833		
1270330000	Finkolo (Sikasso)	11.2167	-5.4833	>> transformé en	-5.4834
1270046900	Yangasso	13.0667	-5.3167		
1270145000	B-Yangasso	13.0667	-5.3167	>> transformé en	-5.3168
1150777016	Kerewan	13.5	-16.1		
1150777017	Kerewan Met.	13.5	-16.1	>> transformé en	-16.1001

Annexe 4

Liste des stations ayant été supprimées pour cause de valeurs douteuses

- 1947 : MAKA COULIBENTAN (SN) : pmm très faibles.
- 1956 : OULOUMA (ML) : 1761mm alors qu'à côté on a des valeurs entre 600 et 800 mm.
- 1961 : FULACUNDA (GW) : 3048 mm alors qu'à côté on a entre 1800 et 2200 mm.
- 1962 : TAMCHAKETT (MR) : 1196 mm (valeur douteuse pour la Mauritanie).
- 1966 : SANNOU (GN) : 3037.8 mm alors qu'à côté on a entre 1400 et 1800 mm.
- 1967 : SANNOU (GN) : 3168 mm alors qu'à côté on a entre 2000 et 2200 mm.
- 1968 : SANNOU (GN) : 2986 mm alors qu'à côté on a entre 1400 et 1500 mm.
- 1969 : SANNOU (GN) : 3045 mm alors qu'à côté on a entre 1600 et 2000 mm.
- 1970 : SANNOU (GN) : 2517 mm alors qu'à côté on a entre 1200 et 1500 mm.
- 1967 : OULOUMA (ML) : 1539.7 mm alors qu'à côté on a entre 600 et 800 mm.
- 1969 : KATI-HAUT (ML) : 2596 mm alors qu'à côté on a des valeurs environ 1000 mm.
- 1970 : XITOLE (GW) : 253 mm alors qu'à côté ça dépasse 1500 mm.
- 1971 : XITOLE (GW) : 621 mm alors qu'à côté ça dépasse 1500 mm.
- 1972 : XITOLE (GW) : 621.3 mm alors qu'à côté ça dépasse 1500 mm.
- 1974 : XITOLE (GW) : 153 mm alors qu'à côté ça dépasse 1500 mm.
- 1979 : SINE-MATAR (SN) : 3928.5 mm alors qu'à côté on a des valeurs entre 700 et 1000 mm (1300 mm en juillet et 1446 mm en août).

Stations supplémentaires supprimées pour le jeu de données de 1980 à 1991 :

Moudery (SN)
Fassala nere (MR)
Toukara (SN)
Colobane (SN)
Foum Gleita (MR)
Agueilat (MR)
Dialakoto (SN)
Doussoudiagua (ML)
Toufoude Cive (MR)
Gogui(mopti) (ML)
Aourou (ML)
Yanfolila (ML)
Boulel centre (SN)
Faraba (ML)
Touil (MR)
Kaur hydro (GM)
Gabou (MR)
Koundara (GN)

Annexe 5

Détail des procédures pour la spatialisation des données avec ArcInfo à travers un exemple : l'année 1947

Il a fallu réaliser de nombreux tests de spatialisation des données afin de choisir la bonne méthode à utiliser en observant les résultats. Pour réaliser ces tests de spatialisation, il a fallu passer par plusieurs étapes sur différents logiciels :

- Créer un espace de travail (« workspace ») sous **ArcInfo** où vont être stockés tous les fichiers créés par ArcInfo

Ex : Arc : cw c:\mauritanie\pannuelles

- Créer un fichier Shape avec **ArcMap** : pour cela on ouvre le fichier .txt concerné avec ArcMap et on affiche les points (les stations) en fonction de leurs coordonnées en longitude et latitude (clic droit sur l'intitulé du fichier, puis *afficher les données XY*). Quand ces points sont affichés, on enregistre au format Shape (clic droit, *données/exporter les données*).
- On repasse sur le logiciel **ArcInfo**, et on se place sous l'espace de travail concerné par les données (dans mon cas j'ai créé plusieurs répertoires pour ces tests avec une typologie qui me permettait de ne pas me tromper entre les différentes méthodes lorsque j'examinais ensuite les résultats. C'est une fois tous ces tests réalisés et après avoir choisi la méthode de spatialisation appropriée pour cette étude, que j'ai créé un répertoire pour les pluies annuelles, un autre pour les pluies mensuelles...)

Exemple :

```
Arc : w c:\mauritanie\testpannuelles
```

```
Arc : shapearc pa1947 pa1947 (pa1947 est le nom du Shape créé avec ArcView)
```

```
Arc : build 1947 point
```

Cette commande met en forme la couverture ArcInfo

Il faut ensuite rentrer dans le module Grid pour spatialiser (On va créer les grilles de pluies) :

```
Arc : Grid  
Grid :
```

C'est à ce moment là qu'il faut rentrer les commandes correspondant à la méthode que l'on veut utiliser. Les tests ont été effectués avec toutes les méthodes, même si des personnes très compétentes en ce qui concerne la spatialisation des données donnaient leur préférence pour le Krigeage ou L'Inverse Distance Pondérée.

Il s'est avéré effectivement que les résultats obtenus par la plupart des méthodes utilisées ne donnaient rien de concret avec notre jeu de données.

Nous nous sommes donc plutôt penchés sur ces deux méthodes que je vais détailler à partir de l'exemple de l'année 1947 :

- Essais avec IDW Inverse Distance Pondérée

```
Pa1947gi=idw(pa1947, pa, #, 0.5, radius, #, 1, 0.5, -18, 11, -4, 28)
```

C'est-à-dire que la spatialisation avec une méthode d'inverse distance pondérée se fait :

- à partir de la couverture de points nommée pa1947 ;
- le champ utilisé comme valeur Z de la grille est celui intitulé « pa » dans le fichier .txt ;
- # : valeur par défaut du paramètre barrière, qui bloque la spatialisation lorsqu'une couverture de faille interrompt la spatialisation ;
- 0.5 : exposant correspondant au calcul de spatialisation entre les stations de la couverture (tests effectués également avec 1 ou 1.5) ;
- Radius : la spatialisation se fait sur un rayon donné (l'autre option, « sample », consiste à définir un échantillon de points connus pour spatialiser la donnée Z) ;
- # : valeur du rayon, par défaut 5 fois la taille des cellules en sortie ;
- 1 : nombre de points utilisés à l'intérieur du rayon défini précédemment, par défaut il est à 0, le rayon est étendu si ce nombre de points n'est pas trouvé (on peut jouer sur ce paramètre aussi pendant les tests) ;

- 0.5 : taille de la cellule de grille de sortie, exprimée en unité de la carte carré ;
- -18 : Xmin de la zone à spatialiser ;
- 11 : Ymin de la zone à spatialiser ;
- -4 : Xmax de la zone à spatialiser ;
- 28 : Ymax de la zone à spatialiser.

- Essais avec le Krigeage

```
pa1947gk = kriging(pa1947, pa, #, grid, pa1947var, #, radius, #, 1, 0.5, -
18, 11, -4, 28)
```

- pa1947gk : grille en sortie ;
- pa1947 : couverture de points ;
- pa : champ de la valeur Z de la grille ;
- # : fichier barrière s'il y en a un pour la zone donné ;
- grid : indique que c'est une grille qui est constituée en sortie (choix entre un graphe, une grille, ou les deux) ;
- pa1947var : grille contenant le variogramme du calcul ;
- # : méthode de krigeage, par défaut ArcInfo utilise la méthode **Sphérique**, mais choix aussi avec circulaire, exponentielle, gaussienne, linéaire, universal1 et universal2 ;
- radius : le krigeage est fait sur un rayon donné, par défaut 5 fois la valeur de la cellule en sortie ;
- # : valeur par défaut du radius ;
- 1 : nombre de points minimum pour mener à bien l'interpolation ;
- 0.5 : taille de la cellule en sortie ;
- Xmin ;
- Ymin ;
- Xmax ;
- Ymax.

Après avoir créé les grilles de pluies, l'étape suivant consiste à les transformer en lignes d'isovaleurs :

```
Grid : pa1947lk = contour(pa1947gk, interval, 50, 0)
```

- pa1947lk : couche de lignes en sortie
- pa1947gk : grille en entrée
- interval : les courbes sont tracées à intervalle régulier. On peut aussi noter les valeurs si le pas n'est pas régulier, en utilisant la commande « list »)
- 0 : seuil inférieur utilisé pour tracer les courbes

Pour ces essais de spatialisation, le paramètre retenu en ce qui concerne les intervalles des courbes n'était pas « interval » mais plutôt « list », dans la mesure où les totaux annuels de pluies au nord de la Mauritanie peuvent être très faibles ; par conséquent il fallait pouvoir observer le placement des isolignes dans cette zone où les pluies pouvaient être inférieures à 50 mm.

```
Grid : pa1947lk = contour(pa1947gk, list, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000)
```

En utilisant la méthode Inverse Distance Pondérée, on remarque de temps en temps des zones douteuses d'isolignes 100mm au centre de la Mauritanie qui disparaissent avec le Krigeage

Lorsque l'on observe des dissemblances entre les différentes méthodes de Krigeage, on se rend compte qu'il n'y a aucune différence sur la majeure partie de la zone d'étude, les changements sont visibles seulement dans la partie nord de la Mauritanie.

Des tests ont aussi été effectués en changeant le nombre de points minimum pour mener à bien l'interpolation, en essayant de 1 à 15 points pour chaque méthode.

Finalement, le choix s'est porté sur le **Krigeage** avec une méthode Sphérique, faite sur un rayon correspondant à 3 fois la valeur de la cellule en sortie, et un nombre de 5 points minimum pour mener à bien l'interpolation.

Références Bibliographiques

Ardoin-Bardin Sandra (2004), *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II.

Crès François-Noël (2004), *Informatique Excel*. Document pédagogique. École Polytechnique Montpellier II. 60p.

Crès François-Noël (2004), *Informatique Visual Basic-Excel*. Document pédagogique. École Polytechnique Montpellier II. 45p.

De Blomac F., Gal R., Hubert M., Richard D., Tourret C. (1994), *ArcInfo : concepts et applications en géomatique*. Col. Traité de nouvelles technologies. Série Géomatique. Hermès, Paris, 1994.

Denett et al., (1985), *A reappraisal of rainfall trends in the Sahel*. Journal of Climatology, n°5, 355-362.

Dubief Jean (2001), *Données Météorologiques du nord de l'Afrique à l'Equateur*. Karthala, Paris, 2001. 274 p.

Dubief Jean (1958), *Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara*. G GI de l'Algérie. Direction de l'Hydraulique. Alger-Birmadreis.

Dubief Jean (1959), *Le climat du Sahara*. Mémoire Université d'Alger. Tome I. Alger, 1959.

Estienne P., Godard A. (1992), *Climatologie*. Masson, Paris, 1992.

Haziza Emma (2003), *Modélisation mensuelle pluie-débit. Apport de la spatialisation. Cas des données de sols*. Mémoire de DEA, Université Montpellier II.

Jeune Afrique (1993) Atlas Jeune Afrique du continent Africain. Editions du Jaguar, Paris, 1993. 175p.

L'Hôte Y., Mahé G. (2004), *Sahel : une sécheresse persistante et un environnement profondément modifié*. Revue de la Société Météorologique de France, 44, 8.

L'Hôte Y., Mahé G. (2002), *Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues*. Hydrological Sciences Journal, 47, 4, 563-572.

Mahé Gil (1993), *Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques. Moyennes et extrêmes*. Thèse Université Orsay Paris XI, 1993. Col. Études et Thèses de l'ORSTOM.

Nicholson S.E., Palao I.M. (1993), A re-evaluation of rainfall variability in the Sahel. Part I. Characteristics of rainfall fluctuations. International journal of Climatology, vol.13, 371-389.

Sénégal (1976), *Annales des précipitations journalières de la République du Sénégal de l'origine des Stations à 1965*. CIEH - Ministère de la Coopération - ORSTOM. 872 p.

Sénégal (1990), *Annales des précipitations journalières du Sénégal de 1966 à 1980*. Ministère de l'Hydraulique, Dakar. CIEH – ASCNA - ORSTOM. 675 p.

Sircoulon J., Olivry J.C. (1986) *Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale (considérations sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières)*. In : Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, Ouagadougou 20-24 mai 1986. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Série Hydrologie, 20p.

Thinon Pascal (2004), *ArcView 8.2. Support de cours et travaux pratiques*. ENSAM-INRA.

Vial Laurence (2005), *Epidémiologie de la borréliose à borrelia crocidura*. Thèse en cours.
Université Montpellier II.

ArcInfo – Tutorial

Sites Internet

<http://armspark.msem.univ-montp2.fr/sierem/>

Site du Système d'Information Environnementale sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (SIEREM).

<http://www.hydrosciences.fr>

Site Internet de l'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier.

<http://www.ird.fr/>

Site de l'Institut de Recherche et de Développement.

<http://www.maisondeleau.org/>

Site de la Maison des Sciences de l'Eau.

http://www.getty.edu/research/conducting_research/vocabularies/tgn/

Getty Thesaurus of Geographic Names Online. Base de donnée gratuite qui répertorie plus d'1 million de noms et d'informations sur des sites dans le monde (comme par exemple les coordonnées géographiques).

<http://www.grida.no/climate/ipcc/regional/pdf/africa.pdf>

Rapport sur les incidences de l'évolution du climat dans les régions : Evaluation de la vulnérabilité. Afrique.

<http://www.ird.sn/centre/sommaire.htm>

Site de l'Institut de Recherche et de Développement au Sénégal.

<ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/SRTM30/>

Adresse Ftp de la NASA regroupant les informations sur le SRTM30.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	2
Introduction.....	3
1. Le contexte.....	5
1.1. Présentation de la Maison des Sciences de l'Eau et de l'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier.....	5
1.1.1. La Maison des Sciences de l'Eau	5
1.1.2. L'Unité Mixte de Recherche HydroSciences Montpellier	6
1.1.2.1. L'organisation des recherches au sein de l'UMR HydroSciences Montpellier	6
1.1.2.2. L'Axe 3 de l'UMR HSM : La Variabilité hydrologique.....	8
1.2. Environnement technique et logiciels utilisés pendant le stage	10
1.3. L' Action Thématique Interdépartementale « Évolution climatique et Santé ».....	13
1.3.1. L'institut de Recherche pour le Développement	13
1.3.2. La borréliose à tiques	14
1.4. La zone d'étude	16
1.5. Le climat de l'Afrique de l'Ouest	17
1.5.1. Les alizés	17
1.5.2. La mousson	19
1.5.3. La Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT).....	19
1.5.4. Les différentes zones climatiques en Afrique de l'Ouest	21
2. La constitution des jeux de données	22
2.1. La Base de Données	22
2.2. L'extraction des données à partir d'Orion.....	22
2.3. L'optimisation de la qualité des jeux de données	26
2.3.1. Les différentes étapes pour le tri des données.....	26
2.3.1.1. Les données de pluies annuelles	27
2.3.1.2. Les données de pluies mensuelles moyennes	28
2.3.2. Les macros Excel en VBA.....	29
2.3.3. La critique des données	31
2.3.3.1. Les doublons supprimés par ArcInfo	31
2.3.3.2. Les données de pluies discutables	32
2.3.3.3. Le cas des pluies annuelles de 1980 à 1991	35
2.4. Le choix de la méthode de spatialisation	36
2.5. Les macros sous ArcInfo.....	37

3. <u>La réalisation des cartes</u>	39
3.1. <u>Mode opératoire</u>	39
3.2. <u>L’habillage de la carte</u>	41
3.2.1. <u>La charte graphique</u>	41
3.2.2. <u>La symbologie</u>	45
3.3. <u>La pluviométrie annuelle</u>	46
3.3.1. <u>Les cartes de pluies annuelles de 1947 à 1991</u>	46
3.3.2. <u>La variabilité de la pluviométrie annuelle</u>	51
3.3.2.1. <u>Une rupture à la fin des années 1960</u>	51
3.3.2.2. <u>Le glissement des isohyètes vers le sud</u>	58
3.4. <u>La variabilité de la pluviométrie mensuelle</u>	61
4. <u>La production de l’atlas de données climatiques sur support multimédia</u>	65
4.1. <u>L’organisation du support multimédia</u>	65
4.1.1. <u>L’arborescence</u>	65
4.1.2. <u>La résolution des cartes interactives</u>	67
4.2. <u>Le design</u>	67
4.2.1. <u>La création des boutons interactifs</u>	67
4.2.2. <u>La mise en page</u>	69
4.2.3. <u>Les animations</u>	70
4.3. <u>L’importation des cartes sous Flash</u>	70
4.4. <u>Les liens vers les menus et les cartes</u>	71
4.5. <u>La finalisation sur CD</u>	72
Conclusion.....	73
Annexes.....	75
Références bibliographiques.....	86
Table des matières.....	89
Table des figures et tableaux	91

TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figures :

<u>Figure 1 : La Maison des Sciences de l'Eau</u>	5
<u>Figure 2 : L'organigramme d'HydroSciences Montpellier</u>	7
<u>Figure 3 : L'organigramme de l'équipe VAHYNE</u>	10
<u>Figure 4 : Localisation de la zone d'étude</u>	18
<u>Figure 5 : Schématisation et explication du climat en Afrique de l'Ouest</u>	20
<u>Figure 6 : La création des paniers sur le logiciel Orion</u>	23
<u>Figure 7 : Le choix des données à extraire de la Base de Données avec le logiciel Orion</u>	24
<u>Figure 8 : L'exportation des séries en fichier texte à partir d' Orion</u>	25
<u>Figure 9 : L'outil Visual Basic Editor du logiciel Excel</u>	30
<u>Figure 10 : Le repérage des données douteuses grâce aux grilles de pluies créées par ArcInfo</u>	33
<u>Figure 11 : Le repérage des données douteuses grâce aux isolignes créées par ArcInfo</u>	34
<u>Figure 12 : Carte des précipitations annuelles en 1950</u>	48
<u>Figure 13 : Carte des précipitations annuelles en 1958</u>	49
<u>Figure 14 : Carte des précipitations annuelles en 1983</u>	50
<u>Figure 15 : Carte de pluviométrie annuelle moyenne pour la période 1947-1969</u>	52
<u>Figure 16 : Carte de pluviométrie annuelle moyenne pour la période 1970-1985</u>	53
<u>Figure 17 : Fluctuation des précipitations pour certaines régions d'Afrique, exprimée en écart type moyen par région (Nicholson, 1993)</u>	55
<u>Figure 18 : Carte de différences de pluviométrie entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 en valeurs absolues</u>	56
<u>Figure 19 : Carte de différences de pluviométrie entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 en pourcentage</u>	57
<u>Figure 20 : Déplacements vers le sud des isohyètes 250, 500, 1000, et 1500 mm en Afrique de l'Ouest entre les périodes 1951-1969 et 1970-1989</u>	59
<u>Figure 21 : Déplacements des isohyètes vers le sud entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 au Sénégal, en Mauritanie et en Gambie</u>	60
<u>Figure 22 : Grilles de pluies moyennes au mois d'août pour les périodes 1947-1969 et 1970- 1985</u>	62
<u>Figure 23 : Déplacements des isohyètes vers le sud entre les périodes 1947-1969 et 1970-1985 pour le mois d'août au Sénégal, en Mauritanie et en Gambie</u>	63
<u>Figure 24 : Arborescence du support multimédia</u>	66
<u>Figure 25 : Illustrations permettant de créer les boutons sous Flash</u>	68
<u>Figure 26 : Mise en page de la page d'accueil</u>	69
<u>Figure 27 : Mise en page pour la page de menus des pluies annuelles</u>	69
<u>Figure 28 : Création des boutons permettant la mise en forme des dates</u>	70

Tableaux :

<u>Tableau 1 : La charte graphique pour les cartes de pluies annuelles</u>	42
<u>Tableau 2 : La charte graphique pour les cartes de pluies mensuelles moyennes</u>	43
<u>Tableau 3 : La charte graphique pour les cartes d'évolution des pluies annuelles</u>	44
<u>Tableau 4 : Totaux annuels de pluies dans les 3 capitales de la zone d'étude en 1950, 1958 et 1983</u>	47
<u>Tableau 5 : Diminution des précipitations en Afrique de l'Ouest (Moyenne de la période 1970-1989 comparée à la période 1950-1969) (d'après Servat <i>et al.</i>, 1998)</u>	55