



***Rapport des contributions canadiennes au projet ACDI – CILSS
(A030978-002) «Appui aux capacités d'adaptation aux
changements climatiques»***

Tome I

**Groupe de travail I : Méthodologie en études de vulnérabilités, d'impacts et
d'adaptations face aux changements climatiques en milieu sahélien**

**Gestion intégrée des données climatiques, environnementales et socioéconomiques :
de l'analyse aux infrastructures**

Du présent vers l'avenir – recommandations et pistes futures de collaboration



Rapport préparé selon *l'entente principale de coopération scientifique* entre le Centre régional AGRHYMET et Environnement Canada du 22 octobre 2002. Rapport préparé également selon *l'entente #6600-3-4246* « Appui canadien aux projets pilotes d'adaptation aux changements climatiques au Burkina Faso, au Mali et au Niger » entre Environnement Canada -Service météorologique du Canada et l'Université du Québec à Montréal - Chaire d'études sur les écosystèmes urbains, ainsi que *l'entente # 6600- 5-4616* de collaboration pour un projet conjoint « Appui canadien aux capacités d'adaptation aux changements climatiques au Sahel » entre Environnement Canada- Service météorologique du Canada et l'Université du Québec à Montréal.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de l'Environnement, 2007.	© Her Majesty the Queen in Right of Canada, represented by the Minister of the Environment, 2007.
--	---

Mots clés : Afrique, Sahel, AGRHYMET, CILSS, changements climatiques, indices climatiques, vulnérabilités, impacts, adaptations, climat, capital social, capital environnemental, capacités d'adaptation, options d'adaptation, stratégies d'adaptation.

Comprend des références bibliographiques
ISBN 978-0-662-09508-8
No. de cat. En56-213/2007F

Internet (PDF)
ISBN 978-0-662-09509-5
No. de cat. En56-213/2007F-PDF

Ce rapport doit être cité comme suit:

Rapport des contributions canadiennes au projet ACDI – CILSS (#A030978-002); appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques. 2007, Montréal : Environnement Canada, 3 tomes.

Les sections ou groupes de travail du rapport doivent être citées selon l'exemple suivant :

Cotnoir, A., A I. Bokoye, P. Gachon, G. Berteau. 2007. Groupe de travail I – Méthodologie en étude de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations face aux changements climatiques en milieu sahélien, 37 p. dans *Rapport des contributions canadiennes au projet ACDI – CILSS (#A030978-002); appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques*. Montréal : Environnement Canada, tome I.

Poudret, P., A. Cotnoir, P. Gachon, G. Berteau. 2007. Gestion intégrée des données climatiques, environnementales et socioéconomiques : de l'analyse aux infrastructures, 25 p. dans *Rapport des contributions canadiennes au projet ACDI – CILSS (#A030978-002); appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques*. Montréal : Environnement Canada, tome I.

Pour obtenir des copies additionnelles :
Service Météorologique du Canada
Environnement Canada
Sciences atmosphériques et enjeux environnementaux
Place Bonaventure
800, rue de la Gauchetière Ouest
Tour Nord-est, bureau 7810
Montréal (Québec) H5A 1L9
Contact. André Cotnoir
Courriel : andre.cotnoir@ec.gc.ca

This report is available in English

TOME I

**Groupe de travail I : Méthodologie en études de vulnérabilités,
d'impacts et d'adaptations face aux changements climatiques en milieu
sahélien**

par

**André Cotnoir, Amadou Idrissa Bokoye (Ph.D.), Philippe Gachon
(Ph.D.), Geneviève Berteau**

Suivi de

**Gestion intégrée des données climatiques, environnementales et
socioéconomiques : de l'analyse aux infrastructures**

par

**Philippe Poudret, André Cotnoir, Philippe Gachon (Ph.D.), Geneviève
Berteau**

Et

**Du présent vers l'avenir – recommandations et pistes futures de
collaboration**

Septembre 2007

AVERTISSEMENT

Ce rapport ne peut être utilisé et/ou cité sans le consentement des auteurs.

SYNTHÈSE

Le Comité permanent Inter-États de lutte contre la sécheresse dans le Sahel (CILSS) pour le Centre Régional AGRHYMET (Agriculture Hydrologie et Météorologie) a sollicité et obtenu un financement du gouvernement canadien, via l'Agence canadienne de développement international (ACDI) afin de mettre en place un projet d'appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques. Le principal effet attendu du projet est de réduire la vulnérabilité des populations sahéliennes vis-à-vis des impacts des changements et de la variabilité climatiques. Parmi les secteurs potentiellement concernés par les effets majeurs de la variabilité et des changements climatiques en zone sahélienne, l'agriculture, les ressources en eau, le pastoralisme et l'environnement intégré ont été les principaux axes d'intérêt du projet. Aussi, le Centre Régional AGRHYMET a fait appel à l'expertise canadienne, via une entente de collaboration scientifique avec Environnement Canada et l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Cette expertise a été mise à contribution principalement sous forme de services professionnels et d'expertise scientifique dans des domaines tels que l'analyse du climat, l'élaboration de scénarios climatiques et des enquêtes concernant les attitudes et les pratiques des populations sur les sites des projets pilotes.

L'ensemble du projet canadien « Appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques au Sahel » comporte deux volets. Un premier volet analyse les caractéristiques du climat, soit la variabilité, les extrêmes et les changements des variables climatiques d'intérêt, afin de produire des scénarios du climat à l'échelle régionale et locale. Un second volet de projets-pilotes explore certaines caractéristiques environnementales importantes (la fertilité des sols, la cartographie des caractéristiques biophysiques, etc.), la mise en place de paquets technologiques (choix de semence, pratiques agricoles, etc.) ainsi que les attitudes et les pratiques des populations face aux aléas du climat via des enquêtes sur le terrain. La région du Sahel, en Afrique, est une zone typique où des actions substantielles d'analyse du climat sont nécessaires (GIEC, 2001a) afin de mieux en comprendre l'évolution antérieure, actuelle et future, dans le souci d'étayer les impacts climatiques à travers la définition et l'établissement d'indicateurs de sensibilité climatique, de capacité d'adaptation et de vulnérabilité. Le cadre de collaboration généré par le projet offre l'occasion de développer des outils quant au suivi et à l'adaptation au climat en zone sahélienne sur le court et le long terme ainsi qu'à des fins de gestion et de développement durable. Cette collaboration, qui se distingue par la collaboration novatrice entre les spécialistes en sciences sociales et ceux en sciences du climat, devrait permettre aux communautés locales d'élaborer des options d'adaptation viables, en vue de réduire leur vulnérabilité face aux changements climatiques.

Groupe de travail I : Méthodologie en études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations face aux changements climatiques en milieu sahélien.

Dans le cadre du présent projet, une méthodologie a été préconisée pour réaliser des études de vulnérabilités, d'impacts, et d'adaptations (VIA) face à la variabilité du climat et à ses changements en milieu sahélien. Le domaine des études VIA a rapidement évolué depuis le début des années 1990. D'études *techniques* sur les impacts sectoriels des changements climatiques, études de première génération, elles ont récemment évolué vers des analyses faisant la lumière sur la vulnérabilité sociale, humaine et environnementale et ses impacts face aux changements climatiques. Cette évolution dans la méthodologie préconisée sert de base afin d'analyser la pertinence de l'approche envisagée ici. Celle-ci met de l'avant une combinaison des facteurs de vulnérabilité définie par le capital social, le capital environnemental et la dimension d'exposition aux événements (dimension événementielle). C'est sur l'évolution dans le temps de cette

combinaison des facteurs primordiaux que nous souhaitons agir par l’intermédiaire de stratégies d’adaptation afin de réduire la vulnérabilité des populations.

Le cadre d’analyse est axé davantage sur la vulnérabilité présente, plutôt que sur celle anticipée dans le futur, de manière à fonder les choix et les décisions politiques à partir de l’expérience accumulée en analysant les conditions récentes ou le passé récent. Ce cadre conceptuel permet de bâtir l’analyse de la vulnérabilité future non plus sur des scénarios du climat, mais sur le constat de la capacité d’adaptation actuelle en termes de durabilité, de résilience et de points de ruptures en regard d’un avenir socio-économique et environnemental probable (Fischer *et al.*, 2005). L’approche permet d’y inclure l’incertitude reliée à l’appréciation du futur probable en le confrontant à la résilience, par exemple, de la capacité d’adaptation et, par conséquent, de connaître les points de rupture d’un système humain ou environnemental face à diverses situations équiprobales (Leichenko *et al.*, 2002).

À terme, l’approche doit servir de support afin de déterminer les options d’adaptation. Il s’agit alors d’intégrer les éléments climatiques pertinents (en termes de variabilité, d’extrêmes et de changements à venir) aux préoccupations de l’organisation sociale des pays du Sahel (les attitudes et les pratiques existantes et ancestrales, la gestion, l’accès et l’utilisation des ressources, etc.). Si l’intégration de chacun de ces éléments et les relations de cause à effet sont assez bien évaluées, les populations et leurs décideurs seront à même d’agir afin de réduire de façon ciblée leur vulnérabilité face aux aléas du climat. Également, elle permettra de considérer la possibilité que ces options d’adaptation soient applicables à d’autres territoires si, dans une certaine mesure, les principales caractéristiques de la vulnérabilité s’y retrouvent.

L’approche est souvent qualifiée d’approche ascendante (« bottom-up » en anglais) dans la littérature (cf. Adger *et al.*, 2004). En effet, pour que les études débouchent sur de véritables mesures d’adaptation, les principaux acteurs locaux doivent s’investir dès le début du projet. Ils sont plus à même de cerner les principaux enjeux qui caractérisent la vulnérabilité dans leur région que ne le seraient des acteurs « éloignés », d’autant plus qu’eux seuls, en général, connaissent certains des facteurs cruciaux responsables de la sensibilité de leur environnement naturel et de la population dans son ensemble (p. ex. la sensibilité de certaines espèces agricoles au régime de précipitation, aux agents microbiens pathogènes ou aux insectes).

Le cadre conceptuel de la vulnérabilité précise que le système est composé d’humains dans leurs relations sociale et économique sur un territoire ayant des caractéristiques environnementales. L’ensemble de ces caractéristiques constitue les facteurs du système sur lequel se produisent des événements. De plus, afin d’analyser la vulnérabilité, la dimension des événements doit comporter au-delà des événements climatiques, les risques naturels et les événements de nature humaine, sociale et économique qui viennent tous *perturber* l’équilibre du système à l’étude. Finalement, il convient de connaître dans quel contexte et dans quel but s’effectue l’analyse de la vulnérabilité. Par exemple, s’il est requis d’analyser la vulnérabilité des populations vis-à-vis de l’agriculture pluviale, cela nous permet d’encadrer l’analyse du capital social (les attitudes et les pratiques en regard de l’agriculture pluviale), du capital environnemental (les types de sol, la nappe phréatique, l’aménagement du territoire, etc.), de l’échelle de temps (p. ex. la durée de la saison des pluies) et des événements pouvant s’y produire (p. ex. l’analyse de la variabilité et des extrêmes de la saison des pluies, les conflits politiques). Notre contribution en termes d’analyse du climat explore cette relation entre les événements – climatiques – et le système socioécologique. Cette méthodologie, permettant de représenter et de mesurer la vulnérabilité, a comme objectif final de transformer les résultats de nos travaux en action sur le terrain et cela, dans une perspective de recherche-action. Le but est de fournir aux populations et aux décideurs des outils afin de choisir et de mettre en place des options d’adaptation. Ces outils doivent, en

regard de l'analyse des composantes de la vulnérabilité, comprendre un tant soit peu une description détaillée du contexte humain, social, environnemental et événementiel et, ainsi, optimiser l'utilisation des résultats de nos recherches.

L'approche rejoint les objectifs du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et du cadre d'analyse de la vulnérabilité face aux changements climatiques (PNUD/GEF 2001; idem, 2004), car elle permet d'établir les éléments essentiels d'une adaptation dynamique dans le contexte actuel et en particulier dans celui de la nécessité d'une action ou d'une réaction parfois urgente, à bâtir une tolérance accrue face aux changements du climat. Elle doit également considérer l'adaptation comme un processus dynamique dans lequel il n'y a pas de solutions définitives, mais qui comprend plutôt l'adoption de mesures qui orientent l'adaptation dans une direction viable pour les acteurs et la société en général. Finalement, elle doit permettre d'identifier les besoins immédiats en adaptation et de bâtir un niveau de tolérance accrue pour l'avenir (cf. Adger *et al.*, 2004).

Groupe de travail II : Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation.

Le travail de recherche consistait à évaluer les changements climatiques dans cette région d'Afrique, à développer l'information pertinente pour les besoins des populations locales et à faciliter l'élaboration de stratégie d'adaptation en zone sahélienne. La méthodologie utilisée s'est organisée autour de plusieurs thèmes en vue d'atteindre les objectifs suivants :

- Caractériser et analyser le climat sahélien (*i.e.* le climat moyen ainsi que la variabilité et les extrêmes) dans les pays du CILSS à partir des observations de stations disponibles;
- Évaluer la performance des modèles climatiques globaux (MCG) sur la fenêtre sahélienne à partir des observations et des séries de réanalyses disponibles;
- Développer de nouvelles méthodes et/ou utiliser les méthodes existantes de réduction d'échelle statistique (« downscaling » en anglais) pertinentes et les évaluer afin de reconstruire le climat observé (moyen, variabilité et extrêmes) et offrir des solutions de rechange aux MCG en générant une information pertinente à l'échelle locale (dans l'optique de favoriser l'adaptation face à la variabilité et aux changements climatiques dans un contexte sahélien);
- Utiliser la ou les méthodes les plus robustes pour générer les scénarios des changements climatiques en zone sahélienne.

Une base de données (variables climatiques) des scénarios pour toute la fenêtre de l'Afrique de l'Ouest disponibles à des pas de temps journaliers et avec une résolution spatiale inférieure à 50 kilomètres devait être constituée. Dans ce contexte, l'analyse des outils de modélisation ne représentait pas les seules tâches à réaliser. En effet, avant d'anticiper l'état futur du climat, une connaissance préalable et approfondie des caractéristiques du climat dans cette région tropicale ainsi que la variabilité observée au cours des dernières décennies s'est avérée indispensable, notamment afin de développer et d'analyser l'information climatique pertinente pour répondre aux besoins des populations, qui dépendent pour l'essentiel de l'agriculture pluviale. C'est pourquoi l'analyse du régime de précipitation a fait l'objet d'une attention particulière, compte tenu de l'effet majeur de cette variable climatique sur ce secteur d'activité économique névralgique.

Les données d'observation utilisées pour établir la climatologie de référence sur la période de 1961 à 1990 ont été extraites des données quotidiennes colligées au Centre Régional

AGRHYMET dont le contrôle de qualité a été au préalable effectué par le Centre Régional AGRHYMET. Une sélection des stations présentant le moins de lacunes a été réalisée afin de ne pas compromettre le calcul de la moyenne mensuelle et des indices climatiques. Parmi les critères utilisés, il devait y avoir moins de deux années successives de lacunes et au moins 26 années d'observations complètes sur la période de 1961 à 1990, et ces 26 années devaient être géoréférencées pour le besoin de la spatialisation. Parmi l'ensemble des données disponibles (environ 400 stations pluviométriques), 244 stations issues des pays du CILSS possèdent des séries dont la durée couvre la période de 1961 à 1990 et ont satisfait au critère de sélection défini. Elles ont donc été retenues pour la présente étude. À partir du cumul quotidien de précipitation, six indices ont été calculés afin de caractériser la variabilité et les extrêmes de précipitation, et ce, sur toute la saison de mousson, soit durant les mois d'avril à octobre pour chaque année, en plus d'analyser les variables de base (*i.e.* moyenne et écart type intrasaisonner de la précipitation totale cumulée). Cela a ainsi permis de caractériser la variabilité dans la fréquence, l'intensité et la durée des événements pluvieux, voire des séquences sèches. Ces indices ont été sélectionnés parmi les indices les plus couramment utilisés pour étudier la variabilité et les changements du régime de précipitation. Ils répondent également à la nécessité de caractériser le climat sahélien, permettant à la fois de déterminer :

- la climatologie moyenne (les conditions saisonnières moyennes propres au Sahel) via le cumul total des précipitations et des précipitations quotidiennes moyennes;
- les extrêmes via le calcul du 90^e centile et l'occurrence de cet extrême;
- la variabilité du régime de précipitation ou de la durée des périodes sèches via le calcul de la fréquence des jours humides ou des jours secs consécutifs, et de l'intensité des précipitations durant les jours humides.

Une fois le climat de référence caractérisé à partir des observations, une analyse détaillée de la performance des MCG dans la région sahélienne a été alors réalisée. Compte tenu de la faible résolution des MCG et des problèmes inhérents aux paramétrisations physiques utilisées dans ces modèles, notamment en ce qui concerne les processus liés à la précipitation (l'occurrence, l'intensité et la durée) en zone tropicale, le recours à des méthodes alternatives s'avérait indispensable, afin de raffiner et d'améliorer l'information à l'échelle locale. Ainsi, une évaluation rigoureuse d'une méthode de mise à l'échelle statistique a été entreprise, notamment afin d'améliorer la simulation de la précipitation, pas seulement en termes de valeur moyenne, mais également en termes d'occurrence, d'intensité et de durée des événements pluvieux. C'est seulement une fois que cette méthode a été évaluée, voire améliorée ou raffinée, que les scénarios climatiques pourront être développés (actuellement en cours d'élaboration, les résultats préliminaires ne sont pas inclus dans le présent document). Cette démarche qui suit donc une logique d'analyse du climat, en partant des observations existantes et des outils disponibles pour le simuler, a donc nécessité l'utilisation de méthodes d'analyse statistique et géostatistique, ainsi que l'analyse des processus atmosphériques d'échelle synoptique (*i.e.* le forçage atmosphérique à grande échelle) liés à l'apparition et à l'intensité des précipitations locales.

Comme l'analyse de la climatologie l'a montré, le régime de précipitation au Sahel est très inhomogène dans l'espace et dans le temps, et il est très largement déterminé par les fluctuations dans la fréquence, l'intensité et la durée des événements pluvieux. Dans ce contexte, le recours à des indices de variabilité et d'extrêmes calculés à partir des valeurs quotidiennes de précipitation a permis de mieux caractériser le régime pluvial sahélien, dominé par un petit nombre d'événements pluvieux à caractère convectif. Comme les MCG présentaient de nombreuses lacunes quant à la simulation adéquate de tels indices à l'échelle régionale (*i.e.* Afrique sahélienne), le recours à une méthode de mise à l'échelle statistique a permis d'améliorer de

façon majeure la reconstruction du régime de précipitation à l'échelle locale, notamment l'occurrence et l'intensité des événements pluvieux. Tout ce travail constitue donc une étape importante, voire indispensable, afin non seulement de mieux établir les fluctuations passées ou récemment observées, mais également d'améliorer notre connaissance sur les changements à venir et leurs impacts potentiels sur l'environnement et les activités humaines au sens large.

Groupe de travail III : Vulnérabilité des populations et adaptation aux variabilités climatiques au Sahel : acteurs, institutions et dynamiques locales.

Dans une communauté, il existe des groupes d'acteurs avec des préférences différentes par rapport à l'utilisation et à l'allocation des ressources. Lorsque l'on met l'accent sur un programme axé sur la communauté, comme le projet qui nous occupe, il est important de considérer les « jeux politiques » qui font que la communauté et la gestion des ressources sont comme elles sont. Une telle dynamique peut, par exemple, prendre la forme de jeux de pouvoir, de négociations, de tensions et de contestations entre certains groupes au sein d'une communauté (Agrawal, 2001). Une communauté et la façon dont elle gère les ressources ne sont pas nécessairement déterminées par des facteurs extérieurs aux individus qui la forment comme le fait de partager des normes, de vivre sur un même territoire ou encore d'avoir les mêmes origines ethniques. La théorie enracinée (« grounded theory » en anglais), offre une base théorique pour percevoir la communauté.

Les comportements humains peuvent être très complexes. Ils ne correspondent pas à un modèle de déterminisme simple comme celui concernant la communauté (Crozier et Friedberg, 1977). Une action collective n'est pas exclusivement déterminée par l'environnement, par des facteurs extérieurs, mais par les interactions entre les individus qui la produisent. Elle est construite par des acteurs qui possèdent des intérêts, des ressources et qui sont confrontés à des contraintes qu'ils utilisent dans leurs actions (Bernoux, 1985). L'utilisation ou la gestion d'une ressource servant à plusieurs acteurs différents en est un bon exemple. Autour d'un cours d'eau comme le fleuve Niger, il y a des agriculteurs, des éleveurs, des pêcheurs, des commerçants, des ménagères et plusieurs autres. Tous ces acteurs utilisent le fleuve pour leurs activités qui nécessitent des conditions particulières et qui diffèrent de l'une à l'autre. Si on leur confiait la gestion de cette ressource, le résultat émanerait de l'interaction et de la négociation entre tous ces intérêts, des jeux de pouvoir issus des ressources que possède chacun d'eux et des contraintes auxquelles ils feraient face.

Traditionnellement, les études sur l'adaptation consistaient à prédire les effets des changements climatiques à partir de modèles climatiques pour ensuite cibler la vulnérabilité liée à ces effets potentiels (Smit, 2003). Toutefois, la vigilance est de mise puisqu'il est difficile d'identifier des stratégies d'adaptation touchant (ou concernant) uniquement la problématique des changements climatiques. En effet, la vulnérabilité, tout comme la capacité d'adaptation, peut être amplifiée par certaines caractéristiques (sociales, politiques, culturelles, etc.) de la société qui ne sont pas considérées comme faisant directement partie de la sphère de la relation au climat (Handmer, 2003). Il faut considérer ce qui freine les capacités d'adaptation ou ce qui rend les gens vulnérables. À défaut de prendre en compte ces considérations, on tentera de trouver une solution au mauvais problème. Cette façon d'approcher l'adaptation, appelée « évaluation de la vulnérabilité », est de plus en plus utilisée. Elle constitue l'inverse de la méthode traditionnelle qui se caractérise par l'évaluation des impacts des variations du climat à partir de modèles climatiques. Puisque l'adaptation doit être propre à un système, dans un lieu et à un moment donné, cette approche permet d'identifier les vraies vulnérabilités de la société en question (Smit, 2003).

Dans le cadre de ce volet « social » du projet, la collaboration entre les instances canadiennes et africaines s'est effectuée au niveau de l'appui au volet enquête générale sur les stratégies paysannes d'adaptation (itinéraire) à la variabilité et aux changements climatiques. Cet appui concerne les cinq projets pilotes au Mali, au Niger et au Burkina Faso. Ces enquêtes ont permis la pleine participation des communautés rurales à la définition de stratégies d'adaptation face aux changements et à la variabilité climatiques.

Annexe : Gestion intégrée des données climatiques, environnementales et socioéconomiques : de l'analyse aux infrastructures

Dans le cadre du projet, des données climatiques, hydrologiques, agrométéorologiques, phytosanitaires, pastorales, démographiques, socioéconomiques, cartographiques et environnementales ont été collectées auprès des structures nationales attitrées. Un des défis de ce projet est d'entreposer une grande quantité de données climatologiques et de les mettre en relation adéquatement. À ce jour, les données climatologiques de sorties de modèles (MCG – modèles de circulation générale) sont conservées sous différents formats (ASCII principalement) qui occupent un espace considérable. L'architecture des données du projet se veut ouverte, permettant l'arrimage entre les données de différentes sources et géoréférencées. Les MCG ont des références par points de grille, en valeurs de longitude et de latitude. Les villages ou les groupes ont été également référencés géographiquement, permettant ainsi l'association avec des données à caractère environnemental ou géophysique. La base de données régionale des observations climatologiques comporte des données provenant des diverses stations également géoréférencées ainsi que des données socioéconomiques.

L'interface utilisateur a été conçue pour offrir un cadre commun facile à utiliser tout en permettant une vision transversale des données diverses favorables à une analyse multivariée de l'information. Cette interface mettra à la disposition de l'utilisateur une série d'outils permettant l'analyse numérique des séries temporelles, le calcul d'indices combinant plusieurs variables et la représentation graphique des informations générées. L'interface doit également offrir un outil de conversion permettant d'exporter des données vers d'autres outils d'analyse. Les MCG et les données d'enquête sur le terrain ont été intégrés à la base de données régionale AGRHYMET, ce qui permettra des analyses plus systématiques tant sur le plan climatologique que socioéconomique. Par la suite, on pourra mettre en œuvre une représentation cartographique et spatiale de l'information à l'aide de système d'information géographique (SIG), permettant de combiner les MCG et les résultats d'enquête. Ces données pourront être mises en relation avec des données hydrologiques, agropastorales ou satellitaires.

L'atteinte des objectifs de mise en place des données pour l'analyse et la caractérisation du climat passé récent et futur a nécessité l'achat et l'installation d'une infrastructure informatique. Les composantes suivantes ont été livrées et installées au Centre Régional AGRHYMET, à savoir un serveur Sun FireWire V880 et la suite ORACLE 9i, une interface d'accès et de maintenance des données fondée sur le logiciel MATLAB. En collaboration avec Environnement Canada, le Centre Régional AGRHYMET a procédé à l'installation du système de gestion de bases de données ORACLE 9i ainsi que du schéma de la base de données des sorties des modèles climatiques et il a procédé à des tests de connectivité. Pour ce qui a trait à l'interface d'accès aux données, deux logiciels ont été retenus par le Centre Régional AGRHYMET pour faire la gestion et accéder aux données climatiques (CLIDATA) et hydrologiques (HYDROMET). Le logiciel distribué par Oracle, DISCOVERY permet d'accéder aux données brutes tandis que les outils fournis par Oracle (OEM) servent à en faire la gestion. Les logiciels MATLAB et MS Excel ont été également utilisés pour accéder et traiter les données de différentes sources. Les données de

sortie de modèles ainsi que les réanalyses NCEP pour la période de 1961 à 1990 (référence) ont été installées sur le serveur. Ces données servent essentiellement à la mesure de performance, à l'analyse climatologique et à la mise à l'échelle statistique. Par la suite, des données de sortie de modèles pour les horizons 2020, 2050 et 2080 ont été fournies pour l'analyse du climat futur et l'élaboration des scénarios climatiques.

Conclusion

Le projet canadien « Appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques au Sahel » a permis d'élaborer une approche novatrice qui s'inscrit dans la démarche actuelle en termes de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations aux changements climatiques. Ce projet en deux volets principaux enquête auprès des communautés villageoises et analyse de l'évolution du climat (y compris la variabilité et les extrêmes). Il se démarque par son objectif de réduire la vulnérabilité des populations sahéliennes vis-à-vis des impacts des changements et de la variabilité climatiques en leur permettant de développer des stratégies d'adaptation qui sont scientifiquement fondées et qui correspondent à leur réalité quotidienne de lutte à la pauvreté.

Notre contribution à cet objectif a été :

- de définir le cadre conceptuel et la méthodologie en vue de réaliser des études de vulnérabilités, d'impacts, et d'adaptations (VIA) en milieu sahélien. Ce cadre conceptuel met en relief l'importance des dimensions sociale, environnementale et événementielle (p. ex. la nature et l'évolution du climat, le contexte politique) dans la démarche de réduction des vulnérabilités et de la mise en œuvre de politiques d'adaptation;
- de fournir une assise matérielle et conceptuelle de la gestion de bases des données climatiques et sociales en appui aux études VIA en milieu sahélien;
- de développer une méthode d'analyse détaillée du régime de précipitation au Sahel en termes d'indices climatiques permettant de caractériser l'intensité, la durée, la fréquence et/ou l'occurrence des précipitations à partir de données quotidiennes, de valider la performance des MCG sur la fenêtre sahélienne et de développer des méthodes alternatives de production de scénarios climatiques (mises à l'échelle) aux échelles locale et quotidienne, et ce, en regard de la vulnérabilité des populations sahéliennes dans un contexte de forte variabilité naturelle du climat et de l'ampleur des changements potentiels à venir;
- de fournir, en appui à la mise en œuvre des projets-pilotes et au moyen d'une enquête auprès des communautés villageoises, une analyse détaillée des caractéristiques sociale, politique et environnementale qui définissent les vulnérabilités actuelles des communautés sahéliennes et, ainsi, de renforcer leurs capacités d'adaptation actuelles et futures face aléas du climat dans le cadre de la mise en œuvre de stratégies d'adaptation.

Avant-propos exécutif

Le Comité Permanent Inter États de lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) pour le Centre Régional AGRHYMET (Agriculture Hydrologie et Météorologie localisé à Niamey au Niger) a sollicité et obtenu un financement du gouvernement canadien, via l'Agence Canadienne de Développement International (ACDI) afin de mettre en place un projet d'appui aux capacités d'adaptation au changement climatique. C'est dans ce contexte que l'expertise canadienne fut mise à contribution. Parmi les secteurs de vulnérabilité existants, la sécurité alimentaire, l'agriculture, les ressources en eau et le pastoralisme ont été les principaux axes pris en compte. La participation des experts au projet «Appui canadien aux capacités d'adaptation aux changements climatiques au Sahel » s'est effectuée en deux volets principaux; enquête auprès des communautés villageoises concernant l'adaptation actuelle et future face aux aléas du climat et analyse de l'évolution du climat. L'objectif étant de réduire la vulnérabilité des populations sahéliennes vis-à-vis des impacts du changement et de la variabilité climatique en leur permettant de développer des stratégies d'adaptation qui soient scientifiquement fondées et qui correspondent à leur réalité quotidienne de lutte à la pauvreté.

Le présent rapport est formé des résultats des groupes de travail :

- Groupe de travail I : «Méthodologie en études d'impacts, de vulnérabilité et d'adaptation aux changements climatiques en milieu sahélien » La méthodologie proposée met de l'avant une combinaison des facteurs de vulnérabilité définie par le capital social, le capital environnemental et la dimension d'exposition aux événements (dimension événementielle). C'est l'évolution dans le temps de cette combinaison des facteurs primordiaux sur lequel il est suggéré d'agir par le biais de stratégies d'adaptation afin de réduire la vulnérabilité des populations. ;
- Groupe de travail II : «Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : De l'observation à la modélisation » Ce travail de recherche consiste à évaluer le changement climatique dans cette région d'Afrique, à développer les informations pertinentes pour les besoins des populations locales et à faciliter le développement de stratégie d'adaptation en zones sahéliennes. Dans ce contexte, une connaissance préalable et approfondie des caractéristiques du climat dans cette région tropicale ainsi que la variabilité observée au cours des dernières décennies s'est avérer indispensable notamment afin de développer et d'analyser les informations climatiques pertinentes pour répondre aux besoins des populations. C'est pourquoi, l'analyse du régime de précipitation fut l'objet d'une attention particulière, compte tenu de l'effet majeur de cette variable climatique sur ce secteur d'activité économique névralgique. Par la suite, afin d'anticiper l'état futur du climat, une l'analyse des outils de modélisation a été réalisée. ;
- Groupe de travail III : «Vulnérabilité des populations et adaptation aux variabilités climatiques au Sahel : Acteurs, institutions et dynamiques locales » Ces enquêtes ont permis la pleine participation des communautés rurales à la définition de stratégies d'adaptation face aux changements et à la variabilité climatique. Lorsque l'on met l'accent sur un programme basé sur la communauté il est important de considérer les «jeux politiques» qui font que la communauté et la gestion des ressources sont comme elles sont. Une communauté et la façon dont elle gère les ressources ne sont pas nécessairement déterminées par des facteurs extérieurs aux individus qui la forment comme le fait de partager des normes, de vivre sur un même territoire ou encore d'avoir

les mêmes origines ethniques. La théorie enracinée (*grounded theory*), offre une base théorique pour percevoir la communauté. Puisque l'adaptation doit être spécifique à un système, dans un lieu et à un moment donné, cette approche permet d'identifier les vraies vulnérabilités de la société en question. ;

- «Synthèse» et «Recommandations et pistes futures de collaboration » Cette section présente les réflexions, pistes futures de collaboration et recommandations en ce qui a trait à la consolidation des résultats du présent projet. Cette consolidation se veut concrète et touche de façon immédiate les actions à entreprendre.

Nous tenons à remercier chaleureusement nos collaborateurs pour leur implication.

L'Agence Canadienne de Développement International (ACDI) qui a permis, financé et soutenu ce projet. Nous tenons à remercier; Mme Édith Gouin et M. Simon Boivin, agents de développement à l'ACDI.

Le Comité Permanent Inter États de lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) et plus particulièrement son secrétaire exécutif adjoint, M. Issa Martin Bikienga, pour son soutien dans l'exécution du projet.

La Direction Générale du Centre Régional AGRHYMET (CRA), notre partenaire principal, ainsi que le Dr Mathieu Badolo, coordonateur du projet pour le CRA, Dr Hubert N'Djafa Ouaga, expert en projet-pilote au CRA, M. Gnoumou Faustin, Chef Département Formation et Recherche et M. Brahimé Sidibé, Chef Département Information et Recherche. Nous souhaitons également souligner l'apport de l'ensemble des experts et des chercheurs du CRA tout au long de ce projet.

La Chaire d'Étude sur les Écosystèmes Urbains de l'Université du Québec (Dr Laurent Lepage et son équipe), le Groupe « Analyse du climat » d'Environnement Canada (Dr Philippe Gachon et son équipe) à Montréal pour leur apport en ce qui a trait à l'étude des dynamiques sociales et des caractéristiques de la mousson au Sahel.

Nous tenons également à remercier pour leur collaboration les institutions sur le terrain qui nous ont fournis une aide précieuse et la participation des populations locales sans laquelle nous n'aurions pu développer ce projet au Sahel.

Finalement, nous souhaitons à souligner le travail de Mme Geneviève Berteau qui a revu, intégré, édité et mis en forme les textes des Groupes de travail pour en arriver au présent rapport.

Monsieur Gérald Vigeant
Adjoint exécutif
Planification & Opérations
Service météorologique du Canada
Environnement Canada - Région du Québec

Monsieur André Cotnoir B.Sc/M.Sc
Météorologue – Vulnérabilités, impacts et adaptations au climat et à ses changements
Chargé de projet "Appui canadien aux capacités d'adaptation aux changements climatiques au Sahel"
Service météorologique du Canada
Environnement Canada - Région du Québec

Groupe de travail I : Méthodologie en études de vulnérabilités d'impacts, et d'adaptations face aux changements climatiques en milieu sahélien

Rédaction : André Cotnoir, Amadou Idrissa Bokoye (Ph.D.), Philippe Gachon (Ph.D.), Geneviève Berteaup



Source : European Space Agency (<http://www.eduspace.esa.int>)

La présente partie du rapport représente la contribution canadienne au projet ACDI – CILSS (A030978-002) en ce qui a trait à :

- une synthèse des études passées portant sur les répercussions des changements climatiques face à l'agriculture, aux ressources en eau, au pastoralisme et à l'environnement intégré;
- un exemple de méthodologie suggérée afin d'effectuer des études de vulnérabilités d'impacts et d'adaptations face aux changements climatiques.

Table des matières

SYNTHÈSE	III
AVANT-PROPOS EXÉCUTIF	X
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	XV
REMERCIEMENTS	XVI
1. MÉTHODOLOGIE EN ÉTUDES DE VULNÉRABILITÉS, D'IMPACTS ET D'ADAPTATIONS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	1
2. CADRE CONCEPTUEL	2
3. VULNÉRABILITÉ : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	4
4. VULNÉRABILITÉ: ÉVOLUTION RÉCENTE DU CADRE CONCEPTUEL	9
4.1. CADRE CONCEPTUEL DE BROOKS (2003) ET D'ADGER ET AL. (2004)	9
4.2. CADRE CONCEPTUEL DE FÜSSEL ET DE KLEIN (2006)	10
5. MESURE DE LA VULNÉRABILITÉ ET CHOIX DES OPTIONS D'ADAPTATION	11
5.1. MESURE DE LA VULNÉRABILITÉ (LUERS ET AL., 2003; LUERS, 2005)	12
5.2. INTERPRÉTATION DES TERMES	15
6. CONCLUSION	17
RÉFÉRENCES	18
ANNEXE A. FORMULATION ANALYTIQUE DE LA VULNÉRABILITÉ	20
ANNEXE B. MESURE DES COMPOSANTES DE LA VULNÉRABILITÉ - TRAVAUX DE LUERS ET AL., 2003, ET DE LUERS, 2005	22
ANNEXE C. LES INDICES CLIMATIQUES, BIOPHYSIQUES ET DE VULNÉRABILITÉ	23

Liste des figures

FIGURE 1. PNUD/GEF : CADRE DE POLITIQUES D'ADAPTATION (CPA) : RENFORCEMENT DES CAPACITÉS POUR LES ACTIVITÉS D'ADAPTATION (2004).....	3
FIGURE 2. CARTE D'OCCUPATION DES SOLS (PLATEAU CENTRAL – BURKINA FASO; SOURCE : AGRHYMET, 2005).....	7
FIGURE 3. DIMENSION DES ÉVÉNEMENTS : PRÉSENTE CE QUI PEUT SE PRODUIRE SUR LES PLANS HUMAIN, SOCIAL, ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL, ET QUI VIENT PERTURBER LE CAPITAL SOCIAL ET ENVIRONNEMENTAL. ELLE COMPREND LA NOTION DE « RISQUES NATURELS ». LA DÉLIMITATION ENTRE LES ÉVÉNEMENTS HUMAIN, SOCIAL ET ÉCONOMIQUE, ET ENVIRONNEMENTAL (EN POINTILLÉ) INDIQUE UN REGROUPEMENT DE GENRE SEULEMENT, ET NON UNE INDÉPENDANCE D'OCCURRENCE.	8
FIGURE 4. ÉTUDES SUR L'ÉLABORATION DES POLITIQUES D'ADAPTATION – D'APRÈS FÜSSEL (2005).	10
FIGURE 5. SURFACE DE VULNÉRABILITÉ (LUERS, 2005).....	13
FIGURE 6. IDEM À LA FIGURE 5, MAIS RAMENÉ À UN PLAN (LUERS, 2005).....	14

Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CRA	Centre régional AGRHYMET
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
PANA	Programmes d'action nationaux d'adaptation
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement
Étude VIA	Études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations

Remerciements

Nous souhaitons remercier, en tout premier lieu, l'ACDI pour le soutien financier à la réalisation de ce travail.

De même, nous remercions également pour les conseils, le suivi et le soutien le Dr Hubert N'Djafa Ouaga, expert en projet-pilote au Centre régional AGRHYMET (CRA) et le Dr Mathieu Badolo, coordonateur du projet pour le CRA. De même, nous remercions la Direction générale du CRA pour son soutien.

Finalement, nous tenons à remercier M. Gérald Vigeant, pour son soutien tout au long de ce travail et pour son soutien constant à la réalisation de ce projet.

1. Méthodologie en études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations aux changements climatiques

Dans le cadre du présent projet, une méthodologie est proposée afin de réaliser des études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations (VIA) face à la variabilité du climat et à ses changements.

À partir, d'une revue de littérature, un cadre conceptuel est proposé au Centre Régional AGRHYMET (CRA) afin de mener à bien des études VIA en ce qui a trait à l'agriculture, à l'élevage, aux ressources en eau et au développement durable en tenant compte des conflits d'usage.

La notion d'étude VIA s'est imposée progressivement au cours des quinze dernières années à la suite des différentes études et des différents rapports publiés à propos de l'évolution du climat et de ses effets potentiels sur les activités humaines et l'environnement en général. Ces études ont mené, en 1992, à l'élaboration de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCUNCC) et, en 1997, à la préparation du Protocole de Kyoto.

En effet, il est à présent largement reconnu que, en dépit de la stabilisation ou même de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), le climat, tel que nous le connaissons aujourd'hui, va subir des changements inévitables en raison de l'accumulation historique des GES. Ces effets pourraient se faire sentir pendant plus d'un siècle d'après le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC, 2001a). Les objectifs de Kyoto représentent seulement 3 p. 100 de l'action nécessaire afin de stabiliser effectivement les émissions de GES à leur niveau de 1990, et d'atténuer les conséquences de l'augmentation des émissions anthropiques sur le réchauffement planétaire probable et les multiples effets sur l'ensemble du climat mondial. Des actions importantes devront donc être consacrées à l'élaboration de mesures d'adaptation afin de faire face aux effets néfastes des changements climatiques, qui semblent inéluctables d'après le GIEC (2001a).

Comme le suggèrent la CCUNCC (ONU, 1992) et le Protocole de Kyoto, des actions importantes doivent être consacrées afin non seulement de mieux cerner les répercussions des changements climatiques sur les écosystèmes, mais également de mesurer la vulnérabilité des populations et de l'environnement en général. Tout cela doit être envisagé dans le but ultime d'élaborer des stratégies d'adaptation dans un contexte de développement durable. Afin d'atteindre ces objectifs, les parties prenantes à la CCNUCC et au Protocole de Kyoto ont mis de l'avant les Programmes d'Action Nationaux d'Adaptation (PANA). Les PANA visent à identifier les besoins urgents et immédiats des pays les moins avancés pour qu'ils puissent s'adapter aux menaces actuelles du fait de la variabilité climatique. Ces PANA ont contribués, au cours des dernières années, à l'évolution des études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations de façon notable.

Dans un premier temps, nous procéderons à un rappel de l'évolution des études VIA issue des différents rapports du GIEC. Les études VIA ont rapidement évolué depuis le début des années 1990. D'études « techniques » sur les impacts sectoriels des changements climatiques, que nous qualifierons d'études de première génération, elles ont évolué récemment vers des analyses faisant la lumière sur la vulnérabilité sociale, humaine et environnementale et les impacts face aux changements climatiques. Cette évolution nous servira d'assise afin d'exposer par la suite les

éléments de la méthodologie envisagée. Ces derniers permettent de mettre de l'avant un espace¹ de vulnérabilité défini par les trois dimensions suivantes : le capital social, le capital environnemental et la dimension d'exposition aux événements (la dimension événementielle). C'est sur l'évolution dans le temps de cet espace que nous souhaitons agir par l'intermédiaire de stratégies d'adaptation afin de réduire la vulnérabilité des populations.

2. Cadre conceptuel

Afin d'assurer l'élaboration des initiatives en matière d'études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations, le Secrétariat de la CCNUCC assure, depuis ses débuts, un leadership dans l'élaboration méthodologique. Il a publié, en 1999, un premier rapport regroupant les méthodes et les outils d'analyse et d'évaluation des impacts favorisant l'élaboration des stratégies d'adaptation face aux changements climatiques (ONU, 1999). Ce premier rapport suivait la publication de documents d'orientation et d'analyse qui ont fortement influencé les premières études d'IVA. Notons parmi celles-ci les travaux de Kates *et al.* (1985), GIEC (1994) et Benioff *et al.* (1996) qui ont permis d'établir les bases de réflexion sur les études d'IVA.

Les études de première génération mettaient l'accent sur l'évaluation des impacts au détriment de l'analyse de l'adaptation et de la vulnérabilité. En effet, elles visaient surtout à connaître l'ampleur des impacts des changements climatiques sur les écosystèmes afin, entre autres, de soutenir les programmes de mitigation et de stabilisation des GES. Elles se fondaient sur l'utilisation des données extraites des modèles climatiques globaux (MCG) qui servaient alors d'intrants à des modèles sectoriels conçus pour des applications en hydrologie, en agriculture, en santé, etc., afin d'en quantifier les impacts. Elles constituent les premières études sur l'adaptation, en évacuant le plus souvent toutes considérations humaines et sociales. Ainsi, elles ne représentaient pas de réelles stratégies d'adaptation qui nécessitaient l'intégration des dimensions socioéconomiques, humaines et environnementales, mais plutôt une première série d'études définie par certains comme étant des exercices dictés par les impacts – « impact-led » en anglais (Adger *et al.*, 2004).

Au cours des dernières années et surtout depuis que la CCNUCC a su regrouper des experts venant des sciences du climat ainsi que des sciences humaines et économiques, la prise en compte des aspects socioéconomiques, humains, et environnementaux a été réalisée comme s'il s'agissait des éléments essentiels permettant de déterminer la capacité à s'adapter à un climat en changement². Une telle approche, désignée par certains comme étant dictée par la vulnérabilité – « vulnerability-led » en anglais – (Adger *et al.*, 2004), met alors l'accent sur l'évaluation de la vulnérabilité des populations face aux changements climatiques.

À ce propos, le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) a publié, depuis 2001, plusieurs versions d'un cadre d'analyse de la vulnérabilité face aux changements climatiques (PNUD/GEF, 2001). Les travaux du PNUD ont démontré que l'élaboration d'une approche commune est nécessaire pour l'exécution des études d'VIA (Burton *et al.*, 2002). Il en découle que les études VIA sont axées davantage sur la vulnérabilité actuelle, plutôt que sur celle prévue dans le futur, de manière à fonder les choix et les décisions politiques sur l'expérience

¹ « Espace » pris dans le sens d'« espace euclidien ».

² Par exemple, la septième Conférence des Parties au Protocole de Kyoto – tenue à Marrakech en 2001 – où l'on a créé trois fonds : 1. le Fonds spécial pour les changements climatiques; 2. le Fonds pour les pays les moins avancés; 3. le Fonds pour l'Adaptation. Chacun de ces fonds comporte un soutien aux projets d'adaptation.

accumulée en tenant compte des conditions récentes ou imminentes. Le cadre conceptuel permet de bâtir l'analyse de la vulnérabilité future non plus sur des scénarios du climat, mais sur le constat de la capacité d'adaptation actuelle en termes de durabilité, résilience et points de rupture en ce qui a trait au développement socioéconomique et environnemental probable (Fischer *et al.*, 2005). Il s'agit d'une nouvelle approche qui innove principalement sur deux points. En premier lieu, cette approche s'amorce avec les données récentes relatives à la variabilité et aux extrêmes climatiques, et évalue les expériences récentes en matière de vulnérabilité et d'adaptation. L'évaluation est de ce fait fermement ancrée dans le présent, reposant sur le développement plutôt que sur un scénario. En second lieu, le cadre conceptuel autorise l'adoption d'une approche de l'apprentissage par la pratique. L'adaptation est donc envisagée comme un processus dynamique, à travers lequel les réponses définitives ne sont pas recherchées, mais dans lequel on préconise des mesures orientées qui amélioreront l'adaptation actuelle et qui permettront d'y apporter des corrections ultérieures (PNUD/GEF, 2001) (cf. figure 1). L'approche permet d'y inclure l'incertitude liée à l'appréciation du futur probable en le confrontant à la résilience, par exemple, et à la capacité d'adaptation et, par conséquent, de connaître les points de rupture d'un système humain ou environnemental face à diverses situations équiprobales (Leichenko et O'Brien, 2002).

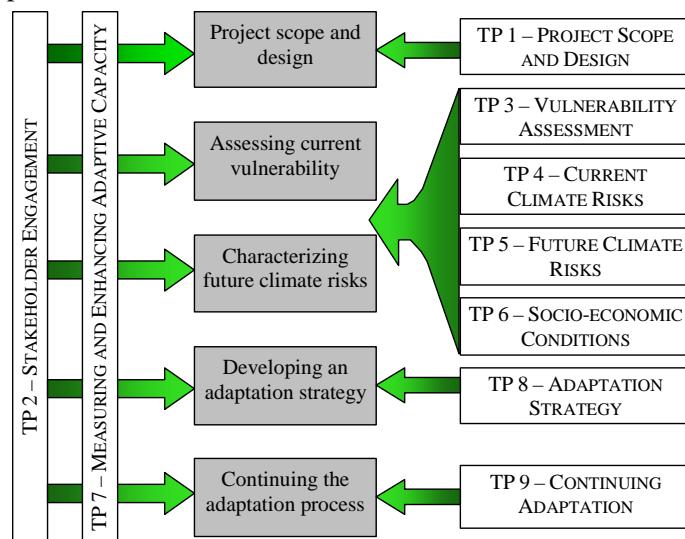


Figure 1. PNUD/GEF : Cadre de politiques d'adaptation (CPA) : renforcement des capacités pour les activités d'adaptation (2004).

L'objectif poursuivi dans le cadre du présent projet était de faciliter l'élaboration des stratégies d'adaptation face au climat, à sa variabilité et à ses changements plausibles, qui sont scientifiquement fondées et ancrées dans l'organisation sociale. Dans le cadre de notre revue de littérature et du contexte dans lequel s'est développé ce projet de collaboration, l'approche proposée par le PNUD/GEF (2004) nous semble la plus appropriée³. Celle-ci met l'accent sur la nécessité d'une prise en compte à la fois des facteurs socioéconomiques, environnementaux et événementiels quant à la définition d'indicateurs pertinents, dans le cadre de l'approche analytique de la vulnérabilité suggérée précédemment afin d'en arriver à un choix judicieux des options d'adaptation.

³ Une synthèse des principaux indices et indicateurs climatiques potentiellement utiles dans le contexte d'une analyse multivariée et multidisciplinaire relativement au Sahel est présentée à l'annexe C.

Pour ce faire, il est nécessaire que les parties prenantes (usagers et public en général) s'investissent de façon considérable à l'échelle locale à la fois dans l'élaboration de l'étude et dans la mise en place des mesures de réduction de la vulnérabilité⁴. Une telle approche est souvent qualifiée d'approche ascendante dans la littérature (cf. Adger *et al.*, 2004). En effet, pour que les études débouchent sur de véritables mesures d'adaptation, les principaux acteurs locaux doivent s'investir dès le début du projet. Ils sont alors plus à même de cerner les principaux enjeux qui caractérisent la vulnérabilité dans leur région que ne le seraient des acteurs « éloignés », d'autant plus qu'eux seuls, en général, connaissent certains des facteurs cruciaux responsables de la sensibilité de leur milieu (p. ex. la sensibilité de certaines espèces agricoles au régime de précipitation, aux agents microbiens pathogènes ou aux insectes). Par la suite (cf. Groupe de travail III, Lepage *et al.* 2007; Vulnérabilité des populations et adaptation aux variabilités climatiques au Sahel : acteurs, institutions et dynamiques locales), l'analyse des résultats d'enquêtes de terrain illustre bien la nécessité de prendre en compte les connaissances du milieu concerné afin d'en tirer profit et d'augmenter ainsi les chances de réduire la vulnérabilité des populations.

3. Vulnérabilité : approche méthodologique

L'évolution progressive des études VIA, depuis l'analyse des impacts (« impacts-led ») jusqu'à l'analyse de la vulnérabilité (« vulnerability-led »), afin d'établir des choix pertinents et viables quant aux options d'adaptation, nécessite de définir la notion de vulnérabilité. Au cours des dernières années, de nombreuses études ont permis de proposer une définition de la vulnérabilité. Par exemple, Janssen *et al.* (2005) ont notamment répertorié 771 références traitant de la vulnérabilité et de la résilience ainsi que de l'adaptation dans le contexte des changements environnementaux globaux⁵. Ils ont souligné que les articles à ce propos se sont particulièrement accrus depuis 1995.

Dans le même contexte, le GIEC a publié son troisième rapport d'évaluation (GIEC, 2001a) dans lequel on mentionnait l'urgence de tenir des études de vulnérabilité, à la suite des constats suivants :

- **Les effets des changements climatiques sur les écosystèmes** : la variabilité et les changements climatiques qui, dernièrement, se sont produits à l'échelle régionale, notamment les hausses de température, ont déjà influé sur beaucoup de systèmes physiques et biologiques. Les systèmes naturels sont vulnérables à l'évolution du climat, et certains subiront des dommages irréversibles;
- **Les effets des changements climatiques sur le développement socioéconomique et humain** : L'accroissement récent des inondations et des sécheresses aurait eu une incidence sur plusieurs sociétés et êtres humains. Beaucoup de systèmes humains sont sensibles à l'évolution du climat, et certains sont particulièrement vulnérables;
- **Les risques particuliers dus aux phénomènes extrêmes et au changement de grande ampleur** : L'évolution projetée des phénomènes climatiques extrêmes pourrait avoir de sérieuses conséquences sur l'environnement et les activités humaines. Certains effets

⁴ Une bonne connaissance des vulnérabilités actuelles et des enjeux qui en découlent doivent être bien cernés afin de mettre en place les dispositifs adéquats. C'est pourquoi autant d'effort a été investi dans la recherche au cours des dernières années.

⁵ Le terme « changements environnementaux globaux » comprend l'ensemble des modifications naturelles et anthropiques que subit notre environnement à l'échelle de la planète, y compris les changements climatiques.

- éventuels à grande échelle (p. ex. l'augmentation du niveau marin et des sécheresses pancontinentales de grande ampleur) pourraient se révéler irréversibles et exposer la société dans son ensemble à des risques qui n'ont pas encore été quantifiés de manière fiable;
- **La nécessité de l'adaptation :** À toutes les échelles, l'adaptation est une stratégie nécessaire pour mener à terme les actions visant à atténuer les effets des changements potentiels et plausibles. Les populations et les sociétés qui possèdent le moins de ressources auront la plus faible capacité d'adaptation, et sont ou seront les plus vulnérables. L'adaptation, le développement durable et une meilleure équité peuvent se renforcer mutuellement.

Des constats du GIEC, la notion de vulnérabilité prend toute son importance dans le contexte du suivi des effets néfastes des changements climatiques. Le GIEC (Chapitre 1, p. 7 et 96, 2001a) propose la définition de vulnérabilité qui suit :

« Mesure dans laquelle un système est sensible – ou incapable de faire face – aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de la variation du climat à laquelle le système considéré est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation. »

C'est dans ce contexte que s'est élaboré le projet canadien « Appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques au Sahel ». Outre le Groupe de travail sur la méthodologie en études VIA au Sahel, le projet comporte ainsi deux autres volets. Un premier volet analyse les caractéristiques du climat, sa variabilité et ses extrêmes ainsi que les outils pertinents pour produire les scénarios de changements climatiques à l'échelle locale (cf. Groupe de travail II, Gachon *et al.*; Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation). Un second volet, à travers des projets-pilotes et des enquêtes de terrain, explore le domaine environnementale (la fertilité des sols, la cartographie des caractéristiques biophysiques, etc.), la mise en place de paquets technologiques (le choix de semence, les pratiques agricoles, etc.) ainsi que les attitudes et les pratiques des populations face aux aléas du climat (cf. Groupe de travail III, Lepage *et al.*; Vulnérabilité des populations et adaptation aux variabilités climatiques au Sahel : acteurs, institutions et dynamiques locales). À partir de ces analyses, nos travaux devraient favoriser l'élaboration de choix d'options d'adaptation vis-à-vis de l'agriculture, de l'élevage et des ressources en eau dans le contexte du développement durable, en tenant compte des conflits d'usage.

Ainsi, afin d'établir les tenants et les aboutissants en ce qui a trait à l'agriculture, à l'élevage et à la ressource en eau, plusieurs aspects ont été analysés à propos des :

- dimensions sociale (culture, attitudes, pratiques face aux aléas) et environnementale (caractéristiques biophysiques du territoire) des pays du Sahel;
- événements venant perturber les dimensions sociale et environnementale (p. ex. les caractéristiques de la mousson au Sahel), reposant sur la notion de « risques naturels » telle que définie par les Nations Unies⁶;

⁶ Risques naturels : « [...] phénomènes physiques d'origine naturelle provoqués soit par l'apparition rapide ou progressive de phénomènes d'origine atmosphérique, géologique ou hydrologique se produisant à l'échelle locale, nationale, régionale, mondiale ou à celle du système solaire. Parmi ceux-ci, il convient de citer les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, les glissements de terrains, les tsunamis, les inondations et la sécheresse. » (www.unesco.org/science/disaster/about_disaster_fr.shtml#definition)

- échelles de temps à partir desquelles se produisent ces événements perturbateurs (p. ex. la variabilité intrasaisonnière et interannuelle de la mousson).

Les choix des stratégies d'adaptation devront alors mettre à profit la capacité des populations à gérer certains événements, notamment ceux liés aux caractéristiques climatiques (p. ex. en termes d'intensité, de durée, de fréquence et d'échelle spatiale de l'événement), et leur capacité d'organisation (dimension sociale), ainsi que la gestion et l'utilisation des ressources naturelles (dimension environnementale) pour en réduire les effets.

Avant d'aller plus loin, il est important de définir les trois facteurs ou composantes qui sous-tendent la notion de vulnérabilité et son analyse, à savoir le capital social, le capital environnemental et la dimension événementielle. Les définitions suivantes sont suggérées :

- *Capital social (C_s)* ou dimension sociale : valeur collective de toutes les normes, de toutes les relations sociales, et de tous les réseaux formel et informel d'un système ou d'une organisation sociale permettant la coordination d'actions en vue d'atteindre des objectifs communs (d'après Adger, 2001 et 2003; Pelling et High, 2005);
- *Capital environnemental (C_e)* ou dimension environnementale : représentation de toutes les ressources, et de toutes les caractéristiques géophysiques et environnementales composant un territoire ou un lieu. Ce terme est parfois associé dans la littérature à la biodiversité d'un lieu ou d'un territoire (les ressources naturelles, la qualité de l'environnement, etc.) (cf. figure 2);
- *Événement (E)* ou dimension des événements : une circonstance ou une somme de circonstance qui survient à un moment donné et qui perturbe le capital social et environnemental. L'événement se caractérise par une transition, voire une rupture, dans le cours des choses, et par son caractère relativement soudain ou temporaire, même s'il peut avoir des répercussions par la suite (une fluctuation des prix du marché, un ouragan, une crise politique, etc.). Un événement s'exprime en termes de fréquence et de durée dans le temps et d'étendue spatiale (cf. Robards et Alessa, 2004). Les événements ont un caractère humain, social et environnemental (cf. figure 3).

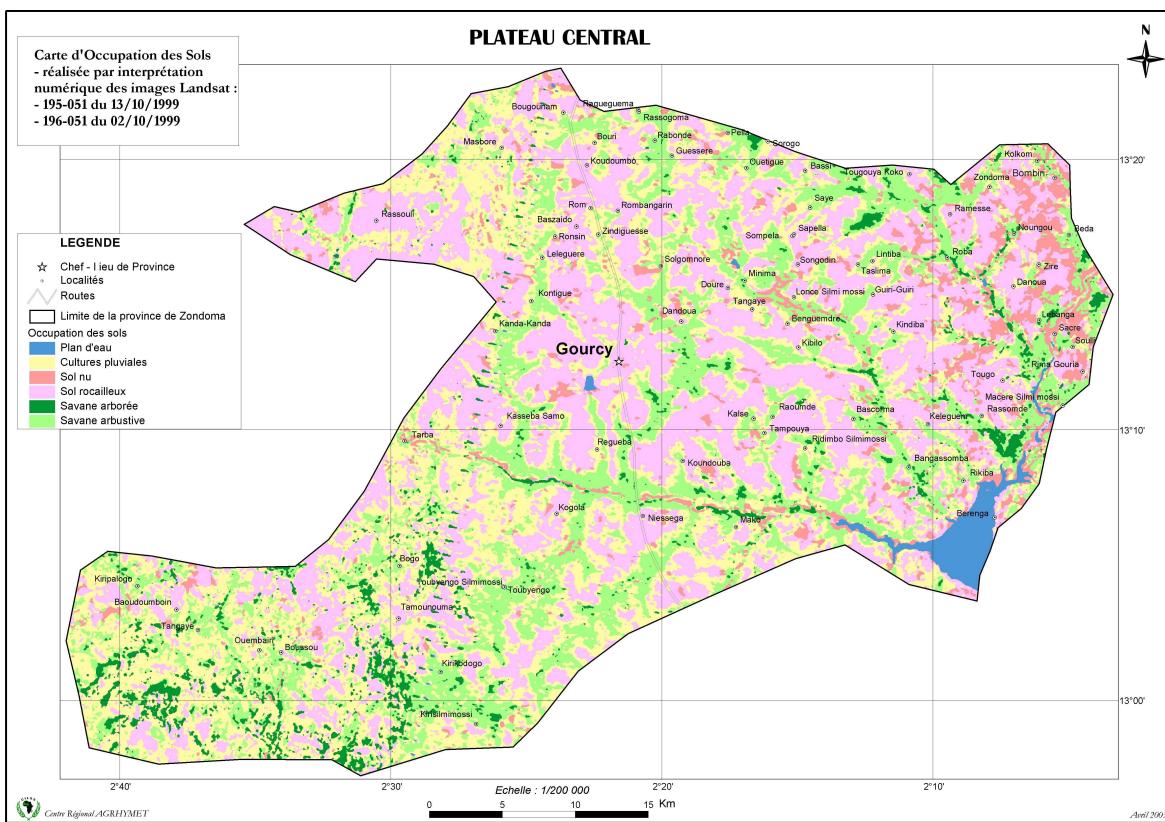


Figure 2. Carte d'occupation des sols (Plateau central – Burkina Faso; source : AGRHYMET, 2005).

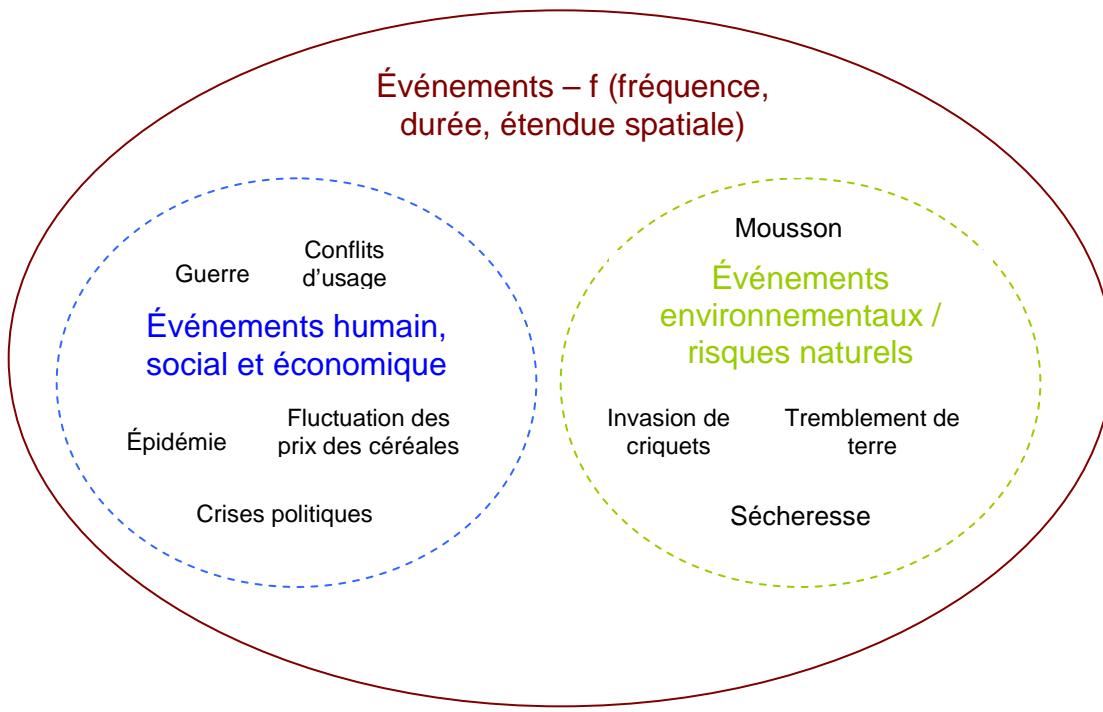


Figure 3. Dimension des événements : représente ce qui peut se produire sur les plans humain, social, économique et environnemental, et qui vient perturber le capital social et environnemental. Elle comprend la notion de « risques naturels ». La délimitation entre les événements humain, social et économique, et environnemental (en pointillé) indique un regroupement de genre seulement, et non une indépendance d'occurrence.

Du cadre conceptuel, la vulnérabilité devient une fonction des dimensions sociale (C_s), environnementale (C_e), événementiel (E) se situant à l'échelle de temps (t) et en regard des aspects ciblés par l'étude de vulnérabilité (l'agriculture, l'élevage, la ressource en eau, etc.) de telle sorte que :

$$V = f\{C_s, C_e, E, t\} \quad (1)$$

Où V est évalué en regard d'aspects ciblés (p. ex. agriculture, élevage, ressource en eau)

Le cadre conceptuel de la vulnérabilité diffère de la définition présentée par le GIEC, car celle-ci tient compte du fait que le système est composé d'humains dans leurs relations sociale et économique sur un territoire ayant des caractéristiques environnementales. L'ensemble de ces caractéristiques constitue les facteurs du système sur lequel se produisent des événements. De plus, afin d'analyser la vulnérabilité, la dimension des événements doit comporter au-delà des événements climatiques, les risques naturels et les événements de nature humaine, sociale et économique qui viennent tous perturber l'équilibre du système à l'étude. Finalement, il convient de connaître en regard de quoi s'effectue l'analyse de la vulnérabilité. Par exemple, s'il est requis d'analyser la vulnérabilité des populations en regard de l'agriculture pluviale, cela nous permet d'encadrer l'analyse du capital social (les attitudes et les pratiques en regard de l'agriculture pluviale), du capital environnemental (les types de sol, la nappe phréatique, l'aménagement du

territoire, etc.), de l'échelle de temps (p. ex. la durée de la saison des pluies) et des événements pouvant s'y produire (p. ex. l'analyse de la variabilité et des extrêmes de la saison des pluies, les conflits politiques). Le cadre conceptuel constitue la base de référence afin d'apprécier la vulnérabilité des populations sahéliennes dans le contexte du présent projet. Toutefois, puisque ce cadre conceptuel diffère de celui défini et proposé par le GIEC et plus particulièrement en ce qui a trait à la vulnérabilité, la prochaine section permet de faire un rappel des bases méthodologiques utilisées dans les études récentes en matière de VIA.

4. Vulnérabilité: évolution récente du cadre conceptuel

La présente section expose les points de vue récents de quelques auteurs et indique l'influence de ceux-ci sur l'évolution du cadre conceptuel de la vulnérabilité, par rapport à la définition suggérée par le GIEC (2001a).

4.1. Cadre conceptuel de Brooks (2003) et d'Adger *et al.* (2004)

Brooks (2003) et Adgers *et al.* (2004) proposent de revoir le cadre conceptuel de la vulnérabilité. Comme le notent ces auteurs, il n'existe aucune définition univoque de la vulnérabilité. Deux grands points de vue s'affrontent. D'une part, le point de vue, qui est celui des sciences sociales, est endogène, car il considère la mesure de la vulnérabilité par rapport aux habiletés humaines ou de la société à affronter les risques naturels. Il exprime la vulnérabilité comme la mesure de l'ensemble des aptitudes socioéconomiques qui permettent d'agir face aux risques naturels. D'autre part, le point de vue, qui est celui des sciences physiques et des experts en analyse des risques naturels, est exogène, car il définit la vulnérabilité à partir de facteurs externes à l'organisation sociale qui viennent en perturber la condition – les impacts. Il exprime la vulnérabilité essentiellement comme la mesure des dommages connus ou appréhendés, causés par des risques naturels sur un territoire ou un lieu donné.

La définition du GIEC (2001a), citée précédemment, se rapproche du point de vue exogène de la vulnérabilité. Toutefois, l'inclusion de la « sensibilité du système » dans la définition se rapproche du point de vue des sciences sociales. La sensibilité du système pouvant être perçue comme une appréciation des conditions inhérentes au système. De ces conditions inhérentes au système, Brooks (2003) et Adgers *et al.* (2004) indiquent que l'habileté humaine en société à faire face aux risques naturels en compose la majeure partie. À partir de là, ils définissent « la vulnérabilité sociale » comme étant l'expression essentielle de la « sensibilité du système » à faire face aux risques naturels. Celle-ci devient alors un déterminant de la vulnérabilité qui intègre alors les points de vue endogène et exogène. Ils proposent alors de définir cette vulnérabilité sous le terme de « vulnérabilité biophysique », ce qui est, selon eux, exprimé par la définition du GIEC.

Le cadre conceptuel de Brooks (2003) et d'Adgers *et al.* (2004) souligne l'importance d'intégrer la dimension sociale – aspect endogène – dans l'évaluation de la vulnérabilité. Il offre également une vision critique de la définition de la vulnérabilité du GIEC qui, selon les auteurs, contient une ambiguïté en ce qui a trait à la dimension sociale de la vulnérabilité. Toutefois, les auteurs ne prennent pas en compte de façon explicite la dimension environnementale dans l'expression de la vulnérabilité. De plus, il ne pose pas correctement le ou les aspects (l'agriculture, l'élevage, etc.) visés par l'étude de vulnérabilité ainsi que l'échelle de temps des événements à laquelle se réfère l'analyse de la vulnérabilité.

En définitive, le cadre conceptuel pose clairement la question de la dimension sociale comme un des déterminants de la vulnérabilité. Il se rapproche de notre base méthodologique en posant l'importance de cette dimension.

4.2. Cadre conceptuel de Füssel et de Klein (2006)

Füssel et Klein (2006) suggèrent que la confusion autour de la notion de vulnérabilité définie par Brooks (2003) et Adger *et al.* (2004) provienne du fait que cette notion est abordée de façon sectorielle, dans le cadre de disciplines et de traditions scientifiques particulières (les sciences sociales, l'analyse de risques naturels, les sciences physiques, etc.). Il y a donc, pour ces auteurs, nécessité de réconcilier les différentes approches afin de favoriser la recherche multidisciplinaire dans les études VIA, sachant que chaque notion prise individuellement, ne peut constituer qu'une partie de la vulnérabilité. Afin d'intégrer chacun des éléments disciplinaires de la vulnérabilité, ces auteurs formulent un cadre conceptuel selon quatre dimensions⁷ : i) le ou les aspects de la vulnérabilité visés par l'étude, nommément les attributs de la vulnérabilité; ii) le lieu socioéconomique et environnemental nommément la sphère d'étude; iii) l'événement d'intérêt selon l'attribut visé; iv) l'échelle de temps correspondant à l'événement d'intérêt.

Dans le récent travail de Füssel et de Klein (2006), une étude complète de l'évolution du cadre conceptuel des études VIA a été réalisée. Ces auteurs aboutissent à des conclusions similaires, c'est-à-dire que les études se sont déplacées de la plus restreinte évaluation des impacts des changements climatiques à des études de vulnérabilité – telles que précédemment décrites – et, plus récemment, vers des études en politiques d'adaptation (« adaptation policy assessment » cf. Füssel, 2005). Les caractéristiques principales en sont la considération des facteurs socioéconomique et humain appelés « non-climatic factor » et la prise en compte de l'analyse de la variabilité climatique dans la mesure de la vulnérabilité (cf. figure 4).

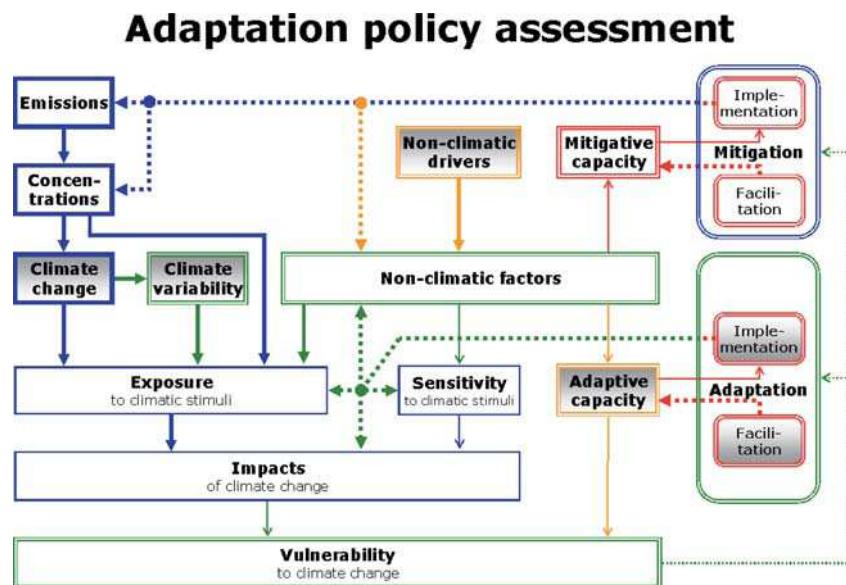


Figure 4. Études sur l'élaboration des politiques d'adaptation – d'après Füssel (2005).

⁷ En fait, Füssel présente un cadre conceptuel plus large qui comporte également un schéma de classification des études et une terminologie afin de concevoir et décrire les études VIA (cf. Füssel et Klein, 2006).

La récente approche proposée par Füssel et Klein (2006) permet d'aborder l'analyse de la vulnérabilité en faisant un inventaire complet des dimensions qui la définissent. En plus de réconcilier les différentes approches en attribuant à chaque contribution leur part respective dans l'évaluation de la vulnérabilité, elle favorise une intégration multidisciplinaire. Elle correspond également à la démarche suggérée compte tenu des objectifs du présent projet. Elle identifie essentiellement les mêmes dimensions – capital social, environnemental, événementiel – que nous avons définies précédemment.

5. Mesure de la vulnérabilité et choix des options d'adaptation

La quantification de la vulnérabilité a fait l'objet de nombreuses recherches. Notons le travail d'Adger *et al.* (2004) qui ont regroupé les causes déterminantes d'origines sociales et environnementales afin de construire des indices et des indicateurs, en insistant sur l'utilisation judicieuse de ceux-ci pour expliquer la vulnérabilité observée face aux désastres d'origine climatique. Notre réflexion s'inspire fortement de cette approche afin de développer des critères pertinents, à l'échelle des communautés locales des pays du Sahel.

À terme, cette approche doit servir de référence afin de déterminer les options d'adaptation. Il s'agit alors d'intégrer les éléments climatiques pertinents (en termes de variabilité, d'extrêmes et de changements plausibles à venir) – cf. Groupe de travail II, Gachon *et al.* – aux préoccupations de l'organisation sociale (les attitudes et les pratiques existantes et ancestrales, la gestion, l'accès et l'utilisation des ressources, etc.) – cf. Groupe de travail III, Lepage *et al.* Si les constituants d'une telle mesure sont assez bien évalués, les populations et leurs décideurs seront à même d'agir afin de réduire de façon ciblée leur vulnérabilité face aux aléas du climat. Également, elle permettra de considérer la possibilité que ces options d'adaptation soient applicables à d'autres territoires si, toutefois, les principales caractéristiques de la vulnérabilité s'y retrouvent.

La représentation et la mesure de la vulnérabilité doivent ultimement permettre le transfert des connaissances et de l'information de nature scientifique en action sur le terrain. Le but est de fournir aux populations et aux décideurs des outils afin de déterminer les différentes options d'adaptation et de faciliter leur mise en œuvre. Ces outils doivent, en regard de l'analyse des composantes de la vulnérabilité, comprendre un tant soit peu une description assez poussée du contexte humain, social, environnemental et événementiel afin de faire un usage le plus optimal possible des résultats de nos recherches.

Récemment, quelques auteurs se sont penchés sur une formulation analytique de la vulnérabilité (cf. Robards et Alessa, 2004; Metzger *et al.*, 2005; Ionescu *et al.*, 2005). Il s'agit de bâtir une relation de la forme $V = f\{X_1, X_2, X_3, \dots\}$ où X_1, X_2, X_3, \dots représentent les différentes dimensions (socioéconomique, humaine, environnementale et événementielle) de la vulnérabilité. La formulation de la vulnérabilité exprime alors l'habileté humaine et sociale à agir face aux aléas socioéconomiques, humains et environnementaux des changements climatiques. Elle considère également, à partir d'une situation de vulnérabilité donnée, l'adaptation comme un processus dynamique dans lequel il n'y a pas de solutions définitives, mais qui comprend plutôt l'adoption de mesures qui orientent l'adaptation dans la bonne direction. Elle doit permettre d'identifier les besoins immédiats en adaptation et bâtir un niveau de tolérance accrue pour l'avenir (cf. Adger *et al.*, 2004). Afin d'arriver à cette formulation analytique, il est nécessaire de définir l'adaptation et la capacité d'adaptation et d'établir les liens avec la notion de vulnérabilité. Les définitions présentées ci-dessous sont fondées sur le rapport

du GIEC (2001a) et les récentes études d'Adger (2001 et 2003), d'Adger *et al.* (2004) et de Luers (2005) :

- *Adaptation (Ad) : processus social dynamique qui évalue l'habileté à agir collectivement face aux dommages, aux torts ou aux blessures à la suite d'un événement ou d'événements auxquels un système naturel ou anthropique est confronté;*
- *Capacité d'adaptation (CAd) : processus social dynamique qui évalue l'habileté à agir collectivement dans le but de mieux répondre aux événements environnementaux appréhendés, et, ainsi, de réduire la vulnérabilité et de favoriser le développement durable.*

Brooks (2003) établit une relation entre l'adaptation et la vulnérabilité actuelle et future. Dans le contexte d'un processus dynamique de réduction de la vulnérabilité, l'adaptation représente la différence entre la vulnérabilité actuelle et une vulnérabilité *potentielle* dans un futur donné, selon la formule suivante :

$$Ad(t) = V_0 - Vp(t) \text{ (tiré de Brooks, 2003)} \quad (2)$$

où V_0 est la vulnérabilité initiale du système à l'étude
 $Vp(t)$ est la vulnérabilité potentielle à un temps t issue du processus d'adaptation
 $Ad(t)$ est le processus d'adaptation durant le temps t

À partir de 2, on peut tirer une fonction d'évolution de la vulnérabilité en fonction du temps telle que :

$$Ad(t) = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

Maintenant, on peut représenter la capacité d'adaptation en regard de l'adaptation et de la vulnérabilité. Luers *et al.* (2003) ont récemment posé comme hypothèse que la capacité d'adaptation est une situation particulière de l'adaptation. Les auteurs en arrivent à identifier deux dimensions principales définissant la vulnérabilité. Les prochaines sections exposent les résultats de leur travail à ce propos.

5.1. Mesure de la vulnérabilité (Luers *et al.*, 2003; Luers, 2005)

Dimension 1; Sensibilité et probabilité d'exposition

Luers *et al.* (2003) et Luers (2005) décrivent en premier lieu la vulnérabilité d'un système comme étant la conséquence de facteurs exogènes et endogènes appliqués sur lui. Par facteurs exogènes, ils considèrent tous les facteurs externes venant potentiellement perturber ou endommager plus ou moins fortement le système (p. ex. la variabilité climatique, la fluctuation des prix du marché) selon une « probabilité d'exposition ». Les facteurs endogènes ou « sensibilité » du système sont les caractéristiques internes du système telles que la fertilité des sols, la gestion du pâturage, les infrastructures routières, etc.

Dimension 2; État du système relatif à son seuil de dommage

La vulnérabilité d'un système doit être évaluée par rapport à sa sensibilité relative à un seuil de dommage au-delà duquel ce système ne peut récupérer son état premier. Par exemple, la production agricole minimale par agriculteur nécessaire afin de lui assurer une certaine pérennité. Selon Luers *et al.* (2003) et Luers (2005), un tel aspect est souvent subjectif, mais permet tout de même de créer un cadre de référence afin de délimiter l'espace dans lequel se situe la vulnérabilité.

En ces termes, la vulnérabilité peut donc être définie comme suit (Luers *et al.*, 2003; Luers, 2005) :

$$V = f \left\{ \frac{(\text{sensibilité, probabilité d'exposition})}{\text{état du système} / \text{seuil de dommage}} \right\} \quad (4)$$

De 4, les auteurs expriment la fonction de vulnérabilité dans un espace à trois dimensions, tel que celle-ci y représente une surface dans ce volume. À l'examen de cette surface, on constate que la vulnérabilité n'est pas une surface plane – cf. figure 5. Il est important de constater que, sous certaines conditions initiales, la vulnérabilité varie rapidement pour ensuite ne varier que plus lentement.

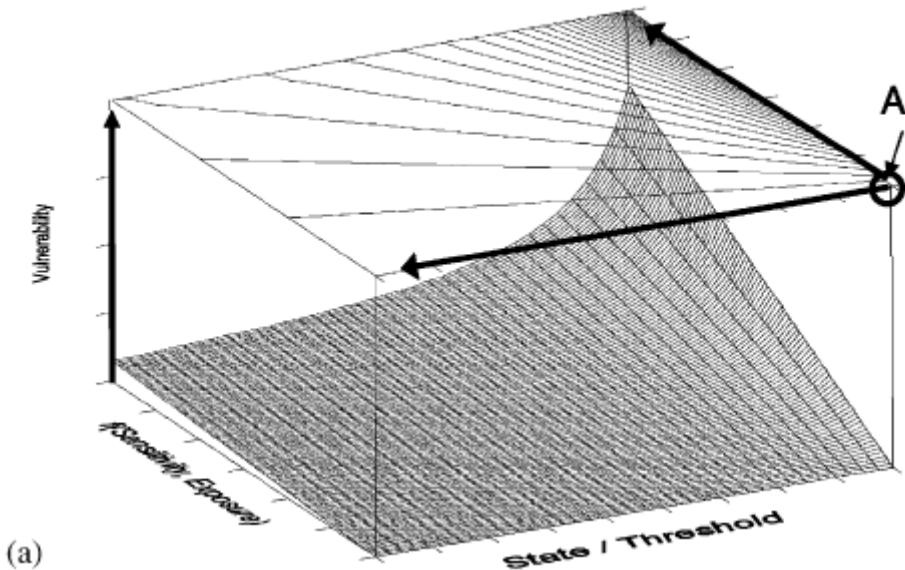


Figure 5. Surface de vulnérabilité (Luers, 2005).

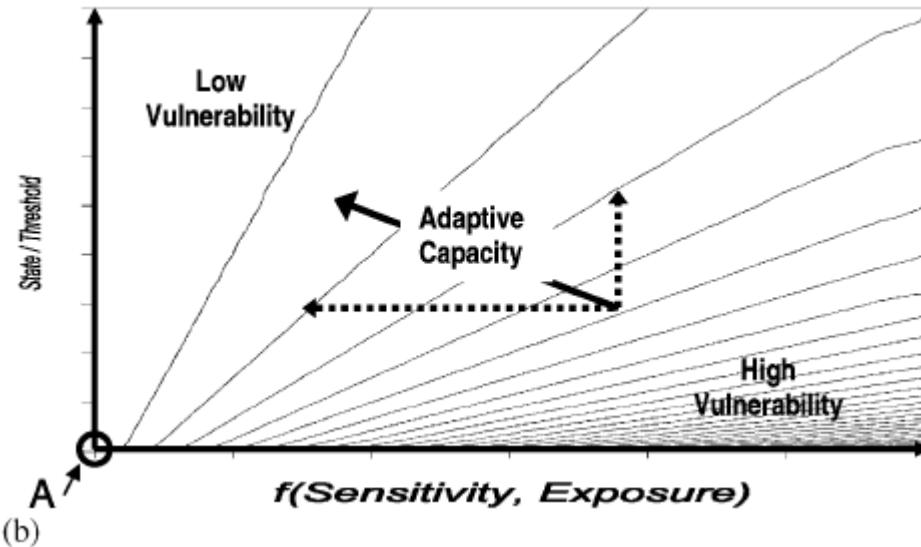


Figure 6. Idem à la figure 5, mais ramené à un plan (Luers, 2005).

Les auteurs font également une représentation en deux dimensions de cette surface pour en arriver à la figure 6. À partir de cette figure, notons que la capacité d'adaptation est un vecteur orienté vers la plus basse vulnérabilité. La résultante est la somme (vectorielle) des vecteurs; « État du système relatif à son seuil de dommage » (*Er_domm*) et « sensibilité et probabilité d'exposition » (*Sens_exp*). La capacité d'adaptation peut alors s'exprimer ainsi :

$$\vec{C}_{ad} = \vec{E}_{r_domm} + \vec{S}_{ens_exp} \quad (5)$$

L'orientation du vecteur \vec{C}_{ad} vers une vulnérabilité minimale dépendra de la somme vectorielle de \vec{E}_{r_domm} , et \vec{S}_{ens_exp} . \vec{C}_{ad} pointerà vers une valeur minimale de la vulnérabilité seulement sous des conditions particulières d'orientation et de longueur des vecteurs \vec{E}_{r_domm} et \vec{S}_{ens_exp} , telle que l'indique la figure 6.

De même, nous pouvons constater, sur la figure 6, que l'adaptation, contrairement à la capacité d'adaptation, ne suppose aucunement un parcours optimisé vers les valeurs minimales de vulnérabilité. En effet, des options d'adaptation choisies sans tenir compte des meilleures solutions dans le contexte du territoire ou du système à l'étude, et dans le contexte de la figure 6 des conditions *Er_domm* et *Sens_exp*, pourraient nous déplacer selon des lignes de vulnérabilité constante et même, dans le pire des cas, vers des valeurs de vulnérabilité plus forte.

Nous pouvons nous inspirer d'une telle démarche, à partir de l'espace que nous avons défini à la section 4, afin d'imposer que les choix d'options d'adaptation optimisent le parcours de réduction de la vulnérabilité de telle sorte que nous nous retrouvions constamment à un minimum relatif tel que :

$$Cad = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (6)$$

où $V \rightarrow 0$

Il est à noter qu'un tel choix du « meilleur parcours » le long de minimums relatifs met de l'avant le caractère dynamique du processus d'adaptation tel que décrit à la section 2 – l'apprentissage par la pratique et l'adaptation par un processus successif de choix optimaux – vers un minimum absolu de vulnérabilité. Il est alors possible de décrire, de façon analytique, la variation locale de la vulnérabilité selon l'expression suivante :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\left(\frac{dE}{dt} + \frac{dCs}{dt} + \frac{dCe}{dt}\right) * \left(\frac{\partial V}{\partial E} + \frac{\partial V}{\partial C_s} + \frac{\partial V}{\partial C_e}\right) \quad (7)$$

(cf. annexe A pour obtenir plus de précisions)

La fonction analytique qui décrit l'évolution locale de la vulnérabilité est composée de deux termes. Un premier terme, $\left(\frac{\partial V}{\partial E} + \frac{\partial V}{\partial Cs} + \frac{\partial V}{\partial Ce}\right)$ est dépendant des conditions locales initiales de Cs, Ce, E , et un second terme, $\frac{dE}{dt} + \frac{dCs}{dt} + \frac{dCe}{dt}$ représente l'évolution temporelle de Cs, Ce, E . Les deux prochaines sections présentent l'interprétation de ces termes en fonction de la méthodologie que nous proposons.

5.2. Interprétation des termes

$$\bullet \quad \left(\frac{\partial V}{\partial E} + \frac{\partial V}{\partial Cs} + \frac{\partial V}{\partial Ce}\right) \quad (8)$$

Le présent terme indique qu'il est possible de mesurer la vulnérabilité locale des populations en évaluant les caractéristiques de C_s (capital social) et C_e (capital environnemental) et E (fonction probabiliste d'événement). Luers *et al.* 2003 fournissent un exemple de cette représentation tel que donné à la figure 7 – cf. annexe B pour obtenir des précisions.

Il correspond également aux travaux effectués par les groupes de travail du présent projet, lequel permet l'analyse de l'état actuel en ce qui a trait au C_s (cf. Groupe de travail III, Lepage et al. 2007 : Vulnérabilité des populations et adaptation aux variabilités climatiques au Sahel : acteurs, institutions et dynamiques locales) par l'analyse des acteurs, des institutions et des dynamiques locales, au C_e par les travaux effectués (cf. figure 2, carte d'occupation des sols) par AGRHYMET dans le cadre de la mise en œuvre des projets-pilotes et E par l'analyse des événements liés à la mousson (cf. Groupe de travail II, Gachon et al. 2007 : Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation).

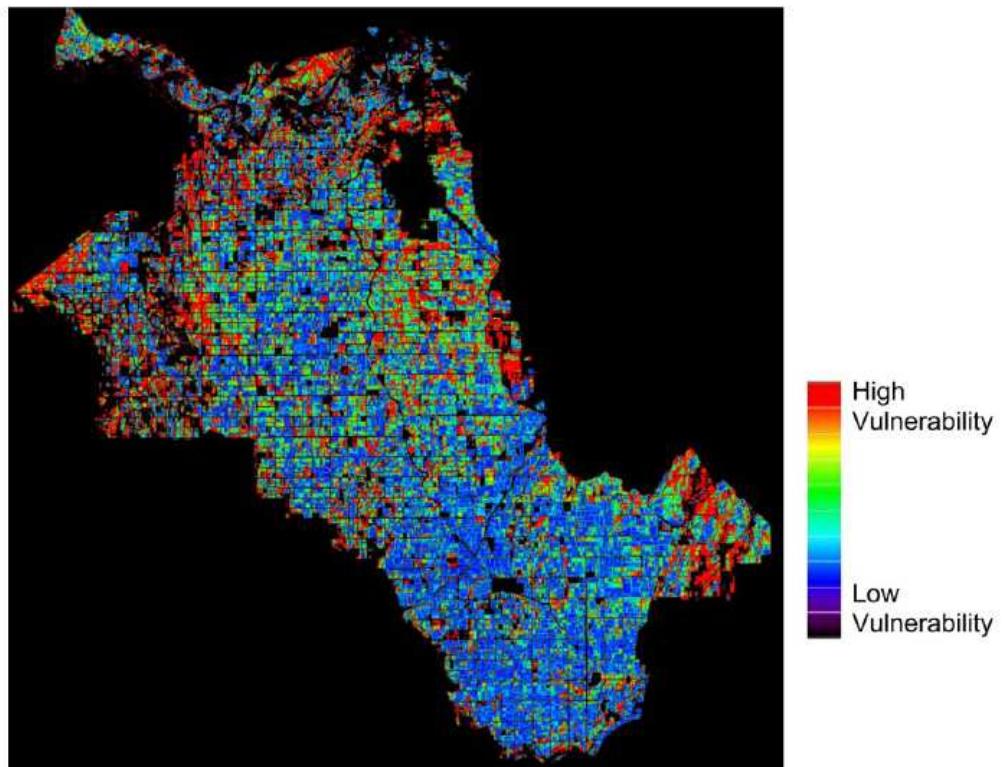


Fig. 3. Vulnerability, Yaqui Valley irrigation district. The most vulnerable are shown in red and the least vulnerable in dark blue.

Figure 7. Distribution spatiale de la vulnérabilité sur le territoire – Tirée de Luers et al., 2003.

$$\bullet \quad \frac{dE}{dt} + \frac{dCs}{dt} + \frac{dCe}{dt} \quad (9)$$

Ce terme indique que l'évolution de la vulnérabilité à partir d'un état initial, $(\frac{\partial V}{\partial E} + \frac{\partial V}{\partial Cs} + \frac{\partial V}{\partial Ce})_{t=0}$, est dépendant des changements se produisant ou induits aux trois dimensions que nous avons définies précédemment, soit Cs, Ce, E .

Ce qui précède nous indique que, si l'on souhaite diminuer la vulnérabilité de façon optimale, le choix des options d'adaptation doit agir ou prendre en compte les changements à venir à Cs, Ce, E .

Dans cette optique, Lobell *et al.* (2002 et 2003) ont suggéré que, dans le contexte de l'agriculture au Mexique (Vallée Yaqui), plus de 80 p. 100 de la variance dans le rendement agricole s'explique par la gestion et la mise en œuvre des pratiques agricoles – la dimension capitale sociale. La quête de l'autosuffisance alimentaire n'est donc pas seulement fonction de la variabilité du climat et des changements potentiels à venir – la dimension événementielle (E), mais elle est liée de façon intrinsèque à la bonne gestion et aux pratiques culturales adéquates (*i.e.* cette relation intuitive entre le rendement agricole et la bonne gestion des pratiques agricoles est dans ce cas quantifiée à l'échelle du territoire étudié). Dans le cas présenté par Lobell *et al.* (2003), les paysans mexicains devront être en mesure de mettre en place de meilleures pratiques agricoles et une saine gestion agricole avant d'espérer atteindre une meilleure qualité de vie et

réduire leur vulnérabilité. Cela exige une connaissance de la dynamique sociale via, par exemple, une analyse et une bonne compréhension des processus de prise de décision et du cadre formel d'action ainsi qu'un accès aux ressources matérielles afin d'optimiser l'implantation des stratégies d'adaptation pertinentes à l'échelle des populations locales. La fonction analytique suggérée plus haut exige alors une analyse détaillée des dimensions sociales, environnementales et événementielles et nécessite d'intégrer les différents facteurs afin d'en arriver à un choix judicieux des options d'adaptation. Les groupes de travail II et III (cf. Groupe de travail II : Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation et Groupe de travail III : Vulnérabilité des populations et adaptation aux variabilités climatiques au Sahel : acteurs, institutions et dynamiques locales) se penchent sur les caractéristiques futures de ces dimensions par l'intermédiaire, par exemple, de la mise à l'échelle statistique et de l'analyse des relations entre acteurs.

6. Conclusion

Dans le cadre du projet « Appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques au Sahel », une méthodologie est proposée afin de procéder aux études VIA, ainsi qu'un cadre conceptuel. Alors qu'une première génération d'études mettait l'accent sur les impacts des changements climatiques au détriment de la vulnérabilité et de l'adaptation, celles-ci ont néanmoins permis de jeter les bases afin de raffiner les mesures de mitigation et de stabilisation des gaz à effets de serre. Au cours des dernières années, une définition plus globale de la notion de vulnérabilité s'est développée, laquelle tient compte des aspects socioéconomiques, humains et environnementaux comme facteurs déterminants vis-à-vis de la capacité à s'adapter face à un climat en changement. Une telle approche, dite « vulnerability-led », est celle qui est suggérée dans le présent projet avec de l'information récoltée à la fois dans le domaine de « l'analyse du climat actuel et de sa variabilité » et dans le domaine socioéconomique via des « projets pilotes et des enquêtes sur le terrain ».

L'approche analytique présentée permet de définir une méthode de mesure de la réduction de la vulnérabilité qui optimise le choix des options d'adaptation. Cette méthode permet de définir « l'évolution optimale » vers une vulnérabilité minimale d'un système en réponse à des événements « perturbateurs ». Cette évolution optimale, définie comme la capacité d'adaptation, nécessite de connaître la répartition de la vulnérabilité en fonction du capital social, du capital environnemental et des événements probables pouvant survenir à l'échelle locale en un temps donné. Selon les échelles de temps considérées, la contribution de chacun de ces facteurs devra être évaluée afin de procéder au choix des meilleures options d'adaptation. L'approche proposée rejoint les objectifs du PNUD et du cadre d'analyse de la vulnérabilité face aux changements climatiques (PNUD/GEF, 2001; idem, 2004) en permettant d'établir les éléments essentiels d'une adaptation dynamique depuis l'analyse et la récente expérience acquise et une intégration progressive des enjeux liés aux changements climatiques à venir.

Il s'agit alors d'intégrer les éléments climatiques pertinents (en termes de variabilité, d'extrêmes et de changements plausibles à venir) aux préoccupations de l'organisation sociale (les attitudes et les pratiques existantes et ancestrales, la gestion, l'accès et l'utilisation des ressources, etc.). Si les constituants d'une telle mesure sont assez bien évalués, les populations et leurs décideurs seront à même d'agir afin de réduire de façon ciblée leur vulnérabilité face aux aléas du climat. Également, elle permettra de considérer la possibilité que les options d'adaptation soient applicables à d'autres territoires si, toutefois, les principales caractéristiques de la vulnérabilité s'y retrouvent.

Références

- Adger, N. W., N. Brooks, G. Bentham, M. Agnew et S. Eriksen. 2004. *New Indicators of Vulnerability, Technical report 7*, Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research, 128 p.
- Adger, N. W. 2003. « Social Capital, Collective Action, and Adaptation to Climate Change », *Economic Geographer*, vol. 79, n° 4, p. 387-404.
- Adger, N. W. 2001. *Social Capital and Climate Change*, Norwich: Tyndall Center for Climate Change Research, School of Environmental Sciences University of East Anglia, 19 p.
- Benioff, R., S. Guill et J. Lee. 1996. *Vulnerability and Adaptation Assessments: An International Guidebook*, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 200 p.
- Brooks, N. 2003. *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework, Working Paper 38*, Norwich : Tyndall Centre for Climate Change Research, 20 p.
- Bokoye, A. I., J. Milton, G. Vigeant, P. Gachon et A. Cotnoir. 2005. *Les indices climatiques – Appui à l'élaboration d'indices climatiques pertinents en milieu sahélien*, Montréal : Environnement Canada, 50 p.
- Burton, I., S. Huq, B. Lim, O. Pilifosova et E. L. Schipper. 2002. « From Impacts Assessment to Adaptation Priorities: The Shaping of Adaptation Policies », *Climate Policy*, vol. 2, p. 145-159.
- Füssel, H.-M.. 2005. *Vulnerability in Climate Change Research: A Comprehensive Conceptual Framework: University of California International and Area Studies, Breslauer Symposium* (Breslauer, le 1^{er} décembre 2005), Pabol Alto: Stanford University, 36 p.
- Füssel, H.-M., et R. J.T. Klein. 2006. « Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking », *Climatic Change*, vol. 75, n° 3, p. 301-329.
- GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat). 2001a. *Bilan 2001 des changements climatiques: conséquences, adaptation et vulnérabilité*, Cambridge : Cambridge University Press, 101 p.
- GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat). 1994. *IPCC technical guidelines for assessing impacts of climate change. IPCC Special Report CGER-1015-94*, Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO, UNEP, 59 p.
- Fischer, G., M. Shah, F. Tubiello et H. Van Velhuizen. 2005. « Socio-economic and Climate Change Impacts on Agriculture: An Integrated Assessment, 1990-2080 », *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, vol. 360, n° 1463, p. 2067-2083.
- Ionescu, C., R. J.T. Klein, J. Hinkel, K. Kumar et R. Klein. 2005. *Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change*, Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 20 p.
- Janssen, M., M. Schoon, W. Ke et K. Börner. 2005. « Scholarly Networks on Resilience, Vulnerability and Adaptation within the Human Dimensions of Global Environmental Change », *Global Environmental Change*, vol. 16, n° 3, p. 240-252.
- Kates, R., J. H. Ausubel et M. Berberian. 1985. « Climate Impact Assessment: Studies of the Interaction of Climate and Society », *Geographical Review*, vol. 77, n° 3, p. 382-385.
- Lang, S. 1973. « Calculus of Several Variables», Addison-Wesley, Reading, 376 pages.
- Leichenko, R. M., et K. O'Brien. 2002. « The Dynamics of Rural Vulnerability to Global Change: The Case of Southern Africa ». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 7, p. 1-18.
- Lobell, D. B., G. P. Asner, I. J. Ortiz-Monasterio et T. Benning. 2003. « Remote Sensing of Regional Crop Production in the Yaqui Valley, Mexico: Estimates and Uncertainties », *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, vol. 94, p. 205-220.

- Lobell, D B., I J. Ortiz-Monasterio, L C. Addams et I J. Asner. 2002. « Soil, Climate and Management Impacts on Regional Wheat Productivity in Mexico from Remote Sensing ». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 114, p. 31-43.
- Luers, A, D B. Lobell, L S. Sklar, L C. Addams et P A. Matson. 2003. « A Method for Quantifying Vulnerability, Applied to the Agricultural System of the Yaqui Valley, Mexico », *Global Environmental Change*, vol. 13, n° 4, p. 255-267.
- Luers, A. 2005. « The Surface of Vulnerability: An Analytical Framework for Examining Environmental Change », *Global Environmental Change*, vol. 15, n° 3, p. 214-223.
- Metzger, M. J., R. Leemans et D. Schröter. 2005. « A Multidisciplinary Multi-scale Framework for Assessing Vulnerabilities to Global Change », *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 7, p. 253-267.
- ONU (Organisation des Nations Unies). 1999. *Compendium of Decision Tools to Evaluate Strategies for Adaptation to Climate Change*, New York: Secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 49 p.
- ONU (Organisation des Nations Unies). 1995. *Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*, New York : Secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 25 p.
- Pelling, M. et High, C. 2005. « Understanding Adaptation: What can Social Capital Offer Assessments of Adaptive Capacity? », *Global Environmental Change Part A*, vol. 15, n° 4, p. 1-12.
- PNUD/GEF (Programme des Nations Unies pour le Développement). 2004. *Cadre de politiques d'adaptation CPA : renforcement des capacités pour les activités d'adaptation*. New York : Organisation des Nations Unies.
- PNUD/GEF (Programme des Nations Unies pour le Développement). 2003. *User's Guidebook for the Adaptation Policy Framework*, New York: Organisation des Nations Unies, 36 p.
- PNUD/GEF (Programme des Nations Unies pour le Développement). 2001. *Cadre de politiques d'adaptation (CPA) : renforcement des capacités pour les activités d'adaptation*, New York : Organisation des Nations Unies, 61 p.
- Robards, M., et L. Alessa. 2004. « Timescapes of Community Resilience and Vulnerability in the Circumpolar North », *Arctic*, vol. 57, n° 4, p. 415-427.

ANNEXE A. Formulation analytique de la vulnérabilité

La formulation de la vulnérabilité doit exprimer l'habileté humaine et sociale à agir face aux aléas socioéconomiques, humains et environnementaux des changements climatiques. À partir des définitions du capital social (C_s), du capital environnemental (C_e) et de la dimension événementielle (E), il est possible de constituer cette formulation analytique, relationnelle pour la vulnérabilité telle que :

$$V = f\{C_s, C_e, E, t\} \quad (1)$$

Par la suite, nous utilisons la relation entre l'adaptation et la vulnérabilité d'une part et entre la capacité d'adaptation d'autre part afin d'obtenir les fonctions analytiques suivantes

$$Ad = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2)$$

$$Cad = \frac{\Delta V}{\Delta t} \text{ où } V \rightarrow 0 \quad (3)$$

À noter la différence entre 2 et 3, cette dernière est un cas particulier de 4 et décrit « l'évolution optimale » vers une vulnérabilité minimale d'un système en réponse à des événements perturbateurs. En ce sens, cette évolution optimale devra comporter les meilleures options d'adaptation à toutes les échelles de temps afin de réduire la vulnérabilité.

Sous certaines conditions ($\lim. \Delta t \rightarrow 0$), 2 peut être exprimé comme :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt} \text{ pour } \Delta t \rightarrow 0 \quad (4)$$

De telle sorte que nous aurons, en suivant la règle « Chain Rule» tel que présenté dans Lang (1973) :

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial E}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial E} + \frac{\partial C_s}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial C_s} + \frac{\partial C_e}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial C_e} + \frac{\partial f}{\partial t} + R \quad (5)$$

R représente le résiduel issu des dérivées d'ordre supérieur. En première approximation, nous posons que R est négligeable. Si nous suivons un parcours optimal, nous nous retrouvons en condition d'extremums relatifs, alors :

$$\frac{df}{dt} = 0$$

Et nous avons un système en situation de quasi-équilibre tel que :

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\left(\frac{dE}{dt} \frac{\partial f}{\partial E} + \frac{dC_s}{dt} \frac{\partial f}{\partial C_s} + \frac{dC_e}{dt} \frac{\partial f}{\partial C_e}\right) \quad (6)$$

Nous aurons donc :

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\left(\frac{dE}{dt} + \frac{dC_s}{dt} + \frac{dC_e}{dt}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial E} + \frac{\partial f}{\partial C_s} + \frac{\partial f}{\partial C_e}\right) \quad (7)$$

À partir de 7, la valeur de f , pour chacune des variations locales, est la vulnérabilité en ce point dans le domaine E, C_s, C_e , nous aurons :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\left(\frac{dE}{dt} + \frac{dC_s}{dt} + \frac{dC_e}{dt}\right) * \left(\frac{\partial V}{\partial E} + \frac{\partial V}{\partial C_s} + \frac{\partial V}{\partial C_e}\right) \quad (8)$$

ANNEXE B. Mesure des composantes de la vulnérabilité - travaux de Luers *et al.*, 2003, et de Luers, 2005

Les recherches du présent groupe sont particulièrement intéressantes, car celui-ci tente en premier lieu, à partir d'une analyse exhaustive de la définition de la vulnérabilité telle que fournie dans la littérature sur la gestion de risques et des études sur l'analyse de la sécurité alimentaire, d'en extraire les composantes fondamentales (Luers *et al.*, 2003; Luers, 2005), puis de représenter, parfois de modéliser, et de quantifier la vulnérabilité – voir la section 5.

L'application d'une telle méthode à l'évaluation de la vulnérabilité des agriculteurs de la vallée Yaqui, au Mexique, fournit un bel exemple de l'importance d'optimiser les choix d'option d'adaptation– voir Luers *et al.* 2003; Luers, 2005. En effet, les auteurs en arrivent à définir la fonction de vulnérabilité régionale suivante :

$$V_{rég} = \int \left(\frac{\left| \frac{\partial Y}{\partial T} \right|}{Y/Y_0} \right) P_T dT \quad (\text{Luers } et \text{ al., 2003}) \quad (1)$$

Y est la production de blé en tonnes par hectare

Y₀ est le seuil de production afin d'assurer la pérennité de la ferme

T la température minimale moyenne de la nuit

P_T est la probabilité de la température T

D'une telle analyse, les auteurs tirent les conclusions suivantes :

1. L'aspect dominant de la vulnérabilité *actuelle* est la *qualité* de gestion des fermes, peu importe la fertilité des sols – l'aspect gouvernance et la prise de décision. La fertilité des sols joue un rôle plus important lorsqu'il s'agit de fermes en difficulté de gestion où le sol est pauvre;
2. Dans l'analyse de la variation temporelle de la vulnérabilité sur 20 ans, les fluctuations des prix du marché du blé dominent (30 p. 100 de la variation appréhendée), tandis que la variation de la température (augmentation simulée d'un degré) tient pour environ 10 p. 100 de la variation de la vulnérabilité.

– pour obtenir des précisions sur les conclusions, voir Luers *et al.*, 2003 –

Grâce à une telle analyse, il devient possible de passer de la recherche à l'action sur le terrain. En effet, les choix d'option d'adaptation, pour ce territoire, tiendront compte en premier lieu des aspects « gouvernance et prise de décision ». En ce qui a trait aux options d'adaptation sur une période de temps plus longue, des mesures devront être prises afin de compenser les conséquences du *libre marché* sur la vulnérabilité des agriculteurs et, dans une moindre mesure, sur les paquets technologiques permettant de compenser ou d'optimiser le réchauffement des températures. Les options d'adaptation susmentionnées sont données en guise d'exemple seulement afin de démontrer la pertinence de cette approche analytique. Notons que la pertinence d'options d'adaptation pour un territoire ou un cas à l'étude est pertinente pour un autre territoire ou un cas à l'étude en autant que les *caractéristiques* de vulnérabilité de l'un soient applicables à l'autre endroit.

ANNEXE C. Les indices climatiques, biophysiques et de vulnérabilité

Avant propos

La présente annexe expose une synthèse des différents indices utilisés pour caractériser la variabilité et les extrêmes climatiques ainsi que ceux permettant le suivi des processus liés à l'atmosphère, à l'hydrosphère ou à la biosphère. De même, des indices utilisés pour caractériser la vulnérabilité des populations ou de l'environnement et ceux liés à l'activité économique. Ces indices permettent de synthétiser l'information associée à différents phénomènes, *i.e.* météorologiques, climatiques, biophysiques ou, plus généralement, d'origine naturelle ou anthropique, caractérisés par une ampleur, une durée et une fréquence variable. Selon les auteurs, les secteurs d'activités et les effets envisagés sur le territoire, la définition de ces indices varie, même si un effort d'uniformisation a eu lieu à l'échelle internationale ces dernières années, notamment pour la définition des indices climatiques d'extrêmes. Par exemple, ces derniers ont été développés afin de servir d'outil pour caractériser le climat (la variabilité et le changement) et ses effets tangibles sur l'environnement et les activités humaines. Il est important de préciser que le terme d'indicateur correspond à une combinaison multivariée d'un ou de plusieurs indices.

Dans cette annexe, les indices présentés regroupent ceux qui sont potentiellement les plus pertinents afin d'entreprendre des analyses climatiques, environnementales et socio-économiques dans le contexte des pays du Sahel.

La présente annexe est tirée d'un rapport interne préparé par Amadou Idrissa Bokoye, Ph.D., dans le cadre des travaux de préparation de la partie canadienne – Environnement Canada – au présent projet (Bokoye *et al.*, 2005). Le lecteur est invité à consulter le rapport complet au besoin.

1. Introduction

Plusieurs initiatives internationales (Karl *et al.*, 1999) ont abouti à l'élaboration de forums et de mises en place de système de gestion de données climatiques et de suivi des changements climatiques en cours, dans le but de faciliter les recherches sur les impacts et l'adaptation face aux changements climatiques. On peut citer l'initiative du Global Analysis of Extremes coordonnée par la Commission de climatologie (CCI) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), de l'équipe d'experts intitulée « Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices » (ETCCDMI) [<http://www.clivar.org/organization/etcccd>] associée au projet CLIVAR (Climate Variability & Predictability) dans le cadre du Word Climate Research Programme (WRCP). Une des missions de cette équipe d'experts est la coordination internationale pour le développement d'une série d'indices climatiques établis à partir des données journalières qui permettent d'analyser les extrêmes climatiques (Peterson, 2001). Le site Web <http://cccma.sesos.uvic.ca/ETCCDMI> fournit une liste de 27 indices [http://cccma.sesos.uvic.ca/ETCCDMI/list_27_indices.html] et un logiciel (RClimindex : <http://cccma.sesos.uvic.ca/ETCCDMI/software.html>) pour leur traitement. Le programme ouvert Open Programme Area Groups (OPAG : <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wmo/ccl/index.html>) est une autre initiative de l'OMM qui contribue à l'établissement d'indices climatiques et à la mise en place de bases de données fiables pour des besoins d'analyse. Des initiatives régionales comme le projet européen STARDEX (Statistical and Regional Dynamical Downscaling of Extremes for European regions) ou Asian Pacific Network (APN) ont également permis d'élaborer ou de raffiner les indices existants pour la détection des événements climatiques extrêmes et leur analyse ou leur validation à partir des résultats des modèles climatiques ou des différences de réduction d'échelle statistique. Par exemple, l'utilisation de plusieurs séries d'indices d'extrêmes de température et de précipitation ont permis non seulement d'analyser la variabilité récente observée au cours des dernières décennies dans plusieurs régions du globe, mais également de valider la performance des modèles climatiques régionaux et/ou des méthodes de mise à l'échelle statistique (cf. les travaux, en Europe de Haylock et Goodess, 2004, de Haylock *et al.*, 2006, et Schmidli *et al.*, 2007, ainsi que, au Canada, de Vincent et Mekis, 2006, et de Gachon *et al.*, 2005).

L'analyse des changements climatiques et de ses impacts nécessite des analyses à l'échelle régionale et pas uniquement à l'échelle mondiale ou pancontinentale. Dans ce contexte, les travaux de Frich *et al.* (2002) ont révélé que plusieurs grandes régions du monde restent sous-analysées en ce qui concerne la variabilité climatique et que le développement d'indicateurs climatiques régionaux n'a pas encore débuté de façon uniforme. Par exemple, la compréhension du cycle de la mousson en Afrique de l'Ouest reste encore aujourd'hui un défi majeur pour la communauté scientifique et nécessite une approche multidisciplinaire comme tenu de la complexité des phénomènes en jeu (cf. Groupe de travail II). Les projets internationaux AMMA (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine) et PROMISE (Predictability and variability of Monsoons, and the agricultural and hydrological Impacts of climate change) tentent d'améliorer les connaissances de la variabilité de la mousson et de la simulation de celle-ci à moyenne échéance.

Dans le but de répondre aux objectifs du présent projet, la présente annexe a pour objet de résumer les indices climatiques existants et les plus appropriés pour des applications spécifiques dans les régions sahéliennes. De plus, quelques indicateurs pertinents sont également présentés.

3. Les indices climatiques et de nature non climatique

a. Concept général

Selon Bond *et al.* (2005), les indices climatiques sont utilisés généralement par les scientifiques dans leur tentative de caractériser et de comprendre divers processus climatiques liés au temps que nous vivons au quotidien et d'effectuer le suivi des fluctuations des éléments météorologiques à long terme. À l'instar de l'indice Dow Jones qui traduit les fluctuations des marchés boursiers suivant la valeur des actions, les indices climatiques sont utilisés pour représenter l'essentiel des éléments du climat qui influencent directement et indirectement les conditions environnementales et l'activité humaine.

Plusieurs indices combinant des paramètres météorologiques, climatiques, socioéconomiques, culturels, anthropogéniques et biologiques ont été mis en place dans le cadre de programmes nationaux (NOAA, États-Unis), régionaux (p. ex. STARDEX) ou internationaux (PNUD, Nations Unies). Les indices climatiques peuvent être répartis en plusieurs classes selon la nature des phénomènes ou des processus biophysiques auxquels ils sont associés. Dans la perspective de recherche et développement de nouveaux indices au Sahel, il serait opportun de faire une récapitulation thématique des principaux indices existants comme suit :

- indices du couplage océan-atmosphère (Tableau 1);
- indices d'extrêmes climatiques (Tableau 2);
- indices biophysiques (Tableau 3);
- indices de vulnérabilité et de capacité d'adaptation (Tableau 4).

Les sous-sections qui suivent décrivent chacune des classes d'indice ci-dessus.

b. Les indices du couplage océan-atmosphère (téléconnexion)

Les indices climatiques qui permettent d'étudier les téléconnexions ou de décrire le couplage du système océan-atmosphère peuvent s'avérer utiles pour caractériser la variabilité des variables de surface à l'échelle régionale (p. ex. Shabbar et Skinner, 2004; Skinner *et al.*, 1999; Shabbar *et al.*, 1997). Ces indices peuvent, par exemple, permettre d'établir des liens avec des phénomènes pancontinentaux comme la sécheresse au Sahel (Giannini, 2003). Les travaux de Landsea et Gray (1992) ont également permis de montrer qu'il existe une relation entre la précipitation au Sahel et la fréquence des ouragans qui prennent naissance au large de la Floride et des Caraïbes. En effet, les conditions atmosphériques qui sont responsables d'un déficit des précipitations au Sahel sont associées à un nombre de tempêtes et de cyclones tropicaux plus faible que la normale dans l'océan Atlantique Nord. Les principaux indices pouvant être associés à ce genre de processus de téléconnexion qui se manifestent par des fluctuations notables dans le régime climatique de l'Afrique de l'Ouest sont reportés dans le Tableau 1. Il convient de noter que les indices spécifiés en tableaux n'ont pas tous été l'objet d'études de téléconnexion avec des paramètres de la circulation atmosphérique au Sahel. Cependant, de nombreuses études rapportent l'influence des océans (Atlantique, Indien, Pacifique) sur le climat au Sahel.

c. Les indices de variabilité, d'extrêmes climatiques, de vulnérabilité et de capacité d'adaptation

La recherche d'une simplification de la dynamique de processus complexes associés aux phénomènes mentionnés plus haut a donné lieu à une panoplie d'indices climatiques répartis selon les catégories suivantes : indices d'extrêmes climatiques (Tableau 2), indices biophysiques (Tableau 3), indices de vulnérabilité et de capacité d'adaptation (Tableau 4).

Il y a lieu de noter que seuls les indices présentant un intérêt potentiel pour le Sahel ont été présentés dans les tableaux présentés plus loin. Les seuils et des critères sont parfois associés à ces indices, et ceux-ci peuvent être adaptés au Sahel. Il s'agirait de réajuster ces indices pour tenir compte de la grande dynamique spatio-temporelle du régime des précipitations au Sahel et des températures extrêmes qui caractérisent cette région du monde.

Les indices ou les indicateurs de vulnérabilité s'avèrent pertinents pour le Sahel qui se caractérise par un lien étroit entre le climat et la vie socioéconomique. En effet, cette catégorie d'indicateurs peut intégrer la sensibilité du climat, la capacité d'adaptation et la vulnérabilité (GIEC, 2001). Les indicateurs de vulnérabilité intègrent à la fois des paramètres socioéconomiques et biophysiques (Adger *et al.*, 2004; Brooks et Adger, 2004; Brooks *et al.*, 2005). Force est de constater que la plupart de ces indicateurs ont été élaborés en dehors de la région sahélienne. Les données issues du projet scientifique axé sur la collaboration entre Environnement Canada et le Centre Régional AGRHYMET relatif au renforcement des capacités d'adaptation aux changements climatiques au Sahel permettent d'envisager l'élaboration d'indices ou d'indicateurs propres au Sahel qui seraient de nature à répondre aux besoins de la région.

4. Quels indices climatiques pour le Sahel?

La littérature offre de multiples indices ou indicateurs pour caractériser le climat et les réalités socio-économiques. Toutefois, ceux-ci ne répondent pas nécessairement aux besoins en termes, par exemple, de meilleure gestion de la production agricole largement tributaire de l'aléa climatique. Les incertitudes associées à la connaissance du climat sahélien et de sa modélisation demeurent encore importantes en raison de la compréhension des mécanismes de la mousson africaine qui reste à compléter. La vie au Sahel reste assujettie à la dynamique de la mousson, et seuls des indices climatiques qui intègrent des caractéristiques de la mousson en termes d'intensité, de durée, de fréquence et de distribution spatiale permettraient de répondre effectivement à des besoins dans plusieurs secteurs d'activités comme la gestion de la campagne agricole. De tels indices ou l'association de tels indices avec de l'information socioéconomique selon l'approche d'Adger *et al.* (2004) permettraient de générer de meilleurs outils de diagnostic et de gestion de l'espace sahélien. Nous listons ci-dessous des champs pour lesquels l'élaboration d'indice en termes de caractérisation et de quantification serait utile :

- Qualité de la saison des pluies ou concept de pluviométrie efficace (relation rendement agricole et pluviométrie) : Un indice de qualité des pluies dépendant de la distribution spatiale des événements de pluie et de leurs fréquences ainsi que sa modélisation en fonction de variables de la circulation générale atmosphérique seraient fort pertinents pour la gestion du monde agricole;

- Date efficace de semence : Identifier la période propice pour semer reste un défi majeur et constant pour le paysan sahélien. Sultan *et al.* (2004) ont étudié la dynamique d'installation de la mousson à partir des données journalières historiques des précipitations ou des modèles de simulation du cycle végétatif de culture. Si l'étude a montré des caractéristiques intéressantes du début de la mousson, il n'en demeure pas moins que la définition d'un indice opérationnelle caractéristique du début de la mousson et modélisable à partir de paramètres de la circulation générale serait un atout majeur pour le monde agricole sahélien. Des actions continues pour améliorer la prévision du système de la mousson en Afrique de l'Ouest, facteur clé de la saison des pluies au Sahel ont été réalisées (the prediction of the West African Monsoon [WAM] system; Diongue-Niang, 2004; Sultan *et al.*, 2004; Sultan et Janicot, 2003) et se poursuivent par le truchement du programme AMMA. Le début de la saison pluvieuse est étroitement lié avec la présence de la mousson au Sahel et avec la présence des vents humides (mousson) associés à la migration vers le nord du front intertropical (FIT) ;
- Durée de la saison des pluies : la saison des pluies peut être caractérisée par sa durée qui serait définie comme étant le nombre de jours écoulés entre la première et la dernière pluie. Cette durée serait très sensible aux variations interannuelles, et sa paramétrisation en fonction des caractéristiques de la mousson et de la circulation générale atmosphérique pourrait être utile pour gérer le cycle agricole et les activités liées à la gestion des cours d'eau temporaires;
- Indices ETCCDMI adaptés au Sahel : voir Groupe de travail II;
- Relation climat-santé : Au Sahel, certaines configurations synoptiques correspondent à des pics épidémiologiques. On peut citer le cas de la méningite cérébro-spinale largement associé aux événements de poussière dans la région. Un indice climat-santé dépendant de la teneur en poussière (donnée disponible de la part de la climatologie) et des paramètres météorologiques classiques permettrait de définir des seuils d'alerte afin de prévenir et de minimiser l'impact de tels événements synoptiques sur la santé des populations.

L'élaboration d'indice mentionné plus haut à l'échelle quotidienne et saisonnière serait de nature à mieux répondre à bien des secteurs d'activités au Sahel. La liste ci-dessus est une proposition qui vient compléter l'ensemble d'indices STARDEX et ETCCDMI appliqués dans le rapport du Groupe de travail II. Les indices proposés sont liés à l'environnement physique. Des échanges avec les experts thématiciens du Centre Régional AGRHYMET sont nécessaires pour une prise en compte des contraintes socioéconomiques en considérant, par exemple, les données collectées dans le cadre des projets pilotes du projet canadien d'appui au renforcement des capacités d'adaptation du Sahel face aux changements climatiques. Le présent document récapitulatif sur les indices climatiques dans le contexte du projet canadien d'appui aux états sahéliens constitue une première étape vers l'élaboration d'indices ou indicateurs climatiques appropriés pour le Sahel. Le cadre de collaboration généré par la convention de coopération entre le Canada et le CILSS offre l'occasion d'élaborer des outils opérationnels quant au suivi et à l'adaptation au climat en zone sahélienne sur le court et le long terme. Cette collaboration qui se distingue par la collaboration novatrice entre les spécialistes en sciences humaines et ceux du climat devrait aboutir à des indices climatiques pertinents et utiles pour le Sahel.

Tableau 1. Indices du couplage océan-atmosphère (tiré de Bokoye *et al.*, 2005)

Indice	Description	Source
Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO)	Anomalies SST de l'Atlantique	Enfield <i>et al.</i> (2001)
Baffin Island–West Atlantic (BWA)	Indice à 50 KPa qui reflète la variabilité de la structure occidentale du NAO. Il explique mieux la variabilité de la température du nord-est de l'Amérique	Shabbar <i>et al.</i> (1997)
Quasi-Biennial Oscillation (QBO) index	Le QBO est une variation zonale régulière des vents stratosphériques dans le sens est-ouest	Veryard et Ebdon (1961) Reed (1965)
Pacific/North American (PNA) pattern index	Valeurs des hauteurs géopotentielles standardisées @ 500 hPa dans quatre centres d'actions définis par Wallace et Gutzler (1981) ou une des tendances dominantes (vecteurs propres) obtenue à partir d'une analyse en composante principale rotatoire fondée sur le champ de pression 700 hPa	Wallace et Gutzler (1981)
Pacific interdecadal climate oscillation (PDO)	Tendance récurrente de la variabilité climatique du système océan-atmosphère centrée sur les latitudes moyennes du bassin du Pacifique	Mantua <i>et al.</i> (1997)
North Atlantic Oscillation Index (NAO)	Indice d'hiver (de décembre à mars) fondé sur la différence des pressions normalisées au niveau de la mer entre Lisbonne (Portugal) et Stykkisholmur (Iceland)	Hurrell (1995)
North Pacific (NP) Index	Pondération spatiale de la pression au niveau de la mer sur la région : 30N-65N, 160°E-140W.	Trenberth et Hurrell (1994)
Sahel rainfall index	Indice pluviométrique normalisé du Sahel (20-8N, 20W-10°E). La zone de moyennage est fondée sur l'analyse en composante principale de la moyenne de juin à septembre	African rainfall présenté dans Janowiak (1988, <i>Journal of Climate</i> , vol. 1, 240-255)
Southern Oscillation Index (SOI)	L'indice méridional d'oscillation (SOI) est calculé en utilisant la moyenne mensuelle des anomalies de pression au niveau de la mer @ Tahiti (T) et Darwin (D)	Trenberth (1984)
Niño Regions 3 et 3.4 SST Indices	Niño 3 (90°W-150°W, 5°S-5°N) et Niño 3.4 (120°W-170°W, 5°S-5°N). Anomalies de températures de surface au dessus de la mer sur la période de 1950 à 1979 sont montrées avec une liste d'anomalies mensuelles (indices) pour la période de 1950 à 1999.	Trenberth (1997)

Tableau 1. Indices du couplage océan-atmosphère (suite)

Indice	Description	Source
<i>TNI</i> (Trans-Niño Index) et <i>N3.4</i> (Niño 3.4 Index)	<i>TNI</i> (Trans-Niño Index), défini pour être la différence entre les anomalies SST normalisées entre les régions Niño 1+2 et Niño 4	Trenberth et Stepaniak (2001)
Madden et Julian Oscillation (MJO)	L'indice MJO correspond à une période de 30 à 60 jours ou de 40 à 50 jours d'oscillation qui s'avère être la principale fluctuation interannuelle qui explique les variations dans les tropiques.	Madden et Julian (1971 et 1994)

Tableau 2. Indices d'extrêmes climatiques (tiré de Bokoye *et al.*, 2005)

Indice	Description	Source
T _{xmax} _{max}	Maximum mensuel de la température maximale journalière	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
T _{xmax} _{min}	Maximum mensuel de la température minimale journalière	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
T _{xmin} _{max}	Minimum mensuel de la température maximale journalière	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
T _{xmin} _{min}	Minimum mensuel de la température minimale journalière	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
TN10p	Pourcentage de jours où la température minimum journalière < 10 ^e percentile	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001) Zhang <i>et al.</i> (2004)
TX10p	Pourcentage de jours où la température maximum journalière < 10 ^e percentile	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001) Zhang <i>et al.</i> (2004)
TN90p	Pourcentage de jours où la température minimum journalière est > 90 ^e percentile	ETCCDMI Zhang <i>et al.</i> (2004)
TX90p	Pourcentage de jours où la température maximum journalière est > 90 ^e percentile	ETCCDMI Zhang <i>et al.</i> (2004)
WSDI	"Warm spell duration index", comptage annuel des jours avec au moins six jours consécutifs où la température maximum journalière est > au 90 ^e percentile	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
CSDI	« Cold spell duration index », comptage annuel des jours avec au moins six jours consécutifs où la température maximum journalière est < au 10 ^e percentile	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
DTR	Écart diurne de température	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)

Tableau 2. Indices d'extrêmes climatiques (suite).

Indice	Description	Source
Rx1day	Maximum de précipitation sur une journée	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
Rx5day	Maximum de précipitation sur cinq jours consécutifs	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
SDII	Simple indice d'intensité de précipitation	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
R10mm	Nombre de jours où PRCP \geq 10mm	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
R20mm	Nombre de jours où PRCP \geq 20mm	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
Rnnmm	Nombre de jours où PRCP \geq nn, nn est un seuil défini par l'usager	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
CDD	Nombre maximum de jours secs consécutifs avec précipitation RR < 1 mm	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
CWD	Longueur maximum de jours consécutifs avec précipitation \geq 1mm	ETCCDMI (Peterson <i>et al.</i> , 2001)
Dry spell	Une période d'au moins 15 jours sans précipitation d'au moins 1 mm	Glossaire météorologique : http://amsglossary.allenpress.com/glossary/

Tableau 3. Indices biophysiques (tiré de Bokoye *et al.*, 2005).

Indice	Description	Source
Standardized Sahel Rainfall index (SRI) 1898-2002	Cet indice est calculé au NCAR (http://www.ncar.ucar.edu/) à partir de la climatologie mensuelle des stations de surface	Janowiak (1988)
Percent of normal	Rapport entre la précipitation actuelle et la normale (moyenne sur 30 ans) $\times 100$	Willeke <i>et al.</i> (1994)
Standardized precipitation index	Quantification du déficit de précipitation à plusieurs échelles de temps. L'indice est lié à la probabilité de précipitation pour toute échelle de temps : http://www.wrcc.dri.edu/spi/spi.html	McKee <i>et al.</i> (1993)
Crop moisture index (CMI)	Indice pour un suivi semaine par semaine des conditions des cultures. Il est fondé sur la température moyenne et la précipitation totale sur chaque semaine. Il n'est pas destiné au suivi de sécheresse à long terme.	Palmer (1968)
Surface water supply index (SPI)	Complément de l'indice de Palmer dans l'État du Colorado où la montagne est un élément clé de la fourniture en eau. L'indice est calculé à partir du cumul de neige, des eaux de ruissellement et du stock d'eau en réservoir	Shafer et Dezman (1982)
Palmer Drought Severity Index (PDSI)	Indice dérivé d'un algorithme de calcul de l'humidité du sol étalonné pour des régions relativement homogènes Les valeurs vont de -4 (très sec) à 4 ou I (très humide)	Palmer (1965)
Reclamation Drought Index (RDI)	L'indice RDI est calculé à partir du niveau de la rivière et il intègre des éléments comme la température, la précipitation, le cumul de neige et les niveaux des réservoirs comme entrée.	Hayes (2005)
Aridity index ou indice de sécheresse	Rapport entre l'évapotranspiration et la précipitation. Indice de suivi de désertification	Budyko (1974)
Indice de Lamb	Indice caractéristique de la distribution spatio-temporelle de la pluviométrie $\frac{1}{N_j} \sum \frac{r_{i,j} s_i}{S_i}$ r _{i,j} cumul pluviométrique de juin à octobre pour l'année j et la station i s _i et S _i représentent respectivement la moyenne et l'écart type de la pluviométrie annuelle calculée à la station I pour la période de 1951 à 1999. N _j nombre de stations sans donnée manquante pour l'année j	Lamb (1985)

Tableau 3. Indices biophysiques (suite).

Indice	Description	Source
Corn Heat Units	« Corn heat units » est un terme énergétique calculé pour chaque jour, de la date de semence à la récolte. L'indice est calculé à partir des températures minimum et maximum journalières et d'une constante comme suit : $CHU = [1.8 \times (T_{min}-4.4) + 3.33 (T_{max}-10.0) - 0.084 (T_{max}-10.0)^2] / 2$ où T_{min} et T_{max} sont le minimum et le maximum des températures journalières	<i>Shane Chetner</i> Alberta Agriculture, Food and Rural Development, Edmonton, Alberta
Land degradation index (LDI)	Indice de caractérisation de la dégradation des sols en zone semi-aride à partir de la télédétection spatiale	Chikhaoui <i>et al.</i> (2005)
Normalized difference vegetation index (NDVI)	Indice de caractérisation du couvert végétal à partir de la télédétection visible et proche infra-rouge	Tucker <i>et al.</i> (1985)
Wind erosion indicator	Facteur d'érosion éolien qui peut être lié à l'utilisation et à la gestion des sols. L'érosion éolienne est influencée par le climat, le sol, le type d'agriculture et les techniques de gestion du sol.	Chepil et Woodroff (1963) Coote Pettapiece (1987)
Water erosion indicator	L'indice peut être utilisé pour prévoir la moyenne à long terme du niveau annuel de l'érosion hydrique.	VVliet <i>et al.</i> (1976)
Indice climatique de Birot	Rapport des précipitations mensuelles par leur fréquence à la température moyenne mensuelle $IC = P \times J / T$ où P est la précipitation mensuelle (en mm), J est le nombre de jours de pluie et T la température moyenne mensuelle en degrés Celsius Rapport de la pluie à la température $I=P/(T+10)$	Villeneuve <i>et al.</i> (1974)
Indice d'aridité de De Martonne	$P = \text{pluie annuelle (en mm)}, \text{Température moyenne annuelle (en degrés Celsius)}$	De Martonne (1929)

Tableau 3. Indices biophysiques (suite).

Indice	Description	Source
Indice du bien être de Thom	<p>Effets de la température et de l'humidité sur le corps humain exprimé par la formule :</p> $DI = 0.4 \times (Td + Tw) + 15$ <p>où :</p> <p>Td=température du thermomètre sec (en degrés Fahrenheit)</p> <p>Tw=température du thermomètre mouillé (en degrés Fahrenheit)</p> <p>Le bien être est marqué par $DI < 70$</p>	Thom (1959)
Indice de continentalité de Johansson	<p>$K = (1.6 A / \sin(\phi)) - 14$</p> <p>Où A est l'amplitude annuelle de la température en degré Celsius</p> <p>ϕ, la latitude géographique, K exprimé en pourcentage, zéro pourcent correspond à un climat océanique et 100 pour cent à un climat continental et ϕ la latitude géographique</p>	Villeneuve <i>et al.</i> (1974)
Indice de pluvio-efficacité	<p>$I = (100 \times (P/E) + 12(p/e))/2$</p> <p>P = pluviométrie totale p: pluviométrie du mois le plus humide E : évaporation totale e: évaporation du mois le plus humide</p>	Villeneuve <i>et al.</i> (1974)
Indice de précipitation effective de Thornthwaite	<p>$I = \sum (P-E)$</p> <p>où</p> <p>P est la pluviométrie mensuelle (en pouces) E est l'évaporation mensuelle (en pouces)</p>	Thornthwaite (1931)

Tableau 3. Indices biophysiques (suite).

Indice	Description	Source
	$I = \sum_{n=1}^{n=12} 10 \times I_n$	
Indice de Thornthwaite	Avec $I_n = 0.165 \times (P_n / (t_n + 122))^{10/9}$ où P_n et t_n sont les précipitations et températures moyennes du mois, respectivement en mm et en degrés-centigrade	Thornthwaite (1948)
	Indice de surplus d'eau par rapport aux besoins d'une station donnée : $HI = 100 \times S/n$	
Indice d'humidité	où S , le surplus d'eau est la somme des différences mensuelles entre la précipitation et l'évapotranspiration potentielle pour les mois où la précipitation normale excède l'évapotranspiration potentielle, et où n , les besoins en eau, est la somme de l'évapotranspiration potentielle mensuelle pour ces mois de surplus	Thornthwaite (1948)
Indice héliothermique	$I = (tm \times dmj) / 100$ tm, température moyenne dmj, durée moyenne du jour	Villeneuve <i>et al.</i> (1974)
Indice pluviométrique d'Emberger	$I = (100 \times P) / (M+m)(M-m)$, M : moyenne de la température du mois le plus chaud, m celle du mois le plus froid et P, les précipitations annuelles I est d'autant plus petit que le milieu est plus sec	Emberger (1952)
Indice bioclimatique	Indique le nombre de mois au cours de l'année où les besoins de la végétation sont satisfaits.	Le Borgne (1988)
Indice global de mousson: Global unified monsoon index (GUMI)	$GUMI = \frac{PW - PW_{\min}}{PW_{\max} - PW_{\min}}$ PW est la quantité d'eau précipitable en cm. PW_{\max} et PW_{\min} sont les moyennes multi-annuelles des maximum et des minimum des valeurs journalières selon une grille Latitude-longitude	Zeng et Lu (2004)

Tableau 3. Indices biophysiques (suite).

Indice	Description	Source
Indice de mousson ouest africain: West African Monsoon Index (WAMI)	Différence entre les vitesses de vent à 200 hpa et 925 hpa	Fontaine <i>et al.</i> (1995)
Nouvel indice de mousson : Dynamic Normalized Seasonality (DNS)	Rapport entre la norme de la différence la climatologie du vecteur vent de janvier et de la moyenne des mois de janvier et juillet et la norme du vecteur vent pour une année et un mois donnés	Li et Zeng (2002, 2003)

Tableau 4. Indices de vulnérabilité et de capacité d'adaptation (tiré de Bokoye *et al.*, 2005).

Indice	Description	Source
Indice de développement humain (IDH)	Indice développé par le programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) incluant des indicateurs relatifs à la pauvreté, l'éducation, la santé etc.	Morris (1979) Downing <i>et al.</i> (2001)
Index of sustainable economic welfare (ISEW)	Similaire à l'IDH mais avec un accent sur la vie économique	Hamilton (1999)
Indice d'Insécurité Humaine (IIH)	Indice composite du bien être humain. Il intègre des facteurs environnementaux et des indicateurs sociaux. Il a été développé dans le cadre du Global Environmental Change and Human Security (GECHS)	(GECHS, 2000)
Environmental vulnerability index (EVI)	Indice composite représentant la vulnérabilité de petites îles. EVI intègre des facteurs relatifs à la météorologie, la géologie, les caractéristiques des pays, la biologie et les facteurs anthropiques.	South Pacific Applied Geosciences Commission (SOPAC)
Environmental sustainability index (ESI)	Mesure de progrès vers un développement durable dans 142 pays en utilisant 20 indicateurs en 5 composantes: Systèmes environnementaux, réduction de stress, réduction de la vulnérabilité humaine, capacité sociale et institutionnelle, et de l'intendance global.	World economic forum (2002)
Water poverty index (WPI)	L'indice WPI caractérise la disponibilité de la ressource en eau avec variables socio-économiques.	(Sullivan, 2002)
Environmental performance index (EPI)	L'indice évalue la qualité de l'air, de l'eau, les émissions de gaz à effet de serre et le niveau de protection du sol	World economic forum (2002)
RISK1	Nombre de personnes tuées par désastre climatique rapporté au pourcentage de la population nationale.	Brooks et Adger (2005)
RISK2	Nombre absolu de personnes tuées par désastre climatique	Brooks et Adger (2005)
RISK3	Somme de personnes tuées ou affectées par un désastre climatique rapporté au pourcentage de la population nationale	Brooks et Adger (2005)

Tableau 4. Indices de vulnérabilité et de capacité d’adaptation (suite).

Indice	Description	Source
RISK4	Rapport entre le nombre de personnes tuées et affectées par une catastrophe climatique	Brooks et Adger (2005)
RISK5	Rapport du nombre de personnes tuées et affectées calculé comme moyenne du même rapport pour des événements individuels où figurent les deux catégories de personnes	Brooks et Adger (2005)
CVI	Climate Vulnerability Index Indice combinant des paramètres biophysiques et socio-économiques	Sullivan et Meigh (2005)

Gestion intégrée des données climatiques, environnementales et socioéconomiques : de l'analyse aux infrastructures

Rédaction : Philippe Poudret, André Cotnoir, Philippe Gachon (Ph.D.), Geneviève Berteau



Source : European Space Agency (<http://www.eduspace.esa.int>)

La présente partie du rapport représente la contribution canadienne au projet ACDI – CILSS (A030978-002) en ce qui a trait à :

- l'utilisation et l'interprétation des scénarios de changement climatique (base de données des scénarios climatiques ainsi que l'archivage et l'accès aux infos sur les scénarios climatiques);
- la gestion de bases de données ;
- l'appui aux projets-pilotes d'adaptation au climat (mise en place et analyse des données d'enquêtes et socioéconomiques).

Liste des abréviations, sigles et acronymes

CCSR/NIES	Center for Climate System Research (Université de Tokyo)/National Institute for Environmental Studies
CGCM1	Première génération du modèle couplé climatique global
CGCM2	Deuxième génération du modèle couplé climatique global
CILSS	Comité permanent Inter-États de lutte contre la sécheresse dans le Sahel
CRA	Centre Régional AGRHYMET
CSIROMk2b	Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
EC	Environnement Canada
ECHAM4	Modèle développé par le German Climate Research Centre
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecast
FTP	File Transfert Protocol
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HADCM3	Troisième version du modèle climatique global couplé du Hadley Centre for Climate Prediction and Research
IS92a	Scénario d'émission développé en 1992 par l'Intergovernmental Panel on Climate Change
KB	Kilobyte
Lat	Latitude
Lon	Longitude
MCG	Modèle climatique global
MS	Microsoft
NCAR-1	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
ODBC	Open Database Connectivity
Préc	Précipitation
SFTP	Secure File Transfer Protocol
SIG	Système d'information géographique
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SQL	Structured Query Language
SRES	Special Reports on Emission Scenarios de l'Intergovernmental Panel on Climate Change
Tmin	Température minimale
Tmax	Température maximale
UQAM	Université du Québec à Montréal
VBA	Visual Basic Application
Étude VIA	Études de vulnérabilité, d'impact et d'adaptation
VPN	Réseau privé virtuel (Virtual Private Network)
VSAT	Very Small Aperture Terminal

1. Base de données des scénarios climatiques

1.1. Mise en place des données pour l'analyse et la caractérisation du climat passé et futur

Un des défis du projet est d'entreposer une grande quantité de données climatologiques et de les mettre en relation adéquatement. À ce jour, les données climatiques de sorties de modèles climatiques globaux (MCG) sont conservées sous différents formats dans des fichiers texte qui occupent un espace considérable.

L'utilisation d'une base de données relationnelle permet de structurer l'espace nécessaire à l'entreposage et d'accéder aux données via un langage adapté qu'est le langage SQL (Structured Query Language). Un système de gestion de base de données est principalement utilisé pour organiser les données en un ensemble cohérent de façon à ce qu'il soit possible d'accéder facilement à celles-ci via un index et un format normalisé. L'intégrité des données est assurée par des règles de validation à la saisie et à la mise à jour ainsi que par le système lui-même.

L'architecture des données du projet se veut ouverte, permettant l'arrimage entre les données de différentes sources du moment que celles-ci sont géoréférencées. Par exemple, chaque point de grille de MCG possède sa propre valeur en longitude et en latitude. Par ailleurs, les villages ou les groupes sociaux associés sont également référencés géographiquement, permettant ainsi l'association avec des données à caractère environnementale ou géophysique. La base de données régionale des observations climatologiques comporte des données provenant de diverses stations également géoréférencées ainsi que des données socioéconomiques.

L'interface utilisateur doit être également conçue pour offrir un cadre commun facile à utiliser tout en permettant une vision transversale des données diverses favorables à une analyse multivariée de l'information. Cette interface met à la disposition de l'utilisateur une série d'outils permettant l'analyse numérique des séries temporelles, le calcul d'indices combinant plusieurs variables et la représentation graphique des informations générées. L'interface doit également offrir un outil de conversion permettant d'exporter des données vers d'autres outils d'analyse.

Les MCG et les données d'enquête sur le terrain pourront être intégrés à la base de données régionale du Centre Régional AGRHYMET (CRA), ce qui permettra des analyses plus systématiques tant sur le plan climatologique que socioéconomique. Par la suite, on pourra mettre en œuvre une représentation cartographique et spatiale de l'information à l'aide de système d'information géographique (SIG), permettant de combiner les MCG et les résultats d'enquête (voir Groupe de travail II, section 3 concernant les MCG et Groupe de travail III, section II concernant les résultats d'enquêtes). Ces données pourront être mises en relation avec d'autres données hydrologiques, agropastorales ou satellitaires.

1.2. Infrastructures et archivage

L'archivage des données pour l'analyse et la caractérisation du climat a nécessité l'achat et l'installation d'une infrastructure informatique. Les composantes suivantes ont été livrées et installées au CRA, à savoir un serveur Sun FireWire V880 et la suite ORACLE 9i, une interface d'accès et de maintenance des données fondée sur le logiciel MATLAB.

Le serveur est actuellement utilisé pour héberger les bases de données relatives aux différents scénarios climatiques qui attendent d'être transférés dans les pays membres du Comité permanent Inter-États de lutte contre la sécheresse dans le Sahel (CILSS). Il est utilisé au CRA comme un entrepôt de données. Ce dernier doit permettre aux experts d'accéder directement aux données et également de visualiser ou d'effectuer des analyses sur ces données.

Les parties canadiennes et celles du CRA ont procédé à l'installation du système de gestion de base de données ORACLE 9i ainsi que du schéma de la base de données des sorties des modèles climatiques.

Pour ce qui a trait à l'interface d'accès aux données, deux logiciels ont été retenus par le CRA pour faire la gestion et accéder aux données climatiques (CLIDATA) et hydrologiques (HYDROMET). Le logiciel distribué par Oracle, DISCOVERY, permettra d'accéder aux données brutes, tandis que les outils fournis par Oracle (OEM) serviront à en faire la gestion. Les logiciels MATLAB et MS Excel seront également utilisés pour accéder aux données de différentes sources.

2. Gestion intégrée de bases de données

Les données de sortie de MCG (périodes actuelles et futures) ainsi que les réanalyses NCEP pour la période de 1961 à 1990 ont été installées sur le serveur (voir les tableaux ci-dessous pour consulter la liste des données fournies au CRA 2004-2005).

Modèle	Scénario d'émission	Baseline	Horizon	Variables
CGCM1	IS92a (GHG+A1)	1961-1990	-	Tmin, Tmax, Préc
CGCM2	A2-1 et B2-1	1961-1990	-	Tmin, Tmax, Préc
HADCM3	A2 et B2	1961-1990	1991-2099	Tmin, Tmax, Préc
NCEP	-	1960-1990	-	Tmin, Tmax, Préc
ECHAM4		1961-1990		
ECMWF		1961-1990		

Tableau 1. Données quotidiennes (fenêtre africaine).

Modèle	Scénario d'émission	Baseline	Variables
CCSR/NIES	SRES (A2)	1961 - 1990	Tmin, Tmax, Préc
CGCM2	IS92a (A1, A2, A3 => moy)	1961 - 1990	Tmin, Tmax, Préc
CSIROMk2b	SRES (A2)	1961 - 1990	Tmin, Tmax, Préc
ECHAM4	IS92a (scénario 2)	1961 - 1990	Tmin, Tmax, Préc
HADCM3	SRES (A2)	1961 - 1990	Tmin, Tmax, Préc
NCAR-1	IS92a (scénario 2)	1960 - 1990	Tmin, Tmax, Préc

Tableau 2. Données mensuelles (globales).

Modèle	Latitude	Longitude	Grille (lat-lon)	Nombre de cellules
CGCM2	31.54S-42.68N	41.25O-41.25E	~ 3.75° x 3.75	21 lat x 23 lon
HADCM3	30S - 40N	41.25O-41.25E	2.5° x 3.75°	29 lat x 23 lon
NCEP	30S - 40N	40O - 40E	2.5° x 2.5°	33 x 29 points

Tableau 3. Fenêtre africaine.

Les données climatiques de sortie de modèles ont été archivées dans leur format brut sur le serveur avant d'être éventuellement transférées dans la base de données régionale (Oracle 9i). Toutefois, le développement de plusieurs applications reste nécessaire afin que cette base de données régionale, mise en place par le CRA, puisse accepter une base de données en entrée, ce qui nécessite une réorganisation structurelle.

2.1. Harmonisation de la base de données régionale

La base de données régionale AGRHYMET, ayant évolué énormément ces dernières années, est arrivée à une étape cruciale de consolidation et de normalisation afin de conserver un certain degré de performance. L'utilisation du logiciel CLIDATA nécessitera une première actualisation de la structure même de la base de données. Il pourrait être intéressant de saisir cette occasion pour harmoniser les différentes parties de la base de données. Néanmoins, avant de pouvoir normaliser et optimiser la base de données régionale, il faudrait avoir accès à plus d'information concernant les données actuellement contenues dans la base de données régionale, nommément le dictionnaire de données devant contenir une définition complète de chaque champ de chaque table de la base de données. Sans celui-ci, une analyse complète des besoins devrait être refaite pour bien cerner les problématiques et la meilleure façon d'atteindre les objectifs que le CRA s'est fixés. La liste des règles d'affaires régissant les données serait également nécessaire afin de fonder les liens qui unissent les données entre elles. Un schéma de base de données préliminaire a été élaboré en attendant les autres documents décrivant les données. Le tableau 5 présenté plus loin offre la description des données ainsi que les règles d'affaires qui les lient. La qualité des données (l'exactitude et la complétude des séries temporelles) pourrait être améliorée. Pour ce faire, nous proposons de revoir la stratégie de maintenance des stations, le processus de cueillette des données ainsi que la validation et l'assurance qualité des données d'observation.

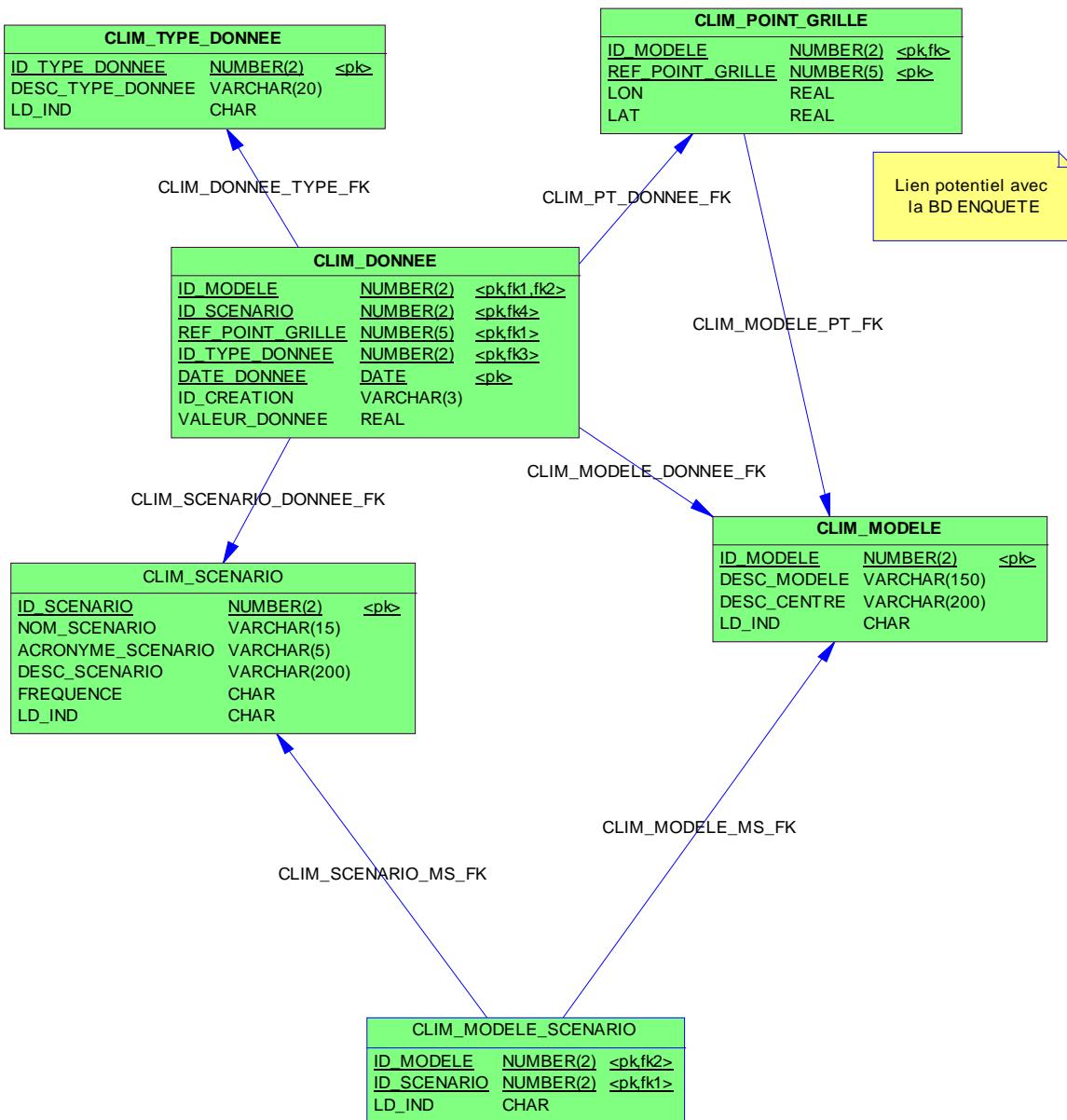


Figure 1. Diagrammes de base de données.

Table	Description	PK	Type
<u>CLIM_DONNEE</u>			
Id_modele	Données climatiques générées	O	N
Ref_point_grille	Lien vers le modèle qui a été utilisé pour générer cette donnée, mais également partie de la clé pour accéder au point de grille.	O	N
Id_scenario	Lien vers le scénario qui a été utilisé pour générer cette donnée	O	N
Id_type_donnee	Deuxième partie de la référence au point de grille	O	N
Date_donnee	Lien vers le type de la donnée	O	N
Id_creation	Date pour laquelle la donnée est générée	O	D
Valeur_donnee	Identification unique du créateur		A
	Valeur de la donnée générée		R
<u>CLIM_TYPE_DONNEE</u>			
Id_type_donnee	Identification du type de donnée	O	N
Desc_type_donnee	Description du type de donnée		A
Ld_ind	Indicateur de suppression logique		B
<u>CLIM_POINT_GRILLE</u>			
Id_modele	Lien vers modèle; première partie de la clé	O	N
Ref_point_grille	Identification du point de grille	O	N
Lon	Longitude du point de grille		R
Lat	Latitude du point de grille		R
<u>CLIM_SCENARIO</u>			
Id_scenario	Table définissant les scénarios	O	N
Nom_scenario	Identification du scénario		A
Acronyme_scenario	Nom du scénario		A
Desc_scenario	Acronyme du scénario		A
Ld_ind	Description du scénario		A
	Indicateur de suppression logique		B
<u>CLIM_MODELE</u>			
Id_modele	Table définissant les modèles	O	N
Desc_modele	Identification du modèle		A
Desc_centre	Description du modèle		A
Ld_ind	Description du centre où le modèle a été développé		A
	Indicateur de suppression logique		B
<u>CLIM_MODELE_SCENARIO</u>	Table de jointure qui détermine les scénarios possibles pour chaque modèle		
Id_modele	Lien vers le modèle	O	N
Id_scenario	Lien vers le scénario	O	N
Ld_ind	Indicateur de suppression logique		B

Légende : A = Alpha, B = Booléen, D = Data, N = Numérique, O = Oui, R = Réel

Tableau 4. Dictionnaire des données (scénario climatique).

Règle	Description	Portée
RC1	Un modèle de données comporte un ou plusieurs points de grille	CLIM_MODELE_PG_FK
RC2	Un modèle peut avoir un ou plusieurs scénarios	CLIM_MODELE_MS_FK
RC3	Un scénario peut être lié à plusieurs modèles	CLIM_SCENARIO_MS_FK
RC4	Une donnée est liée à un seul point topo	CLIM_PT_DONNEE_FK
RC5	Une donnée est liée à un seul modèle	CLIM_MODELE_DONNEE_FK
RC6	Une donnée est liée à un seul scénario	CLIM_SCENARIO_DONNEE_FK
RC7	Une donnée est d'un seul type	CLIM_DONNEE_TYPE_FK
RG8	Un point de grille est généré premièrement par le ID_modele suivi d'un numéro séquentiel. Cette séquence est renouvelée pour chaque modèle	CLIM_POINT_GRILLE
RG9	La clé primaire de la donnée est constituée du ID_modele, ID_scenario, Ref_point_grille, ID_type_donnee et Date_donnee	CLIM_DONNEE
RT10	Une donnée générée doit avoir un ID_modele et un ID_scenario valide (présent dans la table CLIM_MODELE_DONNEE)	CLIM_MODELE_DONNEE CLIM_DONNEE

Légende : RC = Cardinalité, RG = Génération, RT = Trigger

Tableau 5. Évaluation de la taille de la bd – règles d'affaires – scénarios climatiques futurs.

- Si nous avons des données mensuelles pour tous les modèles (un scénario) et quatre variables :

17 millions d'enregistrements dans la table principale 2,273,309 KB (soit environ 2,3 Giga)
- Si, par contre, nous avons des données journalières pour tous les modèles (un scénario) et quatre variables :

150 millions d'enregistrements dans la table principale 58,245,088 KB (soit environ 58,2 Giga)

3. Interface d'analyse et d'accès à l'information sur les scénarios climatiques

3.1. Atelier régional

Un atelier d'initiation au logiciel MATLAB a été offert du 26 avril au 3 mai 2004 à des représentants de tous les pays du CILSS. La formation comprenait les fonctions de base de MATLAB, l'utilisation des graphiques à deux et à trois dimensions et d'outils d'analyse statistique et d'interpolation, ainsi que des exemples et des exercices pratiques sur la lecture et sur l'écriture de fichiers ainsi qu'une introduction aux bases de données. Cette formation au puissant

outil d'analyse MATLAB a été très appréciée par l'ensemble des participants et, selon le questionnaire d'évaluation, sera très utile dans le quotidien des spécialistes en climatologie et pourrait donner lieu à un atelier de formation avancée sur MATLAB.

La section sur la programmation et les interfaces graphiques n'ayant pas été abordées, faute de temps due à la différence de niveaux des étudiants, devront faire l'objet d'un atelier de perfectionnement pour les experts désireux d'approfondir leurs connaissances et leur compétence en ce qui concerne l'utilisation de MATLAB et de ses diverses boîtes à outils.

3.1.1. Guide d'installation et de configuration de l'outil MATLAB et de l'interface d'accès aux données

A. Installation de MATLAB et de ses composantes

Prérequis : Licence de MATLAB et de ses composantes, espace disque nécessaire

Procédure : Insérer le disque compact ayant la version désirée du produit MATLAB (version 7) et suivre les instructions détaillées sur l'installation.

B. Installation de MS EXCEL

Prérequis : Licence de Microsoft Office (ou Excel seulement), espace disque nécessaire

Procédure : Insérer le disque compact ayant la version désirée du produit MS OFFICE (vérifier la version de votre système d'exploitation) et suivre les instructions détaillées d'installation.

C. Installation du client ORACLE

Prérequis : Licence du client ORACLE, Serveur ORACLE installé, espace disque nécessaire

Procédure : Le serveur ORACLE installé sur un ordinateur à distance peut être accédé de votre ordinateur si le client ORACLE est installé sur l'ordinateur à distance. Insérer le disque compact ayant la version désirée du produit CLIENT ORACLE et suivre les instructions détaillées sur l'installation.

D. Configuration d'un lien ODBC

Prérequis : Accès ADMINISTRATEUR à l'ordinateur cible, CLIENT ORACLE.

Procédure : L'installation du client ORACLE ajoute une option dans le choix des pilotes ODBC.

- À partir du menu démarrer, cliquer sur Outils d'administration \ Sources de données ODBC.
- Choisir l'onglet source de données système, puis appuyer sur ajouter.
- Choisir le pilote de votre base de données (ORACLE) et appuyer sur terminer.
- Nommer la source de données et appuyer sur Sélectionner dans la section base de données.
- Indiquer quel fichier prendre pour la base de données, puis appuyer sur OK.
- Appuyer encore sur OK et encore sur OK.

E. Accès aux données

Prérequis : MS EXCEL, lien ODBC, Serveur ORACLE (avec des données)

Procédure :

- Démarrer MS EXCEL.
- À partir de la barre de menu, cliquer sur Données / Données externes / Créer une requête.
- Choisir la source de données et appuyer sur OK.
- Choisir les champs qui doivent paraître dans MS EXCEL et appuyer sur Suivant.
- Choisir les filtres (optionnel) et appuyer sur Suivant.
- Choisir les tris (optionnel) et appuyer sur Suivant.
- Choisir Renvoyer les données vers MS EXCEL (défaut) et appuyer sur Terminer.
- Choisir le ou les données qui seront utilisées (défaut) et appuyer sur OK.
- Sauvegarder le fichier

F. Utilisation d'un fichier MS EXCEL avec MATLAB

Prérequis : Tous les points précédents

Procédure :

- Démarrer MATLAB.
- À partir du menu supérieur, cliquer sur File/Import data.
- Spécifier l'utilisation d'un fichier MS XCEL et appuyer sur OK.

NOTA :

Une autre méthode d'accès aux données, fournie par Mathworks, est également disponible. La boîte à outils de la base de données (Database Toolbox) comprend une façon similaire, mais moins conviviale que MS EXCEL, d'accéder aux données stockées dans une base de données.

3.2. Outil intégré d'analyse

À la suite de l'atelier sur les outils d'analyse, le besoin en homogénéisation des processus d'analyse, tant le calcul d'indices climatologiques que l'utilisation des données, est ressorti comme aspect important. La partie canadienne épaulée par l'équipe de développement logiciel du CRA développera un outil d'aide au calcul d'indice utilisant MATLAB. Cet outil fait suite au premier atelier sur les fondements de MATLAB et offrira le calcul des indices de base; des versions subséquentes seront développées au besoin en nouveaux indices plus adaptés au contexte sahélien. Cette interface permettra une fusion des différents types de données, une vision unique et transverse des données. Les indices ainsi calculés pourront être exportés vers d'autres applications telles les applications cartographiques et les outils de mise à l'échelle statistique.

L'outil d'analyse et de représentation des données se veut un espace d'analyse, de production de données secondaires et de graphiques. Les composantes principales de cet outil sont le logiciel MATLAB (analyse et représentation graphique) et les outils de représentation cartographique ARC*. Une interface de calcul d'indices climatiques sera développée de concert avec les chercheurs du CRA. Certains de ces résultats d'analyse seront, par la suite, publiés sur le Web.

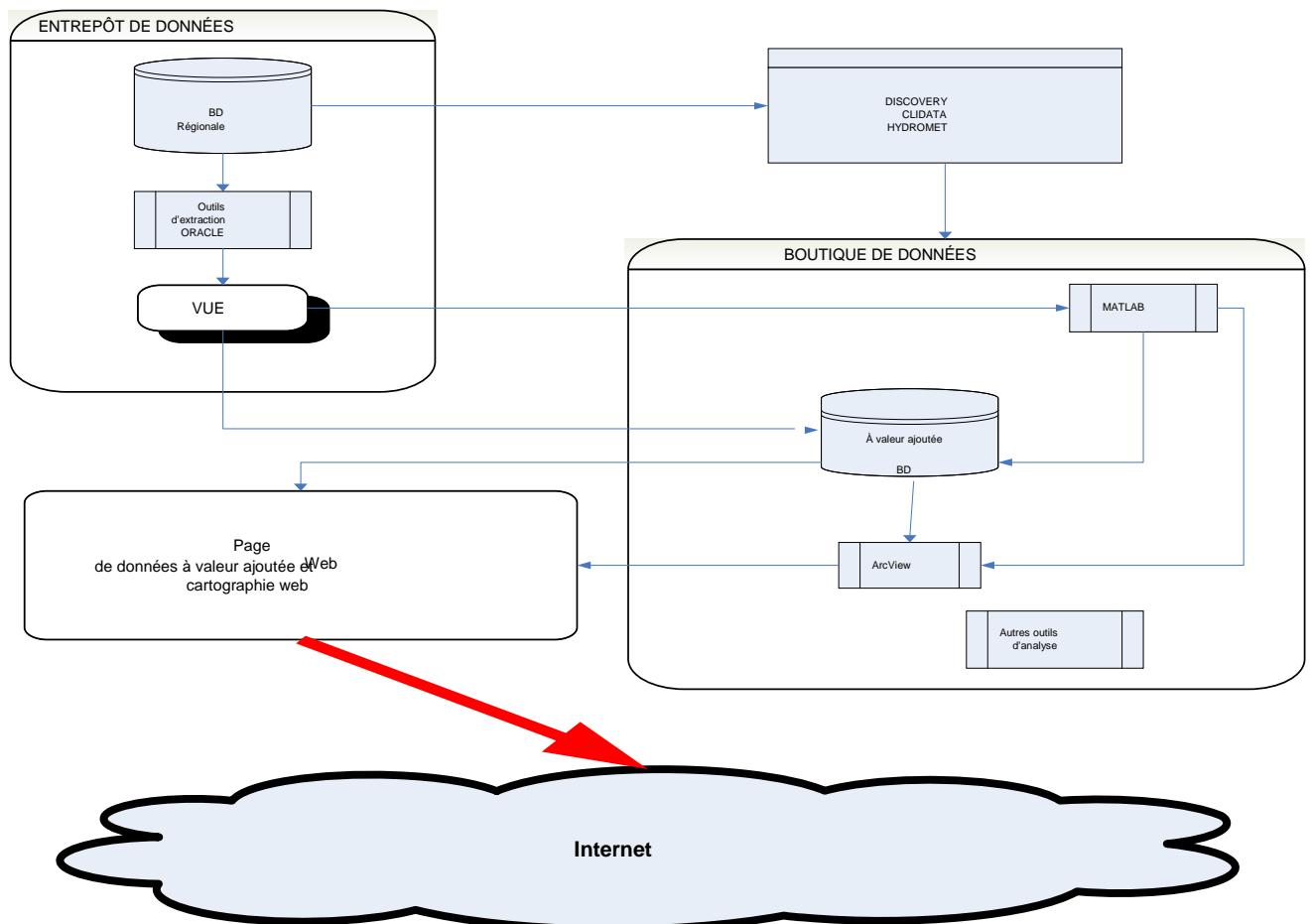


Figure 2. Flux des données (base de données régionale).

Entrepôt de données	Boutique de données	Page web
Base de données régionale	Atelier d'analyse et de représentation des données	Ajout de nouvelles pages sur le site d'AGRHYMET
Vues (sous ensemble de données thématiques)	MATLAB, ArcView	Interfaçage de ArcIMS avec l'Internet (cartographie sur le web)
DISCOVERY / CLIDATA / HYDROMET	Base de données à valeur ajoutées	Site FTP pour le téléchargement de données

Tableau 6. Entrepôt de données.

3.3. Consolidation des apprentissages

Une formation avancée en utilisation des outils MATLAB pourrait être offerte avec la même formule que précédemment aux étudiants intéressés et démontrant des aptitudes à la programmation. Une formation de base en utilisation d'un langage de développement de page Internet serait également envisageable, maximisant le déplacement du formateur.

Afin d'optimiser les ateliers qui seront offerts au CRA, le formateur devra suivre des cours et des séminaires de perfectionnement avec les outils choisis et les adapter pour répondre aux besoins spécifiques du CRA. Quatre cours ont été retenus pour la formation MATLAB, soit « MATLAB external interface », « Advanced MATLAB programming techniques », « MATLAB for building Graphical user interface » et « MATLAB for signal processing ». Un plan de formation continue devrait être envisagé afin de permettre un haut niveau de compétence avec les divers outils retenus pour les analyses. Ce plan pourrait comprendre des séminaires, des conférences et des ateliers et être inclus dans le programme de formation du CRA à même son syllabus.

3.4. Licences multiutilisateurs pour MATLAB

Le CRA détient actuellement une licence pour un seul utilisateur, ce qui était suffisant pour l'évaluation du logiciel en tant que composante principale de l'atelier d'analyse et de représentation des données. Le logiciel MATLAB et ses outils de statistiques et de traitement de signal ont été retenus pour faire partie du noyau de logiciels prioritaires. Il est nécessaire d'étendre la licence actuelle à la licence de groupe pour faculté, personnel et chercheurs de MATLAB et des boîtes à outils précédemment mentionnées. Cette licence permet une utilisation multisite pour 30 utilisateurs. (Voir www.mathworks.com pour obtenir plus de renseignements sur les licences et les nouveaux outils MATLAB)

4. Mise en place et analyse des données d'enquêtes et socioéconomiques

4.1. Étapes de réalisation de l'interface

Les régions où les cinq projets pilotes devaient avoir lieu ayant été déterminées et les questionnaires d'entretien semi-directifs élaborés, il a fallu développer une interface graphique de saisie de données. Le logiciel MS Access fut choisi pour sa portabilité et le fait qu'il est fort répandu, il n'y aurait pas de problèmes de licence. L'interface construite avec le langage de programmation VBA a alors été copiée sur l'ordinateur portable de chaque enquêteur. Après les enquêtes, nous avons transféré les résultats d'enquête sur cinq bases de données MS Access distinctes avant de les transférer finalement en rapports (format RTF) qui ont servi d'intrant à l'outil d'analyse qualitatif NVivo. Les autres étapes ont ensuite été effectuées par l'équipe de la Chaire d'étude sur les écosystèmes urbains de l'Université du Québec À Montréal (UQAM). Un processus de sauvegarde a été proposé pour avoir la certitude que le colossal travail de catégorisation n'est pas perdu.

Étapes de réalisation

1. Détermination des cinq projets pilotes (UQAM)
2. Élaboration des questionnaires d'entretiens semi-directifs (UQAM)
3. Développement d'une interface de saisie (VBA/ACCESS) (EC)
4. Transfert des résultats d'enquête sur cinq bases de données ACCESS (Enquêteurs)
5. Choix de l'outil d'analyse qualitatif NVivo (UQAM)
6. Transfert des données ACCESS en format RTF (EC)
7. Analyse qualitative par induction (catégorisation) (UQAM)
8. Transfert des résultats d'analyse NVivo vers EXCEL (matrice) (UQAM)
9. Transfert des matrices EXCEL vers SPSS pour analyse quantitative (UQAM)
10. Restitution des résultats d'enquête par monographies et sur le terrain (UQAM)

Conservation des données aux divers stades d'analyse (UQAM /EC)

- Les données brutes en format ACCESS (cinq fichiers qui devraient être fusionnés)
- Les fichiers RTF des catégorisations (beaucoup de travail impliqué)
- Les fichiers EXCEL
- Les résultats d'analyse SPSS

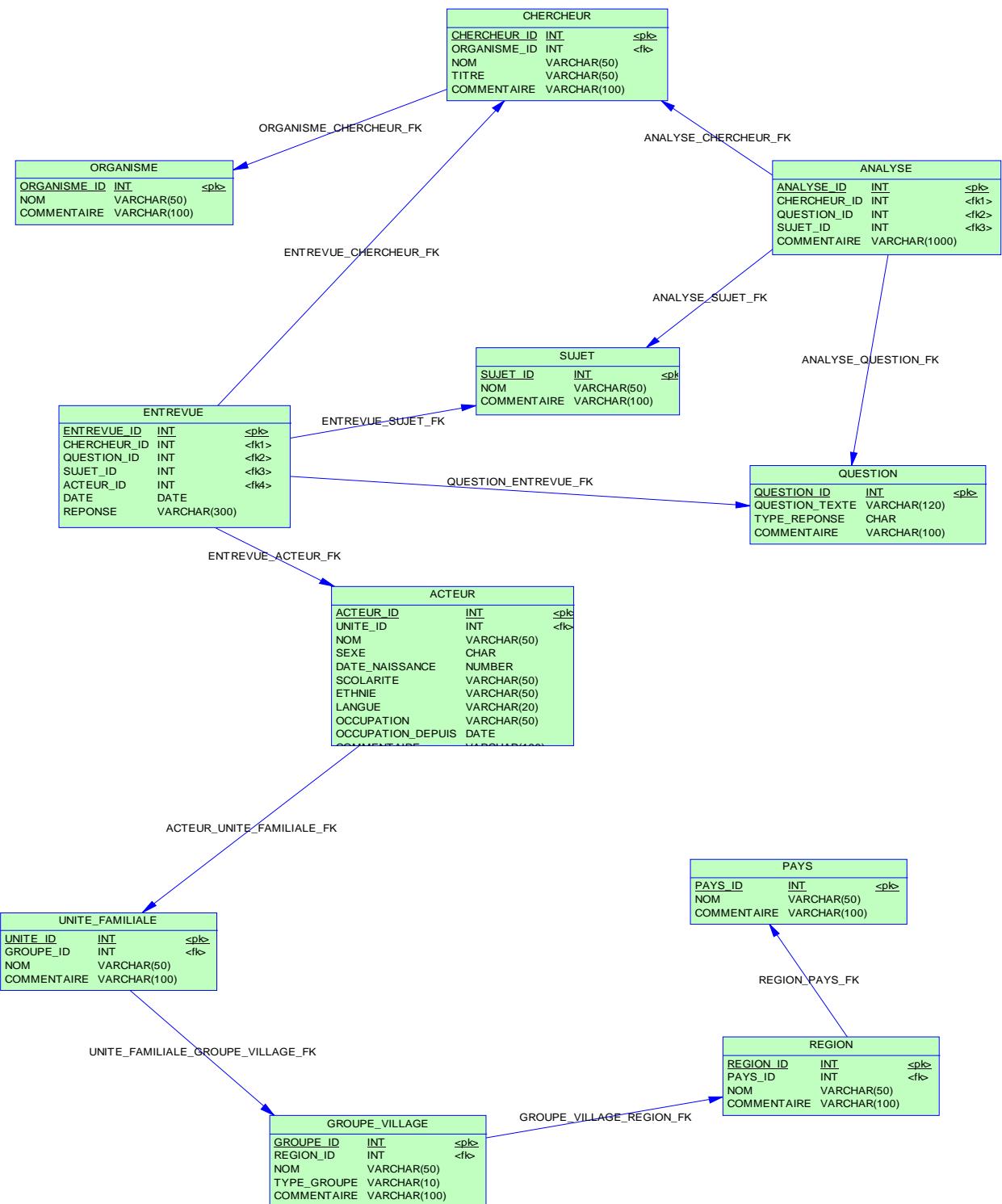


Figure 3. Modèle de base de données (enquête socioéconomique).

4.1.1. Guide d'utilisation de l'interface de saisie – enquête sur le terrain

Concept de base : Dans un premier temps, vous saisissez l'information sur l'entretien et l'acteur (celle-ci peut être préparée à l'avance). Il est important d'avoir un numéro d'entretien unique pour chacun. Vous pouvez naviguer d'un entretien à l'autre (voir « Navigation »). Ensuite, vous cliquez sur le bouton gris intitulé SAISIR ENTRETIEN qui vous permet de saisir les réponses de l'entretien. Si c'est un nouvel entretien, le système générera la série de questions à répondre avec le numéro de l'entretien que vous avez fourni. Si vous avez déjà commencé à saisir les réponses de l'entretien, vous serez placé à la première question de l'entretien.

Navigation : La navigation se fait principalement avec la barre de navigation située au bas des formulaires. Vous pouvez, dans l'ordre, revenir au premier enregistrement et atteindre l'enregistrement précédent. Vous pouvez atteindre directement un enregistrement en inscrivant le numéro de celui-ci dans la case suivante et en appuyant la touche retour. Vous pouvez atteindre le prochain enregistrement, atteindre le dernier enregistrement et, finalement, la petite flèche et l'étoile vous permettent d'ajouter des enregistrements. Vous fermez le formulaire en cliquant sur le X en haut à droite.

Saisie de données : Il suffit de passer à l'enregistrement suivant ou précédent après avoir saisie l'information dans les champs pour que celle-ci soit sauvegardée.

Reprise et modification : À tout moment, vous pouvez, en retournant sur la question ou la description d'entrevue, la modifier. Il est impossible de supprimer les enregistrements; en cas d'erreur, il suffit d'effectuer une modification.

Note importante : La seule contrainte que l'interface impose est celle d'avoir un numéro d'entrevue unique. Ce qui veut dire que ceux-ci devront être gérés et distribués idéalement par une seule et unique personne.



DESCRIPTION DE L'ENTRETIEN

ENQUÊTE

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA
GESTION DES PÂTURAGES AU SAHEL ET SUR LES
RELATIONS ENTRE ÉLEVEURS ET AGRICULTEURS À
TAHOUA AU NIGER

ENTRETIEN DATE	HEURE DÉBUT	HEURE FIN	CHERCHEUR	ORGANISME
1 2004-01-06				

exemple: 17:15

SECTION: A - DESCRIPTION DU RÉPONDANT OU DE LA RÉPONDANTE

NOM	PRÉNOM	SEXÉ	NAISSANCE
			1900-01-01

SCOLARITÉ	APPARTENANCE ETHNIQUE	APPARTENANCE LINGUISTIQUE

VILLAGE	GROUPE	PLACE DANS LA FAMILLE/CLAN

COURTE HISTOIRE DE VIE

Guide d'utilisation

Saisir l'entretien

Enr : |<|<|>|>>*> sur 2

Figure 4. Exemple d'interface de saisie (amorce du questionnaire).

QUESTIONNAIRE D'ENTRETIEN



ENQUÊTE

ENTRETIEN: 1

SECTION C - Agriculture, élevage, territoire

QUESTION: 11

Votre environnement (territoire) s'est-il transformé au cours des dernières années ? Si oui comment ? (eau, végétation , peuplement, propriété, frontières)

RÉPONSE

COMMENTAIRE

Enr : 11 sur 34

Figure 5. Exemple d'interface de saisie (questionnaire).

5. Mise en valeur des résultats d'études

5.1. Antenne africaine du GIEC

Le CRA souhaite, dans un avenir rapproché, jouer le rôle d'antenne sahélienne et africaine de réception et de diffusion de données en matière de scénarios climatiques et d'études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations. Pour ce faire, toute la partie échange de données doit recevoir une mise à niveau substantielle. Dans un premier temps, le CRA devra se doter d'un lien à haut débit, ce qui permettra une communication optimisée. Dans un second temps, les données disponibles doivent être rendues accessibles, et ce, de façon sécurisée pour toutes les composantes nationales AGRHYMET et ses spécialistes.

Nous suggérons l'acquisition d'un lien Internet haute vitesse pour appuyer le CRA. À la suite d'une analyse et des discussions avec l'équipe des réseaux et de l'équipement du CRA, nous sommes rapidement arrivés à la conclusion qu'un lien satellite serait une solution à envisager. La topologie du territoire sahélien ainsi que l'infrastructure de télécommunication actuelle ne permettent pas un lien à haute vitesse câblé. La technologie VSAT est assez mature et abordable pour répondre à ce besoin. Aux dernières nouvelles, en novembre 2005, l'antenne satellite a été achetée et livrée, mais pas encore installée.

Lien haute vitesse (antenne satellite)

Nous suggérons l'acquisition d'un lien Internet haute vitesse pour appuyer le projet AGRHYMET. À la suite d'une analyse et des discussions avec l'équipe des réseaux et de l'équipement du CRA, nous sommes rapidement arrivés à la conclusion qu'un lien satellite serait une solution à envisager. La topologie du territoire sahélien ainsi que l'infrastructure de télécommunication actuelle ne permettent pas un lien haute vitesse. La technologie VSAT est assez mature et abordable pour pouvoir retenir cette avenue. Voici une évaluation des coûts (basé sur une évaluation des prix de 2004) qu'engendrera cette option d'un lien haute vitesse satellite au CRA :

Coût de l'équipement (en euros)

Antenne (AN-PI120K)	€ 252 (1.2 m Tx/Rx Antenna, Ku-Band Feedhorn, Cross-Pol Filter/OMT, Intelsat approved)
Électronique (ES-L2W)	€ 1,833
Cables (CS-R030)	€ 74
Activation (2W2-AFA)	€ 948

Total: € 3,107 (installation et envois en surplus)

Abonnement au service (en euros) :

Service (2W2-P082) € 1,144 / mois (256 kbps de communication sortante/ 64 kbps de communication entrante)

€ 16,835 pour la première année

€ 13,728 pour les années suivantes

Des frais de maintenance, dont un contrat de service, devront être ajoutés.

Figure 6. Proposition antenne VSAT.

6. Perspectives futures

6.1. Accès Web sécurisé

Dans l'optique d'une communication efficace et sécuritaire et dans le respect des différentes règles d'accès aux données qui font actuellement l'objet d'un protocole d'entente internationale, nous envisageons un lien réseau privé virtuel «Virtual Private Network» (VPN) pour relier les diverses composantes régionales. Un lien VPN permet de connecter, et ce, de façon très sécuritaire, deux points d'un réseau. En échangeant préalablement une clé secrète d'encryptage, les deux correspondants peuvent échanger des informations via le réseau Internet dans un genre de tunnel protégé. L'accès aux informations de l'ensemble des scénarios climatiques et à la base de données géophysiques du CRA aura pour fins la production d'information spatiale géréférencée. Les données pourront être offertes en deux formats : premièrement, en fichiers texte compressés qui seront transférés avec un protocole comme Secure File Transfer Protocol (SFTP). Ce format est utile pour les applications qui n'ont pas d'options de connexion à une base de données. Deuxièmement, l'information transférée dans une base de données sera accessible via un engin de recherche et d'extraction afin de répondre aux requêtes des différents chercheurs. Les résultats pourront être visualisés et transférés. Il est également possible de connecter deux réseaux entre eux en utilisant cette technologie. Il permet d'étendre géographiquement et simplement un réseau de chercheurs en conservant le même niveau de sécurité.

6.1.1. Description générale : Réseau privé virtuel

Un réseau privé virtuel (VPN) est un lien entre un utilisateur distant à un réseau qui passe par le réseau public qui est sécurisé; les données sont cryptées sur 128 bits. Le transfert de données entre les deux points se fait comme si l'utilisateur distant était connecté directement sur le réseau local, donnant accès à un compte sur le réseau avec les droits et les priviléges octroyés par l'administrateur du réseau. Il est également possible de connecter deux réseaux entre eux en utilisant cette technologie. Il permet d'étendre géographiquement et simplement un réseau en conservant le même niveau de sécurité.

Pour obtenir plus de renseignements à ce sujet, consulter les sites de Survol (<http://idm.internet.com/foundation/vpn-1.shtml>), de Solutions commerciales (<http://www.epm.ornl.gov/~dunigan/vpn.html>) et du Consortium VPN (<http://www.vpnc.org/>).

Sécurité

Un coupe-feu (firewall) est un élément essentiel à la protection d'un réseau connecté à Internet.

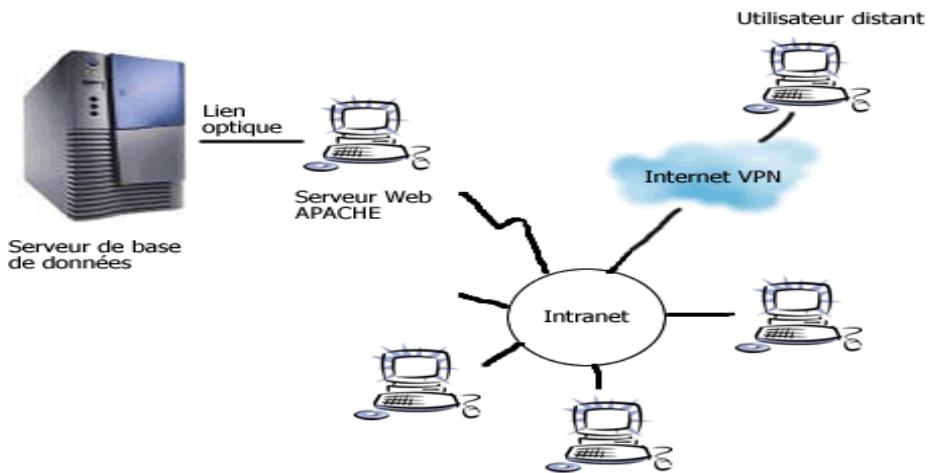


Figure 7. Solution proposée : réseau privé virtuel.

6.2. Acquisition des données

Dans l'optique d'une amélioration de la qualité intrinsèque des données régionales du CRA, un processus d'acquisition et de validation automatisé pourrait être déployé. Les différentes données des stations atmosphériques et hydrologiques sont acheminées vers le CRA via courriel. Avec un lien à haute vitesse, ce processus pourra être automatisé et permettra un flot régulier et fiable de données. Un processus automatisé de validation des données à la réception pourrait être implanté afin de compléter le transfert. Les données seraient évaluées selon des barèmes plus ou moins stricts et seront soumises à la validation manuelle par un expert qui aura le fin mot. L'équipe canadienne a plusieurs années d'expérience avec ce genre de méthode et pourra transférer cette connaissance sous forme de schémas, de processus et d'applications.

6.3. Données d'inventaire des équipements

Afin de relativiser les données reçues des divers équipements sur le terrain sahélien, il est important de savoir de quel instrument la donnée provient. Une base de métadonnées décrivant chaque équipement, les extrêmes, les unités, la position (latitude/longitude) et le plan de maintenance ne sont que des exemples qui permettent de lier les données à la réalité. L'équipe canadienne a plusieurs années d'expérience avec ce genre de base de données et pourra transférer cette connaissance sous forme de schémas, de processus et d'applications.

6.4. Données socioéconomiques (TDBASE)

Le CRA a produit en 2003 un système de Gestion de la base de données climatique thématique. Ce disque compact (TDBASE) contient des données de différents types qui sont accédées par une interface intégrée. Le format de base de données Foxpro a été utilisé pour entreposer les données et peut être installé à partir du disque. Il était question de centraliser ces données vers la base de données régionale afin de pouvoir plus aisément mettre en corrélation les divers aspects des thématiques du centre.

Sujet	Données
Agriculture	Production Superficie Rendement
Élevage	Santé animale Immunisation Population
Indicateurs complexes	Production totale des cultures par capita Superficie totale des cultures par capita Population de l'espèce animale par capita Population de l'espèce animale par superficie cultivée Unité Bétail Tropical par hectare Unité Bétail Tropical par superficie cultivée Indice de concentration des cultures pluviales (par ha) Indice de concentration des cultures pluviales (par tonne)

Tableau 7. Sommaire des données disponibles (TDBASE).

6.5. Transfert des résultats d'enquêtes vers la base de données régionale

Lorsque tous les résultats d'enquête seront saisis dans les diverses fiches MS Access, la compilation de celles-ci devra être transférée dans la base de données régionale afin de faire des corrélations avec les autres données géosociologiques. Pour ce faire, il faudra recourir à une personne avec de bonnes connaissances de MS Access et de base de données ORACLE. Le cas échéant, les fichiers MS Access pourraient être transférés au Canada pour consolidation, et un fichier de chargement ORACLE sera généré.

6.6. Site Internet des répercussions sociales et biophysiques du climat et ses changements au Sahel

Il s'agit ici de développer un site permettant l'accès complet aux données des études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations (sorties bruts des modèles, scénarios climatiques, données socioéconomiques et du climat, etc.) ainsi qu'aux résultats des études VIA, aux outils de mise à l'échelle statistique et de recherche. Ce site devra faire référence en Afrique de l'Ouest et permettre, notamment, au réseau des chercheurs africains de s'y alimenter aux fins de recherches, de publications et de participation aux conférences internationales comme la rencontre sur la mise en place du Protocole de Kyoto, par exemple. Nous avons travaillé à une maquette de cette proposition de site.

AGRHYMET

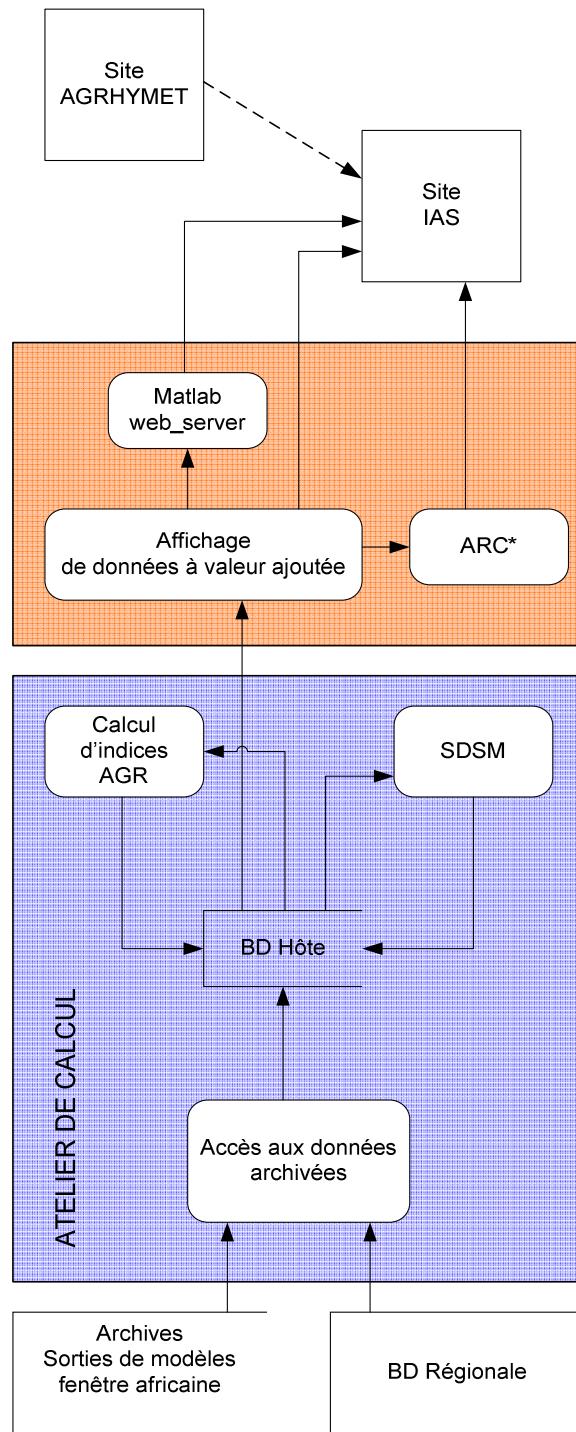


Figure 8. Maquette de la proposition.

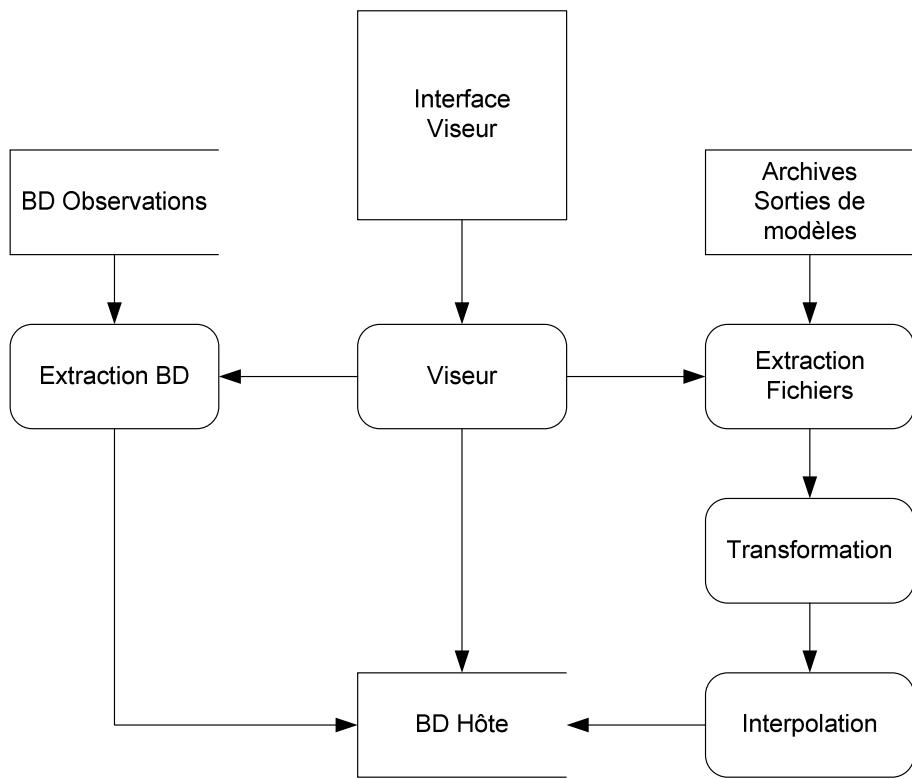


Figure 9. Extraction de données en tout genre.

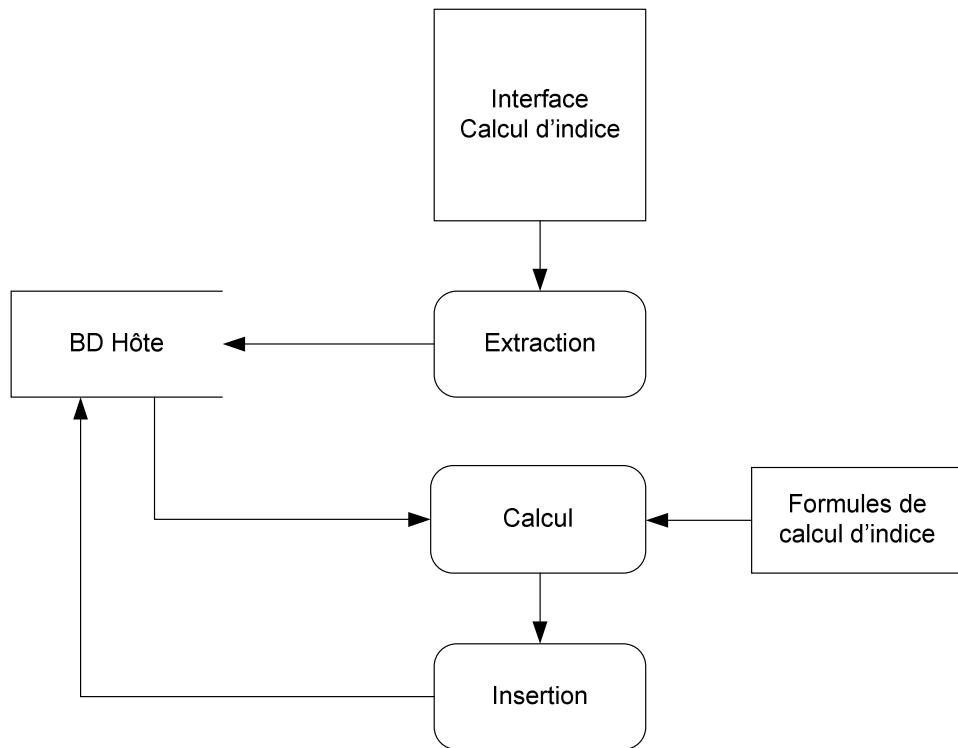


Figure 10. Atelier de calcul d'indices climatologiques et mise à l'échelle statistique.

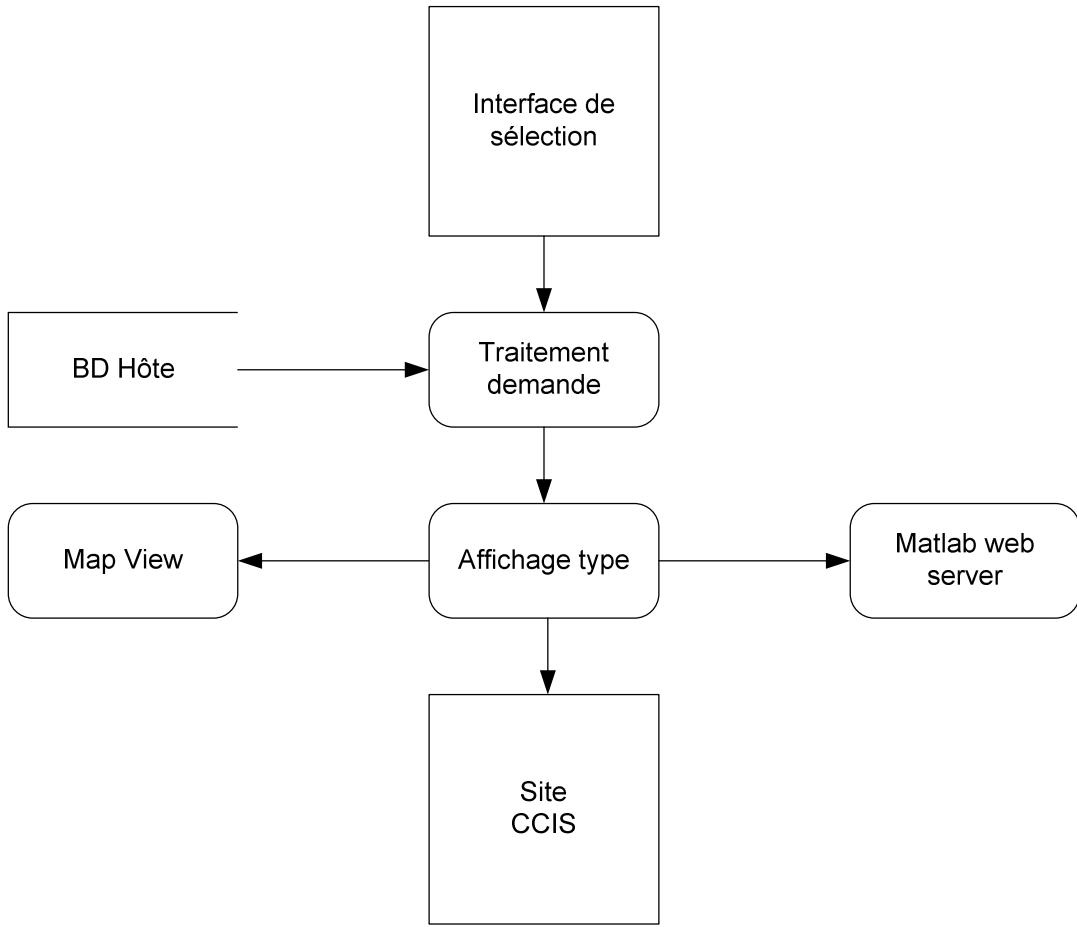


Figure 11. Module d'affichage en tout genre (graphique, carte ou texte).

6.7. Mise sur le Web de données à valeur ajoutée (données secondaires)

Une section du site AGRHYMET, accessible au grand public, sera réservée aux données à valeur ajoutée. Seront présentés des indicateurs climatiques et de vulnérabilité ainsi que diverses cartes générées par les logiciels de la famille ARC*. Ces cartes devront être de basse résolution vu la nature d'Internet, mais des versions à plus haute résolution pourraient être disponibles via un site FTP accessible par mot de passe. Cet espace tiendra lieu de vitrine de la recherche en vulnérabilités, en impacts et en adaptations aux changements climatiques du CRA.

6.8. Interface SIG

Il est prévu que l'équipe d'application et de base de données du CRA effectue le transfert de données qui sont actuellement dans des fichiers texte et qui servent à l'élaboration de la cartographie vers un support base de données Oracle. Ce transfert permettra, en partenariat avec l'équipe de l'atelier SIG du CRA, aux chercheurs en impacts et en adaptations de générer eux-mêmes certaines cartes en utilisant les outils SIG (ESRI, MapGuide, MapInfo ou autres).

Du présent vers l'avenir – recommandations et pistes futures de collaboration



Source : European Space Agency (<http://www.eduspace.esa.int>)

L'objectif poursuivi dans le cadre du présent projet était de faciliter le développement des stratégies d'adaptation face au climat, à sa variabilité et à ses changements plausibles, qui sont scientifiquement fondées et ancrées dans l'organisation sociale. Cet objectif s'inscrit parfaitement dans l'évolution de la recherche en vulnérabilités, en impacts et en adaptations face aux changements climatiques. Au terme de cette collaboration, il demeure encore des efforts à consacrer afin d'amener encore plus loin la mise en place et le suivi des stratégies d'adaptation.

Les actions à venir doivent principalement consolider sur le terrain les résultats obtenus lors de ce projet. Pour y arriver, des pistes futures de collaboration et des recommandations sont proposées en ce qui a trait à la consolidation des résultats. Cette consolidation doit être concrète et toucher de façon immédiate les actions à entreprendre.

En tout premier lieu, les actions à effectuer immédiatement auprès du Centre Régional AGRHYMET seront abordées afin d'y consolider les acquis des travaux des Groupes de travail I, II et III (l'atelier de formation, le transfert d'outils d'analyse, les actions sur le terrain).

En second lieu, les pistes futures de collaboration qui découlent de l'actuelle collaboration et qui sauraient se trouver dans une poursuite des travaux – phase II – seront élaborées.

1. CONSOLIDATION ET TRANSFERT D'EXPERTISE À EFFECTUER À COURT TERME

a. Groupe de travail I : Méthodologie en études de vulnérabilités, d'impacts, et d'adaptations face aux changements climatiques en milieu sahélien.

Les travaux des trois dernières années ont permis d'élaborer une approche en ce qui a trait aux études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations face aux aléas du climat. Fondée sur l'analyse de la contribution relative des dimensions socioéconomique, environnementale et climatique (événementielle) à la vulnérabilité, cette approche exploite des approches novatrices dans le domaine des sciences du climat et de l'analyse de l'organisation sociale. Afin de transférer ces expertises aux chercheurs sahéliens, il est recommandé de tenir un atelier régional de formation au Centre Régional AGRHYMET. Cet atelier comprendra les thèmes suivants :

- *Approche méthodologique en études de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations;*
- *Caractérisation du climat sahélien, mise à l'échelle et production de scénarios climatiques dans un contexte sahélien.*

b. Groupe de travail II : Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation.

La contribution en ce qui a trait à l'analyse des caractéristiques du climat a permis de cerner les limites actuelles des modèles climatiques globaux (MCG) face à la production de scénarios du climat aux échelles régionale et locale. L'utilisation d'une méthode de mise à l'échelle, en utilisant les prédicteurs issus d'un MCG (*i.e.* HadCM3) a permis de générer une information plus plausible à l'échelle locale en utilisant une combinaison judicieuse de prédicteurs. Cette méthode doit maintenant être transférée au Centre Régional AGRHYMET. Afin d'assurer le transfert de l'expertise en ce qui a trait à la mise à l'échelle et des outils d'analyse et de production élaborés, il est recommandé de :

- *transférer des outils et des logiciels afin de procéder à la mise à l'échelle des sorties des modèles du climat en milieu sahélien;*
- *présenter au Centre Régional AGRHYMET un atelier de formation sur l'utilisation du logiciel de mise à l'échelle SDSM (Statistical Downscaling Model) en contexte sahélien.*

c. Groupe de travail III : Vulnérabilité des populations et adaptation aux variabilités climatiques au Sahel : acteurs, institutions et dynamiques locales.

L'enquête concernant la vulnérabilité et l'adaptation des populations aux variabilités climatiques au Sahel a permis de cerner, de façon exhaustive, les interrelations entre les acteurs, les institutions et les dynamiques locales (le système d'action, le cadre institutionnel et le réseau d'action) en vue de l'élaboration de stratégies d'adaptation, il est recommandé :

- *d'identifier, pour chacun des projets pilotes, les actions prioritaires d'adaptation à entreprendre afin de réduire la vulnérabilité des populations en regard des constats de l'enquête sur le terrain et de désigner les interlocuteurs privilégiés pour leurs mises en œuvre;*
- *de tenir un atelier concernant la théorie engrainée (grounded theory), caractérisation et analyse de l'organisation sociale.*

d. Gestion intégrée des données climatiques, environnementales et socioéconomiques; de l'analyse aux infrastructures

Un des défis du présent projet de collaboration scientifique est d'entreposer une grande quantité de données environnementales et socioéconomiques et de les mettre en relation adéquatement. Une attention particulière a été portée afin d'exercer une gestion des données se voulant ouverte et permettant l'arrimage entre les données de différentes sources par géoréférences. Afin de pousser plus loin la gestion et la disponibilité des données environnementales et socioéconomiques, les actions suivantes sont recommandées :

- *Intégrer les résultats d'analyse du climat et les données d'enquête sur le terrain à la base de données régionale du Centre Régional AGRHYMET, ce qui permettra des analyses plus systématiques tant sur le plan climatologique que socioéconomique;*
- *Mettre en œuvre une représentation cartographique et spatiale de l'information à l'aide du système d'information géographique (SIG), permettant de combiner les MCG et les résultats d'enquête. Ces données pourront être mises en relation avec des données hydrologiques, agropastorales ou satellitaires.*

Dans la présente phase I, une première interface utilisateur a été développée. Cette interface permet d'offrir un cadre commun facile à utiliser tout en permettant une vision transversale des données diverses favorables à une analyse multivariée de l'information. Cette interface est fondée sur le logiciel en licence commerciale MATLAB (raccourci de « matrix laboratory » [laboratoire matriciel]) par la société américaine The MathWorks qui requiert une formation minimale pour en faciliter l'utilisation. À cet égard, il est recommandé d'implanter une formation en deux ateliers, à savoir :

- ***MATLAB – de base*** : fonctions de base, production de graphiques à deux et à trois dimensions, outils d'analyse statistique et d'interpolation, introduction à l'utilisation de bases de données;
- ***MATLAB – fonctions avancées*** : introduction à la programmation et création d'interfaces graphiques (boîtes à outils).

Finalement, dans le cadre de l'analyse des données d'enquête, une formation complète est requise sur les fonctionnalités du logiciel NVivo :

- ***NVivo – fonctionnalités et analyse de données d'enquête.***

2. PISTES FUTURES DE COLLABORATION – PHASE II

Les acquis du présent projet doivent être intégrés aux programmes de recherche (information) et de formation du Centre régional AGRHYMET. De même, la communauté scientifique du Sahel devrait tirer profit de l'expertise développée par l'accès à celle-ci via un site Internet.

Dans ce qui suit, les éléments qui sauraient composer chacun des volets futurs sont présentés.

PISTE DE COLLABORATION N° 1 – L'AJOUT AU PROGRAMME D'INFORMATION (RECHERCHE)

1. Sur les études concernant les caractéristiques du climat

Les actions du Groupe de travail II au cours des trois dernières années ont porté sur l'élaboration d'une méthode d'analyse détaillée du régime de précipitation au Sahel en termes :

- *d'indices climatiques permettant de caractériser l'intensité, la durée, la fréquence et/ou l'occurrence des précipitations à partir de données quotidiennes;*
- *de validation de la performance des modèles climatiques globaux (MCG) sur la fenêtre sahélienne;*
- *d'élaboration des méthodes alternatives de production de scénarios climatiques (mise à l'échelle) aux échelles locale et quotidienne.*
- *la réalisation d'études et d'analyses portant sur les autres variables climatiques, notamment la température (analyse de l'évolution des tendances observées de températures minimales et maximales depuis les années 1950 et leurs influences sur le calendrier et le cycle des cultures).*
- *étude de l'évolution d'autres facteurs clés de la saison agricole (date de début de l'hivernage, date de semis, longueur de la saison agricole).*
- *la poursuite des travaux de caractérisation du climat sahélien notamment en procédant à une analyse du climat sahélien en période de mousson « humide » (p. ex. de 1930 à 1959) afin de connaître les caractéristiques du régime de précipitations (l'intensité, la durée, la fréquence et/ou l'occurrence) en termes d'indices pertinents;*
- *l'élaboration d'indices climatiques appropriés pour le Sahel à la lumière des résultats des projets pilotes permettant d'identifier les besoins des populations et de définir des seuils pour les indices existants pour mieux répondre aux besoins spécifiques du Sahel (p. ex. pour l'application en agriculture);*
- *l'élaboration d'indices hydrologiques liés à l'écoulement des eaux de surface et à la dynamique spatio-temporelle des cours d'eau comme les lacs et les rivières, afin d'appuyer une meilleure gestion des ressources en eau;*
- *la production d'information mise à l'échelle pour d'autres stations et d'autres régions du Sahel afin de comparer et d'évaluer régionalement la performance des résultats produits;*
- *la mise en place d'un groupe de recherche en prévisions saisonnières et de modèles du climat au Sahel, y compris la modélisation climatique régionale;*
- *l'élaboration de méthodes de mise à l'échelle statistique multisites et permettant d'améliorer la simulation des extrêmes de précipitation à l'échelle régionale et locale;*
- *l'analyse comparative d'autres méthodes dynamiques de mise à l'échelle (i.e. modèles climatiques régionaux), afin d'explorer les incertitudes associées au choix de la méthode de mise à l'échelle;*
- *l'élaboration de scénarios climatiques à partir des différentes méthodes de mise à l'échelle (dynamique et statistique) dans différentes régions du Sahel et en évaluer les incertitudes associées;*
- *l'établissement des liens entre les variables climatiques pertinentes (les*

données mises à l'échelle en comparaison avec les données observées) et la production agricole à l'échelle régionale ou locale (cf. Seidou et al., 2006), la santé ainsi que la sécurité alimentaire des populations.

2. Sur les études concernant les préoccupations de l'organisation sociale

L'apport à la mise en œuvre de projets pilotes a porté sur l'analyse des préoccupations de l'organisation sociale à l'aide d'une enquête auprès des communautés villageoises (travaux du Groupe de travail III). Par une approche méthodologique inductive (grounded theory), cette recherche a permis d'établir :

- *les caractéristiques socioéconomique, politique et environnementale qui définissent les vulnérabilités actuelles des communautés sahéliennes;*
- *leurs capacités d'adaptation actuelles face aux aléas du climat;*
- *l'état des connaissances utilisées afin d'appréhender les aléas du climat;*
- *le système d'action, le cadre institutionnel et le réseau d'action qui permettent aux populations de rechercher des solutions face aux aléas du climat.*

Les axes futurs de recherche devront porter sur :

- *la poursuite de la caractérisation de l'organisation sociale au Sahel en impliquant des acteurs clés comme : les dirigeants d'organismes non gouvernementaux internationaux, les représentants de grandes associations, de hauts cadres de l'administration, les médias, etc.;*
- *l'analyse de l'organisation sociale en ce qui a trait à la gestion durable des ressources;*
- *l'étude de la place des connaissances scientifiques et traditionnelles dans la prise de décision;*
- *l'étude des systèmes d'action et la participation publique, par exemple, en ce qui a trait à la gestion de l'eau, et de l'espace agricole et pastoral;*
- *l'établissement de liens entre l'analyse future des et l'approche proposée par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et le Global Environment Facility (GEF) (Adaptation policy framework for climate change: Developing strategies, policies and measures);*
- *la prise en compte de l'aspect désarticulation des économies des pays en développement par la mondialisation comme facteur de vulnérabilité;*
- *l'étude du contexte institutionnel et organisationnel en ce qui a trait aux instruments d'action publique et de coordination, et ce, aux échelles continentale, transnationale, régionale et locale.*

De même, trois thèmes sont privilégiés pour identifier et caractériser des indicateurs et des seuils de vulnérabilité, à savoir :

- *L'accès aux ressources et la valorisation des potentialités en ressources. Il faudra également considérer, dans ce contexte, la question des technologies et de leur maîtrise par les producteurs;*
- *La gestion des ressources à l'échelle des familles et des communautés. Il s'agit de montrer que le construit sociétal l'emporte sur les risques bioclimatiques apparents dans le domaine alimentaire;*
- *Les effets des régulations, des politiques et des interventions mises en œuvre. Il conviendra donc de faire ressortir les inégalités patrimoniales et décisionnelles qui ne sont pas nécessairement appréhendées par les*

diagnostics rapides participatifs (Janin, 2003), ce qui revient inévitablement à poser la question des rapports de pouvoir au sein des communautés villageoises.

PISTE DE COLLABORATION N° 2 – L'AJOUT AU PROGRAMME DE FORMATION

Afin de former les chercheurs sahéliens aux avancés du présent projet et de ceux découlant du programme de recherche, l'ajout des éléments de formation qui suivent au programme de formation au Centre Régional AGRHYMET est proposé.

En ce qui a trait à l'étude des caractéristiques du climat, les éléments de syllabus suivants :

- Analyse des caractéristiques du climat;
- Variabilité, extrêmes et changements climatiques;
- Indices et indicateurs climatiques en analyse du climat;
- Indices climatiques et études d'impacts;
- Élaboration de scénarios des changements climatiques;
- Techniques de mise à l'échelle – méthodologie de base et avancée;
- Modélisation climatique en particulier, le régime de précipitation en zone de mousson.

En ce qui a trait à l'étude des capacités – gouvernance, connaissances et réduction de la vulnérabilité des populations face aux répercussions climatiques –, les éléments de syllabus suivants :

- Théorie enracinée (grounded theory);
- Introduction à l'analyse de l'action organisée : acteur, pouvoir, relations de pouvoir, zone d'incertitude et système d'action concret;
- Nouvelle gouvernance de l'environnement : délibération, concertation et négociation;
- Utilisation de la connaissance (scientifique et traditionnelle) dans la prise de décision;
- Changements climatiques et stratégies d'adaptation : gestion de l'eau, agriculture et pastoralisme.

PISTE DE COLLABORATION N° 3 – LE SITE INTERNET

En appui aux programmes de recherche et de formation, il est proposé :

qu'un site Internet portant sur « les répercussions sociales et biophysiques du climat et ses changements au Sahel » soit développé.

Il permettrait au Centre Régional AGRHYMET de devenir le point de référence régional en la matière. Le site devra faire référence en Afrique de l'Ouest et permettre, notamment, au réseau des chercheurs africains de s'y alimenter aux fins de recherches, de publications et de participation aux conférences internationales. Ce site permettrait l'accès aux données des études

de vulnérabilités, d'impacts et d'adaptations (VIA) (sorties brutes des modèles, scénarios climatiques, données socioéconomiques et du climat, etc.), aux résultats des études VIA, aux outils de mise à l'échelle statistique et de recherche.