



Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Aix-en-Provence



Institut de recherche
pour le développement



MEMOIRE DE STAGE INGENIEUR 2006

*De L'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers
Pour l'Institut de Recherche pour le Développement*

*Tutrice de stage
Sylvie GALLE
Pour l'IRD*

*Elève-Ingénieur
Sébastien POISSON
Pour l'ENSAM*



SOMMAIRE

Partie 1 Le contexte

| | |
|------------|------------------------------|
| Chapitre 1 | <i>Présentation de l'IRD</i> |
| Chapitre 2 | <i>Le programme AMMA</i> |
| Chapitre 3 | <i>L'OHHVO</i> |

Partie 2 Mon travail

| | |
|------------|---|
| Chapitre 1 | <i>Connaissances préliminaires</i> |
| Chapitre 2 | <i>Calcul de l'évapotranspiration</i> |
| Chapitre 3 | <i>Le radar X-PORT</i> |
| Chapitre 4 | <i>Etalonnage des capteurs d'humidité</i> |

A lush tropical forest scene featuring a small waterfall and stream. The water flows over rocks and is surrounded by dense green vegetation, including palm trees and various tropical plants. The overall atmosphere is vibrant and natural.

PARTIE 1

Le contexte

Cette première partie nous permettra de présenter synthétiquement l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) ainsi que le programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) et plus particulièrement les recherches menées dans la haute vallée de l'Ouémé grâce à l'OHHVO (Observatoire Hydrologique de la Haute Vallée de l'Ouémé). Cela prendra en compte la présentation du cadre physique et du contexte socio-économique de la zone d'étude. Nous passerons donc en revue les aspects essentiels liés à l'IRD et au programme AMMA. Nous rappellerons aussi que notre travail, qui se situe dans un contexte scientifique général dont l'ambition est de parvenir à mieux connaître les impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau, impact dont les enjeux économiques, humains et environnementaux, sont capitaux pour l'avenir de nos pays.

*Le problème de la mesure des débits constitue l'une des plus pénibles incertitudes scientifiques actuelles.
(L. BARBILLON, 1909)*



Chapitre

Présentation de l'IRD

Son origine
Ses Missions
La recherche
Six grandes thématiques de
recherche
Expertise et Valorisation
Un dispositif de recherche
Soutien et Formation
Une politique de partenariat
L'information scientifique
Les moyens financiers
Les ressources humaines

Son origine

Créé en 1944, connu sous le nom d'ORSTOM, l'Institut de recherche pour le développement est, depuis 1984, un établissement public français à caractère scientifique et technologique, placé sous la double tutelle des ministères chargés de la Recherche et de la Coopération.

Ses Missions

L'IRD conduit des programmes scientifiques centrés sur les relations entre l'homme et son environnement dans les pays du Sud, dans l'objectif de contribuer à leur développement. Il remplit les missions fondamentales de : Recherche, Expertise et Valorisation, Soutien et Formation, Information scientifique.

La recherche : un axe stratégique du développement

Les travaux effectués par les chercheurs de l'IRD sont coordonnés par trois départements scientifiques :

Milieus et Environnement (DME) : Les recherches visent à comprendre certains phénomènes comme la variabilité climatique, l'interaction entre océan et atmosphère... Une meilleure perception du climat permet d'évaluer ses effets sur les ressources en eau et végétales ainsi que sur les risques naturels de l'environnement tels que les séismes ou les volcans.

Ressources Vivantes (DRV) : Les travaux portent sur les ressources et écosystèmes des milieux naturels terrestres et des milieux aquatiques, continentaux et marins, dans une optique de développement et de gestion durables. Certaines unités de recherche se consacrent à l'amélioration des productions végétales et tropicales, d'autres à la défense des cultures contre les parasites et les prédateurs. Enfin, de nombreuses recherches portent sur l'écologie aquatique et les sciences de la pêche.

Sociétés et Santé (DSS) : Les études menées couvrent deux domaines, les sciences sociales et la santé ainsi que leur interface dans un large spectre de disciplines. Elles concernent les grandes endémies (dengue, paludisme, sida...), le développement urbain, la pauvreté et ses déterminants et plus récemment les questions relatives aux interactions société/risques environnementaux tels que la migration ou les conflits.

Six grandes thématiques de recherche

Risques naturels, climats et ressources non renouvelables : impacts pour l'environnement et les populations du Sud

Stratégies d'adaptation au changement climatique

Les recherches ont pour objectif d'acquérir des connaissances fondamentales sur les effets des changements climatiques afin de mettre en oeuvre des stratégies d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation qui permettent d'affronter, dans les meilleures conditions, les impacts liés au changement climatique. L'action est menée sur la base des recommandations du groupe d'experts sur l'évolution du climat, dans le cadre du programme des Nations unies sur les changements climatiques.

Prévention et maîtrise des risques naturels et environnementaux

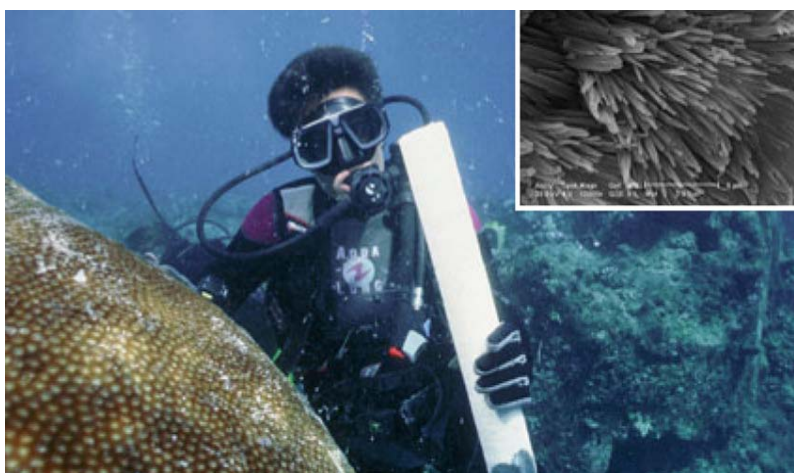
L'aléa est aussi bien géologique, climatique que lié à l'action de l'homme. Il s'agit de comprendre les aléas, en particulier géologiques (sismicité, volcanisme), climatiques (sécheresse, désertification) et d'origine humaine (pollution atmosphérique, pollution environnementale) et de proposer des solutions permettant d'anticiper, de réduire et de maîtriser les risques.

Exemple de programme de recherche dans ce domaine

Modélisation du tsunami en Thaïlande,
Changements climatiques et formation des récifs coralliens.



Gestion durable des écosystèmes du Sud



Biodiversité et gestion des ressources vivantes

La surexploitation des écosystèmes traditionnellement utilisés, la déforestation à des fins commerciales, agricoles ou d'urbanisation et la mise en culture de zones marginales très fragiles contribuent à l'érosion de la biodiversité. Dans ce contexte, il est nécessaire d'inventorier et de décrire dans toute leur complexité et leurs interactions, la biodiversité et la dynamique des écosystèmes continentaux et marins.

Informations spatiales et gestion durable de l'environnement

Les surfaces océaniques et continentales sont maintenant considérées comme un enjeu de recherche opérationnelle mettant en première place l'homme et ses impacts sur l'environnement. Les océans tropicaux et équatoriaux étudiés sont le lieu principal des échanges d'énergie ; la quantité d'eau disponible dans les sols dépend directement de ce cycle. Les recherches permettent de comprendre par l'analyse physique, chimique et pédologique, le fonctionnement de ces écosystèmes afin d'en assurer une gestion durable. Des technologies

adaptées sont proposées dans le but d'une appropriation rapide par le Sud des démarches d'acquisition de données et de gestion durable des environnements concernés. Ces questions interpellent les politiques d'environnement et les pratiques locales confrontées au défi d'un développement durable.

Exemple de programme de recherche dans ce domaine

Gestion rationnelle des ressources en eau au Maroc,
Poissons et pêcheurs en Amérique du Sud.

Eaux continentales et côtières : ressources et usages au Sud

Gestion intégrée des ressources en eau

Un milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable et deux milliards et demi n'ont aucun moyen d'assainissement. La mise en évidence de réserves, leurs conditions d'accessibilité et les problèmes de leur gestion sont l'une des clés du développement. L'accès à l'eau repose sur une chaîne complexe d'intervenants et implique souvent de bouleverser des équilibres sociaux millénaires. L'approche par une gestion intégrée des ressources en eau, fondée sur une solide connaissance du cycle de l'eau, permet de répondre à la problématique de l'accès à l'eau à diverses échelles pertinentes, du village au bassin versant en passant par le territoire.

Développement durable des environnements côtiers

Les recherches portent sur les écosystèmes coralliens, littoraux (estuaires, lagons, mangroves, etc.) et continentaux fortement anthropisés et visent à réduire l'impact de l'intensification des dégradations (prélèvements, pollutions, etc.) sur les ressources naturelles aquatiques. Il s'agit d'étudier les répercussions des changements induits par les activités humaines sur ces écosystèmes et leurs ressources biologiques en vue de les préserver et de les exploiter durablement.

Exemple de programme de recherche dans ce domaine

L'eau souterraine accélère les effondrements de terrain autour de la mer morte,
Une aquaculture durable du tilapia.



Sécurité alimentaire dans le Sud

Productivité des agrosystèmes

Dans de nombreuses régions, l'insuffisance des rendements, combinée à une croissance démographique rapide, a forcé les agriculteurs à cultiver de nouvelles terres peu adaptées à l'agriculture, entraînant le déboisement et la dégradation des sols. Le défi actuel est de continuer le développement de la production alimentaire afin de satisfaire aux besoins futurs sans causer d'effets négatifs sur l'environnement. Intimement liées, les notions de développement durable et de sécurité alimentaire constituent des enjeux majeurs pour les



pays du Sud. Les équipes dédiées au domaine agronomique sensu largo situent leurs travaux et inscrivent leurs recherches les plus fondamentales dans une perspective d'amélioration du rendement des terres cultivées dans des conditions durables tout en maintenant la fertilité des sols, en minimisant l'érosion et en diminuant les intrants. L'identification des mécanismes génétiques et les connaissances biologiques et physiologiques permettront d'accélérer la sélection variétale des plantes cultivées.



Politiques alimentaires

L'élimination de la faim, de l'insécurité alimentaire et de la malnutrition, alliée à une gestion durable des ressources naturelles, est un enjeu majeur du développement. Les progrès scientifiques et technologiques rapides dans les domaines de la biologie moléculaire, de l'information, de la communication et de l'énergie ont fait surgir la nécessité de mettre en place des politiques gouvernementales qui prennent en compte les besoins des agriculteurs, des consommateurs et de l'environnement. Les recherches portent sur l'identification des politiques appropriées (mesures d'incitation) à mettre en place par les décideurs politiques locaux pour améliorer l'efficacité des systèmes alimentaires et inciter les agriculteurs à augmenter leur productivité tout en appliquant une gestion durable des ressources naturelles.

Exemple de programme de recherche dans ce domaine

Biologie des populations de rongeurs des zones sahélo-soudaniennes inondables,
Les biotechnologies au secours des palmiers-dattiers du Sahara.

Sécurité sanitaire, politiques de santé et accès aux soins



L'accès aux soins est une dimension transversale qui doit accompagner systématiquement les recherches engagées. C'est un domaine prioritaire des recherches en sciences sociales de la santé.

Lutte contre les grandes maladies liées à la pauvreté : Sida, paludisme, tuberculose

Pour lutter contre ces grandes maladies, aux répercussions économiques importantes et dont la morbidité et la mortalité constituent une entrave majeure au développement, il est indispensable de rendre plus accessibles les interventions existantes, d'intensifier la recherche et le développement de nouveaux moyens de diagnostic et de lutte et d'améliorer la qualité des recherches.

Environnement et maladies émergentes

Dans les pays en développement, la prise en considération de l'impact de l'environnement sur la santé est une préoccupation récente des décideurs et des citoyens. L'émergence et la transmission de nombreuses maladies dépendent des milieux et de leurs évolutions. La recherche dans ce domaine nécessite une approche écosystémique de la santé humaine afin de proposer des démarches applicables dans les contextes locaux et évoluant vers des solutions viables à long terme. Les pays en développement ne sont plus à l'abri des maladies de civilisation, mais surtout l'évolution des conditions environnementales et humaines en font des

incubateurs de l'émergence de nouvelles maladies - SRAS, grippe aviaire, West Nile... - dont les risques et les répercussions sont mondiaux.

Santé de la mère et de l'enfant

Dans le domaine de la santé, les femmes sont particulièrement vulnérables en raison des risques liés à la maternité. De plus, par les soins qu'elles prodiguent aux enfants, elles sont le garant de la santé des générations futures. Les recherches sur la santé de la reproduction, les risques de la transmission mère/enfants du virus du sida, et les facteurs pouvant influencer sur la santé de la mère et de l'enfant, constituent des dimensions importantes de la recherche. Ainsi les rôles et les activités impartis par la société



aux femmes - facteurs longtemps négligés, et la question du genre et des inégalités liées au sexe doivent être une dimension essentielle de la recherche en sciences sociales, en particulier dans le domaine de ses répercussions sur la santé.

Exemple de programme de recherche dans ce domaine

Traitement préventif intermittent du paludisme : un nouvel espoir pour les enfants,
Leishmaniose viscérale : réussite d'un essai vaccinal sur des chiens.

Développement et Mondialisation : dynamiques socio-économiques, identitaires et spatiales



Lutte contre la pauvreté et les inégalités

Axe majeur des politiques de développement et des objectifs que se fixe la communauté internationale, la lutte contre la pauvreté et les inégalités est analysée sous différents aspects : les aspects multidimensionnels de la pauvreté (monétaire, humaine, en temps...) ; l'accès aux services publics - éducation, santé, eau, transports... ; le fonctionnement du marché du travail ; l'évaluation de l'impact de l'aide publique et privée au développement.

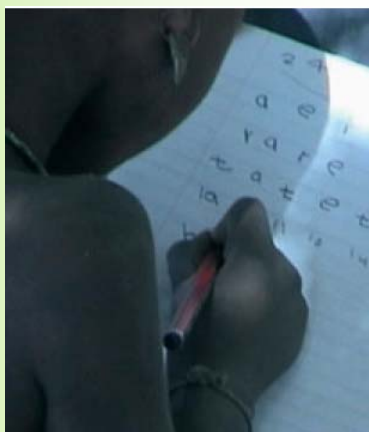
Migrations internationales et développement

Le processus de mondialisation a accéléré les mouvements des facteurs de production tout en restreignant ceux du travail. L'intensification des mouvements de population aux principaux points de fracture du monde, en particulier là où les écarts de revenus sont les plus considérables (axe Europe/Pays de la rive Sud de la Méditerranée et au delà

l'Afrique sub-Saharienne), fait de la question des migrations internationales un enjeu majeur des problématiques du développement contemporain. Les recherches visent à étudier : les déterminants des migrations et les conséquences de ces



migrations sur les sociétés et leur environnement ; la mesure et l'impact des mobilités aux échelles urbaine, régionale et nationale, en termes de recompositions territoriales et sociales ; la constitution de réseaux et de diasporas et les reconstructions identitaires que suscitent les mouvements migratoires.



Une meilleure gouvernance pour un développement durable.

Les recherches se situent à une double interface : entre sociétés et nature d'une part, entre pratiques locales et politiques publiques et internationales en matière de conservation de la biodiversité et de gestion de l'environnement, d'autre part. Elles visent à apporter des éléments de réflexion à la mise en oeuvre d'un développement durable, conjuguant développement économique des populations des pays en développement et préservation de l'environnement. Les savoirs locaux et les pratiques locales sont pris en compte et mis à contribution pour définir les dimensions d'une meilleure gouvernance qui soit adaptée, acceptée et efficace. Deux axes sont privilégiés : l'accès aux ressources et leur préservation ; l'accès aux services et l'urbanisation.

Exemple de programme de recherche dans ce domaine

Politiques d'éducation et stratégies éducatives dans les pays du Sud,
Dynamique démographique et développement durable à Madagascar.

Expertise et Valorisation : les connaissances au service des populations

Le transfert des résultats et la valorisation des savoir-faire est une des clés du développement. Pour favoriser la mise en valeur des connaissances, l'IRD s'appuie sur des instruments comme le dépôt de brevets, la mise en place de contrats de valorisation et de consultance, l'aide à des créations d'entreprises...

Des expertises collégiales permettent aux décideurs de disposer d'une analyse scientifique de l'état des connaissances sur une question constituant un enjeu pour le développement.

Un dispositif de recherche en France et dans le Monde

L'IRD mène des recherches en partenariat avec les acteurs scientifiques, sociaux et politiques des pays du Sud, d'où l'importance d'une représentation physique à l'étranger. Implanté en Afrique, en Asie, dans l'Océan Indien, en Amérique latine et dans le Pacifique, il dispose de 35 centres et représentations dans le monde, dont :

- _ 5 centres en France métropolitaine : Paris, Bondy, Montpellier, Brest et Orléans
- _ 5 centres dans les DOM-TOM : Guyane, Martinique, Nouvelle-Calédonie, Polynésie française et La Réunion
- _ 25 représentations dans des pays étrangers

Les chercheurs de l'IRD interviennent dans une cinquantaine de pays

Soutien et Formation : pérenniser les compétences

L'IRD souhaite accompagner ses partenaires dans leur développement et favoriser leur autonomie, dans l'objectif de participer au renforcement, à long terme, des capacités de recherche du Sud. La réalisation de cet objectif passe notamment par la consolidation de

l'environnement scientifique et social des équipes et la responsabilisation des partenaires. Ces actions se traduisent par la définition de trois grands secteurs d'intervention : le soutien individuel, aux équipes et institutionnel. Ces aides peuvent être de nature différente : financière, technique et scientifique.

Il s'agit de dépasser la logique de transfert des connaissances pour s'intégrer dans une logique d'acquisition des compétences.

Une politique de partenariat très développée

L'ensemble des activités de recherche de l'IRD sont réalisées en partenariat. L'IRD développe un solide réseau de partenaires dans les pays du Sud, en France, y compris dans l'outre-mer tropical français et en Europe. Cette priorité se traduit notamment par la mise en place de projets mixtes, associant des équipes de chercheurs de l'IRD, des équipes locales, mais aussi d'autres institutions de recherche, des établissements universitaires et d'enseignement supérieur... Il s'agit d'une véritable coopération avec l'ensemble de l'appareil scientifique et technique dont les activités de recherche concernent la problématique du développement.

L'information scientifique

L'IRD se doit à la fois d'assurer l'accès à une information scientifique de qualité à ses chercheurs, d'accroître sa visibilité et sa lisibilité sur la scène nationale et internationale et de favoriser le débat entre la science et la société. De nombreux supports permettent la diffusion de l'information.

_ Le journal Sciences au Sud tiré à 15000 exemplaires, les fiches d'actualité scientifique, la photothèque Indigo accessible sur le Web et les colloques favorisent la visibilité de l'IRD auprès des décideurs et des partenaires.

_ Un fonds documentaire répertorie toutes les publications dont 65% sont accessibles sur le Web. L'IRD publie les travaux des chercheurs de l'institut et de ses principaux partenaires français et étrangers sur les thèmes de l'environnement et du développement dans les pays du Sud.

_ L'organisation de débats, d'expositions et la création de clubs jeunes contribuent à sensibiliser la société aux sciences.

Les moyens financiers

Des moyens financiers soutenus, qui reflètent l'effort de la nation en faveur de la recherche

Le budget de l'Institut a été arrêté à 195,24 M€, selon les priorités suivantes :

- poursuivre le soutien à l'activité scientifique, en augmentant les moyens des unités de recherche et de service
- engager un plan d'entretien du patrimoine, tout en renforçant les moyens destinés à l'équipement scientifique
- stabiliser les crédits à caractère incitatif relevant désormais en priorité de l'Agence nationale pour la Recherche
- engager le renouvellement de la flotte scientifique, en concertation avec les autres organismes de recherche concernés.

Les recettes de l'Institut se sont élevées à 180,69 M€ : 167,35 M€ correspondent à la subvention de l'État, 10,60 M€ aux contrats de recherche (près de 17 % de contrats européens) et 2,74 M€ aux recettes diverses. Le budget de l'Institut a été affecté à hauteur de 72 % à la rémunération du personnel, soit 131,2 M€

Le renforcement des moyens des unités de recherche et de service

Deux tiers des moyens financiers sont attribués aux unités, qui représentent 71,7 % des dépenses de personnels sur emplois budgétaires et 41,6 % des budgets de dotation globale de fonctionnement et d'investissement. L'Institut a consacré une enveloppe de 30,6 M€ à l'expatriation, qui demeure une priorité. Les chercheurs sont présents dans près de quarante pays.

Les actions communes traduisent les engagements de partenariat de l'Institut

L'investissement pour les grands équipements a représenté 2,75 M€ : l'Institut a financé le montage d'un laboratoire de mesures des isotopes stables, une participation à l'acquisition d'un gravimètre absolu et a achevé l'installation d'une station de réception d'images multisatellitaire en Guyane. Un effort particulier est aussi engagé pour la modernisation de la flotte, notamment la rénovation du navire hauturier Antéa. Avec 1,24 M€, les contributions aux partenariats illustrent l'engagement de l'Institut auprès de ses partenaires, organismes de recherche français et organismes internationaux.

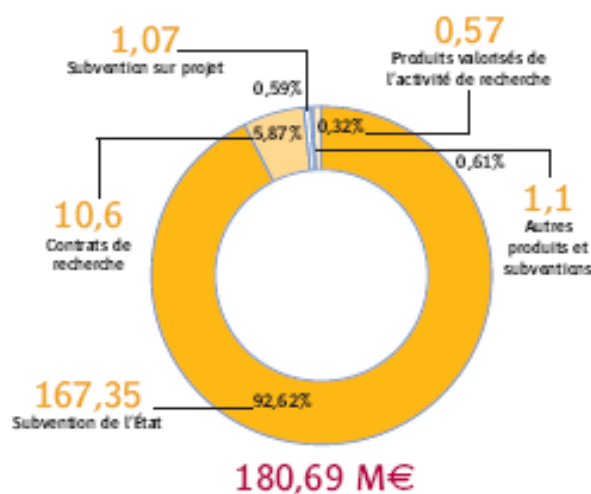
Un programme d'investissement patrimonial

L'Institut a réalisé plusieurs opérations sur son patrimoine immobilier pour un montant total de 1,18 M€ : achèvement de l'extension du laboratoire d'étude en géophysique et océanographie spatiale (LEGOS) à Toulouse ; début des travaux l'extension du pavillon d'accueil du centre d'Ile de France à Bondy ; à Montpellier, achèvement des travaux sur les serres transgéniques et construction d'un bâtiment destiné aux sciences de la plante.

Un effort stratégique sur les systèmes d'information

L'Institut a consacré un investissement important, soit 10,6 M€, pour la mise en oeuvre de la première phase (2002-2005) du schéma directeur des systèmes d'information (SDSI), arrivée à son terme.

Ressources de l'IRD, en M€



Origines des ressources sur contrats de recherche, en M€

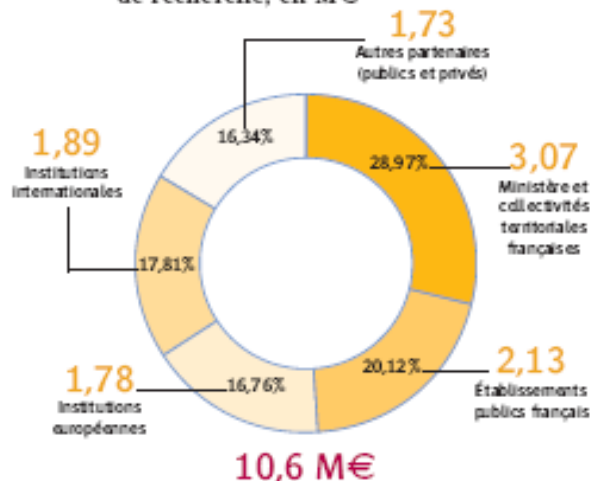
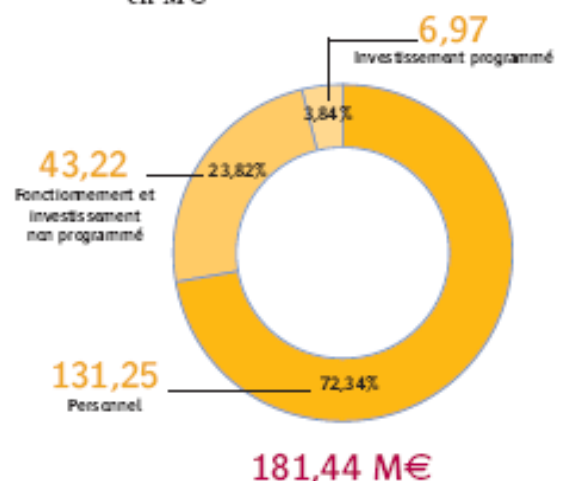


TABLEAU 4 Répartition des recettes sur contrats de recherche, en M€

| | |
|--|-------|
| Département « Milieux et Environnement » | 2,36 |
| Département « Ressources vivantes » | 3,09 |
| Département « Sociétés et Santé » | 3,97 |
| Autres | 1,18 |
| Total inscrit en budget | 10,60 |
| Reversement aux partenaires hors budget | 1,80 |

Dépenses globales de l'IRD par nature, en M€



Répartition géographique des dépenses, en M€

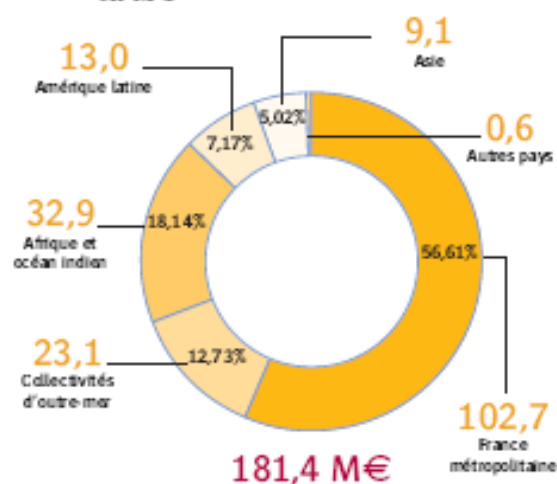


TABLEAU 1 : Dépenses des unités, en M€

| Département de recherche | Personnel | Fonctionnement et investissement | Total |
|--|--------------|----------------------------------|---------------|
| Département " Milieux et Environnement " | 29,03 | 5,44 | 34,47 |
| Département " Ressources vivantes " | 29,73 | 5,81 | 35,54 |
| Département " Sociétés et santé " | 32,03 | 6,74 | 38,77 |
| TOTAL | 90,79 | 17,99 | 108,78 |

| Programmes de recherche | Personnel | Fonctionnement et investissement | Total |
|---|--------------|----------------------------------|---------------|
| • Risques naturels, climats et ressources non renouvelables | 8,29 | 1,65 | 9,94 |
| • Gestion durable des écosystèmes du Sud | 16,25 | 3,09 | 19,34 |
| • Eaux continentales et côtières | 19,58 | 3,01 | 22,59 |
| • Sécurité alimentaire dans le Sud | 14,93 | 3,15 | 18,08 |
| • Sécurité sanitaire et politiques de santé | 13,91 | 4,30 | 18,21 |
| • Développement et mondialisation | 17,83 | 2,79 | 20,62 |
| TOTAL | 90,79 | 17,99 | 108,78 |

TABLEAU 2 : Dépenses des actions communes, en M€

| | Personnel | Fonctionnement et investissement | Total |
|---|--------------|----------------------------------|---------------|
| Soutien et formation | 0,61 | 2,18 | 2,79 |
| Expertise et valorisation | 0,57 | 0,54 | 1,11 |
| Information scientifique et communication | 4,38 | 1,98 | 6,36 |
| Relations internationales | 8,20 | 3,34 | 11,54 |
| Animation scientifique | 2,76 | 0,17 | 2,93 |
| Évaluation scientifique | 0,47 | 0,27 | 0,74 |
| Formation permanente | 0,00 | 1,29 | 1,29 |
| Contributions aux partenariats | 0,05 | 1,19 | 1,24 |
| Moyens navals | 1,78 | 1,21 | 2,99 |
| Autres grands équipements scientifiques | 0,00 | 2,42 | 2,42 |
| TOTAL | 90,79 | 17,99 | 108,78 |

TABLEAU 3 : Dépenses des fonctions support, en M€

| | Personnel | Fonctionnement et investissement | Total |
|---|-----------|----------------------------------|-------|
| Action sociale | 0,05 | 1,05 | 1,10 |
| Système d'information | 2,41 | 7,71 | 10,12 |
| Opérations immobilières | 0,00 | 1,16 | 1,16 |
| Représentations territoriales ¹¹ | 8,14 | 5,27 | 13,41 |
| Services centraux | 11,03 | 2,30 | 13,33 |
| Autres | 0,00 | 0,12 | 0,12 |

Les ressources humaines

L'IRD dispose de 1 653 emplois budgétaires. L'Institut a transformé 9 postes d'agent technique de la recherche en 1 poste d'ingénieur de recherche, 1 poste d'ingénieur d'études, 2 postes d'assistant ingénieur et 5 postes de technicien. La proportion de femmes a encore augmenté sensiblement puisqu'elles représentent près de 40% de l'effectif titulaire de l'Institut, soit 22% des chercheurs (9% des directeurs de recherche, 30% des chargés de recherche) et 56% des ingénieurs et techniciens.

L'âge moyen de l'effectif titulaire est de 46 ans et demi, soit 47 ans et demi pour les chercheurs, et 45,4 ans pour les ingénieurs et techniciens. L'âge moyen des femmes est de 42,8 ans, celui des hommes de 48,7 ans.

Une présence sur tous les continents

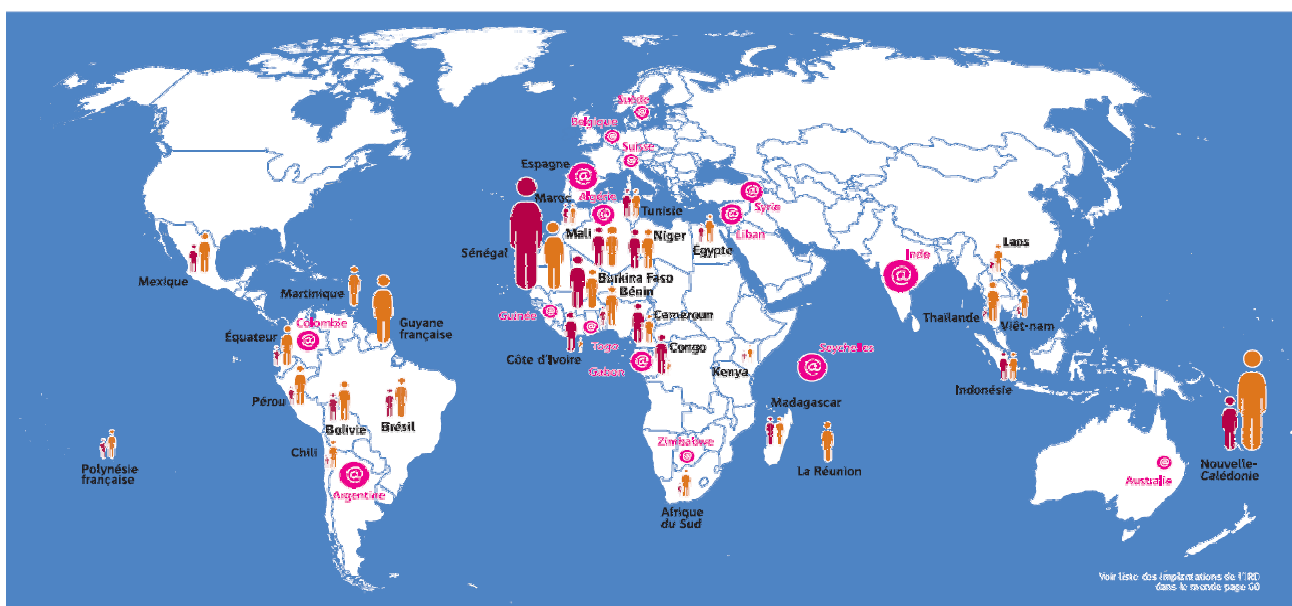
Sur l'ensemble de l'effectif - titulaires et non titulaires - 43% travaillent hors métropole. Il est à noter qu'entre 2003 et 2005, le nombre de journées d'expatriation et de missions longue durée confondues a progressé de 183 000 à 190 000. La présence de l'Institut sur le continent africain est significative puisque près des 3/4 des personnels exerçant à l'étranger y sont affectés. Dans les ROM-COM, un peu plus de la moitié (51,5%) des agents exercent en Nouvelle-Calédonie, un quart en Guyane. Enfin, en métropole, si la plupart des agents travaillent au siège de l'Institut et dans les centres IRD de Brest, Orléans et Montpellier, 34,2% sont accueillis dans des structures partenaires (organismes de recherche, universités...) implantées dans les régions Ile-de-France, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte-d'Azur ou Midi-Pyrénées.

Missions longue durée

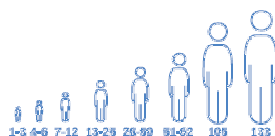
Créées pour instaurer plus de souplesse dans les modalités d'affectation, les missions longue durée - d'une durée moyenne de 4 mois - permettent de renforcer les équipes scientifiques à l'étranger.

En constante augmentation depuis leur mise en place, 155 missions de longue durée ont été réalisées, contre 33 en 2002, 81 en 2003 et 115 en 2004. Les destinations les plus fréquentes sont l'Amérique Latine (40%), l'Afrique (40%) et l'Asie (20%).

L'IRD dans le monde



Centres et représentations
 Personnels locaux
 Personnels affectés*

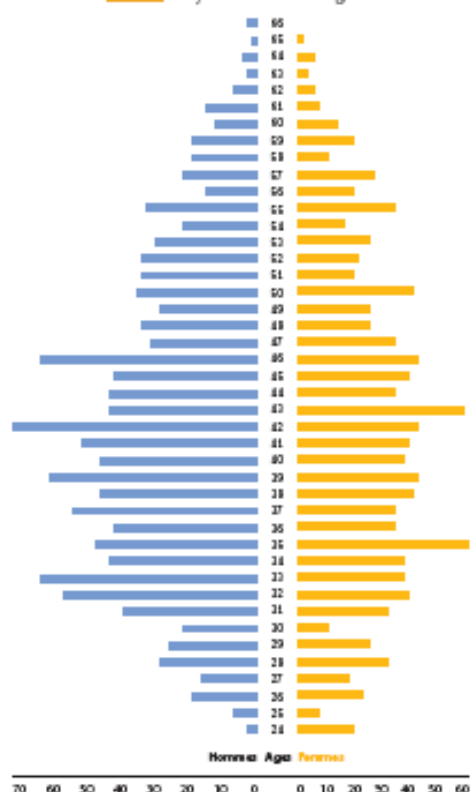


Autres affectations
 1 2 3 8

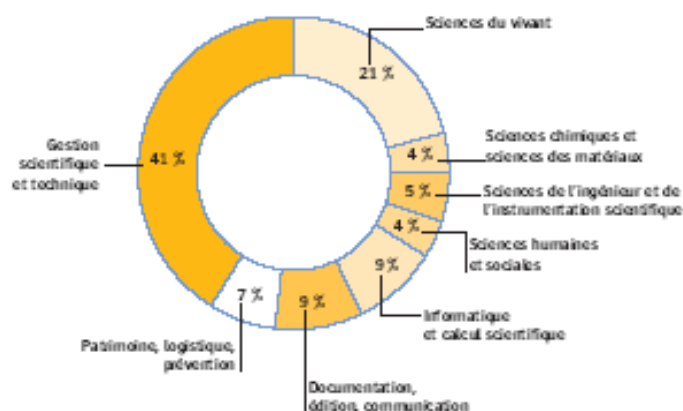
*Titulaires, poste(s) expatriation, doctorants, laboratoires

Répartitions par effectif budgétaire au 31/12/05

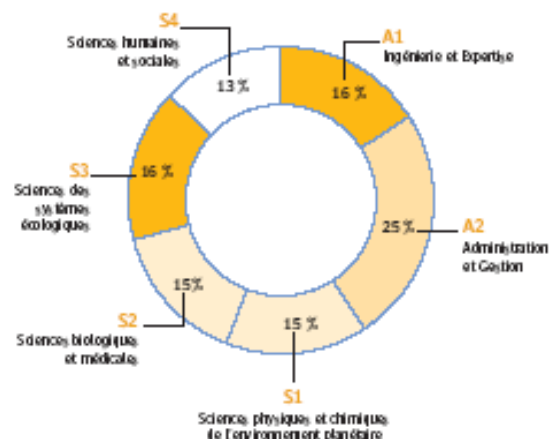
Pyramide des âges



Répartition par branche d'activité des Ingénieurs et Techniciens



Répartition par commission



Répartition du personnel par zone géographique

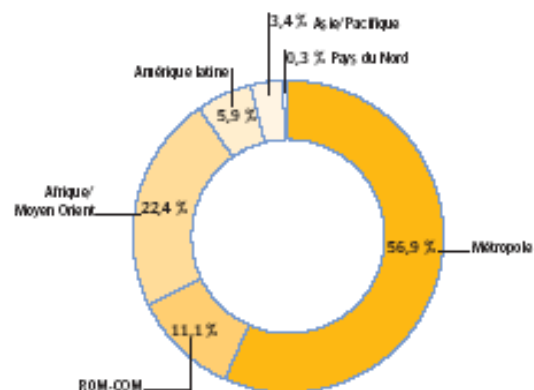


TABLEAU 1 : Emplois budgétaires

| | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Chercheurs | 831 | 833 | 827 | 817 | 817 |
| Ingénieurs | 371 | 393 | 396 | 415 | 419 |
| Techniciens | 421 | 417 | 419 | 410 | 406 |
| Postes fonctionnels | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Total | 1 634 | 1 654 | 1 653 | 1 653 | 1 653 |

TABLEAU 2 : Répartition des personnels sur emplois budgétaires par catégorie et par sexe

| | Hommes | % | Femmes | % | Total |
|---------------------|------------|---------------|------------|---------------|--------------|
| Chercheurs | 617 | 77,7 % | 177 | 22,3 % | 794 |
| Ingénieurs | 211 | 50,0 % | 211 | 50,0 % | 422 |
| Techniciens | 140 | 36,2 % | 247 | 63,8 % | 387 |
| Postes fonctionnels | 7 | 77,8 % | 2 | 22,2 % | 9 |
| Total | 975 | 60,5 % | 637 | 39,5 % | 1 612 |

TABLEAU 3 : Evolution du taux d'affectation hors métropole du personnel sur emploi budgétaire (en%)

| | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Chercheurs expatriés | 39,90 % | 38,80 % | 36,70 % | 33,80 % | 35,14 % |
| Ingénieurs et techniciens expatriés | 34,50 % | 32,20 % | 30,70 % | 28,80 % | 24,45 % |

TABLEAU 4 : Evolution du nombre de missions longue durée

| | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|----------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| Afrique/Moyen Orient | 15 | 38 | 42 | 60 |
| Amérique Latine | 16 | 33 | 45 | 60 |
| Asie/pacifique | 4 | 8 | 20 | 32 |
| Pays du Nord | 1 | 2 | 8 | 3 |
| Total | 36 | 81 | 115 | 155 |

Chapitre

Le programme AMMA :

Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

Qu'est ce que la mousson africaine?

Problématique du programme AMMA

***Les échelles spatiales et temporelles
de la mousson africaine***

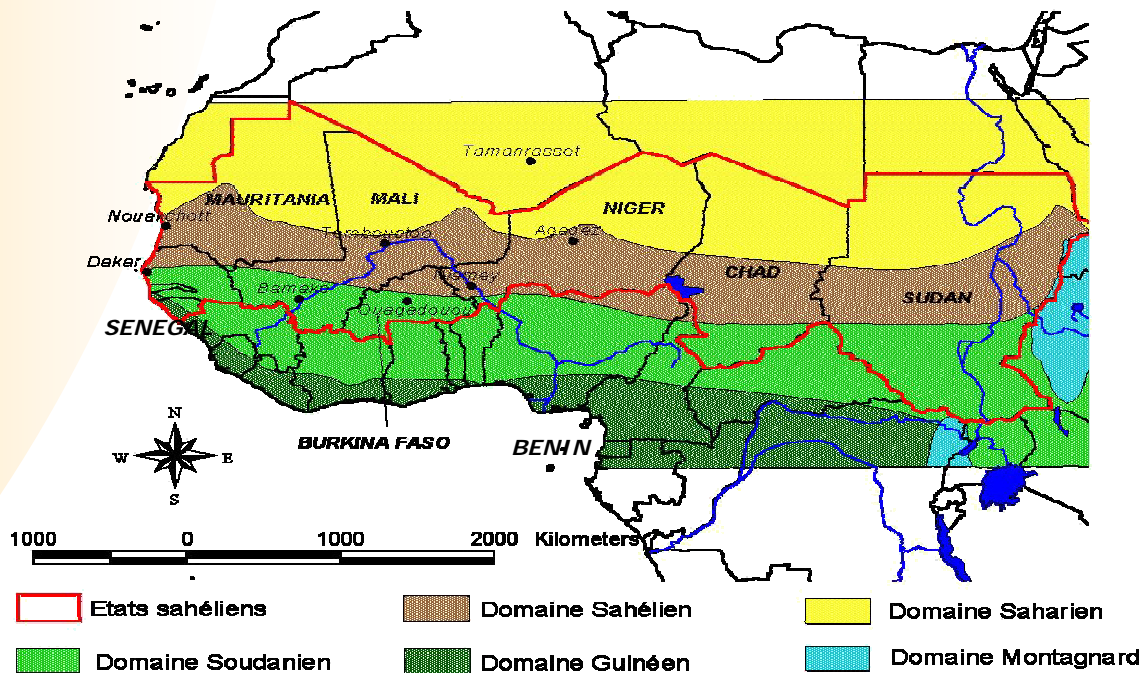
***Les périodes d'observations et les sites
de mesure***

***Les instruments et les mesures prévus
sont répartis en plusieurs catégories***

Nous allons présenter dans cette partie le programme de recherche AMMA de manière la plus large possible. En effet, AMMA possède plusieurs niveaux de complexité et d'échelle afin de pouvoir répondre au mieux à sa problématique.

Qu'est ce que la mousson africaine ?

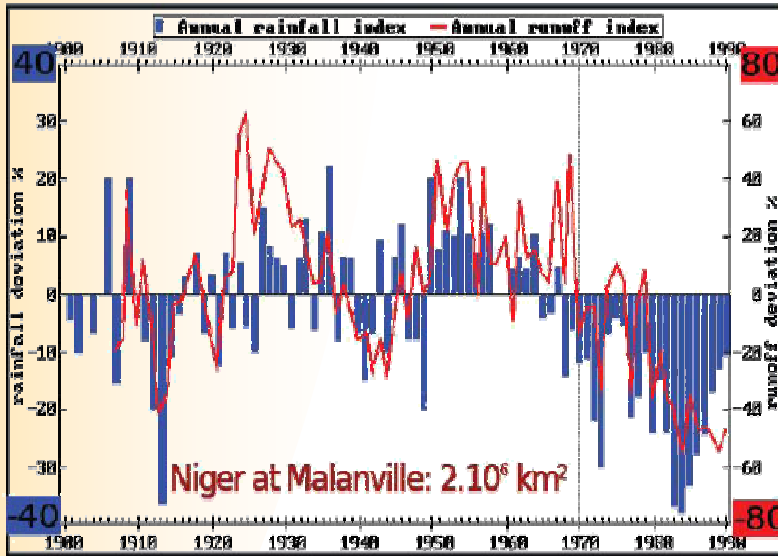
La mousson n'est pas seulement asiatique ! Elle existe aussi en Afrique, et plus particulièrement en Afrique de l'ouest, dans les pays du Sahel et ceux qui bordent le golfe de Guinée. La saison des pluies s'étend de juin à septembre (de juillet à août au Nord de la région concernée).



Lorsque le continent se réchauffe, en été, il attire l'air qui s'est chargé en humidité au dessus du golfe de Guinée. Ce flux d'air humide remonte vers le nord et, une fois au-dessus du continent, se transforme en systèmes orageux nommés lignes de grain (du fait de leur structure frontale linéaire). Ces systèmes se déplacent d'est en ouest, arrosant toute la région avant d'arriver sur l'Atlantique, où ils se transforment parfois en cyclones. Les 10 à 20 systèmes orageux de la saison forment des rivières qui coulent pendant quelques heures, voire quelques jours. Mais elles n'atteignent jamais les fleuves et se terminent en mares.



Au Sahel, dans la région du delta central du Niger, la mousson s'accompagne de l'arrivée de lignes de grain. Celles-ci peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres de longueur et donner lieu à de violentes précipitations.



En bleu : le niveau de pluie, par rapport à la moyenne sur plusieurs années. En rouge, le débit du fleuve Niger, dont les variations sont amplifiées d'un facteur deux, par rapport à celles des pluies. Sur ce graphique, on voit que les conditions climatiques humides des années 1950 et 1960 ont cédé la place à des conditions beaucoup plus sèches, à partir des années 1970.

utilisation des sols) d'être les causes de ces sécheresses.

En outre, à cette tendance sur plusieurs décennies se sont superposées des variations interannuelles, avec des années extrêmement sèches. **Les conséquences sur l'agriculture, l'eau et la santé sont alors dramatiques.**

Problématique du programme AMMA



Arrivée de la mousson en Juin, avec ligne de grain au Sénégal

L'objectif principal d'AMMA est la prévision de la mousson et de ses impacts sur la vie des populations (c'est-à-dire sur les ressources végétales, les ressources en eau et la santé).

Aujourd'hui, les connaissances des scientifiques comportent de grosses lacunes. Certains paramètres clefs ne sont pas enregistrés de façon continue. Les modèles numériques reproduisent mal les cycles journalier, saisonnier et annuel des précipitations sur l'Afrique de l'ouest et l'Atlantique tropical.

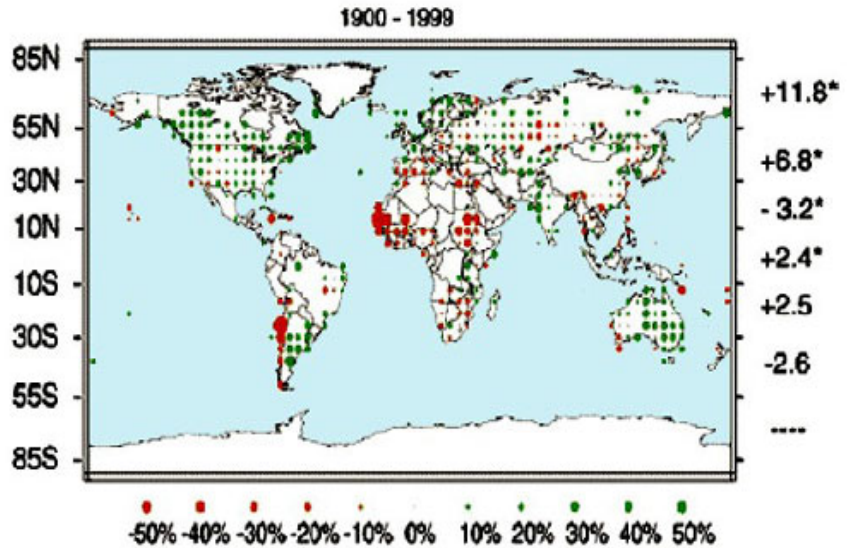
Plus d'observations sont nécessaires pour bien comprendre les interactions entre l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère, qui gouvernent la dynamique et la variabilité de la mousson africaine. **En outre, la mousson africaine joue un rôle important dans le système climatique de notre planète,**

Pour le Sahel, c'est le seul épisode de pluie de l'année. Toutes ses ressources en eau en dépendent, ainsi que ses ressources végétales naturelles et cultivées. Le reste de l'année, le soleil ne réchauffe pas assez le continent pour déclencher le flux d'air humide à l'origine de la mousson. **L'atmosphère reste « inerte ».** Le problème, c'est que ce phénomène ne se répète pas à l'identique tous les ans. Les conditions climatiques humides des années 1950 et 1960 ont cédé la place à des conditions beaucoup plus sèches, à partir des années 1970. Les scientifiques soupçonnent le réchauffement des eaux du proche Atlantique et le changement d'état des surfaces continentales (déforestation et

l'Afrique tropicale étant l'une de ses principales sources de chaleur d'origine continentale. Par exemple, le niveau des précipitations au Sahel est lié à la fréquence des cyclones sur l'Atlantique et donc de ceux qui apparaissent en Floride. **Ainsi, la mousson peut également avoir des conséquences indirectes sur le climat de régions plus éloignées.**

L'Afrique de l'ouest émet une grande quantité de gaz effet de serre naturels (gaz carbonique, vapeur d'eau). **C'est aussi la principale source d'aérosols minéraux sur notre planète** (par exemple la poussière rouge qui se dépose parfois jusque dans le sud de la France).

Du fait de ses émissions d'origine biologique et anthropique (feux de savane et de forêt) et du transport vertical et horizontal de ces gaz par la mousson, l'Afrique de l'ouest est considérée comme une région critique pour la compréhension de la chimie atmosphérique globale. En étudiant la mousson, les scientifiques d'AMMA amélioreront les modèles de prévision météorologiques et de climat global. Ils pourront mieux cerner l'évolution future du climat.



A l'échelle du siècle, les précipitations ont nettement diminué en Afrique de l'ouest (en rouge), alors qu'elles ont augmenté dans d'autres régions du globe comme la France, l'Amérique du Nord, l'Inde et l'Australie.

Les échelles spatiales et temporelles de la mousson africaine

L'échelle globale (celle de la planète)

C'est l'échelle à laquelle la mousson africaine interagit avec le reste du globe. Les scientifiques vont déterminer le rôle des anomalies de température de surface des océans sur la variabilité de la mousson et l'impact de cette variabilité sur l'Atlantique tropical. Ils vont quantifier les particules (aérosols/espèces chimiques) qui quittent le continent. L'échelle globale correspond à des variations qui atteignent la décennie et qui se répercutent sur toute la planète.

L'échelle régionale (celle de l'Afrique de l'Ouest)

C'est l'échelle à laquelle on considère le mécanisme de la mousson et les interactions de processus physiques et biophysiques qui se manifestent à diverses échelles. Les scientifiques vont améliorer leur compréhension des interactions entre surfaces continentales, océan et atmosphère. L'échelle régionale correspond à des variations qui peuvent s'étendre sur plusieurs années.

La méso - échelle (<100 000 km²)

C'est l'échelle des systèmes météorologiques qui produisent les précipitations, éléments sensibles de la variabilité à l'échelle saisonnière et du couplage entre hydrologie et atmosphère à l'échelle des bassins versants. C'est aussi à cette échelle qu'il faut d'abord comprendre le transport des aérosols et des espèces chimiques par les orages.

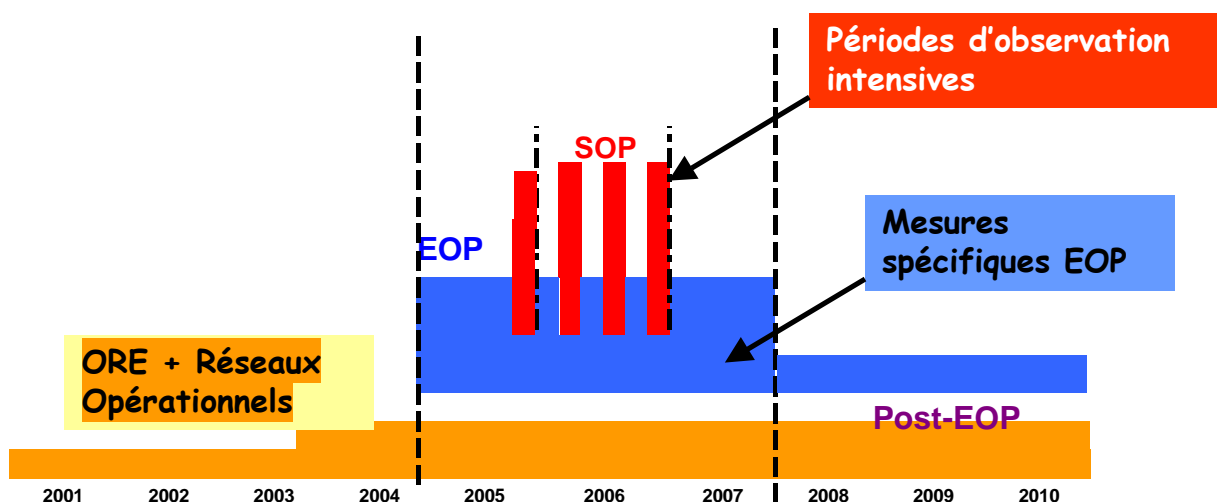
L'échelle sub-méso (100 km²)

C'est l'échelle des maxima de pluie d'origine orageuse. Elle est centrale pour l'hydrologie du Sahel et les cours d'eau plus au sud, donc pour la végétation naturelle et l'agriculture. Pour tenir compte de ce caractère multi-échelle, la stratégie d'AMMA repose sur l'imbrication de zones et de périodes d'observation.

Les périodes d'observations et les sites de mesure

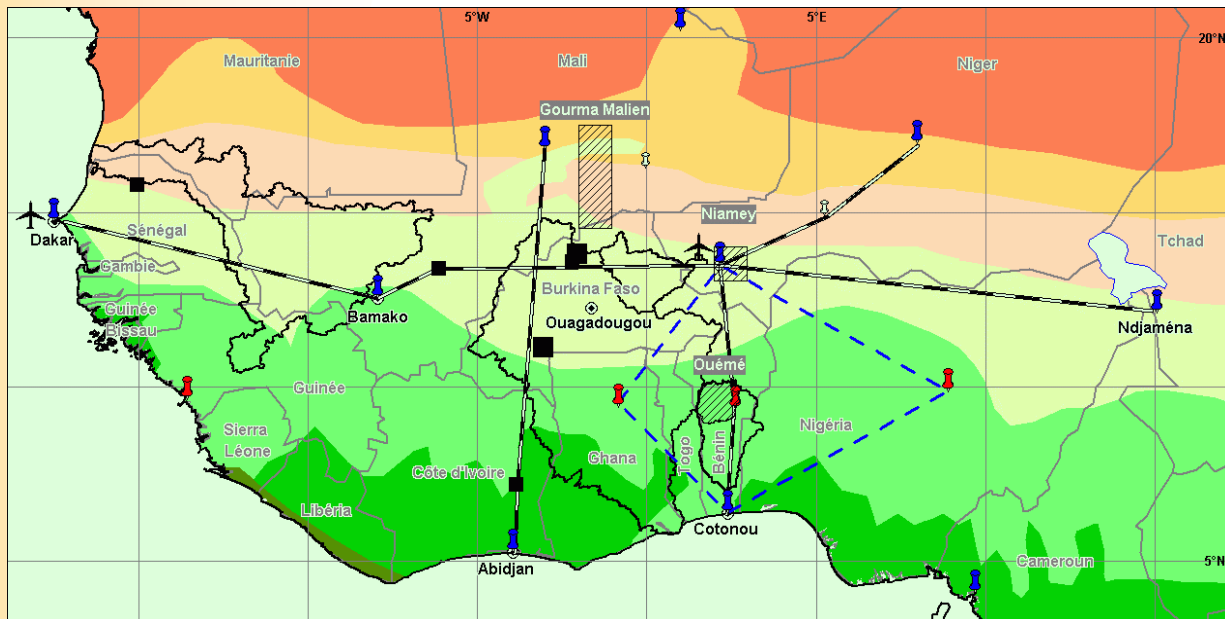
Depuis 2001, des observations à long terme ont été lancées (l'ORE ou l'observatoires de recherche en environnement). Certains processus ne peuvent être bien compris que dans la durée : par exemple la mémoire interannuelle des systèmes hydrologiques (une année sèche est encore plus marquée si la précédente l'a déjà été), les invariances d'échelles (les phénomènes qui se reproduisent d'année en année aux différentes échelles considérées). Cette période d'observation à long terme durera jusqu'en 2010.

A partir de 2005, les scientifiques ont renforcé leurs observations pour une durée de trois ans (l'EOP). Ils étudient le cycle annuel de la mousson, au travers des paramètres de surface et atmosphérique. Au delà d'une mise en place d'observations à l'échelle régionale, ils se concentrent sur trois sites (Gourma, Niamey, Ouémé). 2006 sera une année d'observations très intensives avec la présence des SOP (spécial observation programme) durant lesquels un maximum de moyen d'observation sont mis en œuvre sur les trois sites, mais aussi aux endroits les plus stratégiques du moment. Des moyens lourds sont mobilisés pour analyser l'océan et l'atmosphère à grande échelle. La fréquence des mesures a largement augmenté sur ces trois sites.



La stratégie temporelle

C'est l'année dernière qu'a démarré la période d'observations renforcée (l'EOP), qui s'étendra de 2005 à 2007. Elle concerne la surveillance de l'état de l'atmosphère et des différents cycles biogéochimiques associés. Elle s'appuie sur des systèmes d'observation de plus longue durée, notamment ceux mis en place dans le cadre du programme ORE (observatoires de recherche en environnement), lancé par le ministère de la recherche en 2001. Trois observatoires de recherche en environnement existent en Afrique de l'ouest : l'observatoire AMMA-CATCH, sur le cycle hydrologique, l'observatoire IDAF, sur les émissions et dépôts d'espèces chimiques, et l'observatoire PHOTON-Aeronet, sur les aérosols issus de la surface continentale. Un quatrième observatoire, nommé PIRATA concerne la surveillance des océans grâce un réseau de bouées. C'est dans l'observatoire d'hydrologie AMMA-CATCH du bassin de l'Ouémé que j'ai effectué mon stage.



Cette carte montre la région où les observations d'AMMA auront lieu. **Les sites des radiosondages sont indiqués en bleu et rouge. Les lignes noires et blanches représentent les transect**, le long desquels le climat et la végétation changent progressivement et où des mesures seront également réalisées. **Les trois zones hachurées sont les trois sites méso-échelle** de Gourma, Niamey, Ouémé dans lesquels des bilans en eau précis seront réalisés. **Les points noirs sont des sites d'observation intensive supplémentaire lors de la SOAP.**

Les instruments et les mesures prévus sont répartis en plusieurs catégories

Les radiosondages

Il s'agit de ballons que l'on fait monter dans l'atmosphère toutes les 12 ou 24 heures et qui mesurent la température, l'humidité de l'air et le vent. Ils envoient les résultats au sol par radio. Au nombre de 16, ces radiosondages sont répartis sur toute l'Afrique de l'ouest. A Cotonou (Bénin), mon lieu de résidence, une série de radiosondages a mesuré l'ozone atmosphérique. **C'est la première mesure de ce type jamais réalisée en Afrique.**



Ce ballon monte dans l'atmosphère pour mesurer la température, l'humidité, le vent... et envoie les données au sol par radio.

Un réseau de trois stations GPS, installées sur une ligne méridienne permettra de mesurer la vapeur d'eau dans l'atmosphère, paramètre très important pour la formation des précipitations. Les radiosondages sont organisés et effectués par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) en collaboration avec Météo France. Ces ballons pressurisés de couche limite sont gonflés à l'hélium et sont fait pour voler entre 1200 et 1500 m d'altitude. Ils font 2, 5 m de diamètre. Les nacelles attenantes mesurent la pression, la température et l'humidité de l'air. Ils permettent de suivre le flux de mousson à l'échelle de la masse d'air. Pour le moment les vols les plus longs ont atteint le lac Tchad.



Préparation des ballons sondes par le CNES à l'aéroport de Cotonou

Les LIDAR

Ce sont des systèmes à laser qui mesurent la quantité d'aérosols dans l'atmosphère, ainsi que d'autres paramètres de nature chimique. Ils sont répartis sur deux lignes, appelées transect, le long desquelles le climat et la végétation changent progressivement. L'une, dans le sens des longitudes, s'étend de Dakar (Sénégal) à Niamey (Niger) et l'autre, dans le sens des latitudes, s'étend de Tamanrasset (Algérie) à Djougou (Bénin). Les LIDAR sont au nombre de cinq.

Les stations de flux de surface

Ces stations mesurent les quantités d'eau échangées entre la surface et l'atmosphère (par exemple la quantité d'eau que perdent les plantes par évaporation) pour comprendre comment le continent réchauffe l'atmosphère. **Concrètement, ces stations mesurent l'humidité de l'air et le vent toute les millisecondes. 12 stations sont implantées sur 3 sites couvrant plusieurs centaines de kilomètres carrés chacun : le site du Gourma (Mali), celui du Kori de Dantiandou (Niger) et celui du bassin de la Donga (Bénin).** Ces 3 sites constituent le coeur, densément instrumenté, des 3 zones plus vastes de la Gourma, Niamey, transect (dont la superficie est comprise entre 12 000 Km² et 25 000 Km²). Dans ces zones, des bilans d'eau précis sont réalisés grâce à l'installation de nombreuses stations de mesures de la pluie, du débit des rivières, de la hauteur des nappes d'eau souterraines et de l'humidité. Sur l'un des ces trois sites (la haute vallée de l'Ouémé au Bénin), un radar bande X polarimétrique Doppler (le X-PORT) a été installé pour étudier l'influence de la variabilité spatiale de la pluie sur les bilans d'eau et les rétroactions de cette variabilité sur la dynamique de la mousson. Un camion laboratoire étudie les relations entre les émissions d'espèces chimiques et le développement de la végétation sur ce bassin.

L'océan

L'océan est le théâtre d'observations spécifiques, avec la réalisation de la première campagne EGEE, qui se déroule dans le golf de Guinée. Cette campagne se compose de deux phases : l'une en début de mousson (en juin), l'autre en fin de mousson (en septembre). A l'aide de différents systèmes de mesures par bouées ou depuis le navire, elles renseignent les scientifiques sur les courants, les profils de température et de salinité, l'oxygène dissous, certains isotopes (l'oxygène 18 et le carbone 13) et des paramètres atmosphériques tels que la pression, le vent et les aérosols.

La période d'observations renforcées (2005-2007) est axée sur la variabilité des composantes clés du système climatique régional, d'une année sur l'autre. **L'année 2006 est celle du renforcement du dispositif d'observation sur certaines zones, en vue de mieux cerner la dynamique de la mousson et la formation des précipitations.** La pluie constitue en effet un objet d'étude privilégié. Elle est importante pour les populations et représente l'aboutissement d'une combinaison de processus à différentes échelles de temps et d'espace.

Dans l'atmosphère, ils ont procédé au renforcement de la cadence des radiosondages, qui passera systématique à deux lâchers par jour sur les 16 stations, puis 4 durant les campagnes avions et parfois 8 pour des cas particuliers. Quatre avions de recherche (Falcon 20 et ATR42 de la flotte française, Falcon allemand et Bae146 britannique) sont par ailleurs déployés pour réaliser des mesures de dynamique atmosphérique (vents, humidité...) pendant et après le passage des lignes de grains. Ils surveilleront aussi la chimie atmosphérique, en déterminant les teneurs en aérosols minéraux et en cendres issues des nombreux feux de brousse et de forêt d'origine anthropique. Le recours aux avions est nécessaire pour couvrir de grandes surfaces en peu de temps et réaliser des échantillonnages tridimensionnels fins.



L'Atalante mesurera la température, la salinité des eaux et les courants marins dans le golf de Guinée

Sur l'océan, les campagnes EGEE de la période 2005-2007 seront intensifiées grâce à l'utilisation du navire français Atalante. Il est doté d'une station de radio-sondage embarquée et d'un mât instrumenté en capteurs micro-météorologiques, permettant de réaliser des mesures de flux atmosphérique. Le Ron Brown américain participera également aux campagnes océanographiques. Les Américains s'intéressent fortement au projet AMMA car les variations climatiques de l'Afrique de l'Ouest sont généralement les causes des cyclones et des ouragans de Floride. Une collaboration avec le programme

allemand IFMGEOMAR (campagne du navire RV/METEOR en juin 2006 dans le golfe de Guinée) est également prévue.

Sur le continent, le renforcement des observations concernera surtout les sites du Niger et du Bénin : trois radars Doppler sont installés sur le bassin de

l’Ouémé et à Niamey. Ils font des mesures complémentaires de celles réalisées par les avions, notamment pour caractériser la structure tridimensionnelle des systèmes orageux et la répartition associée des précipitations. Un profileur UHF et VHF, sur le bassin de l’Ouémé, sonde la structure de l’atmosphère à cadence élevée. Un radar bande X sur le même site pour l’influence de la variabilité spatiale de la pluie sur les bilans d’eau et les rétroactions de cette variabilité sur la dynamique de la mousson. La station mobile ARM (Atmospheric radiation measurement), à Niamey, mesure le rayonnement (de l’infrarouge à l’ultraviolet), les propriétés des nuages, les paramètres météorologiques de surface, ainsi que les aérosols et les espèces carbonés.

Cette année d’observations intenses se composera de quatre phases distinctes, correspondant aux quatre phases du cycle de la mousson. **La première phase** est la saison sèche (décembre-mars), qui sera étudiée sur une période d’un mois (15 janvier-15 février). **La deuxième phase**, d’avril à juin, est celle où le flux de mousson se met en place et où les premiers systèmes convectifs porteurs de pluie apparaissent. Les scientifiques s’intéresseront plus particulièrement au basculement des conditions dynamiques qui conduisent à l’établissement durable de la saison des pluies, c’est-à-dire au mois de juin. **La troisième phase**, de juillet à septembre, correspond à la saison des pluies établie sur toute la région ; elle sera étudiée en deux sous-périodes d’une vingtaine de jours chacune – l’une en juillet et l’autre en août. Ces deux sous périodes sont en fait des périodes intensives d’observation. Enfin, **la quatrième phase**, de septembre à novembre, est celle du retrait de la mousson. La température de surface de l’océan permet alors aux perturbations atmosphériques génératrices de pluie sur le continent de se transformer en cyclones sur l’océan, cyclones qui peuvent traverser l’Atlantique et atteindre le continent américain.

Chapitre

L'Observatoire Hydrologique de la Haute Vallée de l'Ouémé

Introduction

Matériels et méthodes

Bilan de l'avancement des recherches

Introduction

L'Observatoire Hydrologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO, Bénin) d'une superficie de 14 600 km² est le plus méridional (1200 mm/an) des 3 sites d'observation de l'O.R.E (les Observatoires de Recherche en Environnement). AMMA-CATCH (l'observatoire des cycles hydrologiques) répartis selon un gradient pluviométrique décroissant du Golfe de Guinée au Sahara. La longue période de sécheresse qui a frappé l'Afrique de l'Ouest (1970-1990) a diminué significativement la pluviométrie en climat soudanien (-11%) principalement en réduisant le nombre d'événements pluvieux. Ceci se traduit par une diminution des débits bien plus importante (environ 35%) sur l'Ouémé supérieur. **L'état actuel des connaissances ne permet pas de transposer ce résultat à d'autres bassins de taille ou de couverture végétale différente.** Pour identifier, quantifier les processus entrant en jeu dans les différents termes du bilan hydrologiques, le bassin de la Donga (586 km²) situé dans le cours supérieur du Haut Ouémé a été instrumenté. Les objectifs sont de:

- quantifier les différents processus (pluie, ruissellement, infiltration écoulements souterrains, évapotranspiration),
- identifier leurs temps caractéristiques,
- préciser leur rôle dans la variabilité intra et interannuelle en prenant en compte la dynamique de la végétation.

Sous un climat soudanien, l'écoulement de la Donga est saisonnier et soutenu par le drainage des nappes. Chaque année, on observe un démarrage retardé des écoulements par rapport au début de la saison des pluies. **Les questions sous-jacentes à l'origine non exclusivement superficielle des écoulements portent notamment sur :**

- Les parts du ruissellement direct et des nappes dans les écoulements en rivières, leurs évolutions intra saisonnières,
- L'existence d'écoulement souterrain et rapide de sub-surface dans les tous premiers mètres du sol,
- L'existence d'une mémoire interannuelle liée au stock souterrain modulant le démarrage retardé des écoulements.

Hormis l'origine des écoulements, l'autre inconnue majeure est le rôle de la végétation dans le cycle hydrologique à travers la transpiration. Les questions reliées à la végétation sont notamment:

- La végétation en début de cycle par ses prélèvements contribue-t-elle à retarder les écoulements ?
- Le passage d'une forêt à une mosaïque culture-jachère plus ou moins ancienne a-t-il un impact sur les écoulements ?

Matériels et méthodes

Les objectifs sont d'assurer la fermeture du bilan hydrologique (pluie, ruissellement, infiltration dans la zone saturée et non saturée, débit et évapotranspiration) à l'échelle du bassin versant (Donga). Pour cela, il est nécessaire d'analyser les processus intervenant dans le bilan, à l'échelle élémentaire de fonctionnement, le versant. La modélisation permet ensuite de tester la représentation des processus aux différentes échelles.

La rivière Donga prend sa source sur les contreforts de la chaîne de l'Atakora à une altitude de 490 m. Elle coule sur des altérites de terrains métamorphiques (schistes, gneiss, migmatites du dahoméen). Le dispositif d'observation est multi-échelle de la toposéquence au bassin de la Donga en passant par une succession de bassins emboîtés. Chronologiquement (jusqu'en 2002), le dispositif comprenait le réseau de base déployé dans le cadre de l'OHHVO pour documenter la variabilité interannuelle de la ressource en eau. Cinq stations de jaugeage (ou limnigraphe) sont implantées le long du cours de la Donga. La station de Ara à l'amont du bassin limite un bassin de 12.8 km². La station de jaugeage la plus en aval (Don) est à 325 m d'altitude pour une superficie de 586 km² (cf. figure 1). Dix-neuf pluviographes sont répartis sur le bassin ou à proximité.

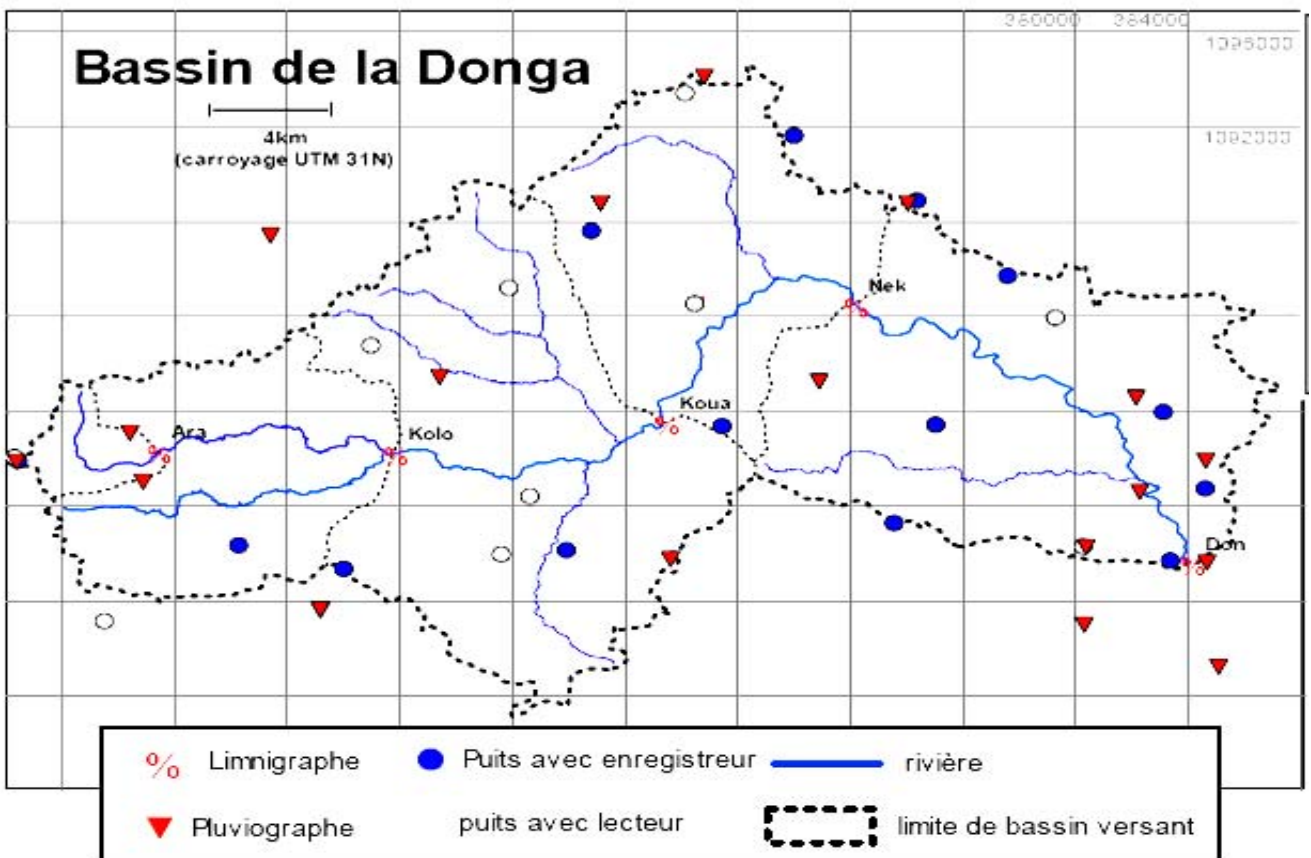


Figure 1 Équipement du bassin de la Donga avec délimitation des sous-bassins

Depuis 2002, **les surfaces des nappes phréatiques sont suivies à travers vingt-deux puits villageois dont douze équipés d'enregistreurs piézométriques.** L'ensemble des puits et des stations de jaugeage a été nivelé au GPS différentiel en février 2003. Deux conductimètres automatiques ont également été installés à des stations de jaugeage (Kolo et Don respectivement sur la figure 1). Parallèlement, **la conductivité est aussi relevée sur les puits** et des campagnes géochimiques (analyse des majeurs, des éléments trace et des isotopes naturels de l'eau) ont été menées sur les puits, les forages villageois et les écoulements. A l'échelle globale du bassin de la Donga, **la confrontation des précipitations, des écoulements, des fluctuations piézométriques et des données géochimiques doit leur permettre d'avancer des hypothèses sur l'origine des écoulements et le fonctionnement du bassin.** Mais, elles ne peuvent être précisées et validées qu'à l'échelle la plus fine, le versant.

Les mesures ponctuelles du bilan sur le versant sont extrapolées en fonction des facteurs déterminant leur variabilité spatiale et temporelle. Les facteurs identifiés en zone soudanienne sont le type de couverture végétale et la position sur le versant :

- Les formations végétales rencontrées sur le haut bassin de l'Ouémé forment un continuum qui s'étend de la forêt claire qui est la végétation « climax » à des couverts de plus en plus défrichés (i.e. déboisés) qui comprennent successivement les savanes boisée, arborée et arbustive pour arriver aux zones de culture permanente où de rares arbres sont conservés pour leur vertus thérapeutiques ou alimentaires (nére *Parkia biglobosa*, et karité *Vitellaria paradoxa* principalement). En bas de versant on trouve des forêts galerie ripicoles composée de végétation hydrophile (ex : palmier raphia) qui bordent les cours d'eau à partir d'une aire drainée d'environ 1 km². **D'un point de vue fonctionnel en terme de flux d'eau, c'est le rapport herbe/arbre qui va être déterminant.** En effet ces deux strates ont un comportement différent vis à vis de l'eau du sol. **Les arbres ont un système racinaire capable d'extraire l'eau des couches profondes** et de réagir rapidement aux premières pluies. Au contraire, **les herbacées ont un système racinaire dense en surface qui se développe au cours de la saison pour les annuelles et les cultures.**
- **La position sur le versant conditionne la couverture pédologique (granulométrie et profondeur du sol notamment) et la redistribution en eau latérale.** La toposéquence type est caractérisée par une longueur de 800 m pour un dénivelé de 40 m. La succession classique est un sommet convexe, suivi d'un glacis de 600 m et d'une rupture de pente aux abords du marigot drainant, qui correspond à une zone humide, rarement cultivée où l'on peut parfois voir l'eau sourdre du sol.

Trois topo-séquences avec une densité d'arbre croissante (jachère, savane arbustive et forêt claire) ont été instrumentées. Sur chacune, le dispositif se compose de 3 sites de mesure répartis du haut au bas de versant. En chaque site, une station de suivi automatique de l'humidité, de la succion et de la température de la zone racinaire est implantée. Il lui est associé 3 piézomètres crépinés respectivement à 2, 10 et 20 m de profondeur pour suivre les différentes nappes (nappe perchée de sub-surface et d'altérite). L'évolution saisonnière des couverts est également suivie. Elle comprend le stade phénologique, la biomasse des principaux herbacés et des ligneux et des mesures de LAI par photographie hémisphérique. **Cet ensemble de mesures (profil d'humidité + nappe + végétation) est appelé « station de bilan local ».**

Pour caractériser l'extension latérale des nappes, ainsi que la profondeur du socle sur les trois toposéquences, des campagnes géophysiques complètent ce dispositif. Aujourd'hui,

des profils ont été réalisés sur chaque toposéquence afin de connaître les profondeurs du socle et la meilleure implantation des piézomètres. **A ce dispositif actuel de mesure du bilan hydrologique de surface vient s'ajouter la mesure des flux d'évapotranspiration.**

La modélisation permet de tester la représentation des processus à diverses échelles. Le premier niveau de modélisation concerne l'échelle de la station de bilan local. Le second niveau est celui de la toposéquence.

Au-delà, l'extrapolation du bilan aux points non mesurés du bassin se fera par modélisation sur la base des deux éléments clé qui sont la densité d'arbre et la position sur la toposéquence. Ces informations seront connues à partir de la carte d'occupation des sols mise à jour annuellement par télédétection et de la couverture satellitaire à très haute résolution (2.5m) acquise en mai 2005. Les positions sur les versants seront déduites du mnt extrait des cartes topographiques au 1 :50 0000.

Bilan de l'avancement des recherches

Avec l'instrumentation déjà déployée, ils ont compris l'origine des écoulements essentiellement composés d'un ruissellement direct et d'un flux de subsurface. Des questions demeurent cependant. Mais pour le moment ils ne disposent que de quelques piézomètres sur chaque toposéquence. La campagne réalisée de tomographie électrique a montré l'extrême variabilité de la couverture d'altération rendant difficile l'interpolation de la surface piézométrique entre les forages. En 2006, un suivi géophysique temporel permettra de suivre les fluctuations latérales des nappes ainsi que sur leur transfert, notamment sur le devenir de l'eau stockée dans les nappes d'altérite. Une autre question porte sur la vidange annuelle des nappes d'altérite. Quelle est la part de l'évapotranspiration et du drainage vers le socle dans cette vidange? La réponse passera par l'analyse des données des stations de flux en cours d'installation et par la modélisation de la reprise évapotranspiratoire sur chaque site de bilan local. Le module mis au point de redistribution de l'eau dans le sol ne résout pas le bilan d'énergie mais utilise une ETP modulée par un coefficient cultural. Les mesures d'évapotranspiration permettront de caler ce coefficient sur les 3 couverts des toposéquences. Pour une plus grande échelle, un scintillomètre infra-rouge associé à une station de flux est en cours de déploiement. Fonctionnant sur un transect d'environ 2.5 Km, il permettra d'évaluer le coefficient cultural pour un couvert plus hétérogène car intégrant en plus de la toposéquence de jachère une en savane arbustive. A l'échelle supérieures des REWs, seule la modélisation permettra d'obtenir un paramètre moyen issu des paramètres déterminés à l'échelle locale. Ceci passe par l'intégration du module de redistribution de l'eau dans POWER (ou dans la version REW, pour l'immédiat). L'autre développement dans POWER concernera le découpage en colonnes élémentaires (les RECs) pour représenter l'hétérogénéité spatiale de la surface en terme d'occupation du sol, de propriété du sol et de végétation. Le découpage en RECs sera obtenu à l'aide des cartes d'occupation du sol en cours de réalisation. Parallèlement, les études se poursuivront sur TOPMODEL avec le souci de paramétrer le fonctionnement reconnu du bassin (remplacement du terme puits actuel par un compartiment profond avec évaporation et drainage). POWER servira à valider les variables en sortie de TOPMODEL (dynamique des nappes superficielle et profonde, contributions aux écoulements). Ce modèle pourra alors être appliqué à l'échelle de l'ensemble de l'Ouémé supérieure.



PARTIE 2



Mon travail

Chapitre **Connaissances préliminaires**

Introduction à l'hydrologie de surface
Le cycle de l'eau
Le bassin Versant
L'atmosphère
Evaporation, Evapotranspiration et le
couvert végétal

La première partie de mon stage a été de me mettre à niveau en hydrologie et à la compréhension de la météorologie dans sa globalité. Plusieurs notions m'ont été indispensables au bon déroulement de mon travail.

Introduction à l'hydrologie de surface

D'une façon très générale, l'hydrologie peut se définir comme l'étude du cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. L'hydrologie au sens large regroupe :

- la climatologie, pour la partie aérienne du cycle de l'eau (précipitations, retour à l'atmosphère, transferts, etc.) ;
- l'hydrologie de surface au sens strict, pour les écoulements à la surface des continents ;
- l'hydrodynamique des milieux non saturés pour les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines (infiltration, retour à l'atmosphère à partir des nappes, etc.) ;
- l'hydrodynamique souterraine (sensu stricto) pour les écoulements en milieux saturés.

L'hydrologie de surface est la science qui traite essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs des écoulements à la surface des continents. Ces problèmes se ramènent généralement à des prévisions (associer à une date une certaine grandeur) ou des prédéterminations (associer à une grandeur une certaine probabilité) de débits ou de volume en un point ou sur une surface.

Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années.

Etats et situation de l'eau

Classiquement, on schématise les états et les situations de l'eau dans le cycle de la façon suivante :

| Etats | Principaux stocks | Phénomènes de transport |
|-------------------------------|--|--|
| Vapeur nuages, brouillards | humidité atmosphérique, évapotranspiration | évaporation |
| Liquide | océans, mers, lacs, eaux souterraines | pluie, cours d'eau, nuages, circulations souterraines |
| Solide | glaciers, manteaux neigeux, calottes polaires | neige, grêle, écoulement des glaciers |

Stocks, flux et inertie des systèmes

Quelles sont les quantités d'eau correspondant à chacun des termes de ce tableau, et avec quelles vitesses se font les échanges ? Les réponses à ces questions sont très difficiles à donner ; on pourra retenir, pour fixer les ordres de grandeur, les chiffres fournis par G. REMENIERAS :

Volumes

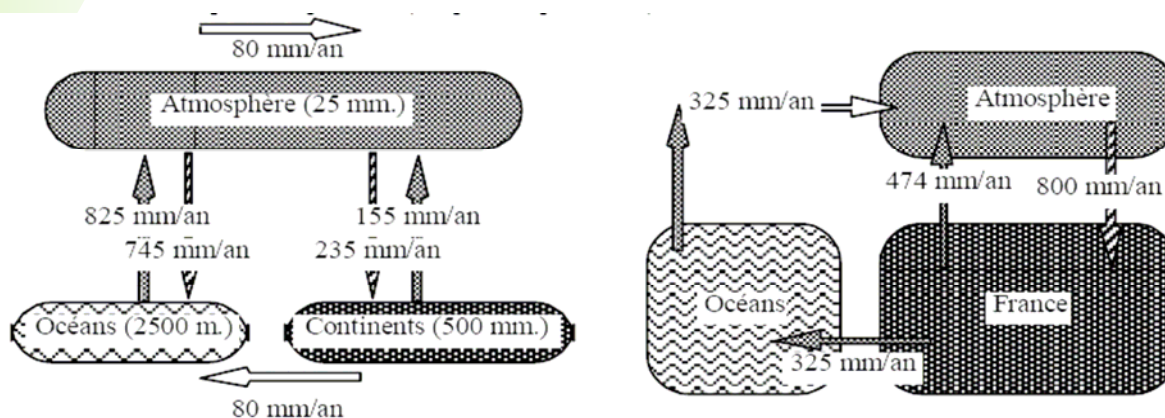
En surface, les terres émergées ne représentent que 146 106 km² sur une surface totale de la planète de 510 106 km² (soit sensiblement 1/4). Cette disparité entre océans et terres est beaucoup plus accentuée entre eaux douces et eaux salées. Le volume total des eaux douces est d'environ 36 106 km³, soit 2,8 % des réserves totales en eau. Par ailleurs, les eaux se répartissent à peu près ainsi, exprimées en épaisseurs uniformément réparties sur la terre :

| | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| mers et océans : 2500 m. | eaux souterraines : 300 à 600 mm. |
| glaciers : 50 à 100 m. | eaux atmosphériques : 20 à 30 mm. |
| eaux continentales : 350 à 700 mm. | matière vivante : ε ! |

On retiendra que ce qui circule dans les cours d'eau ne représente qu'une partie absolument infime du volume d'eau total.

Flux

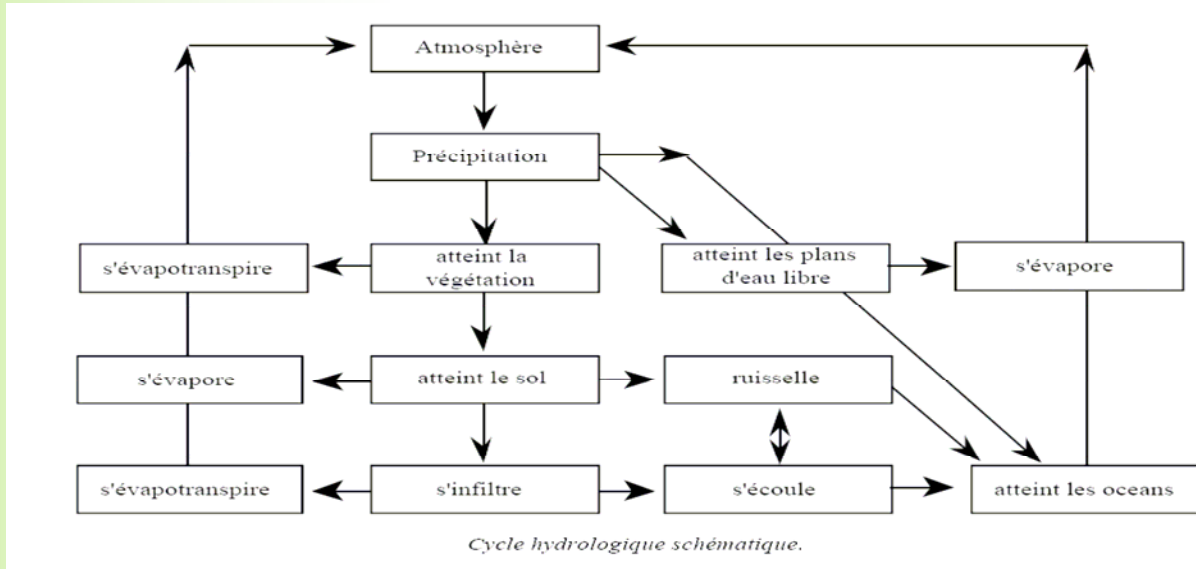
La vitesse avec laquelle l'eau circule est très variable ; généralement, on prend l'année comme période de référence. Les flux annuels sous forme liquide et gazeuse (les plus importantes) sont sensiblement les suivants :



Inertie des systèmes

On appelle "taux de renouvellement" le rapport du stock au flux qui l'alimente et "temps de renouvellement". Plus le temps de séjour est important, plus l'inertie du système est importante : c'est eaux souterraines où il atteint couramment, pour des nappes importantes, 10 à 50000 ans ; en revanche eaux continentales ont un temps de séjour relativement limite, de l'ordre de quelques jours à un an.

Cycle de l'eau



Le bassin Versant

En tout point d'un cours d'eau, nous serons amenés à définir son bassin versant et à caractériser son comportement hydrologique afin de pouvoir effectuer les bilans hydriques complets.

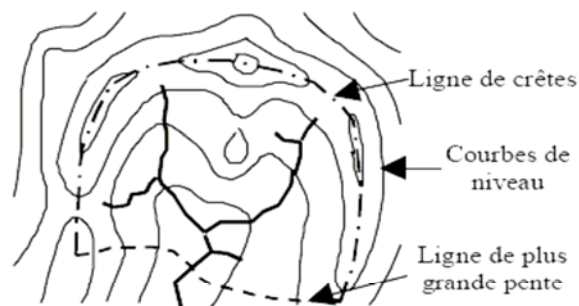
Notion de « bassin versant »

Le bassin versant en une section d'un cours d'eau est défini comme la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit donc traverser la section considérée, appelée exutoire, pour poursuivre son trajet vers l'aval.

Selon la nature des terrains, nous serons amenés à considérer deux définitions :

Bassin versant topographique

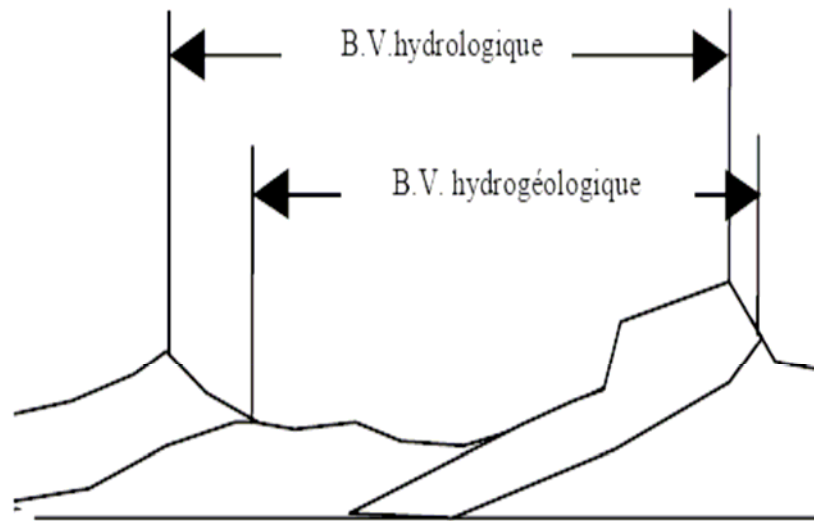
Si le sous-sol est imperméable, le cheminement de l'eau ne sera déterminé que par la topographie. Le bassin versant sera alors limité par des lignes de crêtes et des lignes de plus grande pente comme le montre la figure ci-jointe.



Bassin versant hydrogéologique

Dans le cas d'une région au sous-sol perméable, il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infilte puis sorte souterrainement du bassin (ou qu'à l'inverse des eaux entrent souterrainement dans le bassin).

Dans ce cas, nous serons amenés à ajouter aux considérations topographiques des considérations d'ordre géologique pour déterminer les limites du bassin versant. Cette distinction entre bassin topographique et hydrogéologique se justifie surtout pour les petits bassins. En effet, lorsque la taille du bassin augmente, les apports et les pertes souterraines ont plus de chance de se compenser. De plus, on peut admettre que le débit des cours d'eau est proportionnel à la surface du bassin, les échanges souterrains se font, eux, aux frontières et varient donc sensiblement comme le périmètre. Lorsque la taille du bassin augmente, la surface croît plus vite que le périmètre et la valeur relative des échanges souterrains par rapport au débit de surface tend à devenir négligeable.



Bassin versant hydrogéologique

Lorsque la taille du bassin augmente, la surface croît plus vite que le périmètre et la valeur relative des échanges souterrains par rapport au débit de surface tend à devenir négligeable.

Caractéristiques géologiques

La géologie d'un bassin versant est un facteur très important du régime des cours d'eau qui drainent ce bassin. En période de crue, les volumes écoulés seront d'autant plus grands que le bassin sera plus imperméable. En période de basses eaux, les débits seront d'autant plus forts que les nappes sont plus nombreuses et importantes. Enfin, la géologie influe indirectement sur l'évapotranspiration par l'effet thermique dû à la couleur des sols et par le développement de la végétation en fonction des sols (albédo). On se contente généralement de caractériser la géologie d'après le comportement hydrogéologique du bassin.

On propose une classification en cinq groupes ainsi définis :

| Classe | Intitulé | Exemple |
|--------|---|--|
| P1 | Perméable à aquifère drainant ou non drainé | Formation gréseuse dont les exutoires sont à l'extérieur du bassin |
| P2 | Perméable à aquifère drainé | Formation gréseuse dont les sources alimentent le réseau |
| P3 | Perméabilité moyenne ou faible | Alternance de marnes et calcaires |
| P4 | Karstique | Formation calcaire, perméabilité de fissures et développement d'un réseau souterrain |
| P5 | Imperméable | Terrain marneux, cristallin, etc. |

L'atmosphère

L'atmosphère joue un rôle essentiel dans l'apparition de phénomènes hydrologiques. Le comportement de l'atmosphère nous intéresse à trois niveaux :

- L'atmosphère constitue un stock d'air et d'eau. L'eau de l'atmosphère est sous forme de vapeur, sous forme liquide (fines gouttelettes) ou sous forme solide (cristaux de glaces en suspension). Cependant, on admet que la hauteur d'eau moyenne condensable ne représente qu'environ 20 mm.
- La terre est soumise à des échanges continuels d'énergie avec l'espace. L'atmosphère constitue un collecteur de chaleur provenant soit du soleil, soit du sol. Les échanges varient d'une façon très importante en fonction du temps (à l'échelle saisonnière et à l'échelle journalière) et aussi en fonction du lieu. Ces différences provoquent des mouvements importants des masses d'air (et d'eau).
- L'atmosphère joue donc un rôle de transport d'eau. Les vitesses de ces transports varient de quelques dizaines de kilomètres par heure au sol à plus de 400 Km/h pour les "jet-streams" en altitude.

Evaporation, Evapotranspiration et le couvert végétal

Le retour de l'eau à l'atmosphère peut se faire de différentes manières, soit directement par évaporation à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, cours d'eau, *etc.*), soit le plus souvent à partir d'un sol ou par l'intermédiaire des végétaux. On parle dans ce deuxième cas d'évapotranspiration. Pour l'évaporation, la quantité d'eau qui repart dans l'atmosphère dépend uniquement des paramètres physiques tels que la température de l'air, de l'eau, de la vitesse du vent, du degré hygrométrique, de l'ensoleillement, *etc.* L'évapotranspiration, elle, dépend en plus du couvert végétal et de son stade de développement ; sa mesure en est rendue d'autant plus difficile.

Le couvert végétal influe beaucoup sur les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement de surface. En effet, l'évapotranspiration par les végétaux est très importante et elle varie selon la nature des végétaux (forêts, cultures, prairies, *etc.*).

Par ailleurs, la végétation joue également un rôle atténuateur important en période de crue : en effet, lorsque la végétation est développée, le ruissellement est retardé et la pointe de crue est atténuée. Par ailleurs, l'écoulement étant plus long, la part d'eau reprise par l'évapotranspiration augmente et le volume de la crue diminue. Pour caractériser le couvert végétal, on utilise le pourcentage des surfaces occupées par chaque type de végétation. Sous nos climats, on se contente de trois classes : forêt, cultures, pâturages et friches. (Parfois même, on ne retient que le pourcentage des forêts.). Cette classification est évidemment à adapter pour d'autres climats (par exemple sols nus, savanes, forêts, galeries, rizières, *etc.*).

La détermination des surfaces occupées par chaque type de végétation est difficile car les documents cartographiques les mentionnant sont rares et bien souvent dépassés. Par exemple, le type de culture peut changer d'une année à l'autre (prairies -> cultures). La télédétection satellitaire trouve ici une application particulièrement efficace.

Chapitre 2

Calcul de l'évapotranspiration

*Mesures et estimation de
l'évapotranspiration
L'ETP pour la météo Béninoise
La F.A.O
Penman-Monteith-FAO
Pas de temps journalier
Pas de temps horaire*

Après une période de quelques jours d'adaptation et de documentation sur le milieu de l'hydrologie, ma première tâche a été de traiter une grande partie des données météo acquises durant ces trois dernières années afin de parvenir à calculer l'évapotranspiration du bassin de l'Ouémé.

L'évapotranspiration constitue une variable principale du bilan hydrologique surtout en zone tropicale ou aride où elle peut représenter 50 à 90% du bilan hydrique. Toutefois, elle est d'accès très difficile et son calcul nécessite l'acquisition d'un nombre de données météorologiques proportionnelle à la robustesse de la méthode employée.

Mesures et estimation de l'évapotranspiration

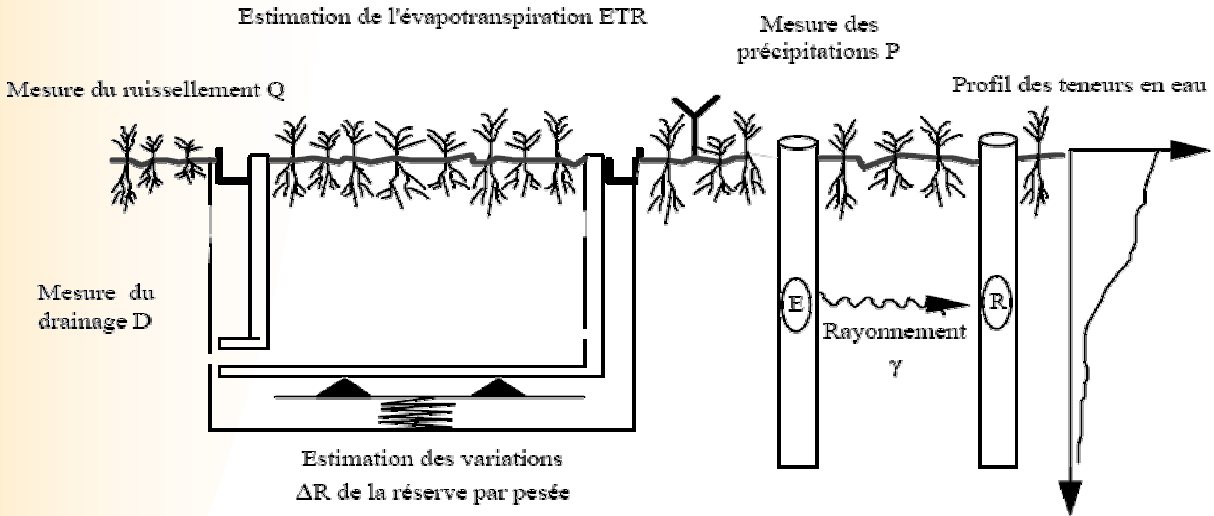
Notion d'évapotranspiration réelle et potentielle

On appelle évapotranspiration réelle (notée par la suite E_{tr}), la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant. L'évapotranspiration potentielle (notée par la suite E_{tp}) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

Mesures directes

Les mesures directes d' E_{tp} ou d' E_{tr} se font surtout en agronomie où on étudie chaque type particulier de cultures. Les résultats de ces mesures sont difficiles à utiliser en hydrologie car il y a une très importante différence d'échelle entre la surface de la parcelle d'essai (quelques mètres carrés) et celle d'un bassin versant (des dizaines de kilomètres carrés). Par ailleurs, les plantations utilisées ne sont généralement pas représentatives de la végétation d'un bassin versant.

La mesure d' E_{tr} peut être faite sur une case lysimétrique. On isole un bloc du sol de quelques mètres-carrés de surface sur environ 2 m d'épaisseur. Cet échantillon de terrain est drainé à sa base et on enregistre les débits D sortant par les drains. En surface, un collecteur fait le tour de la parcelle et récupère les eaux de ruissellement dont le débit Q est également enregistré. Les apports d'eau par la pluie P sont mesurés avec un pluviomètre. Enfin, on évalue le stock d'eau R contenu dans la case, soit par une mesure à la sonde à neutron des teneurs en eau dans le sol, soit en montant la case sur un système de bascule.



Un bilan très simple permet d'évaluer l'Etr sur un intervalle de temps Δt puisque l'on doit avoir la relation suivante :

$$P = [Q + D + Etr] + \Delta R$$

entrée = [sorties] + variation de la réserve

Le même système que la case lysimétrique, mais on parle alors "d'évapotranspiromètre", permet de mesurer l'Etp. Il suffit alors de maintenir un niveau d'eau dans les drains pour que l'eau disponible ne soit plus un facteur limitant de l'Etr. On mesure Etp en écrivant le même bilan que précédemment mais le terme D pouvant être positif ou négatif.

Estimation de l'évapotranspiration

Plusieurs formules permettent d'évaluer l'Etp à partir de différentes mesures climatologiques. La plus complète et la plus complexe est certainement la formule de Penman basée sur la notion de bilan énergétique. Cependant, le nombre de paramètres utilisés par cette formule (différentes températures, hygrométrie, rayonnement global, albédo, etc.) font que son emploi est rarement possible compte tenu des mesures disponibles.

Formule de Turc

La formule de Turc, qui dérive en la simplifiant de la formule de Penmann, ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'insolation. Cette formule est la suivante :

$$Etp = 0,4 \cdot \frac{t}{t + 15} \cdot (I_g + 50) \cdot K$$

Avec :

Etp évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau) ;

t température moyenne mensuelle de l'air (en °C) ;

Ig radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en calorie/cm²/jour) ;

K un coefficient égal à 1 si l'humidité relative hr est supérieure à 50 % (généralement le cas sous nos climats) ;
Sinon :

$$K = 1 + \frac{50 - hr}{70}$$

Si la radiation globale Ig n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation h par la formule :

$$I_g = I_g A \left[0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right]$$

Avec :

IgA radiation globale théorique (en cal/cm2/jour) ;

H durée théorique des jours du mois.

$$H = 362,7 + 0,201 \text{ lat} + (4,085 \text{ lat} - 80,99) \cos (30,01 \text{ i} - 188,9)$$

$$I_g A = 1\,035 - 9,078 \text{ lat} + (7,050 \text{ lat} + 49,90) \cos (29,92 \text{ i} - 182,5)$$

Cette formule d'emploi aisé, bénéficie d'un préjugé assez favorable quant à la précision des estimations obtenues à l'échelle mensuelle. Parfois, on utilise même cette formule à l'échelle décadaire en y adjoignant, si besoin, un terme tenant compte des effets de la végétation.

Formule de Thornthwaite

THORNTHWAITE a proposé également une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$E_{tp} = 16 \cdot \left(10 \frac{t}{I} \right)^a \cdot K$$

Avec :

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,5} \text{ et } I = \sum_{1}^{12} i$$

$$a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

t est la température moyenne mensuelle du mois considéré ;

Etp est l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau) ;

K est un coefficient d'ajustement mensuel.

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K | 0,73 | 0,78 | 1,02 | 1,15 | 1,32 | 1,33 | 1,33 | 1,24 | 1,05 | 0,91 | 0,75 | 0,70 |

Estimation de l'E.T.P. par la méthode de Penman

C'est avec cette méthode que le centre national de météorologie du Bénin estime leur ETP. Je développerai ce point un peu après car il a constitué la base de mon travail sur l'évapotranspiration.

Penman propose d'évaluer l'ETP à partir d'un bilan énergétique simple :

$$R_n = A + S + E * L$$

R_n représente la radiation nette reçue au sol ;
 A représente le flux de chaleur au bénéfice de l'atmosphère ;
 S le flux de chaleur résultant des échanges thermiques avec le sol ;
 E le flux évaporé
 et L la chaleur latente.

La formule prend la forme suivante :

$$ETP = \frac{1}{L} \frac{R_N \frac{F'_t}{\gamma}}{1 + \frac{F'_t}{\gamma}} + \frac{E_a}{1 + \frac{F'_t}{\gamma}}$$

Cette formule reste valable pour des pas de temps décadaire et ne peut pas être utilisée telle qu'elle pour des pas de temps plus faible. Néanmoins son avantage est qu'elle ne demande pas forcément une trop grande quantité et qualité de données. Mais nous développerons cela un peu plus loin.

L'ETP pour la météo Béninoise

Le centre national de météorologie du Bénin utilise la formule de Penman ci dessus. Mais pour que cette formule soit exploitable telle quelle, il faut avoir accès au rayonnement net R_n. La mesure de R_n nécessite du matériel coûteux qu'un pays comme le Bénin n'est pas en mesure de s'offrir et d'en faire la maintenance. Pour contourner cette difficulté, on évalue le rayonnement net par l'intermédiaire de la formule de BRUNT.

$$R_N = I_{Ga} (1 - A) \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) - \sigma T^4 \left(0,10 + 0,90 \frac{h}{H} \right) (0,56 - 0,08 \sqrt{e})$$

La formule développée de R_n dépend de 6 coefficients donnés par la littérature et pour lesquels subsiste une erreur. De plus, le coefficient A (l'albédo) est le paramètre qui rend compte de la « pouvoir » réflecteur du sol. Sa valeur varie considérablement en fonction du type de sol, de la végétation et de son humidité. Pour un sol nu, on estime l'albédo à 0.20 tandis que pour un sol recouvert de neige celui-ci est de 0.90. Pour un sol avec un gazon normé de 12 cm de hauteur et avec une densité connue, il peut varier de 0.20 à 0.25. Ce coefficient n'est déterminé que grossièrement et induit un grande marge

d'erreur. En effet, nous avons fait les calculs d'erreurs et nous nous sommes aperçu que son importance est capitale (environ 30% de l'erreur totale qui est d'environ 13% sur l'ETP si il y a une incertitude de 0.025 sur l'approximation de l'albédo). Le gros problème qui se pose surtout c'est pour la partie intégrative sur toute la surface. On sait bien qu'il est impossible de considérer la végétation comme uniformément variée et il nous faut donc approximer une valeur moyenne sur un bassin versant de façon très qualitative, ce qui n'est pas forcément aisé et valable d'une année sur l'autre. En effet, si une année est plus sèche que les autres, la végétation sera moins dense et donc la valeur globale de l'albédo s'en verra d'autant plus changé. Ce qui peut bien évidemment conduire à un conditionnement climatique de l'année suivante. C'est ce que l'on appelle la mémoire interannuelle.

La formule de BRUNT nous permet donc de contourner la difficulté d'une instrumentation chère mais induit une grande part d'erreur dans le calcul de l'ETP.

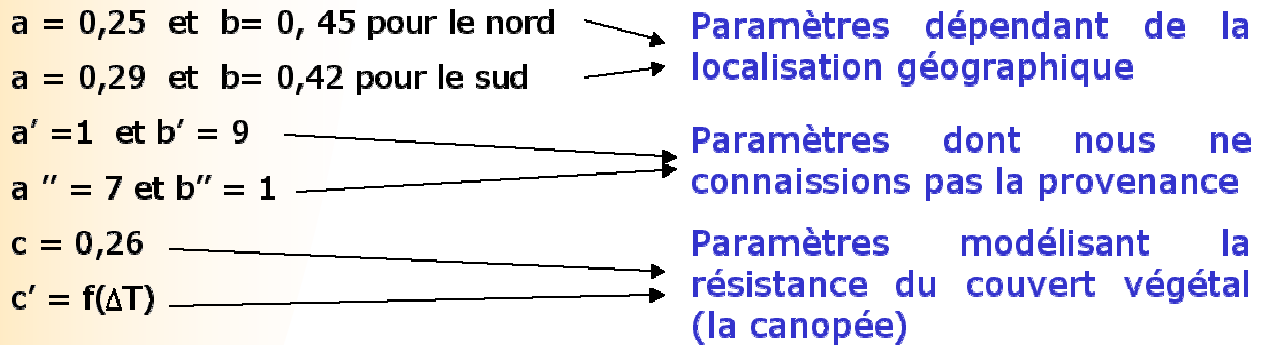
Le pouvoir évaporant de l'air E_a est calculé à partir de la formule ci contre et dépend aussi de paramètres expérimentaux donnés par la littérature.

$$E_a = c(e_w - e)(1 + c'V)$$

Ainsi, tout calcul fait, la formule développée est :

$$ETP = \frac{1}{L} \frac{F'_t}{\gamma} \frac{I_{Ga}(1-A)(a + b \frac{h}{H}) - \sigma T^4 (a' + b' \frac{h}{H})(a'' - b'' \sqrt{e})}{1 + \frac{F'_t}{\gamma}} + \frac{c(e_w - e)(1 + c'V)}{1 + \frac{F'_t}{\gamma}}$$

- ETP** évapotranspiration potentielle en mm/j ;
- I_{ga}** radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère exprimée en cal/cm²/j ;
- A** albédo de la surface évaporante, prise ici pour de la végétation à 0,2 ;
- h** durée réelle d'insolation en heures et dixièmes du jour considéré ;
- H** durée maximale possible d'insolation en heures et dixièmes pour ce jour ;
- σ** constante de STEFAN-BOLTZMAN soit 1,18 10⁻⁷ cal/cm²/jour/°K
- T** température moyenne journalière de l'air sous abri exprimée en degrés Kelvin (T = t + 273 si l'on mesure la température t en ° Celsius) ;
- e** tension moyenne journalière de la vapeur d'eau mesurée sous abri et exprimée en millibars ;
- F'_t** pente de la courbe de tension de vapeur saturante pour la température de l'air T ;
- γ** constante psychrométrique ;
- e_w** tension maximale possible de la vapeur d'eau, exprimée en millibars, pour la température T ;
- V** Vitesse moyenne journalière du vent mesuré à 2 mètres au dessus de la surface évaporante et exprimée en m/s ;
- L** Chaleur latente de l'eau.



La formule vue comme telle à l'air assez simple d'utilisation mais en fait il n'en n'est rien. Tout d'abord, notre premier problème a été de bien comprendre qu'elle démarche ils avaient adopté pour le calcul de l'ETP (nous parlons bien sur de la météo Béninoise...). En effet, cette démarche a été mise en place dans les années 1960 et n'a pas du tout évolué depuis. Les menus documentations qui avaient survécue à trente années d'activité, étaient largement insuffisantes à la bonne compréhension des démarches de calcul. Par exemple, il nous a été très difficile de trouver à quoi correspondaient les coefficients a', a'', b' et b'' d'autant plus qu'aucune dimensions pour aucune données n'étaient présentes. De plus, alors que l'outil informatique est largement présent dans leur bureau, ils utilisaient une très ancienne calculatrice HP (dite polonaise inverse programmable...) ainsi qu'une longue procédure de calcul qui était détaillée sur trois feuilles A4 et pour laquelle de nombreux résultats intermédiaires devaient être retranscrit. L'utilisation de pas moins de 5 abaques étaient aussi nécessaire pour déterminer les valeurs de F't, Iga, ew ...

Après avoir longuement étudié le sujet, nous avons réussi refaire une documentation complète sur leur méthode et nous leur avons aussi fourni un programme Excel qui permet d'automatiser les calculs. C'est ce que nous allons présenter dans les quelques paragraphes qui vont suivre.

La constante de Stefan-Boltzman

La $\sigma_{\text{utilisé}}$ constante utilisée dans le programme HP est :

$$\sigma_{\text{utilisé}} = 1,57 \cdot 10^{-11} \text{ jours}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$$

Normalement, la constante de Boltzmann est :

$$\sigma = 1,18 \cdot 10^{-7} \text{ cal cm}^{-2} \text{ jours}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$$

La constante utilisée par le programme a été divisé par L=59 cal cm⁻² (la chaleur latente de l'eau) et a été multiplié par deux autres facteurs qui ont servi à ramener les constantes a', b', a'', b'' à des valeurs entières pour que la saisie dans la calculatrice soit plus aisée, telles que :

$$a' = 1=10 \times 0,1 \quad b' = 9 = 10 \times 0,9 \quad a'' = 7 = 12,5 \times 0,56 \quad b'' = 1 = 12,5 \times 0,08$$

Les valeurs initiales étant a' = 0,1 b' = 0,9 a'' = 0,56 et b'' = 0,08

Ainsi :

$$\sigma_{\text{utilisé}} = \frac{\sigma}{59 \times 10 \times 12,5} = 1,57 \times 10^{-11} \text{ jour}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$$

γ : La constante psychométrique

$$\gamma = \frac{C_P}{\varepsilon \lambda} P = 0,6605 - 0,825 \times 10^{-4} z$$

Avec :

γ en millibars / $^\circ\text{C}$

z altitude du lieu en m

Cette formule est simple d'utilisation. Nous remarquerons aussi que le plus haut sommet du Bénin étant de 800 m, γ ne varie quasiment pas entre les stations considérées. Nous pouvons donc dire, avec une bonne approximation, que $\gamma = 0,66 = \text{constante}$. Les valeurs de F_t'/γ ainsi obtenues par ces deux dernières formules ne diffèrent que très peu par rapport aux valeurs données par l'abaque.

Calcul de F_t'

$$F_t' = \frac{6,149}{T} \left(\frac{6463}{T} - 3,927 \right) \exp\left(\frac{19,511 \times t}{T} \right)$$

Avec :

F_t' en millibars / $^\circ\text{C}$

t en $^\circ\text{C}$

T en $^\circ\text{K}$

Cette formule est simple d'utilisation et permet de se désolidariser des abaques utilisées. La valeur de t utilisée est celle de la température moyenne sur une décade et $T = 273,15 + t$. La encore, plusieurs discussions peuvent être faites sur la valeur de la température moyenne utilisée. C'est un débat que nous mènerons plus loin dans cet exposé.

Néanmoins, cette formule découle d'une interpolation exponentielle de résultats expérimentaux. Il existe aussi des formules qui interpolent ces mêmes résultats par des fonctions polynomiales qui ne collent pas aux résultats de la même manière que la fonction exponentielle. Les deux types de fonctions sont usitées en proportions égales et il peut y avoir des différences significatives dans les résultats en fonction de la gamme des températures. **La fonction exponentielle « colle »** mieux à la courbe pour des températures voisines de la **température ambiante (c'est à dire de 15 à 40 $^\circ\text{C}$)** tandis que **la fonction polynomiale** a tendance à donner de meilleur résultat sur des gammes de **température négative jusqu'à 15 $^\circ\text{C}$** . C'est certainement pour cette raison qu'en occident on a tendance à utiliser la fonction polynomiale (car la variation de température sur l'année pour des climats européens se trouve entre -20°C à $+40^\circ\text{C}$) tandis que pour les pays de

l'Afrique de l'Ouest, **comme le Bénin, les températures ne descendent jamais en dessous de 23°C durant l'année et ne dépassent que très rarement les 40°C. C'est pour cette raison que nous avons choisi les fonctions exponentielles pour calculer F't, la tension de vapeur saturante et la tension de vapeur.**

Calcul de la tension de vapeur saturante e_w

$$e_w = 6,107 \times e^{\left(\frac{17,27t}{238+t}\right)}$$

Avec :
 e_w en millibars
 t en ° Celsius

Cette formule est simple d'utilisation et permet de se désolidariser des abaques utilisées. La valeur de t utilisée est celle de la température moyenne sur une décade. Les valeurs obtenues par cette formule ne diffèrent que très peu par rapport aux valeurs données par l'abaque. On peut aussi faire la même remarque que pour l'interpolation de la loi que pour F't.

Calcul de la tension de vapeur e

$$e = 0,061 \times H_r \times e^{\left(\frac{17,27t}{238+t}\right)}$$

Avec :
 e en millibars
 t en ° Celsius
 H_r : humidité relative donnée en %

Les valeurs obtenues par cette formule diffèrent légèrement par rapport aux valeurs relevées par la météo. En effet, la détermination de la tension de vapeur e est faite à l'aide d'un thermomètre humide et sec ainsi que d'une règle graduée pour accéder à l'humidité relative de l'air impliquant plusieurs manipulations et lectures intermédiaires qui dépendent fortement du lecteur, ou d'un moyen de calcul similaire à celui l'ETP (programme HP). La valeur de t utilisée est celle de la température moyenne sur une décade. Cette formule est simple d'utilisation et permet de se désolidariser des lectures. On peut faire la même remarque pour l'interpolation de la loi que pour F't.

Calcul des paramètres H et I_{ga} :Préliminaire

Afin de déterminer ces deux paramètres il nous faut déterminer la déclinaison du soleil. Elle dépend de la période de l'année. De plus, la latitude L du lieu géographique influe sur ces deux paramètres.

$$\begin{aligned}
D &= 0,0066241 + 0,406149 \sin(0,0172029(J - 81,95)) \\
&+ 0,006675 \sin(0,0344057(J - 42,85)) \\
&+ 0,003009 \sin(0,0516086(J - 21,42)) \\
&+ 0,000149 \sin(0,0688115(J - 17,57))
\end{aligned}$$

Avec :
D en radians
J numéro du jour de l'année

Calcul de *H*

H dépend directement de la latitude et de la déclinaison du soleil.

$$H = 7,6394 \left[\text{Arc cos}[-\tan(L)\tan(D)] + \frac{0,01065}{\sqrt{\cos^2(L) - \sin^2(D)}} \right]$$

Avec :
D en radians
L en radians
H en heures

Calcul de *I_{ga}*

I_{ga} dépend directement de la latitude, de la déclinaison du soleil et de la période de l'année.

$$\begin{aligned}
I_{ga} &= 914,54 \left[\sin(L)\sin(D)\text{Arc cos}(-\tan(L)\tan(D)) + \sqrt{\cos^2(L) - \sin^2(D)} \right] \\
&\times [1 + 0.033 \cos(0.0172J)]
\end{aligned}$$

Avec :
D en radians
L en radians
J numéro du jour de l'année

Détermination de I_{ga} et H : fin

Nous avons obtenus par ces formules des valeurs de I_{ga} et H journalières. Afin de pouvoir les utiliser dans notre formule décadaire de l'ETP, il ne faut pas oublier de moyenner ces paramètres sur la décade considérée.

Les valeurs d' I_{ga} données par l'abaque qu'utilisait la météo étaient en fait I_{ga}/L ou L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($L=59\text{cal/cm}^2$). C'était encore une des subtilités qu'il nous a fallut déceler et qui nous a fait perdre beaucoup de temps.

Calcul d'incertitude

Nous avons aussi fait tous les calculs d'incertitudes sur la méthode de Penman.

Pour cela nous avons utilisé la théorie classique sur les calcul d'incertitude en physique dont nous rappelons les principes.

Soit la relation physique F dépendant de plusieurs paramètres x_i , dont nous connaissons les incertitudes de mesures Δx_i , telle que :

$$F = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n-1}, x_n)$$
$$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_i, \dots, \Delta x_n \text{ connues}$$

L'erreur commise sur F en fonction des incertitudes sur les variable x_1, x_2, \dots se calcul ainsi :

Par la différentielle totale :

$$\Delta F = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} \right| \Delta x_i$$

Ou par la différentielle logarithmique :

$$\Delta F = F \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial}{\partial x_i} (\ln(F)) \right| \Delta x_i$$

Synthèse

DECADE 3

$T_m = 29,55$ $U_x = 68,21$ $I_{ga} = 15,63$ $H = 12,33$ $E_w = 41,12$ $F_t/G = 3,599$
 $c' = 0,4$ $\Delta T = 11,7$

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| <i>Pluie</i> | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,1 | 9,8 | 0,0 | 0,0 | 31,9 | 0,7 | 0,0 | 43,0 |
| <i>Température minimale</i> | 25,0 | 26,0 | 25,8 | 23,0 | 24,4 | 24,2 | 24,5 | 21,4 | 20,4 | 22,5 | 23,7 |
| <i>Température maximale</i> | 37 | 36,2 | 34,5 | 37,5 | 37,2 | 34,6 | 36,0 | 37,2 | 30,0 | 33,5 | 35,4 |
| <i>Température à 10 cm</i> | 23,5 | 25,4 | 25,0 | 15,0 | 24,3 | 21,8 | 24,0 | 25,4 | 19,4 | 22,0 | 22,6 |
| <i>Température à 50 cm</i> | 17,7 | 19,7 | 19,4 | 20,9 | 17,9 | 15,9 | 18,0 | 19,3 | 13,4 | 16,0 | 17,8 |
| <i>Vent moyen</i> | 1,7 | 1,7 | 2,3 | 1,8 | 2,0 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 1,6 | 1,9 |
| <i>Vent maximal</i> | 4,0 | 4,0 | 5,0 | 5,0 | 4,0 | 5,0 | 5,0 | 4,0 | 6,0 | 4,0 | 4,6 |
| <i>Insolation</i> | 10,6 | 8,3 | 5,7 | 5,1 | 7,2 | 5,9 | 8,5 | 8,3 | 0,5 | 9,5 | 7,0 |
| <i>Humidité minimale</i> | 49 | 51 | 50 | 40 | 44 | 50 | 52 | 49 | 57 | 57 | 50 |
| <i>Humidité maximale</i> | 86 | 79 | 84 | 92 | 84 | 89 | 84 | 84 | 93 | 96 | 87 |
| <i>Tension de vapeur</i> | 28,4 | 28,0 | 28,4 | 27,7 | 26,2 | 28,3 | 28,6 | 28,8 | 25,4 | 28,6 | 27,8 |
| <i>Evaporation Bac A</i> | 6,9 | 7,1 | 6,3 | 6,7 | 5,9 | 5,0 | 7,3 | 10,2 | 2,3 | 4,8 | 62,5 |

ETP Décadaire = 48,59 +/- 6,8

| | A | V | Iga | H | h | T | Hr | e | ew | Ft/g |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Incertitude de mesure | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 1,00 | 0,49 | 0,12 | 0,01 |
| Erreur commise sur ETP | 1,85 | 0,15 | 0,15 | 0,06 | 0,26 | 0,01 | | 1,04 | 0,12 | 0,51 |
| | a | b | a' | b' | a'' | b'' | c | c' | | |
| Incertitude de mesure | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | | |
| Erreur commise sur ETP | 0,92 | 0,52 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,33 | 0,07 | 0,70 | | |

Nous avons créé une feuille Excel qui permet de calculer l'évapotranspiration selon la méthode de Penman. Nous avons choisi de prendre pour température moyenne la moyenne de la température maximale et de la température minimale d'une journée puis de prendre la température moyenne sur la décade (c'est à dire faire la moyenne des 10 températures moyennes calculées à partir de la température max et min de chaque jour). On procède de la même manière pour tous les autres paramètres, c'est à dire en faisant la moyenne de toutes les valeurs moyennes journalières sur une décade. Cela permet d'accéder à l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière sur une décade en mm d'eau par jour. Pour obtenir l'ETP d'une décade il suffit donc de multiplier cette valeur journalière par 10.

Nous obtenons en même temps l'incertitude de l'ETP due aux erreurs de mesures. Le tableau bleu nous permet de voir quelle est la part de chacun des paramètres dans l'erreur totale. C'est tout simplement un détail du calcul d'incertitude qui est linéaire et il suffit donc d'additionner chacune des erreurs pour obtenir l'erreur totale. On voit que la part de l'Albédo est de loin la plus importante de toute. Elle induit à elle seule 30% d'erreur. On voit bien quelles sont les limitations de la formule de BRUNT qui impose l'utilisation de cette notion d'albédo.

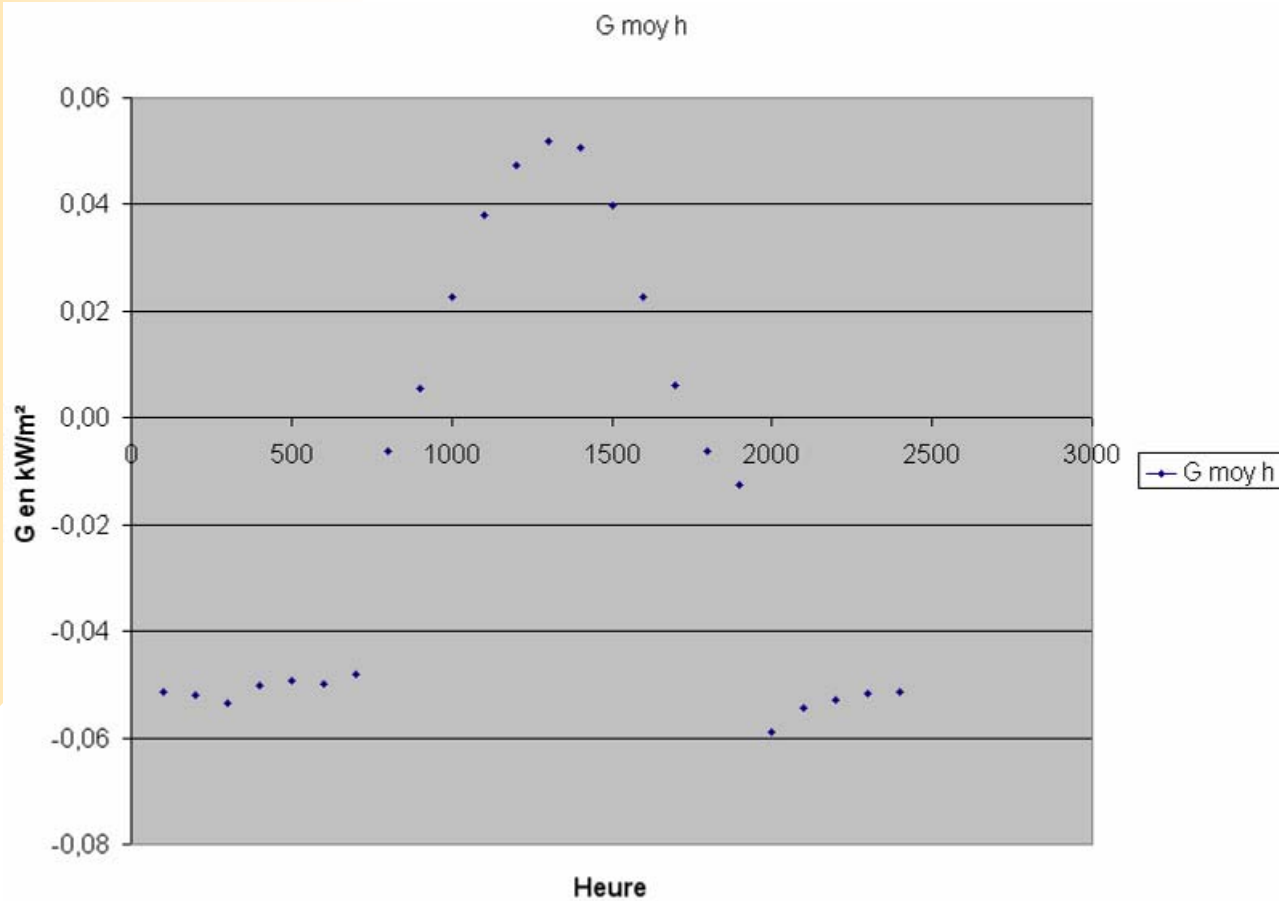
Néanmoins, les données que nous devons posséder sont faciles à mesurer et ne nécessite aucun matériel supplémentaire onéreux qu'il n'y aurait pas dans une station météo synoptique.

| Latitude en radians | | <i>Parakou</i> | <i>Cotonou</i> | <i>Savè</i> | <i>Natitingou</i> | <i>Bohicon</i> | <i>Kandi</i> |
|---------------------|--------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | | 0,16 | 0,10 | 0,14 | 0,17 | 0,12 | 0,19 |
| Mois | Decade | H moyen par decade | Iga moyen par decade | H moyen par decade | Iga moyen par decade | H moyen par decade | Iga moyen par decade |
| Janvier | I | 10,34 11,75 | 10,51 12,33 | 10,41 11,98 | 10,30 11,62 | 10,46 12,15 | 10,25 11,43 |
| | II | 11,53 13,29 | 11,70 13,90 | 11,60 13,53 | 11,49 13,15 | 11,65 13,72 | 11,44 12,96 |
| | III | 11,58 13,60 | 11,74 14,17 | 11,64 13,83 | 11,55 13,48 | 11,69 14,00 | 11,50 13,29 |
| Fevrier | I | 11,65 13,97 | 11,78 14,47 | 11,70 14,17 | 11,62 13,85 | 11,74 14,32 | 11,58 13,69 |
| | II | 11,72 14,35 | 11,82 14,78 | 11,76 14,53 | 11,70 14,25 | 11,79 14,66 | 11,67 14,11 |
| | III | 11,80 14,72 | 11,88 15,07 | 11,83 14,86 | 11,79 14,64 | 11,85 14,96 | 11,76 14,52 |
| Mars | I | 11,89 15,04 | 11,93 15,30 | 11,90 15,15 | 11,88 14,98 | 11,92 15,22 | 11,86 14,89 |
| | II | 11,97 15,30 | 11,99 15,46 | 11,98 15,37 | 11,97 15,26 | 11,98 15,42 | 11,96 15,19 |
| | III | 12,06 15,48 | 12,04 15,55 | 12,05 15,51 | 12,06 15,46 | 12,05 15,53 | 12,07 15,43 |
| Avril | I | 12,14 15,59 | 12,10 15,56 | 12,12 15,58 | 12,15 15,59 | 12,11 15,57 | 12,17 15,58 |
| | II | 12,22 15,62 | 12,15 15,50 | 12,19 15,58 | 12,24 15,64 | 12,17 15,54 | 12,26 15,66 |
| | III | 12,30 15,59 | 12,20 15,39 | 12,26 15,51 | 12,33 15,63 | 12,23 15,45 | 12,36 15,67 |
| Mai | I | 12,37 15,51 | 12,24 15,24 | 12,32 15,41 | 12,40 15,57 | 12,28 15,32 | 12,44 15,64 |
| | II | 12,44 15,41 | 12,28 15,07 | 12,38 15,28 | 12,47 15,48 | 12,33 15,18 | 12,52 15,57 |
| | III | 12,49 15,30 | 12,32 14,91 | 12,42 15,16 | 12,53 15,38 | 12,37 15,04 | 12,58 15,49 |
| Juin | I | 12,53 15,21 | 12,34 14,79 | 12,45 15,05 | 12,57 15,30 | 12,40 14,92 | 12,62 15,42 |
| | II | 12,55 15,15 | 12,36 14,70 | 12,47 14,98 | 12,59 15,24 | 12,41 14,84 | 12,65 15,36 |
| | III | 12,55 15,13 | 12,36 14,68 | 12,48 14,95 | 12,59 15,21 | 12,42 14,82 | 12,65 15,34 |
| Juillet | I | 12,54 15,14 | 12,35 14,71 | 12,46 14,97 | 12,58 15,23 | 12,41 14,84 | 12,64 15,35 |
| | II | 12,51 15,19 | 12,33 14,79 | 12,44 15,04 | 12,55 15,27 | 12,38 14,91 | 12,60 15,39 |
| | III | 12,46 15,27 | 12,30 14,90 | 12,40 15,13 | 12,50 15,34 | 12,35 15,02 | 12,55 15,44 |
| Aout | I | 12,41 15,35 | 12,26 15,04 | 12,35 15,23 | 12,44 15,41 | 12,31 15,14 | 12,48 15,49 |
| | II | 12,34 15,42 | 12,22 15,18 | 12,29 15,33 | 12,36 15,47 | 12,26 15,26 | 12,40 15,53 |
| | III | 12,27 15,46 | 12,17 15,30 | 12,23 15,40 | 12,28 15,49 | 12,20 15,35 | 12,31 15,52 |
| Septembre | I | 12,19 15,45 | 12,12 15,38 | 12,16 15,43 | 12,20 15,46 | 12,14 15,40 | 12,22 15,47 |
| | II | 12,10 15,38 | 12,07 15,40 | 12,09 15,40 | 12,11 15,37 | 12,08 15,40 | 12,12 15,36 |
| | III | 12,02 15,25 | 12,02 15,36 | 12,02 15,30 | 12,02 15,22 | 12,02 15,33 | 12,02 15,17 |
| Octobre | I | 11,93 15,04 | 11,96 15,24 | 11,94 15,12 | 11,93 14,99 | 11,95 15,19 | 11,92 14,91 |
| | II | 11,85 14,77 | 11,91 15,06 | 11,87 14,89 | 11,84 14,70 | 11,89 14,98 | 11,82 14,60 |
| | III | 11,77 14,44 | 11,86 14,82 | 11,80 14,60 | 11,75 14,36 | 11,83 14,71 | 11,72 14,23 |
| Novembre | I | 11,69 14,09 | 11,81 14,55 | 11,74 14,28 | 11,67 13,99 | 11,77 14,41 | 11,63 13,84 |
| | II | 11,62 13,73 | 11,76 14,26 | 11,68 13,95 | 11,59 13,62 | 11,72 14,11 | 11,55 13,45 |
| | III | 11,56 13,41 | 11,72 13,99 | 11,62 13,64 | 11,52 13,28 | 11,67 13,82 | 11,47 13,09 |
| Decembre | I | 11,51 13,15 | 11,69 13,77 | 11,58 13,40 | 11,47 13,01 | 11,64 13,59 | 11,42 12,81 |
| | II | 11,48 12,98 | 11,67 13,63 | 11,56 13,24 | 11,44 12,83 | 11,61 13,43 | 11,38 12,63 |
| | III | 11,47 12,92 | 11,66 13,58 | 11,55 13,18 | 11,43 12,77 | 11,61 13,38 | 11,37 12,56 |

Voici le tableau qui remplace les abaques du service météo. En effet, le calcul de Iga et de H étant assez fastidieux et long, nous avons préféré faire le calcul proprement sur une feuille a part plutôt que de l'intégrer directement dans le calcul de l'ETP. Cela permet aussi de limiter les erreurs de programmation.

Malgré son bon rapport simplicité/efficacité, cette méthode de calcul manque de précision pour estimer le terme d'évapotranspiration pour un programme au enjeu international comme le programme AMMA. En effet, en plus d'être approximative, elle présente l'inconvénient d'avoir un pas de temps trop élevé, ce qui présente un manque de flexibilité pour effectuer les bilans hydriques.

Ces contraintes temporelles sont dues aux hypothèses de démonstrations beaucoup trop larges. Par exemple, elle ne tient pas compte des gains et pertes de chaleur par conduction de la surface évaporante qui, par hypothèse, se compensent sur des périodes de quelques jours. Cette hypothèse est, dans certaines mesures, valable comme dans les pays d'Europe par exemple, où la variation de température entre le jour et la nuit est importante. Mais lorsque nous avons tracé les courbes du rayonnement terrestre que nos capteurs ont mesuré, nous ne pouvions plus donner raison à cette hypothèse pour le pays du Bénin.



On peut voir sur cette courbe que la répartition des rayonnements de la terre n'est pas nulle sur la journée. Pour en avoir le cœur net, nous avons aussi calculé l'intégrale de ce rayonnement sur cette journée par la méthode des rectangles afin de confirmer ce préjugé graphique. Nous obtenons que le rayonnement terrestre sur la journée est de :

$$G = -31\,000 \text{ kJ/m}^2 = -7600 \text{ kCal/m}^2$$

Ce qui correspond en terme d'évaporation à 14 mm d'eau.

En plus de ces hypothèses largement réfutables, ces mesures n'utilisent qu'une petite partie des données que nous avons acquises. En effet, l'instrumentation mise en place nous permet d'avoir avec une résolution au quart d'heure des données météo nécessaire au calcul de l'ETP. On avait donc une perte considérable d'information en procédant ainsi.

Mais cette étape était largement nécessaire avant de passer au modèle de la FAO Penman- Monteith qui lui se trouve être plus complexe. Nous allons dans un premier temps présenter brièvement ce qu'est la FAO, puis nous regarderons cette méthode de calcul.

La F.A.O

The United Nations Food and Agricultural Organization (La F.A.O ou en français l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) joue un rôle de chef de file dans les efforts internationaux de lutte contre la faim. La FAO, qui est au service à la fois des pays développés et des pays en développement, est une tribune neutre au sein de laquelle tous les pays se réunissent sur un pied d'égalité pour négocier des accords et débattre de politiques. La FAO est également une source de savoir et d'informations. Elle aide les pays en développement et les pays en transition à moderniser et à améliorer les pratiques agricoles, forestières et halieutiques, et à garantir une bonne nutrition pour tous. Depuis sa création en 1945, elle a consacré une attention particulière au développement des zones rurales, où vivent 70 pour cent des populations pauvres et affamées de la planète.

Atteindre la sécurité alimentaire pour tous est au cœur des efforts de la FAO - veiller à ce que les êtres humains aient un accès régulier à une nourriture de bonne qualité qui leur permette de mener une vie saine et active.

Le mandat de la FAO consiste à améliorer les niveaux de nutrition, la productivité agricole et la qualité de vie des populations rurales et contribuer à l'essor de l'économie mondiale.

La FAO fournit un type d'assistance non médiatisée, qui aide les populations et les nations à être autonomes. Si une communauté veut accroître ses rendements agricoles, mais qu'elle ne dispose pas des compétences techniques, nous lui apportons des outils et des techniques simples et durables. Lorsqu'un pays passe d'un régime foncier étatique à un régime de propriété privée, elle lui offre les avis juridiques pour faciliter le processus. Lorsqu'une sécheresse pousse des groupes déjà vulnérables au bord de la famine, elle mobilise une action. Et, dans un monde complexe de besoins antagoniques, elle offre une instance neutre et les connaissances de base nécessaires pour bâtir un consensus.

Domaines d'activités

Les quatre grands domaines d'activité de la FAO :

● **Mettre l'information à la portée de tous.** La FAO sert de réseau de connaissances spécialisées. Elle met à profit les compétences techniques de notre personnel - agronomes, forestiers, spécialistes des pêches et de l'élevage, nutritionnistes, experts en sciences sociales, économistes, statisticiens, etc. - afin de recueillir, analyser et diffuser les données utiles au développement. Son site Internet est visité un million de fois par mois, que ce soit pour consulter un document technique ou pour s'informer sur notre travail avec les agriculteurs. Elle publie, en outre, des centaines de bulletins d'information, de rapports et d'ouvrages, distribue des revues, crée de multiples cédéroms et accueille des dizaines de forums électroniques.

● **Partager l'expertise en matière de politiques.** La FAO met au service des ses pays membres des années d'expérience dans l'élaboration de politiques agricoles, le soutien à la planification, la mise au point de lois efficaces et la création de stratégies nationales visant à atteindre les buts de développement rural et de réduction de la faim.

● **Servir de lieu de rencontre pour les Etats.** Tous les jours, des dizaines de responsables et d'experts du monde entier se réunissent au siège ou dans nos bureaux de terrain pour

établir des accords sur les grandes questions d'alimentation et d'agriculture. En tant qu'instance neutre, la FAO offre une tribune où les nations riches et pauvres peuvent se retrouver pour approfondir des thèmes d'intérêt commun.

● **Porter les connaissances sur le terrain.** Son vaste éventail de connaissances est constamment éprouvé dans des milliers de projets de terrain dans le monde entier. La FAO mobilise et gère des millions de dollars provenant des pays industrialisés, des banques de développement et d'autres sources pour garantir que les projets atteignent leurs buts. Elle fournit les connaissances techniques et offre, dans certains cas, elle-même des financements. Dans les situations de crise, nous travaillons en parfait accord avec le Programme alimentaire mondial et d'autres organismes humanitaires pour protéger les moyens d'existence ruraux et aider les agriculteurs à se reconstruire une vie.

Structure et financement

La FAO est dirigée par la Conférence des nations membres, qui se réunit tous les deux ans pour passer en revue le travail effectué par l'Organisation et pour approuver un Programme de travail et budget pour l'exercice biennal suivant.

La Conférence élit un Conseil de 49 Nations membres qui joue le rôle d'organe intérimaire. Les membres sont élus pour trois ans, en rotation. La Conférence élit également un Directeur général à la tête de l'organisation. Le Directeur général actuel, le Dr Jacques Diouf, du Sénégal, a commencé un premier mandat de six ans en janvier 1994, a été réélu pour un second mandat en janvier 2000, et pour un troisième mandat début janvier 2006.

La FAO se compose de huit départements: Administration et finances, Affaires générales et information ; Agriculture, biosécurité, nutrition et protection des consommateurs; Economie et statistiques; Pêches; Forêts; Développement durable et Coopération technique.

La FAO emploie 3 700 personnes - 1 500 membres du cadre organique et 2 200 membres des services généraux - réparties dans cinq bureaux régionaux, cinq bureaux sous-régionaux, cinq bureaux de liaison et plus de 74 bureaux nationaux à part entière (à l'exclusion de ceux hébergés par les bureaux régionaux et sous-régionaux), ainsi que dans son siège de Rome.

Améliorations continues

Depuis 1994, la FAO procède à la restructuration la plus importante depuis sa fondation: elle décentralise ses services, rationalise ses procédures et réduit ses coûts. Elle a ainsi pu réaliser des économies de 50 millions de dollars par an. Parmi ses principales réformes, citons:

- l'importance croissante accordée à la sécurité alimentaire
- le transfert de personnel (du siège au terrain)
- l'augmentation croissante du nombre des experts venus de pays en développement et en transition
- l'élargissement des liens avec le secteur privé et les organisations non gouvernementales
- l'accès électronique amélioré aux documents et bases de données statistiques de la FAO.

En 1999, la Conférence a approuvé le Cadre stratégique pour guider les travaux de la FAO jusqu'en 2015. Il est le résultat de vastes consultations avec les Etats membres de la FAO et les autres parties prenantes et fera autorité pour les futurs programmes de l'Organisation.

Les réformes font partie d'un processus continu à la FAO. En 2005, la Conférence a approuvé le transfert d'autres membres du personnel du siège aux bureaux décentralisés, ainsi que des mesures visant à réaliser de nouveaux gains d'efficacité et une réorganisation au siège.

Le Budget de la FAO

Le bon fonctionnement d'une organisation représentant 188 États membres, plus la Communauté européenne, est un processus complexe. Les représentants de tous les membres se réunissent à la Conférence de la FAO tous les deux ans pour faire le point des travaux accomplis et approuver un nouveau budget. La Conférence élit, suivant un principe de rotation, un petit groupe de 49 membres (le Conseil) chargé de gouverner les activités de l'Organisation pour un mandat triennal. La Conférence nomme également le Directeur général à la tête de l'Organisation. Le Directeur général en poste est M. Jacques Diouf, du Sénégal.

La FAO emploie plus de 1 500 fonctionnaires du cadre organique et 2 200 agents des services généraux, dont un peu plus de la moitié travaille au siège à Rome et le reste opère aux quatre coins du monde, depuis des bureaux disséminés dans plus de 100 pays. Le budget du Programme ordinaire de la FAO est financé par les contributions des membres fixées à la Conférence de la FAO. Le budget pour l'exercice 2006-2007 s'élève à 765,7 millions de dollars EU et couvre les principales opérations techniques, la coopération et les partenariats, y compris le Programme de coopération technique, l'information et les politiques générales, la direction et l'administration.

D'après les premières informations disponibles pour 2005, 378 millions de dollars EU auraient servi à financer 1 613 projets de terrain, dont 416 opérations d'urgence, pour un montant de 150 millions de dollars EU - toutes sources de financement confondues - représentant 40 pour cent de l'exécution totale. Le programme de coopération technique sur le terrain s'est élevé à 228 millions de dollars EU, dont 18 pour cent de contributions de la FAO et le reste de sources externes: Fonds fiduciaires -62 pour cent, UTF 18 pour cent et Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) -2 pour cent.

Penman-Monteith-FAO

La FAO en collaboration avec the International Commission on Irrigation and Drainage (I.C.I.D.) a recommandé la révision de la méthode des calculs des besoins en eau des plantes. La F.A.O. a décidé lors d'un colloque à Rome du 28 au 31 mai 1990 de changer la définition de l'évapotranspiration de référence et de réviser la procédure de calcul.

L'évapotranspiration de référence (ET_o) était définie comme le degré d'évapotranspiration d'une surface recouverte d'herbe d'une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, en pleine croissance, recouvrant totalement le sol et ne souffrant pas d'un manque d'eau (Doorenbos and Pruitt, 1977).

Elle est donnée par la formule climatique de Penman, adoptée par F.A.O. en 1975. Elle utilise des facteurs climatiques mais surestime fréquemment l'ET₀ (Allen et al, 1994). Les recherches ont indiqué une faiblesse dans le calcul de la fonction du vent, le déficit de la pression de vapeur, le rayonnement net de longues longueurs d'onde et l'utilisation du coefficient de correction c. En d'autre, l'ancienne définition correspond à celle utilisée par le centre météorologique du Bénin, que nous avons étudié dans la première partie pour notre « mise en jambe » sur le calcul de l'ETP.

De plus, des études au Sahel (Monteith, 1981) et dans d'autres régions arides (Hess, 1998; Jensen et Haise, 1963; Jones et al., 1981) ont montré que l'équation de Penman-Monteith recommandée par la FAO était la plus adaptée pour l'estimation de l'ET₀ dans les environnements arides et semi-arides.

D'autres études conduites au Maroc (Hayadi, 1991; Elmehdi et Said, 2000) aboutissent à la même conclusion. Nous avons donc utilisé cette dernière comme méthode de référence. Elle fait appel aux données suivantes: températures maximale et minimale, humidités maximale et minimale, insolation et vitesse du vent.

L'évapotranspiration de référence (ET₀) a donc été redéfinie lors du colloque de Rome comme le degré d'évapotranspiration d'une culture de référence ayant une hauteur de 0.12 m, une résistance de couvert de 70 s / m et un albédo de 0.23 identique à l'évapotranspiration d'une surface recouverte d'herbe verte, d'une hauteur uniforme en pleine croissance, recouvrant totalement le sol et ayant de l'eau en suffisance (Smith et al., 1991).

L'équation FAO Penman-Monteith, ayant des paramètres de rugosité et de résistance de surface normalisés, est recommandée comme équation qui représente la nouvelle définition de l'ET₀. Le changement de la définition et la sélection d'une méthode de calcul appropriée à la nouvelle définition prétend contribuer à éliminer les problèmes liés à la mesure de l'ET₀ sur une culture de référence vivante, et permettre l'obtention des valeurs de ET₀ consistantes dans toutes les régions du globe.

L'équation de Penman-Monteith peut s'écrire :

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)}{L(\Delta + \gamma \frac{r_v}{r_a})} + \frac{\gamma \frac{r_v}{r_a} M_{eau} (e_w - e)}{RT r_v (\Delta + \gamma \frac{r_v}{r_a})}$$

Avec :

- ET₀ évapotranspiration de référence en mm/s
- R_n radiation nette à la surface de la culture en MW/m²
- G flux de chaleur du sol en MW/m²
- M_{eau} masse moléculaire de l'eau = 0.018 Kg/mol
- R constante des gaz parfaits R= 8.31 *10⁻³ KJ /mol/K
- T température en kelvin
- e_w tension de vapeur saturante
- e tension de vapeur

L chaleur latente de vaporisation $L = 2.450 \text{ MJ/kg}$
 r_v résistance de la canopée a la vaporisation
 r_a résistance aérodynamique de la végétation
 Δ pente de la courbe de pression de vapeur saturante
 γ constante psychométrique

de plus,

$$r_v = r_a + r_c$$

$$r_a = \frac{209}{u_2} = \frac{240}{u_3}$$

U_i est la vitesse du vent mesurée a i mètre de hauteur
 R_c est la résistance stomatale. Pour le couvert de référence, on l'estime a 70 s/m le jour et 700 s/m la nuit.

Nous obtenons donc :

$$\frac{r_v}{r_a} = 1 + \frac{r_c}{r_a} = \begin{cases} 1 + 0.34U_2 & \text{le jour} \\ 1 + 3.4U_2 & \text{la nuit} \end{cases}$$

L'équation simplifié donne avec les mêmes unités que la précédente :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma \times 10,364 \times 10^{-3} \times U_2 \times (e_w - e)}{T + 273}}{(\Delta + \gamma \frac{r_v}{r_a})}$$

avec T en celcius mesurée à 2 m

Il ne reste plus qu'à intégrer sur le pas de temps que l'on souhaite en faisant bien attention de choisir l'une des deux expression obtenue en fonction du jour ou de la nuit. Le critère discriminant recommandé pour faire la distinction entre ces deux périodes de la journée est de regarder si $R_n < 10 \text{ W/m}^2$. Néanmoins, la FAO ne nous fourni une méthode précise que pour un pas de temps journalier. Sur une journée, comme nous utilisons des valeurs moyennée sur la journée, il ne faut pas faire de distinction et faire comme si ce n'était que le jour. En d'autre termes, faire de ET_0 une fonction par partie sur a journée n'est valable que pour un pas de temps horaire, pour lequel la description du calcul n'est pas précise.

Pas de temps journalier

Rn et G

Nous devons intégrer les rayonnements afin de pouvoir avoir la quantité d'énergie que le sol a reçu durant la journée.

Méthode d'intégration numérique

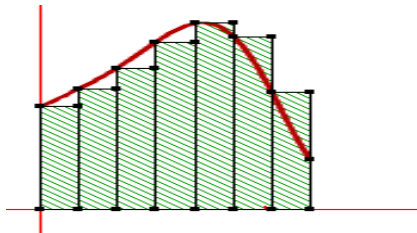
Si f est une fonction continue sur un intervalle $[a,b]$, bien souvent on ne sait pas calculer une primitive de f ou encore nous n'avons qu'une série de point de cette fonction. Ainsi, si l'on désire obtenir la valeur de l'intégrale de f entre les bornes a et b , il faut parfois se contenter d'obtenir une valeur approchée à l'aide d'une méthode d'intégration numérique.

La plupart des méthodes d'intégration numérique fonctionnent sur le même principe. On commence par couper le gros intervalle $[a,b]$ en N plus petits intervalles $[a_i, a_{i+1}]$, avec $a_1=a$ et $a_{N+1}=b$. Ce découpage se fait d'autant plus naturellement si nous possédons des valeurs de f à un pas de temps donné (constant ou non). Puis, pour chaque intervalle $[a_i, a_{i+1}]$, on essaie d'approcher :

$$\int_{a_i}^{a_{i+1}} f(t) dt$$

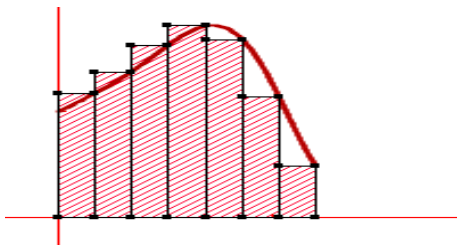
La méthode des rectangles à gauche :

On approche $\int_{a_i}^{a_{i+1}} f(t) dt$ par $(a_{i+1} - a_i) f(a_i)$. Géométriquement, cela signifie qu'on approche l'intégrale de f par l'aire des rectangles hachurés en vert :



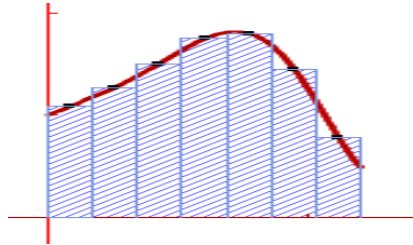
la méthode des rectangles à droite :

On approche $\int_{a_i}^{a_{i+1}} f(t) dt$ par $(a_{i+1} - a_i) f(a_{i+1})$. Géométriquement, cela signifie qu'on approche l'intégrale de f par l'aire des rectangles hachurés en rouge :



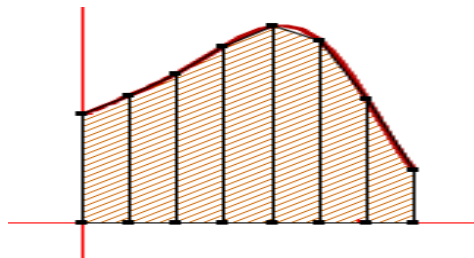
la méthode du point milieu :

On approche $\int_{a_i}^{a_{i+1}} f(t) dt$ par $(a_{i+1} - a_i) f\left(\frac{a_i + a_{i+1}}{2}\right)$. Géométriquement, cela signifie qu'on approche l'intégrale de f par l'aire des rectangles hachurés en bleu :



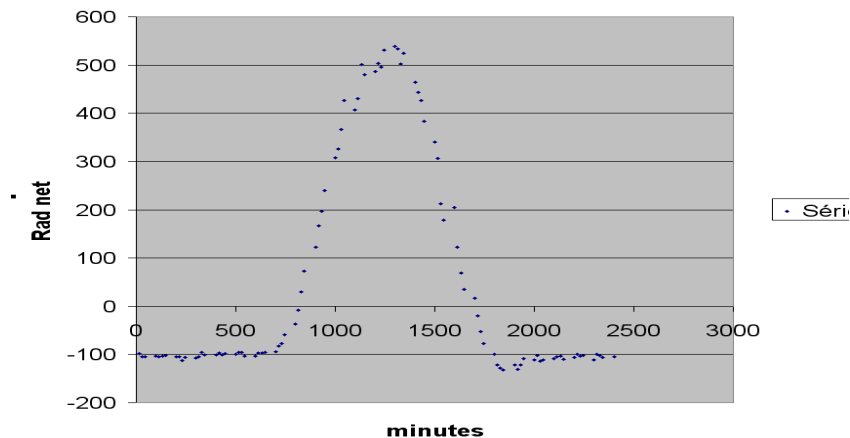
la méthode des trapèzes:

On approche $\int_{a_i}^{a_{i+1}} f(t) dt$ par $(a_{i+1} - a_i) \frac{f(a_i) + f(a_{i+1})}{2}$. Géométriquement, cela signifie qu'on approche l'intégrale de f par l'aire des trapèzes hachurés en marron :



Sous de bonnes hypothèses sur la fonction f (elle doit être continue dans les 3 premiers cas, C^1 dans les 3 suivants), on prouve que ces méthodes d'intégration numérique fonctionnent : quand on augmente le nombre de fois où on coupe le segment $[a,b]$, la valeur de l'intégrale approchée converge vers la vraie valeur de l'intégrale.

Radiation net sur une journée



On voit bien sur cette courbe qu'il y a une très bonne symétrie. Alors, si on utilise une de ces méthodes d'intégration, nous aurons un très bon résultat. On peut d'ailleurs utiliser indifféremment n'importe laquelle.

Pour la détermination de G, la FAO suppose que sur une période d'une journée, le rayonnement terrestre est quasiment nul (nous avons vu que ce n'est pas notre cas, mais nous sommes obligé de calculer l'ETP avec cette hypothèse sinon voulons mettre nos mesures sur le plan international)

Nos mesure du rayonnement net se fait tous les quarts d'heure. Ainsi, pour accéder à l'intégrale du rayonnement net et G que nous noterons W_r , on peut procéder ainsi :

$$W_j = \sum_{i=0}^{4*24} R_{n_i} \times 15 \times 60$$

Autres termes

Pour la température, la FAO exige de prendre comme moyenne journalière celle obtenue par la température minimale et maximale de la journée. C'est à dire :

$$T_j = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2}$$

Pour la tension de vapeur saturante :

$$e_{wj} = \frac{e_w(T_{\min}) + e_w(T_{\max})}{2}$$

Pour la tension de vapeur :

$$e_j = \frac{e_w(T_{\min}) \frac{Hr_{\max}}{100} + e_w(T_{\max}) \frac{Hr_{\min}}{100}}{2}$$

Pour le vent c'est une simple moyenne arithmétique qu'il faut faire.

Pour la constante psychométrique gamma, elle est constante.

Pour delta, la pente de la courbe de tension de vapeur saturante, on applique la formule ci dessous à la température moyenne journalière calculé avec le min et le max.

$$\Delta_j = \frac{4098}{(T_j + 273,2)^2} 6,108 \exp\left(\frac{17,27}{T_j + 237}\right)$$

Il ne reste plus qu'à intégrer le second terme, correspondant aux effets aérodynamiques sur une journée, en le multipliant par le nombre de seconde dans une heure.

La formule devient donc :

$$ET_0 = \frac{\Delta_j \times W_j + \frac{\gamma \times 900 \times U_{2j} \times (e_{wj} - e_j)}{T_j + 273}}{(\Delta_j + \gamma(1 + 0,34U_{2j}))}$$

Pas de temps horaire

Il n'y a pas beaucoup de recommandation particulière pour faire ce calcul. Nous utiliserons la moyenne arithmétique de la température pour le calcul de toutes les grandeurs physiques qui la nécessite. Les trois différences fondamentales qui existent sont bien évidemment le pas de temps différents qui modifie les différentes intégrations, la distinction du jour et de la nuit et le rayonnement terrestre ne peut plus être considéré comme nul. Pour la détermination de G, la FAO préconise de prendre 10% du rayonnement net le jour et 5 fois plus que cela la nuit (soit 50% du rayonnement net la nuit). C'est à dire :

$$G = 0,1R_n \quad \text{le jour}$$

$$G = 0,5R_n \quad \text{la nuit}$$

Nos mesure du rayonnement net se fait tous les quarts d'heure. Ainsi, pour accéder à l'intégrale du rayonnement net et G sur une heure, que nous noterons W_r , on peut procéder ainsi :

$$W_h = \sum_{i=0}^4 \alpha_i R_{n_i} \times 15 \times 60 \quad \text{avec } \alpha_i = \begin{cases} 0,9 & \text{si } R_n > 10Wm^{-2} \\ 0,5 & \text{si } R_n \leq 10Wm^{-2} \end{cases}$$

Nous pouvons dès lors accéder à l'ETP grâce aux formules :

$$\text{Si } R_n \geq 10 Wm^{-2} \quad ET_0 = \frac{\Delta_h \times W_h + \frac{\gamma \times 37 \times U_{2h} \times (e_{wh} - e_h)}{T_h + 273}}{(\Delta_h + \gamma(1 + 0,34U_{2h}))}$$

$$\text{Si } R_n < 10 Wm^{-2} \quad ET_0 = \frac{\Delta_h \times W_h + \frac{\gamma \times 37 \times U_{2h} \times (e_{wh} - e_h)}{T_h + 273}}{(\Delta_h + \gamma(1 + 3,4U_{2h}))}$$

Chapitre 3

Le radar X-PORT

***E**valuation des précipitations
par les radars météorologiques
Présentation du X-PORT*

Après les quelques semaines passées à mettre en place une procédure robuste pour le calcul de l'évapotranspiration pour le compte de l'IRD et à la conception d'un système informatisé de calcul pour le centre météorologique national du Bénin, j'ai été affecté au Radar X-PORT qui se situe à Djougou dans le nord du Bénin, dans le département de la Donga.

C'est alors que j'ai effectué ma première mission en brousse de 10 jours. J'ai été logé dans une case locale assez sommaire, mais plutôt bien équipée pour une maison d'Afrique. J'ai pu goûter aux saveurs de l'Afrique noire profonde en y adoptant un régime alimentaire local quelque peu épicé et à la digestion accélérée... Ce fut une expérience haute en couleur...

L'objectif de ce voyage était d'aller régler des problèmes de traitement du signal radar. Je vais d'abord exposer la partie théorique nécessaire à la compréhension du fonctionnement d'un radar avant de présenter le X-PORT sous ces aspects techniques.

Evaluation des précipitations par les radars météorologiques

La mesure des précipitations par radar est certainement vouée à un développement très prometteur. Mais, la précision actuelle des mesures ne permet pas de se passer d'un réseau d'observations au sol.

Intensité des précipitations

L'intensité d'une précipitation se définit comme le flux d'eau traversant une section horizontale unitaire. Cette intensité s'exprime en hauteur par unité de temps, généralement en mm/h. Bien entendu, cette intensité est instantanée ou quasi instantanée compte tenu des possibilités de mesure. Soit I cette intensité, elle peut s'exprimer en fonction du diamètre D des hydrométéores, de la concentration numérique $N(D)$ de goutte de diamètre $D \pm dD/2$ dans un volume unitaire, de la vitesse limite de chute $V(D)$ des hydrométéores de diamètre D et enfin en fonction de la vitesse verticale de l'air w :

$$I = \frac{\pi}{6} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \cdot D^3 \cdot (V(D) - w) dD$$

Cette formulation est bien sûr valable éventuellement pour de la neige ou de la grêle. Dans bien des cas, w est négligeable devant $V(D)$ et d'autre part, la fonction $V(D)$ est relativement facile à obtenir, ne serait-ce qu'expérimentalement. La principale difficulté pour évaluer I avec la formule précédente est donc de connaître la répartition granulométrique des hydrométéores.

Distribution statistique de la granulométrie des précipitations

Des programmes d'expériences récents, montrent que la distribution statistique des diamètres est de forme exponentielle :

$$N(D) = N_0 e^{-\gamma D} \quad \text{avec} \quad \gamma = aI^b$$

Cette relation, connue sous le nom de "loi de Marshall-Palmer" fait apparaître trois paramètres N_0 , a et b qui sont, semble-t-il, peu variables tout au moins pour la statistique des diamètres sur une longue période. MARSHALL et PALMER avaient trouvé la relation :

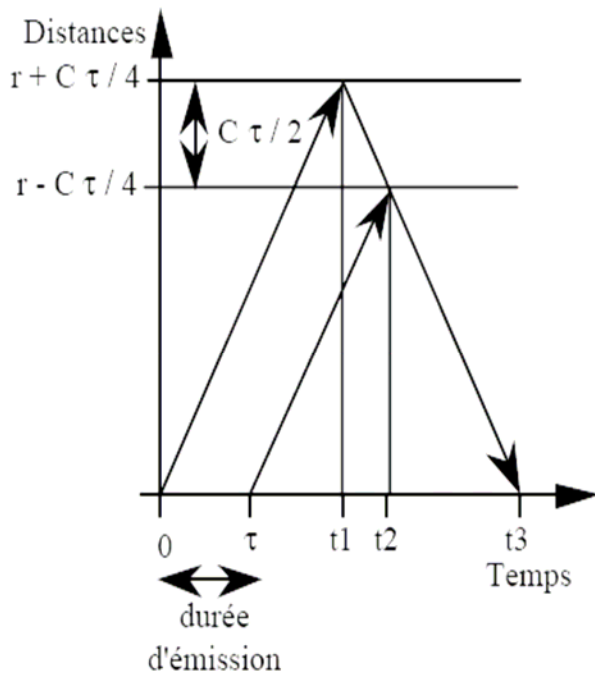
$$N_0 = 0,08 \quad \gamma = 41 I^{-0,21}$$

(avec N_0 en cm^{-4} ; γ en cm^{-1} ; I en mm/h !!)

D'autres auteurs donnent les valeurs $N_0 = 0,07$ et $\gamma = 38R^{-0,14}$. Les différences sont faibles et la formulation est identique. Par contre, ces paramètres deviennent très variables lorsqu'on étudie la distribution des D sur un intervalle de temps plus court, de l'ordre de quelques heures. N_0 , a et b varient également beaucoup avec la situation météorologique. Pour la neige et la grêle, il ne semble pas que des résultats très généralisables aient encore été obtenus.

La zone cible du radar

Les radars météorologiques ont pour objet de mesurer les précipitations au niveau du sol ; ils émettent donc avec des sites faibles. L'antenne orientable va émettre dans une direction donnée et sous faible incidence, un faisceau conique de faible ouverture q (en général, q est de l'ordre de 1°). A une distance r du radar, l'ouverture latérale est donc rq : l'ouverture latérale augmente avec la distance. Durant un intervalle de temps τ très bref, le radar émet une impulsion électromagnétique qui se propage à la vitesse C .



Le début du front d'onde va atteindre la distance $r + \frac{C\tau}{4}$ au temps $t_1 = \frac{r + \frac{C\tau}{4}}{C}$.

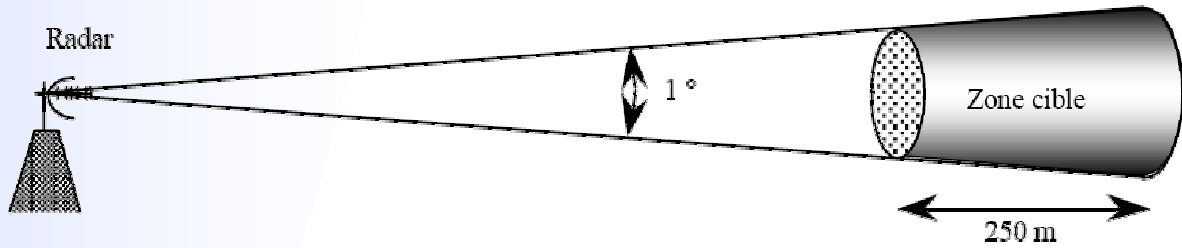
Si à cette distance, il existe un réflecteur, l'onde rétrodiffusée atteindra l'antenne à $2 \times t_1$, soit $\frac{2r + C\tau/2}{C} = \frac{\tau}{2} + \frac{2r}{C}$

La fin de l'impulsion part de l'émetteur au temps τ ; elle atteindra la distance $r - Ct/4$ au temps $t_2 = \tau + \frac{r - C\tau/4}{C}$

Si à cette distance il existe également un réflecteur, l'onde rétrodiffusée reviendra au radar au temps :

$$t_3 = t_2 + \frac{r - C\tau/4}{C} = \frac{2r}{C} + \frac{\tau}{2}$$

Ces deux ondes arriveront en même temps, quelle que soit la distance r . On retiendra que la résolution radiale est donc $C\tau/2$ quelle que soit la distance à laquelle se fait la mesure (en général τ est de l'ordre de 1μ seconde, ce qui donne une résolution radiale de l'ordre de 150 m).



Réflectivité radar et puissance reçue

Soit une cible située à une distance r du radar ; celui-ci recevra une puissance moyenne \overline{P}_r rétrodiffusée.

$$\overline{P}_r = C_1 L^2 \frac{\eta}{r^2}$$

- C_1 représente une constante caractéristique uniquement du radar utilisé (puissance émise, longueur d'onde, gain d'antenne, etc.).
- L^2 représente la perte d'énergie, ou atténuation, pour le trajet aller-retour entre cible et radar. Elle varie avec le coefficient d'atténuation a (exprimé en décibels par unité de longueur) :

$$L = 10^{-0,2} \int_0^r a \cdot dr$$

Cette atténuation varie avec la longueur d'onde ; pour des radars "hydrologiques" de 10 cm de longueur d'onde, l'atténuation est pratiquement négligeable.

- η est la réflectivité radar. Elle ne dépend que des propriétés rétrodiffusantes de la cible. η est la valeur moyenne de la section efficace de rétrodiffusion par la cible à la distance r , ramenée au volume unitaire.

Comment se comportent les ondes radars à la rencontre d'une goutte de pluie ? Dans la gamme des longueurs d'onde de 3 à 10 cm , les gouttes de pluie diffusent le rayonnement dans le domaine de diffusion de Rayleigh. Dans ces conditions, la section efficace de rétrodiffusion radar σ d'une sphère homogène est donnée par la formule dite de Rayleigh :

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K^2| D^6$$

D est bien sûr le diamètre de la sphère, λ la longueur d'onde et K^2 le facteur diélectrique du matériau constituant la sphère (0,93 pour l'eau). Dans ces conditions, la réflectivité radar η d'un ensemble de gouttelettes contenues dans un volume unitaire est :

$$\eta = \sum_i \sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K^2| \sum_i D_i^6$$

Cette équation s'écrit également :

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K^2| Z \quad \text{avec} \quad Z = \sum_i D_i^6$$

Z est appelé "facteur de réflectivité radar" ; on peut également l'exprimer en fonction de la distribution granulométrique des précipitations :

$$Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^6 dD$$

Z s'exprime normalement en m^3 , mais compte tenu des faibles dimensions, on l'exprime usuellement en mm^6/m^3 ou encore plus souvent en dBZ :

$$Z(\text{en dbZ}) = 10 \log(Z) \quad \text{avec } Z \text{ en } mm^6 / m^3$$

La puissance moyenne reçue par le radar a donc pour expression :

$$\overline{P_r} = C_1 L^2 \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \frac{Z}{r^2}$$

Lorsque l'atténuation est négligeable et pour un radar donné, tous les termes sont constants à l'exclusion de Z, r et $\overline{P_r}$:

$$\overline{P_r} = C_2 \frac{Z}{r^2}$$

Présentation du X-PORT

Le radar X-PORT est un radar météorologique bande X, polarimétrique, Doppler conçu pour des applications hydrométéorologiques. Il a été installé dans la ville de Djougou, chef-lieu du département de la Donga, afin de compléter le réseau de mesures hydrologique et pluviographique au sein de l'OHHVO (Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé).

Ses objectifs sont simples :

- Cartographie 2D et 3D des précipitations à pas de temps de 5 min avec une résolution de l'ordre du Km sur le petit bassin de la Donga (600 Km²) lui même équipé s'un réseau dense de pluviographe.
- Détection et suivi dynamique des systèmes précipitant traversant la vallée de l'Ouémé.
- Observation de la structure tridimensionnelle des pluies, à fine échelle et mise en évidence des processus physiques.

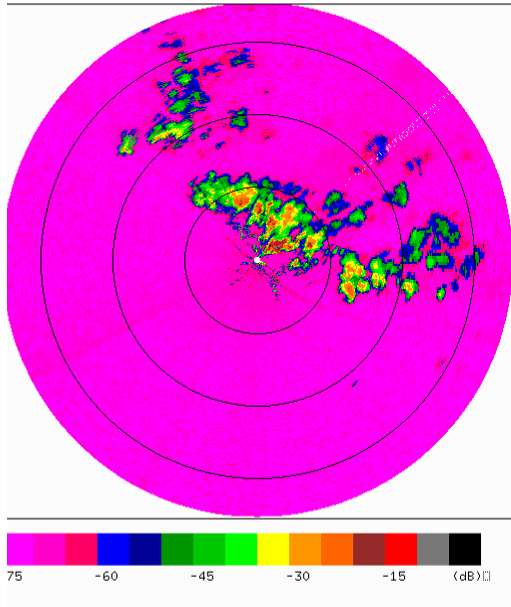
Son principe de fonctionnement repose sur l'analyse de la réflectivité des hydrométéores ainsi que leurs signature Doppler et polarimétrique.

- La réflectivité, mesurée par radar météorologique en provenance de la pluie, est fonction du nombre et de la taille des gouttes de pluie. Le taux de pluie au sol peut être estimé à partir de la réflectivité mesurée. En bande X, la pluie atténue le signal qui doit être corrigé de l'atténuation avant d'estimer les précipitations.
- Le principe de Bipolarisation : Les grosses gouttes d'eau ont tendances à s'aplatir lors de leur chute et la pluie devient alors un milieu anisotrope. La signature polarimétrique permet de distinguer les différents types d'hydrométéores (par exemple la grêle, bien sphérique, ne possède pas de signature marquée) et peut aussi être utilisée pour la correction d'atténuation.
- L'effet Doppler : le saut de fréquence Doppler est une mesure de la vitesse de déplacement des hydrométéores vers le radar. En effet, plus les hydrométéores ont une vitesse élevée, plus ils vont compresser ou dilater en fréquence le signal. C'est la mesure de ce taux de dilatation fréquentielle qui nous renseigne sur la vitesse des hydrométéores.



X-PORT RADAR à double polarisation
DATE..... Sun Jul 9 13:29:19 2006
SITE..... 2.91 AZIMUT 306.48
Longueur du pulse 1 us
RANG..... 20 km SEUIL..... -75 dB

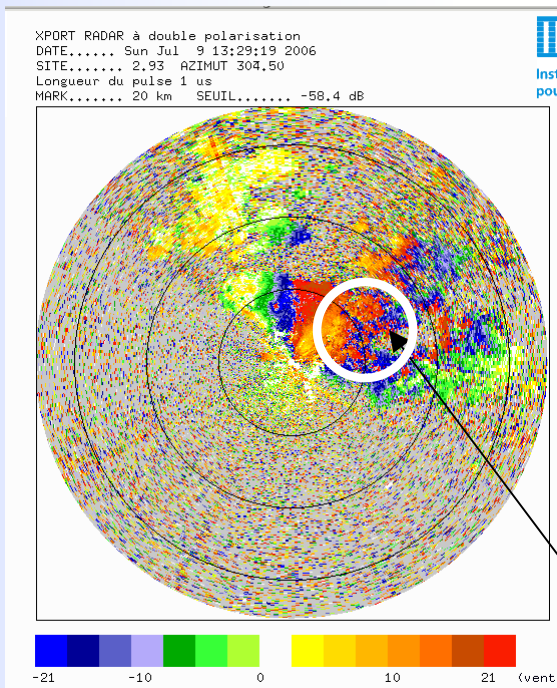
ins
po



La mesure de la réflectivité, corrigé par l'atténuation grâce aux mesures sur la polarisation, nous permet de mettre en place des cartes reflétant la densité en hydrométéores et donc de mettre en avant la naissance et l'importance des cellules convectives dans la zone de mesure du radar (c'est à dire jusqu'à 40 Km pour le X-PORT)

Ici, plus la couleur vire au rouge plus la concentration d'hydrométéore est importante. La couleur rose correspond au seuil du bruit. C'est à dire que l'on voit de cette couleur tous les signaux de trop faible puissance que l'on ne souhaite pas observer. Plus simplement, cela correspond à une cartographie des pluies. Il n'y plus qu'à y mettre un fond de carte centré sur le radar avec les bonnes directions...

Exemple de cartographie des précipitations



Exemple de cartographie Doppler

Sur cette carte nous pouvons voir la signature Doppler des hydrométéores. Elle nous renseigne sur les vitesses des cellules convectives. Plus la couleur est rouge et plus elles se déplacent rapidement suivant la radiale en s'en éloignant. Pour les couleurs bleues et vertes, c'est la même chose sauf qu'elles se rapprochent du radar.

Il est tout de même important de souligner que les couleur blanche ne signifie pas obligatoirement que les cellules ne se déplace pas. En effet, elle peuvent même se déplacer très rapidement. Mais ce déplacement est obligatoirement dans la direction orthoradiale au radar.

Ce virement soudain de couleur (du bleu au rouge) ne signifie pas qu'il y est une discontinuité dans le champ des vitesses des cellules, ce qui serait d'ailleurs physiquement impossible à cause de la viscosité de l'air. Ce virement est tout simplement due au fait que l'effet Doppler due au mouvement des masses d'air est calculé à partir des différences de phase entre les signaux. Ainsi ont a un effet de repliement qui se produit (c'est dire que si la différence des phases due aux vitesses est trop importante, on va alors dépasser les 360° de déphasage, qui correspondent aux couleurs rouge, et donc repartir à 0°, qui correspond aux couleurs bleu).

Quelques points techniques sur le Radar X-PORT

X-PORT est un radar météorologique à impulsions, à source magnétron. Une antenne orthomode permet d'émettre simultanément en polarisation horizontale et verticale. La numérisation en fréquence intermédiaire et la chaîne de traitement intégrée ou Linux offrent une grande flexibilité. Le paramètres mesurés sont la réflectivité Z (qui permet de rendre de la densité en eau), la réflectivité Zdr (qui permet de rendre compte de l'anisotropie géométrique des hydrométéores), les composantes Doppler (pour le champ des vitesses) et la phase différentielle entre l'onde électromagnétique verticale et horizontale (pour les vitesses de chute des hydrométéores).

Quelques caractéristiques techniques du radar

| Emetteur | | Récepteur | |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Fréquence | 9.4 GHz | H et V simultanément | |
| Puissance crête | Jusqu'à 100 KW | Puissance de bruit | - 114 dB |
| Largeur d'impulsion | 0.4 ; 0.5 ; 1 μs | Bruit de radar | 4.4 dB |
| Rapport cyclique | 0.001 | Atténuateurs variables | 0 à 20 dB |
| | | LNA gain | 36 dB |
| | | Dynamique du signal | 90 dB |
| | | Contrôle de fréquence | Calcul sur fuite d'émission |
| Antenne | | Exploration | |
| Diamètre | 1.8 m (6feet) | Balayage | 3D total, protocole libre |
| Ouverture à -3dB | 1°2 | Vitesse Azimut | 5 Tours / min |
| Gain | 42 dB | Vitesse Elévation | 1.6 Tours / min |
| Lobes secondaires | < 24dB | | |
| Polarisation | H et V (cornet orthomode) | | |

Chapitre

4

Étalonnage des capteurs d'humidité

Problématique

Mesure des humidités du sol

Étalonnage

Autre approche purement physique

Problématique

Afin de pouvoir faire un bilan hydrique assez précis, il est nécessaire de connaître l'humidité des sols. Cette humidité peut largement varier en fonction :

- Du type de sols ; c'est-à-dire en fonction de sa densité, sa porosité, sa granulométrie mais aussi en fonction de sa succion et d'autres facteurs chimiques ;
- De la végétation ; en fonction de sa densité bien évidemment mais surtout du type de végétation. En effet, les herbes courtes modifient surtout l'humidité des sols dans les couches peu profondes tandis que les arbres iront puiser l'eau plus profondément.

L'humidité des sols est une des données les plus importantes car elle permet de connaître la part d'eau qui s'infiltre et celle qui ruisselle lors des pluies. En effet, lorsqu'il pleut, une partie de l'eau s'infiltre dans le sol jusqu'à ce que la surface soit à saturation. Dès lors, l'excédent d'eau se met à ruisseler jusque dans le bas fond du versant considéré et crée un court d'eau qui parfois arrive jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Pour effectuer les mesures d'humidité, trois versants représentatifs de trois types de végétations présentent au Bénin ont été équipés en capteur d'humidité. Il s'agit d'une jachère, d'une savane arbustive et d'une forêt claire.

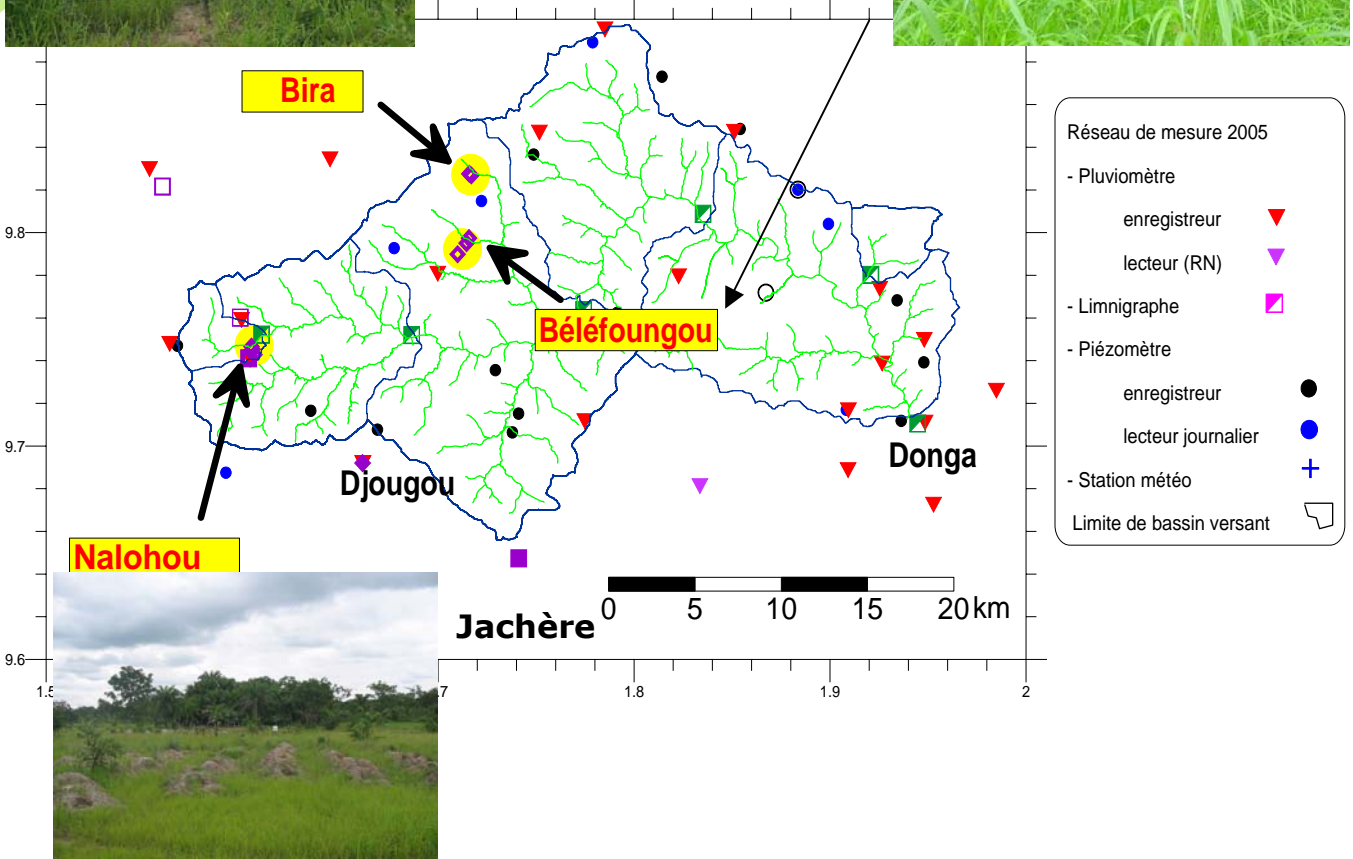
Chacun de ces versants est équipé de trois stations qui mesurent l'humidité, la succion et la température du sol en fonctions de différentes profondeurs.



Savane arbustive

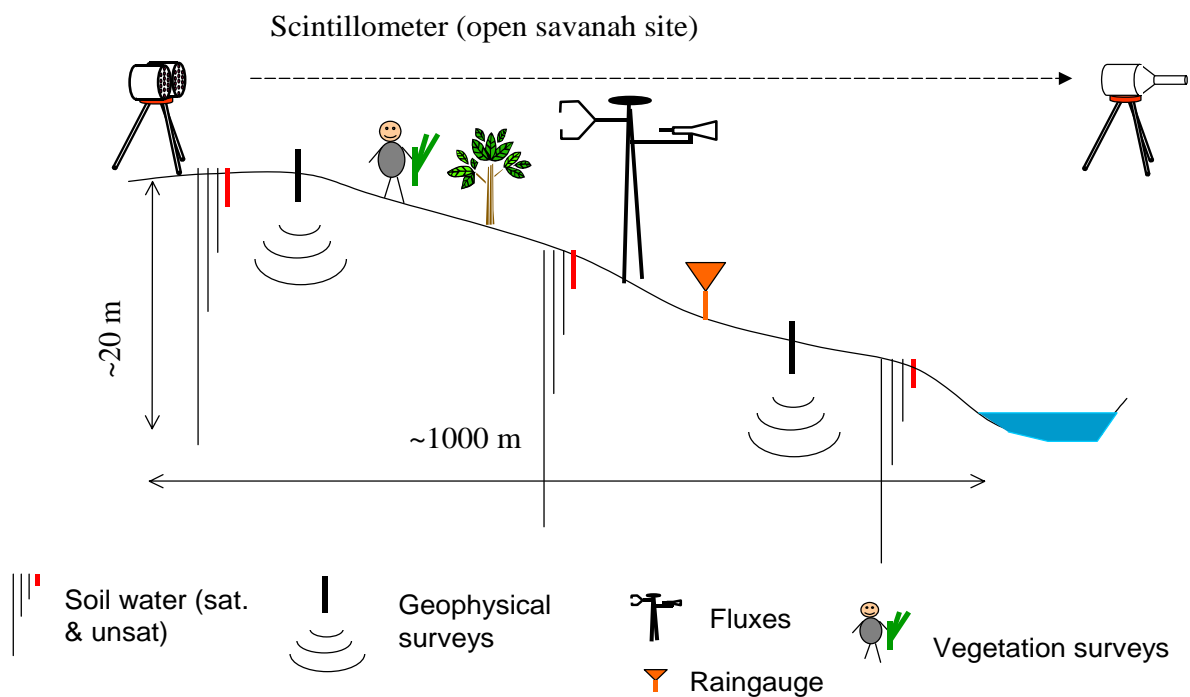


Forêt claire



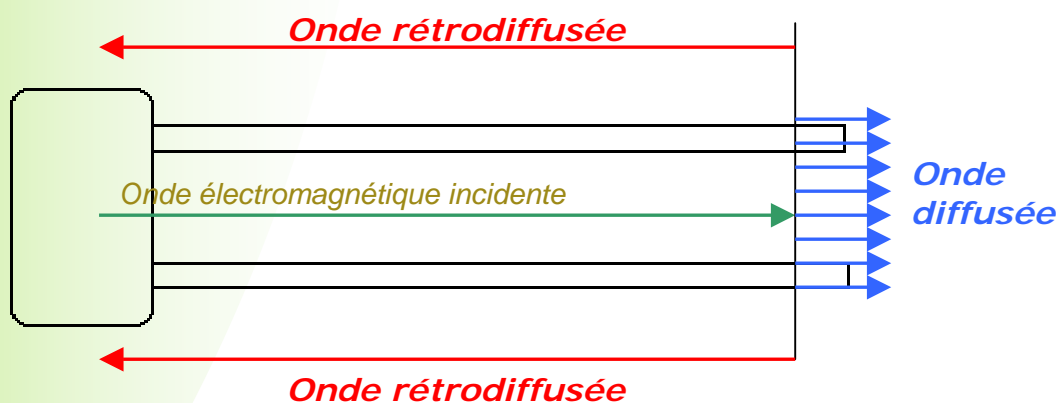


Fosse ouverte des capteurs d'humidité CS616, des Water mark pour la succion et des capteurs thermocouple pour la température



Principe d'instrumentation d'un versant

Les différents sites sont équipés de sondes à humidité de type CS 616. Leur principe de fonctionnement est assez simple. Une sonde est constituée de deux tiges en métal plantées dans le sol et d'un émetteur-récepteur d'ondes électromagnétiques. On fait propager dans chacune des tiges une onde. Une fois arrivée au bout des tiges, une partie de l'onde va se propager dans le sol et une partie va être rétrodiffusée à cause de la discontinuité du milieu (passage du milieu métallique au milieu organique que constitue la terre). C'est cette onde rétrodiffusée que nous allons analyser pour accéder à l'humidité du sol. En effet, l'atténuation et la perturbation de l'onde dépendent de la quantité d'eau dans le sol, donc de son humidité.



Le problème qui se pose alors, c'est que cette dépendance entre la modification de l'état physique de l'onde et de la quantité volumétrique d'eau est non linéaire. La sonde permet de mesurer la fraction volumique d'eau dans le sol. Mais pour une quantité en volume d'eau donnée, l'humidité du sol est fonction de sa densité, sa porosité, sa succion et de sa granulométrie. Ainsi un deuxième problème se pose à nous. **La connaissance volumétrique d'eau dans un sol donnée ne suffit pas pour déterminer son humidité.**

Le constructeur donne pour ses sondes une relation pour un sol moyen de type Européen. Cette relation n'est pas du tout satisfaisante pour les sols de type africain qui sont globalement plus riches en fer (d'où la couleur rouge de la latérite due notamment à la présence d'oxyde de fer et de ferrite). Cette relation constructeur est du second degré mais elle peut résulter d'un développement limité d'une relation de type exponentielle, logarithmique ou autre qui nous conviendrait plus qu'une relation polynomiale (cf. le problème des deux extrapolations pour la tension de vapeur saturante au chapitre 2 de la partie 2). C'est à dire qu'en fin de compte nous ne savons pas quel est le type de relation qui serait le plus à même de convenir, bien que le plus probable soit une relation polynomiale ou exponentielle.

Afin d'obtenir la meilleure relation d'étalonnage possible, nous avons mis en place une procédure expérimentale. Elle consiste tout simplement à mesurer d'une autre manière l'humidité des sols afin de pouvoir faire corrélérer les valeurs données par les sondes et celles que nous avons mesurer.

Mesure des humidités du sol

La manipulation expérimentale est très simple. Nous sommes allés sur les sites de mesure qui se situent dans le bassin de l'Ouémé. Puis nous avons prélevé à l'aide d'une tarière plusieurs séries d'échantillons qui correspondent à plusieurs profondeurs (5, 10, 20, 40, 60, 80 et 100 cm) pris à des instants différents et des endroits différents. Ce protocole expérimental induit bien sûr plusieurs hypothèses comme la considération de l'homogénéité spatiale du type de sol et que l'humidité des échantillons ne varie pas sur les périodes de prélèvement. Nous reviendrons plus en détail sur ces hypothèses et nous en verrons les véritables limites.

Ensuite, nous avons pesé les échantillons humides. Puis nous les avons mis à sécher en étuve pendant 24 h à 105°C. Enfin, nous les avons pesés secs. Nous pouvons dès lors accéder grâce à des relations assez basiques à l'humidité pondérale :

$$H_p \text{ (en\%)} = 100 \times \frac{M_{eau}}{M_{solsec}} = \frac{M_{humide} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

Mais les sondes ne nous permettent pas d'accéder à l'humidité pondérale mais à l'humidité volumique. Nous devons donc prendre en compte une caractéristique physique du sol : sa densité. Des profils de densité sur la profondeur ont heureusement été faits lors de l'installation des sondes il y a deux ans maintenant. Ainsi :

$$H_V (\text{en } \%) = 100 \times \frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{sol sec}}} = 100 \times \frac{M_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} \times \frac{\rho_{\text{sol}}}{M_{\text{sol}}} = H_p \times d_{\text{sol}}$$

où d_{sol} est la densité du sol.

Suite à cette manipulation expérimentale nous possédons deux types de données :

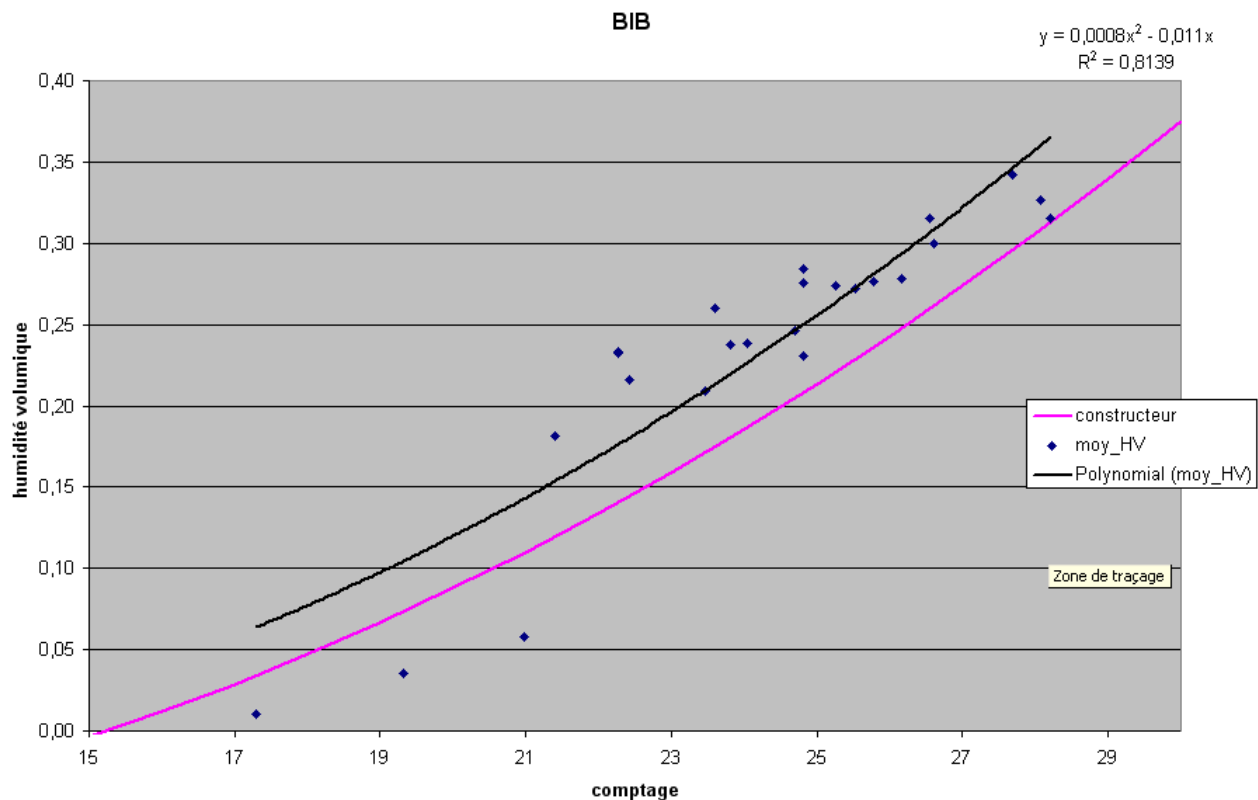
- L'humidité du sol à des instants précis mais à des endroits différents de la fosse, que nous avons mesuré expérimentalement ;
- Les données des sondes d'humidité brutes sans pouvoir les convertir en humidité, que **nous appellerons par la suite comptage**, aux mêmes instants que les prélèvements mais de la fosse.

Il nous reste à déterminer la meilleure relation d'étalonnage possible.

Etalonnage

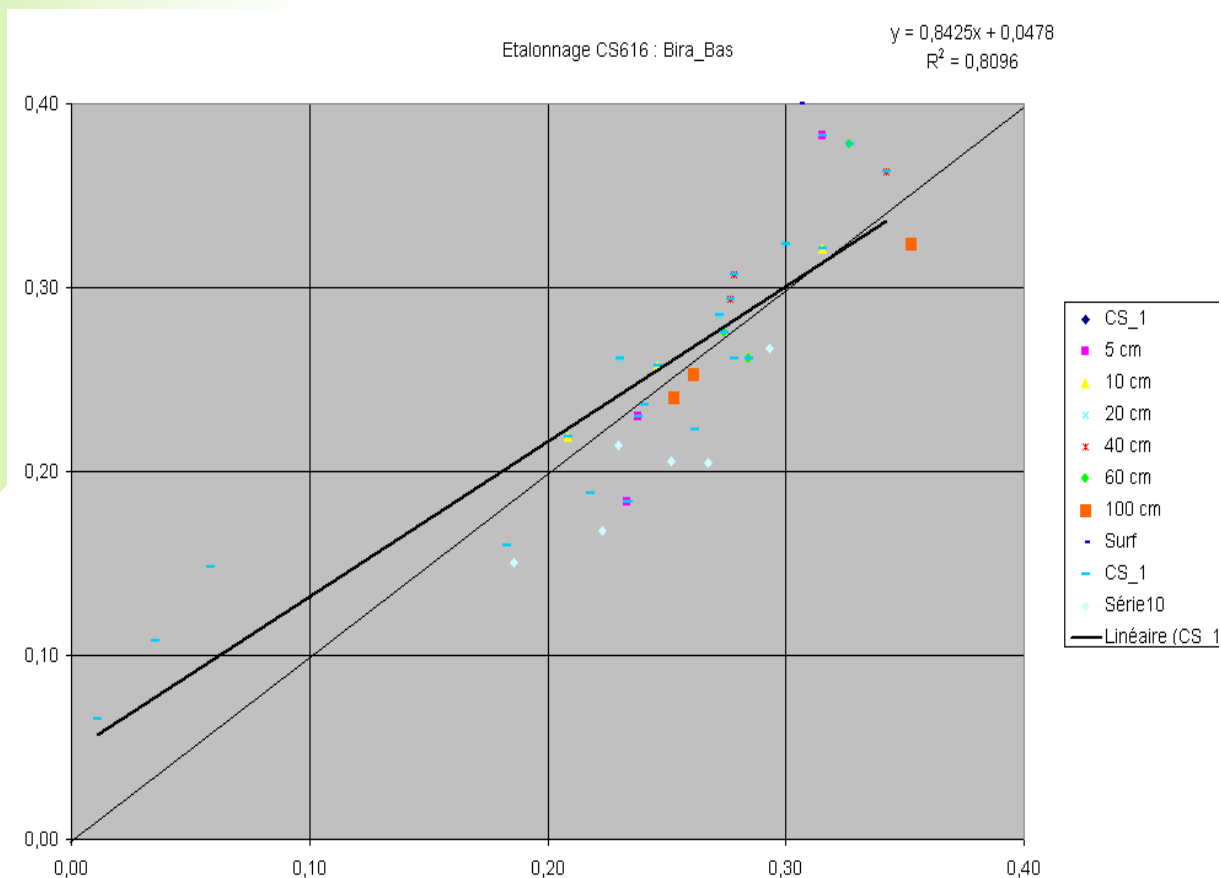
Pour cela, nous avons mis au point une feuille Excel de calcul dans laquelle nous avons renseigné les mesures que nous avons faites pour un site donné et les valeurs des comptages correspondant des sondes.

Nous possédons que deux séries d'échantillons par site ainsi qu'un échantillonnage sur la saturation du sol, qui avait été fait lors de l'installation des appareils. On a inondé complètement la fosse puis nous avons prélevé des échantillons et les comptages sonde correspondant. Grâce à ces quelques séries de données, nous avons tracé les humidités du sol en fonction de leur comptage sonde correspondant.

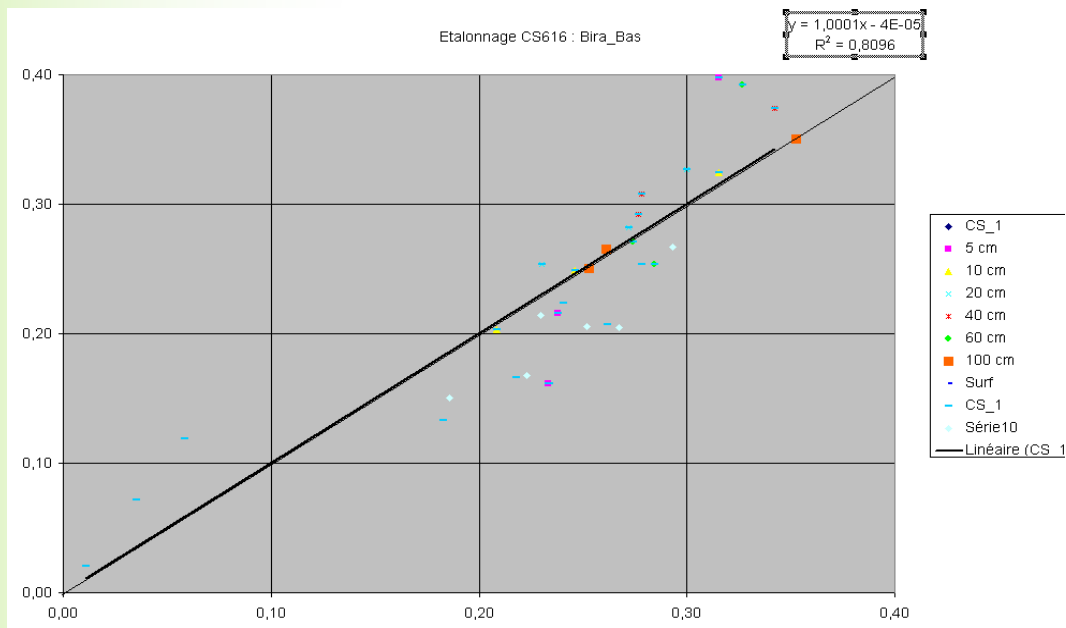


Nous avons aussi rajouté sur ce graphique la courbe d'étalonnage donnée par le constructeur. On voit très nettement que le nuage de point est au dessus de la courbe constructeur et donc qu'elle n'est pas satisfaisante. Nous avons effectué une interpolation polynomiale de degrés deux du nuage de points. Nous pouvons souligné dès à présent plusieurs problèmes que nous développerons plus en détail. Tout d'abord, les échantillons que nous possédons sont très humide. En effet, nous avons effectué les prélèvements pendant la saison des pluies. On voit bien sur notre courbe qu'il nous « manque » le bas du nuage (les points secs) et cela affecte fortement l'interpolation que nous faisons. Il faudra compléter les mesures au mois de janvier – février afin de faire une interpolation complète.

Nous avons donc une première relation qui serait optimale, au vue des données que nous possédons bien sur. Nous allons maintenant regarder la corrélation entre les humidités des échantillons et de celle obtenue par notre relation.



On voit que la corrélation est loin d'être parfaite car nous avons une pente de régression assez différente de 1. Nous pouvons corriger cela en modifiant les coefficients du polynôme afin d'obtenir cette dernière corrélation de manière quasi-parfaite. Concrètement, nous allons diviser tous les coefficients du polynôme par le coefficient directeur de notre régression linéaire ci dessus puis nous allons rajouté le terme constant. Ce qui nous donne en fin de compte une corrélation optimale entre nos valeurs expérimentales et celles données par la sonde par l'intermédiaire de notre nouvelle relation.



On peut critiquer la vraisemblance des mesures. En effet, les mesures n'étant pas été faite dans la fosse, il se pourrait (et il est même fort probable) que l'humidité qui se trouve à un mètre d'elle ne soit pas la même. Nous sommes donc obligé de faire l'hypothèse que l'humidité ne varie que très faiblement sur ces distances. Ici, l'hypothèse a l'air plutôt justifiée. Mais sur d'autre site, la corrélation est très nettement moins robuste et nous ne pouvons qu'émettre des réserves quant au résultats que nous avons obtenue. Néanmoins, ces étalonnages sont déjà plus satisfaisant que la courbe constructeur.

Il nous faut maintenant déterminer les formules théoriques d'étalonnage afin de pouvoir automatiser l'obtention des formules. Nos allons donc voir la théorie d'interpolation du premier et du second ordre afin d'obtenir directement le polynôme de degrés 2 qui correspond le mieux.

Interpolation de donnée

Présentation de l'interpolation polynomiale d'ordre m par la méthode des moindres carrés

Soient x_j et y_j qui sont liés par une fonction f inconnue telle que $y_j = f(x_j)$ pour $j \in [1..n]$ les données à interpolées et n le nombre de mesures effectuées. Ici x_j est le comptage et y_j leur humidité mesurée expérimentalement.

Nous cherchons un polynôme de degrés m , donc une fonction G_m telle que :

$$G_m(x) = \sum_{i=0}^m a_i \cdot x^i \quad \text{tel que } \deg(G_m) = m \leq n$$

Cette méthode cherche à minimiser la somme des carrés des écarts entre G_m et f que nous appellerons S_m telle que :

$$S_m = \sum [G_m(x_j) - f(x_j)]^2 \quad \text{soit minimale}$$

Ce minimum existe et dépend des paramètres du polynôme de G_m soit des a_i .

Ce minimum est atteint si :

$$\forall i \in [0..m] \quad \frac{\partial}{\partial a_i} S_m = 0$$

Ce qui revient à résoudre le système linéaire suivant :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{j=0}^m x_j^0 & \sum_{j=0}^m x_j^1 & \sum_{j=0}^m x_j^2 & \dots & \sum_{j=0}^m x_j^m \\ \sum_{j=0}^m x_j^1 & \sum_{j=0}^m x_j^2 & \sum_{j=0}^m x_j^3 & \dots & \sum_{j=0}^m x_j^{m+1} \\ \sum_{j=0}^m x_j^2 & \sum_{j=0}^m x_j^3 & \sum_{j=0}^m x_j^4 & \dots & \sum_{j=0}^m x_j^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{j=0}^m x_j^m & \sum_{j=0}^m x_j^{m+1} & \sum_{j=0}^m x_j^{m+2} & \dots & \sum_{j=0}^m x_j^{2m} \end{bmatrix}}_A \times \underbrace{\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}}_C = \underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{j=0}^m f(x_j) \\ \sum_{j=0}^m x_j \cdot f(x_j) \\ \sum_{j=0}^m x_j^2 f(x_j) \\ \vdots \\ \sum_{j=0}^m x_j^m f(x_j) \end{bmatrix}}_F$$

Il suffit donc d'inverser la matrice A pour obtenir les coefficients du polynôme interpolateur des moindres carrés G_m .

On rappelle une formule fort utile pour inverser les matrices à déterminant non nul (qui d'ailleurs sont les seules à pouvoir être inversées):

$$A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \times {}^t \text{COMAT}(A)$$

Si le système est à déterminant nul, alors le système est impropre et il existe donc une infinité de polynôme répondant à notre critère ou bien qu'il n'en existe pas... ce qui n'est pas possible physiquement.

Où ${}^t \text{comat}(A)$ est la transposée de la comatrice de A, c'est à dire la transposée de la matrice composée des cofacteurs de la matrice A.

Enfin :

$$C = A^{-1} \times F$$

Ce qui nous donne tous les coefficients du polynôme G_m tel que la somme des carrés de la différence soit minimal.

Cas d'un polynôme interpolateur d'ordre 2

Notre cas est numériquement assez simple puisque nous cherchons un polynôme de degrés 2. Ce qui limite les calculs à des matrices carrées 3x3.

Nous pouvons, si le déterminant du système est non nul, utiliser la méthode de Cramer pour nous aider à trouver la solution.

On note D le déterminant de la matrice du système (on rappelle qu'un système de Cramer est carré) et D_j le déterminant calculé en remplaçant dans D la j -ème colonne par le second membre.

Alors l'unique solution du système est $(s_1, \dots, s_j, \dots, s_n)$ ou s_j vaut $\frac{D_j}{D}$.

Notre système de Cramer est le suivant :

$$\begin{bmatrix} \alpha = \sum_{j=0}^m x_j^0 & \beta = \sum_{j=0}^m x_j^1 & \gamma = \sum_{j=0}^m x_j^2 \\ \beta = \sum_{j=0}^m x_j^1 & \gamma = \sum_{j=0}^m x_j^2 & \delta = \sum_{j=0}^m x_j^3 \\ \gamma = \sum_{j=0}^m x_j^2 & \delta = \sum_{j=0}^m x_j^3 & \varepsilon = \sum_{j=0}^m x_j^4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A = \sum_{j=0}^m f(x_j) \\ B = \sum_{j=0}^m x_j \cdot f(x_j) \\ C = \sum_{j=0}^m x_j^2 f(x_j) \end{bmatrix}$$

Ce qui nous donne les solutions suivantes :

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{A(\gamma\varepsilon - \delta^2) - B(\beta\varepsilon - \delta\gamma) + C(\beta\delta - \gamma^2)}{\alpha(\gamma\varepsilon - \delta^2) - \beta(\beta\varepsilon - \delta\gamma) + \gamma(\beta\delta - \gamma^2)} \\ a_1 &= \frac{-A(\beta\varepsilon - \gamma\delta) + B(\alpha\varepsilon - \gamma^2) - C(\alpha\delta - \beta\gamma)}{\alpha(\gamma\varepsilon - \delta^2) - \beta(\beta\varepsilon - \delta\gamma) + \gamma(\beta\delta - \gamma^2)} \\ a_2 &= \frac{A(\beta\delta - \gamma^2) - B(\alpha\delta - \beta\gamma) + C(\alpha\gamma - \beta^2)}{\alpha(\gamma\varepsilon - \delta^2) - \beta(\beta\varepsilon - \delta\gamma) + \gamma(\beta\delta - \gamma^2)} \end{aligned}$$

et

$$G_m = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$

Cas d'un polynôme interpolateur d'ordre 1

Il nous faut les formules permettant d'obtenir le coefficient directeur et le terme constant d'une interpolation afin de pouvoir affiner les termes du polynôme que nous avons obtenu.

C'est le cas où $m = 1$. Les calculs sont très limités et nous n'aurons à faire qu'à des matrices 2×2 . Nous obtenons, tous calculs faits, le système de Cramer suivant :

$$\begin{bmatrix} \alpha = \sum_{j=0}^m x_j^0 & \beta = \sum_{j=0}^m x_j^1 \\ \beta = \sum_{j=0}^m x_j^1 & \gamma = \sum_{j=0}^m x_j^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A = \sum_{j=0}^m f(x_j) \\ B = \sum_{j=0}^m x_j \cdot f(x_j) \end{bmatrix}$$

La résolution donne tout simplement avec la méthode de Cramer :

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{A\gamma - B\beta}{\alpha\gamma - \beta^2} \\ b_1 &= \frac{\alpha B - \beta A}{\alpha\gamma - \beta^2} \end{aligned}$$

Conclusion

Il nous est très facile d'automatiser les calculs par le biais de ces deux formules puis en modulant les coefficients a_i par les b_i .

Nous allons maintenant essayer de voir comment on peut rendre nos mesures plus juste en modifiant notre protocole expérimental.

Autre approche purement physique

Préliminaire en unidirectionnelle

Nous allons essayé de déterminer l'humidité qu'il y a niveau de la sonde en prenant en compte les variabilités spatiales qui apparaissent. En effet, nous avons approximé dans notre étude interpolatrice qu'il y avait invariance spatiale des humidités à cause des faibles distances entre les points de mesure et la sonde. Nous allons donc essayé de rendre plus robuste tous le travail fait précédemment en interpolant des valeurs collocatrices.

Pour ce faire, nous allons utiliser les développements de Taylor - Young.

Développement de Taylor - Young :

Soit f une fonction de Classe C^{n+1} :

$$\begin{aligned} f(x+h) &= f(x) + h \frac{d}{dx} f(x) + \frac{h^2}{2!} \frac{d^2}{dx^2} f(x) + \dots + \frac{h^n}{n!} \frac{d^n}{dx^n} f(x) + o(h^{n+1}) \\ &= \sum_{p=0}^n \left(\frac{h^p}{p!} \frac{d^p}{dx^p} f(x) \right) + o(h^{n+1}) \end{aligned}$$

Soit en unidirectionnelle et en posant $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{f}_i$ et donc par voie de conséquence $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i + \mathbf{h}) = \mathbf{f}_{i+1}$ ou encore $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i + 2\mathbf{h}) = \mathbf{f}_{i+2}$.

$$f_{i+1} = f_i + hf'_i + \frac{h^2}{2!} f''_i + \dots + o(h^{n+1}) = \sum_{p=0}^n \frac{h^p}{p!} f_i^{(p)} + o(h^{n+1})$$

Ou $o(h^{n+1})$ est l'erreur commise. Cette erreur nous pourrions la calculer grâce au reste intégrale de la formule de Taylor - Lagrange avec reste intégral telle que :

$$o(h^{n+1}) = \int_x^{x+h} \left(\frac{(x+h-t)^{n+1}}{(n+1)!} \frac{d^{n+1}}{dt^{n+1}} f(t) dt \right)$$

Dans notre cas, nous avons affaire à des fonctions représentant des grandeurs physiques. C'est à dire de classe C infinie.

Méthode des différences finies :

On peut aussi exprimer grâce à ce développement f_{i+2} , f_{i-1} et f_{i-2} , mais en s'arrêtant au terme d'ordre trois seulement ce qui nous offre un $o(h^4)$ et en effectuant une combinaison linéaire assez simple des quatre équations obtenues on accède à l'expression suivante :

$$f_i'' = \frac{1}{5 \times h^2} (f_{i+2} + f_{i+1} + f_{i-1} + f_{i-2} - 4f_i) + o(h^2)$$

Soit :

$$f_i = \frac{1}{4} (f_{i+2} + f_{i+1} + f_{i-1} + f_{i-2} - 5h^2 f_i'') + o(h^2)$$

D'autre part, on s'aperçoit par les mesures que les variations d'humidité ne sont que de quelques pourcents. Ainsi les dérivées partielles de l'humidité par rapport aux variables spatiales sont très faibles. On peut donc considérer que le gradient d'humidité est de très faible amplitude sur notre espace d'échantillonnage. Ce qui implique, au vue des temps de réponse des sols, que nous pouvons considérer que cette variabilité spatiale est linéaire. Cette considération implique que les dérivées partielles spatiales secondes sont nulles une à une, ce qui implique que le Laplacien de l'humidité est nul. On peut exprimer cela par la relation mathématique suivante :

$$\Delta H_v = \Delta H_p = \frac{\partial^2}{\partial x^2} H_v(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} H_v(x, y) = 0$$

$$\text{Avec } \frac{\partial^2}{\partial x^2} H_v(x, y) = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2}{\partial y^2} H_v(x, y) = 0$$

On peut parfaitement intuitivement ce qu'est physiquement le Laplacien. Il mesure la différence entre la valeur de la fonction en un point, et sa moyenne autour de ce point. Les fonctions dont le Laplacien est nul sont dites harmoniques (très proche des fonctions holomorphes...) : la moyenne autour d'un point vaut la valeur en ce point, ce qui serait notre cas.

Alors si les dérivées secondes sont nulles nous obtenons :

$$f_i = \frac{1}{4} (f_{i+2} + f_{i+1} + f_{i-1} + f_{i-2})$$

Autre résultat plus pertinent:

Nous nous apercevons alors que $H_{i,j}$ est simplement une moyenne arithmétique des valeurs l'entourant. Cela fait certes une longue démonstration pour un résultat que nous avons intuitivement d'après le sens physique du Laplacien mais maintenant nous pouvons en être sûrs car nous l'avons démontré.

Mais nous pouvons certainement mieux faire encore, nous y prendre sans prendre en compte cette hypothèse de dérivées secondes nulles, qui en fin de compte reste une hypothèse assez forte.

Nous allons revenir à la formule de Taylor – Young. Nous la rappelons ci-dessous afin de faciliter la lecture de ce document.

$$f_{i+1} = f_i + hf'_i + \frac{h^2}{2!} f''_i + \dots + o(h^{n+1}) = \sum_{p=0}^n \frac{h^p}{p!} f_i^{(p)} + o(h^{n+1})$$

Nous allons effectuer ce développement à l'ordre deux afin d'obtenir un $o(h^3)$ sur f_{i+1} , f_{i+2} d'une part et d'autre part f_{i-1} et f_{i-2} . Nous pouvons ainsi obtenir deux expressions de f'_i grâce à des combinaisons linéaires simples des termes de ces deux développements. Ainsi :

$$\begin{cases} f'_i = \frac{4f_{i+1} - f_{i+2} - 3f_i}{2h} + o(h^2) \\ f'_i = \frac{f_{i-2} - 4f_{i-1} + 3f_i}{2h} + o(h^2) \end{cases}$$

Ces égalités sont forcément égales entre elles car en physique il est très rarement (voir impossible) que des grandeurs physiques soient discontinues. Elles sont, mathématiquement parlant, de classe C^∞ . Nous pouvons donc, grâce à l'égalité des deux termes, exprimer f_i en fonction des autres points l'entourant :

$$f_i = \frac{4(f_{i+1} + f_{i-1}) - (f_{i+2} + f_{i-2})}{6} + o(h^3)$$

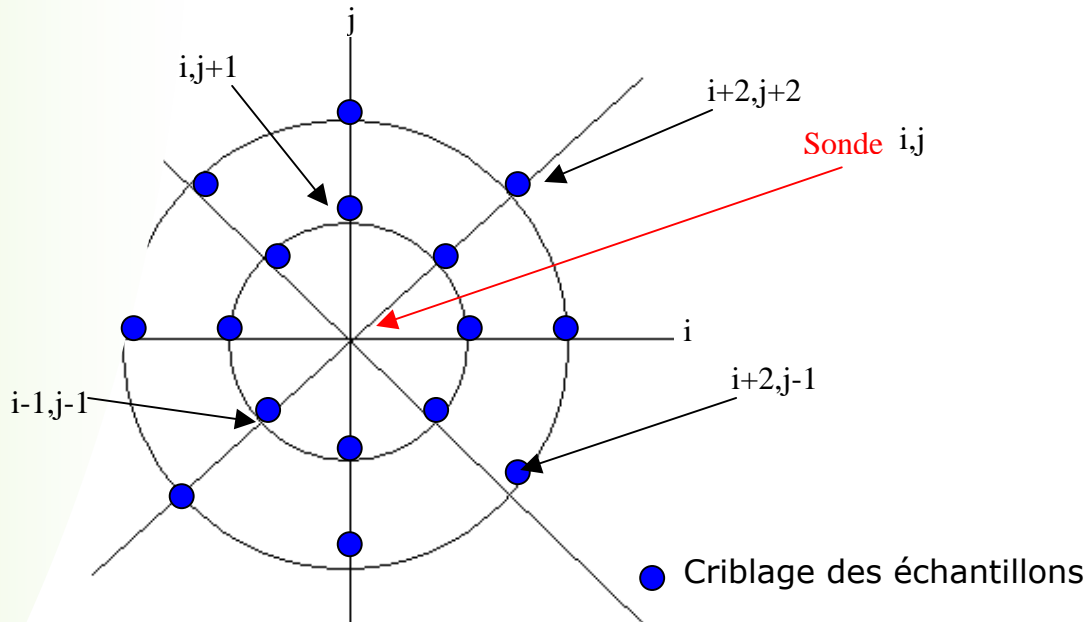
Cette formule est différente de celle obtenue dans la section précédente. Elle est plus générale et ne fait pas d'hypothèse quant à l'harmonicité de l'humidité et prend en compte les variations qu'il y a autour du point.

Néanmoins, nous avons de fortes raisons de penser que l'hypothèse d'harmonicité soit vérifiée. Cela permet d'augmenter l'ordre du terme de l'erreur jusqu'à l'infini. En effet, si la dérivée seconde est nulle alors la troisième aussi ce qui implique que la quatrième... Donc si cette hypothèse est vérifiée, cette formule est infiniment précise et on peut donc considérer, par convergence, qu'il y a égalité.

Il vaut mieux se servir de cette nouvelle formule car elle n'a pas besoin d'hypothèse et contrairement à la première, elle prend en compte le gradient d'humidité qui entoure le point observé. Mais comme nous ne nous lassons jamais d'un peu de mathématiques, nous avons laissé la démonstration de la première.

Modélisation 2D

Soit le criblage de points suivant :



Pour notre cas, soit f deux fois dérivable en $(x,y) \in \mathbb{R}^2$ alors pour tout $(h,h') \in \mathbb{R}^2$

$$f(x+h, y+h') = f(x, y) + h \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) + h' \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) + \frac{1}{2} (h, h') \cdot H(f)(x, y) \cdot (h, h') + o(h^3)$$

Avec $H(f)$ la matrice Hessienne de la fonction f telle que :

$$H(f)(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x, y) & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f(x, y) \\ \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} f(x, y) & \frac{\partial^2}{\partial y^2} f(x, y) \end{bmatrix}$$

Si toutes les dérivées partielles secondes de f existent et sont continues sur un ouvert U , on dit que f est une fonction de classe C^2 sur cet ouvert. Alors, si cette condition est vérifiée, on peut inverser l'ordre des dérivations sans en modifier les résultats. C'est-à-dire :

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} f(x, y) = \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} f(x, y)$$

On pose :

$$\frac{\partial^{k+l}}{\partial x^k \partial y^l} f(x_i, y_j) = f_{i,j}^{k,l}$$

Ainsi, tout calcul fait, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{i+2,j+2} = f_{i,j} + 2h(f_{i,j}^{1,0} + f_{i,j}^{0,1}) + \frac{4h^2}{2!}(f_{i,j}^{2,0} + f_{i,j}^{0,2} + 2f_{i,j}^{1,1}) + o(h^3) \\ f_{i+1,j+1} = f_{i,j} + h(f_{i,j}^{1,0} + f_{i,j}^{0,1}) + \frac{h^2}{2!}(f_{i,j}^{2,0} + f_{i,j}^{0,2} + f_{i,j}^{1,1}) + o(h^3) \\ f_{i-2,j-2} = f_{i,j} - 2h(f_{i,j}^{1,0} + f_{i,j}^{0,1}) + \frac{4h^2}{2!}(f_{i,j}^{2,0} + f_{i,j}^{0,2} + 2f_{i,j}^{1,1}) + o(h^3) \\ f_{i-1,j-1} = f_{i,j} - h(f_{i,j}^{1,0} + f_{i,j}^{0,1}) + \frac{h^2}{2!}(f_{i,j}^{2,0} + f_{i,j}^{0,2} + f_{i,j}^{1,1}) + o(h^3) \end{array} \right.$$

On peut, à l'aide de combinaisons linéaires des quatre équations, exprimer f_i en fonction des quatre points qui l'entoure.

$$f_i = \frac{4(f_{i+1,j+1} + f_{i-1,j-1}) - (f_{i+2,j+2} + f_{i-2,j-2})}{6} + o(h^3)$$

On peut procéder de même avec les autres points du plan et on démontre ainsi que :

$$f_i = \frac{4(f_{i+1,j} + f_{i-1,j} + f_{i,j+1} + f_{i,j-1} + f_{i+1,j+1} + f_{i-1,j-1} + f_{i+1,j-1} + f_{i-1,j+1})}{6 \times 4} - \frac{(f_{i+2,j} + f_{i-2,j} + f_{i,j+2} + f_{i,j-2} + f_{i+2,j+2} + f_{i-2,j-2} + f_{i+2,j-2} + f_{i-2,j+2})}{6 \times 4} + o(h^3)$$

Si nous regardons de plus près, cette nouvelle formule n'est qu'une simple moyenne de la formule démontrée en 1 dimension appliquée aux différentes directions. Nous pouvons alors adapter ces formules au besoin en ne criblant qu'un certain nombre de directions, bien que deux directions orthogonales soient le minimum.

Conclusion

La nouvelle procédure consisterait donc à faire un criblage de zones à échantillonner comme sur la figure présentée plus haut. Suite à ce criblage, nous devons calculer les humidités qu'il y a dans la fosse à sonde grâce à la formule que nous avons déterminé juste au dessus. Ainsi, il nous reste à faire l'étape d'interpolation exactement comme décrite dans les divers paragraphes. Nous aurons alors un polynôme optimal afin d'obtenir nos données sur l'humidité des versants considérés. Cela implique bien sûr de refaire les mesures de la saison des pluies de cette nouvelle manière mais aussi de compléter les séries par un second criblage lors de la saison sèche.

