

Document public



# Projet Réseau SIG-Afrique Carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 Million

BRGM/RP - 54404 - FR  
Décembre 2005



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Projet *Réseau SIG-Afrique* Carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 Million

BRGM/RP - 54404 - FR  
Décembre 2005

J.J. Seguin

**Vérificateur :**

Original signé par: D. Poitrinal

**Approbateur :**

Original signé par: J. Testard

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.





**Mots clés** : Hydrogéologie - Cartographie - Afrique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Seguin J.J.**, (2005) – Projet Réseau SIG-Afrique. Carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 M.

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.



## Synthèse

On présente dans ce rapport le travail de cartographie hydrogéologique réalisé dans le cadre du projet "Réseau SIG-Afrique".

Ce projet (Mars 2003-Décembre 2005) a été financé par le Ministère français des Affaires Etrangères (MAE) et coordonné par le CIFEG (Centre International pour la Formation et les Echanges en Géosciences). L'intégration dans le réseau des travaux géoscientifiques et cartographiques a été financé parallèlement par le Ministère de la Recherche et de la Technologie.

L'objectif principal du projet est la création d'un partenariat pour la valorisation et la diffusion de l'information sur le sol et le sous-sol du continent africain.

Un "Système numérique d'Informations Géoscientifiques" a été ainsi mis en place, partagé entre les partenaires africains du projet, représentant 11 pays:

- 6 pays d'Afrique de l'Ouest: Burkina Faso, Guinée, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal
- 4 pays d'Afrique de l'Est: Ethiopie, Kenya, Tanzanie, Madagascar, groupe auquel s'ajoute l'Angola.

Un site Internet a aussi été créé: [www.sigafrique.net](http://www.sigafrique.net).

Pendant la durée du projet, deux points focaux, l'un à Ouagadougou au Burkina Faso, l'autre à Dar Es Salaam en Tanzanie, ont permis, par l'intermédiaire d'ateliers de 5 à 10 jours, de mener des actions de formation et d'échanger des points de vue dans les thématiques abordées par le projet.

Concernant la cartographie hydrogéologique, deux ateliers de 10 jours se sont ainsi tenus en 2004 et deux autres de 5 jours en 2005 (cf compte rendu de missions en annexe). Ces ateliers ont été consacrés en grande partie à la formation (initiation des participants à la démarche de construction d'un SIG), mais ils ont été aussi un lieu de contributions à la carte hydrogéologique qui a été construite.

Cette carte est une maquette à l'échelle du 1/10 M accompagnée d'un exemple au 1/5 M pour l'Afrique de l'Ouest.

En l'absence d'une carte géologique au 1/5 M, le point de départ a donc été la carte géologique au 1/10 M ainsi que les cartes géologiques au 1/2 M des 11 pays partenaires, cartes établies dans le cadre du projet (ce qui permettait de bénéficier de l'infrastructure numérique déjà en place). Une sortie au 1/5 M a été réalisée à titre d'exemple.





## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Grands traits de l'hydrogéologie de l'Afrique .....</b>	<b>7</b>
2.1. AQUIFERES DISCONTINUS DU PRECAMBRIEN ET DU PALEOZOÏQUE .7	
2.1.1. Aquifères du socle cristallin et cristallophyllien .....	7
2.1.2. Aquifères des formations sédimentaires du Précambrien supérieur et du Paléozoïque .....	8
2.2. AQUIFERES CONTINUS DES BASSINS SEDIMENTAIRES D'AGE MESOZOÏQUE A QUATERNAIRE. ....	10
2.2.1. Aquifères profonds à ressource en eau non renouvelable.....	10
2.2.2. Aquifères des bassins du Congo et du Kalahari .....	13
2.2.3. Aquifères alluviaux .....	14
2.3. AQUIFERES DE STRUCTURE COMPLEXE .....	15
2.3.1. Aquifères de la formation du Karoo.....	15
2.3.2. Aquifères carbonatés .....	17
2.4. AQUIFERES DES FORMATIONS VOLCANIQUES DU PHANEROZOÏQUE	17
2.4.1. Coulées et projections.....	17
2.4.2. Les filons .....	17
<b>3. Méthodologie .....</b>	<b>19</b>
3.1. CARTOGRAPHIE HYDROGEOLOGIQUE .....	19
3.1.1. Type de cartes .....	19
3.1.2. Entités hydrogéologiques .....	20
3.2. CONSTRUCTION DE LA CARTE .....	21
3.2.1. Démarche.....	21
3.2.2. Délimitation de grandes entités hydrogéologiques.....	21
3.2.3. La recharge .....	23

<b>4. Présentation de la carte et du SIG associé .....</b>	<b>27</b>
4.1. PRINCIPES DE REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE .....	27
4.2. LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE.....	28
4.2.1. Couches de données reportées sur la carte.....	28
4.2.2. Autres couches de données .....	29
<b>Conclusion .....</b>	<b>31</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>33</b>
<b>Annexe - Figures.....</b>	<b>35</b>

#### **Liste des tableaux**

- Tableau 1 - Aquifères continus à ressource en eau non renouvelable des bassins sédimentaires récents
- Tableau 2 - Litho-stratigraphie du Karoo dans le bassin de Localane-Ncojane au Botswana
- Tableau 3 - Classification possible des cartes en hydrogéologie
- Tableau 4 - Regroupement des formations géologiques en 11 entités hydrogéologiques
- Tableau 5 - Classes de recharge retenues dans la cartographie

# 1. Introduction

Jusqu'à présent il n'existait pas de carte hydrogéologique numérique (se présentant sous la forme d'un Système d'Information Géographique) de l'ensemble du continent africain. A l'échelle du 1/5 M, la seule carte disponible, est la "*Carte Hydrogéologique Internationale de l'Afrique*" publiée en 1992 par l'OACT (Organisation Africaine de Cartographie et de Télédétection) en 6 feuilles.

Outre cette carte, on peut citer la carte des "*Ressources en eaux souterraines de l'Afrique*" établie par J. Margat à l'échelle du 1/25 M (*Carte n° 3431- F - Nations Unies - J. Margat - 1987*)

Des cartes régionales ont aussi été publiées à différentes échelles, par exemple:

"*Ressources en eau communes des pays de la région de l'OSS. Bassins fluviaux et aquifères profonds transfrontaliers*" à l'échelle du 1/10 M (Observatoire du Sahara et du Sahel - J. Margat - 1995)

"*Carte de potentialité des ressources en eau souterraine de l'Afrique Occidentale et Centrale*" à l'échelle du 1/5 M. (Comité Interafricain d' Etudes Hydrauliques. BRGM et Geohydraulique - 1986).

Le présent travail jette donc les bases d'une cartographie hydrogéologique numérique de l'Afrique, cartographie conçue sous la forme d'un Système d'Information Géographique piloté par le logiciel ArcGIS. Il a aussi permis de rassembler au sein d'un même système informatique des données du continent africain auparavant dispersées dans plusieurs bases internationales:

**Digital Chart of the World (DCW)** pour les villes et les pays

[http://ortelius.maproom.psu.edu/dcw/dcw\\_about.shtml](http://ortelius.maproom.psu.edu/dcw/dcw_about.shtml)

**Hydro1K** base de données hydrographiques développée à l' U.S. Geological Survey (USGS) à partir d'un modèle numérique de terrain du monde à 30" d'arc (GTOPO30).

<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/africa.asp>

De cette base ont été extraits le modèle numérique de terrain , les grands bassins hydrologiques et les principaux cours d'eau et les grands lacs.

**Aquastat** - Base de données "*Eau et Agriculture*" de la FAO . Différentes informations concernant les ressources en eau par pays ont été extraites de cette base et intégrées au SIG\_Afrique\_Eau.

<http://www.fao.org/ag/aql/aqlw/aquastat/main/index.stm>

Après un rappel des grands traits de l'hydrogéologie du continent africain, on expose la démarche adoptée pour l'élaboration de la carte hydrogéologique. A l'issue du projet celle-ci se présente sous la forme d'une maquette au 1/10 M, qu'il est prévu de faire valider par un groupe d'experts avant de l'enrichir pour la produire à l'échelle du 1/5M.



## 2. Grands traits de l'hydrogéologie de l'Afrique

Dans ce qui suit on caractérise brièvement, à l'aide de quelques exemples tirés de la bibliographie consultée, les principaux types d'aquifères de l'Afrique en les rattachant aux formations géologiques délimitées sur la carte géologique au 1/10 M du projet SIG-Afrique.

### 2.1. AQUIFERES DISCONTINUS DU PRECAMBRIEN ET DU PALEOZOÏQUE

#### 2.1.1. Aquifères du socle cristallin et cristallophyllien

Il s'agit de formations plutoniques, métamorphiques, volcano-plutoniques, parfois associées à des formations de roches volcano-sédimentaires, les "ceintures de roches vertes" ("*greenstones belts*"), d'âge Précambrien (archéen à paléoprotérozoïque) à Cambrien.

Elles se rencontrent essentiellement (figure 1 en annexe):

- en Afrique de l'Ouest où elles dominent en Guinée, au Sierra Leone, au Libéria, en Côte d'Ivoire, au Burkina Faso, ... ;
- le long de la côte Atlantique : Angola, Gabon, Guinée Equatoriale ;
- dans la partie nord de l'Afrique du Sud ;
- dans le nord de la Mauritanie (dorsale Reguibate)
- en Afrique de l'Est: Zimbabwe, Nord-Est de la Zambie, Tanzanie, Uganda;
- à Madagascar.

On les retrouve aussi, plus localisées, dans le Sud de l'Algérie (Hoggar), au Niger (Aïr) et au Mali (région de Bougoumi, au sud de Bamako et de part et d'autre du " Déroit soudanais" : sud de Gao et Adrar des Ifoghas).

Les roches qui constituent ces formations (granites, syénites, gabbros, diorites, gneiss, migmatites, schistes, ...) sont caractérisées par une porosité très faible (inférieure à 1% en général, au plus de 1 à 2%); l'emménagement et la circulation d'eau n'y est donc possible que s'il existe :

- une zone d'altération suffisamment épaisse, de bonne porosité, à rôle capacitif
- un réseau de fissures ou de fractures non colmatées, à rôle conducteur.

Parmi ces formations, on distingue deux domaines hydrogéologiques :

- un domaine à dominante granito-gneissique
- un domaine à dominante schisteuse

#### 2.1.1.1. Domaines à dominante granito-gneissique

L'ensemble altérites / socle fracturé se comporte comme un aquifère de type bicouche, dans lequel:

- le substratum rocheux fracturé, à forte perméabilité locale, assure une fonction transmissive qui permet d'obtenir un bon débit instantané,
- les altérites sus-jacentes, grâce à leur capacité de rétention d'eau, permettent l'alimentation à long terme du forage en étant drainées par le réseau de fractures.

Les très nombreux forages réalisés en zones de socle ont confirmé que l'exploitation des eaux souterraines dans ces zones pouvait être significativement améliorée en captant directement les secteurs fracturés de la roche saine avec des possibilités de débits de l'ordre de 5 à 15 m<sup>3</sup>/h, parfois inférieurs à 5 m<sup>3</sup>/h, rarement supérieurs à 15 m<sup>3</sup>/h.

#### 2.1.1.2. Domaines à dominante schisteuse

Le modèle conceptuel est le même que pour les formations granito-gneissiques mais avec quelques différences:

- la frange altérée est plus épaisse,
- la perméabilité de la zone altérée est plus faible en raison d'une fraction argileuse plus importante,
- les fissures affectant la roche saine sont plus nombreuses du fait de la présence des plans de schistosité,
- on trouve fréquemment des intercalations grésos-quartzitiques ou volcano-sédimentaires, des filons de quartz

Ces deux dernières caractéristiques améliorent la qualité du réservoir schisteux, mais les débits restent faibles, et sont généralement inférieurs à ceux du domaine granito-gneissique.

### **2.1.2. Aquifères des formations sédimentaires du Précambrien supérieur et du Paléozoïque**

Ces formations constituent de grands bassins sédimentaires: bassins de Taoudeni, du Sahara Septentrional, de Tindouf, de Murzuk, du Katanga, du Kalahari. Recouvertes en leur centre de formations plus récentes (Paléogène à Quaternaire), elles affleurent (figure 2 en annexe):

- à la périphérie des formations du socle précambrien: sud de l'Algérie, nord du Niger et du Tchad, sud du Mali, ouest du Burkina Faso, sud du Soudan, flanc sud de la dorsale Reguibate en Mauritanie ;
- tout autour du bassin du Congo ;
- en Namibie, au sud-ouest de l'Afrique du Sud, en Zambie, au Mozambique ;
- le long de la Mer Rouge en Erythrée, en Egypte.

Elles affleurent également à Madagascar, au Kenya, en Ethiopie, au Tchad, en Algérie et, plus localement, en Somalie, en Libye et au Maroc.

#### 2.1.2.1. Aquifères des formations gréseuses du Précambrien

Les formations sédimentaires du Précambrien sont constituées de roches très consolidées (très souvent des grès indurés), fracturées ; elles constituent des aquifères peu productifs et d'un point de vue hydrogéologique peuvent être rattachées aux formations cristallines et cristallophyliennes du socle. Elles sont parfois traversées par des injections de dolérites qui en améliorent la fracturation.

Dans le cas du Mali, par exemple, les formations du Précambrien affleurent largement dans le sud du pays, de la frontière avec le Sénégal jusqu'à la plaine du Gourma au sud de Gao. Elles affleurent aussi au nord et de part et d'autre de l'Adrar des Ifoghas.

Il s'agit essentiellement de séries gréseuses, fracturées, parfois épaisses de plusieurs centaines de mètres. Elles affleurent sous forme de plateaux: de l'Ouest vers l'Est, régions de Bafoulabé, de Kenieba, de Sikasso, de Koutiala ("Grès de Koutiala), de Bandiagara ("Grès de Bandiagara"), de San (cf carte au 1/5 M).

Ces plateaux gréseux renferment le principal aquifère discontinu du Mali et de très nombreux forages y sont implantés. Comme dans les zones de socle cristallin, il existe une continuité hydraulique entre les nappes superficielles contenues dans les formations latéritiques et la frange altérée et les nappes des fissures sous-jacentes.

Dans la région de Gourma, les formations, essentiellement constituées de schistes, grès et quartzites sont peu aquifères; les secteurs les plus aquifères sont associés à des niveaux calcaires et gréseux.

#### 2.1.2.2. Aquifères des formations schisto-gréseuses et schisto-pélitiques du Cambrien.

Ces aquifères, à faible réserve en eau, sont caractérisés par :

- un horizon altéré généralement épais et argileux ;
- une forte hétérogénéité lithologique : les schistes alternent avec des grès, des arkoses, des conglomérats, des grauwackes.

La faible perméabilité des séries schisteuses peut être compensée par :

- les plans de schistosité qui en augmentent la porosité;
- la présence d'intercalations détritiques ou volcano-détritiques agissant comme des drains, améliorant ainsi la qualité du réservoir.

Au Mali, les formations du Cambrien, à dominante de schiste et pélite, sont peu aquifères: elles se rencontrent à l'Ouest, le long de la frontière mauritanienne (plaine de Nioro et bordure de la fosse de Nara) et tout à fait au nord (frontière algérienne).

Les secteurs aquifères sont peu développés et liés à une perméabilité de type fissurale. Ils ont une extension latérale et verticale bien inférieure à celle des Grès du Précambrien.

#### 2.1.2.3. Aquifères de calcaires dolomitiques

Ils peuvent être karstifiés, permettant alors d'obtenir de bons débits: par exemple au nord du Burkina Faso où les calcaires dolomitiques drainent l'eau de l'aquifère

gréseux (100 m<sup>3</sup>/h au "forage Christine"), en République Centre Africaine (région de Bangui), en Mauritanie (région de Kiffa), en Algérie (calcaires du Carbonifère dans le sud-ouest oranais), en Afrique du Sud (séries dolomitiques du Transvaal).

## 2.2. AQUIFERES CONTINUS DES BASSINS SEDIMENTAIRES D'AGE MESOZOÏQUE A QUATERNAIRE.

Ils sont localisés sur la figure 3 en annexe.

### 2.2.1. Aquifères profonds à ressource en eau non renouvelable

Dans les bassins sédimentaires d'âge mésozoïque à cénozoïque, on distingue deux grandes séquences géologiques contenant des aquifères profonds, multicouches, captifs dans la partie centrale des bassins:

- le *Continental Intercalaire*: formations continentales principalement d'âge mésozoïque (du Trias à l'Albien), pouvant aussi débiter au Permien.
- le *Continental Terminal*, formations continentales d'âge cénozoïque.

Les formations du Continental Intercalaire sont à dominante gréseuse avec des intercalations argileuses. Elles sont très représentées en Afrique saharienne et sahélienne (bassin du Sahara Septentrional, bassin de Taoudeni, bassin des lullemeden, bassin du Tchad, de Murzuk). Mais on les rencontre aussi dans le bassin du Congo, de la Bénoué, et dans les bassins côtiers du Gabon et du Congo). Au Continental Intercalaire, on rattache aussi la formation dite des *Grès nubiens* (*Nubian Sandstones*), présente en Lybie, en Egypte, au Soudan et au Tchad).

Les formations du Continental Terminal sont des formations essentiellement détritiques, sableuses ou grés-argileuses, d'âge Eocène moyen à Pliocène.

Entre le Continental Intercalaire et le Continental Terminal, on rencontre:

- le Continental Hammadien, formations détritiques d'âge Crétacé supérieur à Paléocène;
- la formation sableuse du Maastrichtien du Bassin Sénégal-mauritanien.

Les aquifères les plus importants de ces bassins, à ressource considérée comme non renouvelable (ou très peu) sont partagés entre plusieurs pays; ils sont localisés sur la figure 3 (en annexe) et listés dans le tableau ci-dessous:

Dénomination des aquifères	Pays concernés	Superficie (km <sup>2</sup> )
Système Aquifère des Grès Nubiens (Nubian Sandstone Aquifer System : NSAS)	Egypte, Libye, Soudan, Tchad	2 200 000
Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS)	Algérie, Libye, Tunisie	1000 000
Bassin du Tchad	Niger, Nigeria, Tchad, Cameroun	600 000
Système Aquifère des lullemeden	Mali, Niger, Nigeria	500 000
Bassin de Murzuk	Algérie, Lybie, Niger	450 000
Maastrichtien	Mauritanie, Sénégal	

Tableau 1 – Aquifères continus à ressource en eau non renouvelable des bassins sédimentaires récents



#### 2.2.1.1. Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (réf. 22)

Il est constitué par la superposition de 2 aquifères: celui du Complexe Terminal et celui, plus profond, du Continental Intercalaire. Il s'étend en Algérie (60 % de sa superficie), en Tunisie (10 %) et en Libye (30%).

Le Continental Intercalaire affleure au Nord Ouest tout au long de l'atlas Saharien et au Nord Est sur le Dahar et le Djebel Neffusa. Au Sud, il affleure le long des formations sédimentaires du Paléozoïque.

L'étude menée par l'Observatoire du Sahara et du Sahel en 2000-2002, recense près de 9000 points d'eau (forages et sources) sollicitant ces deux formations: 3500 captant le Continental Intercalaire et 5300 le Complexe Terminal, avec un prélèvement annuel de 2.2 milliards de m<sup>3</sup>.

Les conséquences de cette exploitation intensive d'aquifères à ressource non renouvelable (baisse piézométriques importantes, affaiblissement de l'artésianisme, tarissement des foggaras) ont conduit à une concertation entre les 3 pays concernés débouchant sur un projet de gestion commune du SASS et la réalisation d'un modèle hydrodynamique permettant de prévoir l'évolution du système suivant différents scénarios d'exploitation.

#### 2.2.1.2. Le Système Aquifère des Grès nubiens (réf. 17 et 20)

Le bassin nubien est l'un des plus grands réservoirs aquifères du monde. D'une superficie d'environ 2000 000 de km<sup>2</sup>, il couvre le sud-est de la Libye, l'Egypte, le nord-est du Tchad et le nord du Soudan.

Dans sa partie nord, vers la Méditerranée, l'aquifère est limité par un interface eau douce/eau salée.

Dans la partie centrale du bassin, l'épaisseur des sédiments dépasse 3000 m. D'un point de vue hydrogéologique on distingue deux couches aquifères:

- une couche correspondant aux dépôts continentaux du mésozoïque (les Grès nubiens au sens strict);
- une couche de dépôts continentaux principalement sableux d'âge post-éocène, communicant par drainance avec les grès sous-jacents.

La série des grès affleure sur à peu près la moitié du bassin, au sud du 26<sup>ième</sup> parallèle, l'aquifère étant alors libre.

L'estimation des réserves en eau varie selon les auteurs, mais ces réserves se chiffrent toujours en centaines de milliers de km<sup>3</sup> dont 15000 km<sup>3</sup> seraient économiquement exploitables (réf. 17).

Les prélèvements évalués au début des années 2000 sont de 2.2 km<sup>3</sup>, la plus grande partie étant destinée à l'irrigation.

En Libye, l'alimentation en eau des principales villes côtières (Benghazi, Ajdabyia,....) est assurée par de l'eau prélevée dans la partie centrale de l'aquifère (environ 70 millions de m<sup>3</sup>/an) et acheminée vers la côte par canalisation sur un trajet de 1600 km (*Great Man-Made River project*).

### 2.2.1.3. Le Système Aquifère du Bassin des Iullemeden (réf. 1 et 20 )

#### 1) *Le Continental Intercalaire*

Dans le bassin des Iullemeden, le Continental Intercalaire est un ensemble complexe de séquences détritiques et lacustres du Jurassique et du Crétacé: sables, grès et argiles, avec quelques couches calcaires au sommet. Les couches à dominante sableuse et gréseuse sont appelées "Grès du Tegama".

A cet ensemble on rattache le Continental Hamadien (faciès latéral gréseux du Crétacé supérieur) que l'on rencontre aussi au Nigeria sous la dénomination de "Gundumi Formation".

Les formations gréseuses du Continental Intercalaire affleurent sur les bordures Nord et Est du bassin (Grès du Tegama) ainsi que dans la partie Sud.

Le Continental Intercalaire affleure aussi à l'Est du pays, mais de manière discontinue: entre l'Aïr et le plateau du Djado et dans le fossé de Tefidet.

Ces formations constituent un vaste aquifère multicouche dont les ressources en eau sont considérées comme non renouvelables.

L'aquifère est libre à la périphérie du bassin( Grès du Tegama à l'Est, bassin de Sokoto au Sud, au Nigeria) et totalement captif au Centre et au Sud.

Lorsque l'aquifère est captif, son toit est formé par des formations argilo-sableuses du Continental Terminal (cf §2 ci-dessous) localement semi-perméables à leur base. Le réservoir est épais de plusieurs centaines de mètres, 500 m en moyenne au Niger, 1000 m près de la bordure Ouest.

Les aires d'émergence sont localisées dans la vallée du Niger et le Dallol Maori (et au sud du Sokoto au Nigeria).

Au Mali, l'aquifère du Continental Intercalaire, présent dans le bassin de Taoudeni, affleure au Nord du pays, dans la région de l'Erg Kenachech.

C'est un vaste réservoir, à ressource en eau non renouvelable, qui s'étend aussi en Mauritanie et au Niger; son épaisseur passe d'une dizaine de mètres en périphérie du bassin à 400 m dans le fossé de Nara.

Trois sous-systèmes peuvent y être individualisés: le fossé de Nara et les régions au nord et au sud de la ride d'Azaouad (qui constitue une discontinuité).

#### 2) *Le Continental Terminal*

C'est un aquifère important du Niger de par son extension et la facilité d'accès à la ressource. Il s'agit d'un aquifère multicouche constitué par des formations sablo-argileuses d'une puissance maximale de 450 m environ et comprenant 3 nappes principales, une nappe libre (formation du CT3) et deux nappes captives contenues dans les formations du CT2 et du CT1.

a) La nappe superficielle (CT3), libre, s'étend sur l'ensemble du synclinal de Dogondoutchi, sauf à l'Ouest de Tahoua et dans les secteurs de Tamakas, Sansawala, Jaja, où le Continental Terminal s'est révélé non aquifère.

Elle est contenue dans des formations sableuses et silteuses dont l'épaisseur varie de quelques mètres à 60 m au centre de la structure.

Les formations superficielles, dunaires et alluviales, peuvent contenir de petites nappes perchées, exploitées par puits traditionnels.

Les zones de recharge principales sont localisées au niveau des Dallols et de leurs affluents et dans le secteur de l'Adar Doutchi.

b) La nappe des "sables moyens" (CT2)

Elle est présente dans la zone centrale du synclinal de Dogondoutchi dans une formation sableuse où elle est captive. Latéralement elle est en contact avec la nappe superficielle.

L'épaisseur de l'aquifère sableux productif est généralement de 20 à 30 m, mais dépasse parfois 50 m.

c) La nappe des "sables inférieurs" (CT1)

Deux domaines, séparés par une zone non aquifère, sont distingués:

Au Sud-Est et au Nord (entre Abala et la frontière du Mali), la nappe est captive.

A l'Ouest du Dallol Bosso, la nappe est captive.

Au Mali, le Continental Terminal est le deuxième aquifère généralisé par ordre d'importance. Dans le delta intérieur du Niger, il est en liaison hydraulique avec les eaux de surface et la nappe des alluvions quaternaires .

2.2.1.4. Aquifère du Maastrichtien (réf. 13 et 19)

C'est un aquifère captif, qui affleure seulement au niveau du Horst de Ndiass, près de Dakar. Il est reconnu sur la quasi-totalité du bassin; il est bordé à l'Est par les formations du sédimentaire ancien et du socle cristallin et limité à l'Ouest par une large frange d'eau salée.

Les zones de recharge ont une extension réduite:

- à l'Ouest, au niveau du Horst de Ndiass: infiltration directe à partir de la surface affleurante ou indirecte de part et d'autre du horst par échange (latéraux ou verticaux) avec les formations sus-jacentes (Paléocène et Eocène).
- au Sud-Est, dans la zone de contact avec le sédimentaire ancien (infiltration directe ou alimentation par les zones fissurées )
- au Nord-Est, recharge indirecte par le fleuve Sénégal à travers les formations quaternaires et tertiaires.

**2.2.2. Aquifères des bassins du Congo et du Kalahari**

2.2.2.1. Bassin du Congo

Le bassin sédimentaire du Congo couvre une grande partie du territoire de la République Démocratique du Congo, s'étend au Nord vers la République Populaire du Congo et au Sud vers l'Angola (partie Nord-Est). Peu d'études ont été consacrées à l'hydrogéologie de ce bassin à ressource en eau superficielle abondante.

Outre les nappes libres contenues dans les alluvions du Congo et de ses nombreux affluents, on peut mentionner:

- l'aquifère libre des plateaux Batéké constitué par des limons sableux d'âge Néogène et des grès "tendres" d'âge Paléogène;
- les nappes libres, parfois profondes, contenues dans les sables d'âge tertiaire du Sud et de l'Est du plateau du Kwango;
- les nappes libres du Kasai contenues dans des sables issus de l'altération de grès d'âge tertiaire.

#### 2.2.2.2. Bassin du Kalahari

Dans le bassin supérieur (Sud-Est de l'Angola et Sud-Ouest de la Zambie), drainé par les cours supérieurs de l'Okavango et du Zambèze et par le Kwango, les formations aquifères sont constituées par des limons sableux et des grès.

### 2.2.3. Aquifères alluviaux

#### 2.2.3.1. Aquifères liés aux grands fleuves.

Ces aquifères, dans les zones de climat aride à semi-aride, doivent leur existence aux grands fleuves qui les alimentent régulièrement.

C'est le cas de la plaine alluviale du Nil en Egypte, de la plaine du Niger ("*delta intérieur*" au Mali, Niger), de la plaine alluviale du Sénégal, ...

#### 2.2.3.2. Formations alluviales des fonds de vallée

Les remplissages alluviaux des fonds de vallée sont fréquents en Afrique. Même en l'absence d'un réseau hydrographique pérenne, il existe souvent un écoulement souterrain à la base des alluvions. Lorsque l'épaisseur de ces alluvions est importante (elles sont souvent de plusieurs dizaines de mètres), ces aquifères représentent une ressource en eau importante pour l'hydraulique villageoise et le pastorale.

Exemple: les nappes des Dallols (vallées sèches) au Niger

Le terme Dallol désigne les grandes vallées fossiles du sud-ouest nigérien, orientées du nord au sud en direction du fleuve Niger (Dallols Bosso, Fogha et Maouri). Dans ces vallées il existe un écoulement intermittent, à la saison des pluies, ainsi que des chapelets de mares plus ou moins temporaires le long des talwegs, assurant l'approvisionnement en eau des cultures irriguées.

##### 1) *Dallol Bosso*

L'aquifère correspond à un d'un remplissage quaternaire de sable d'origine alluviale et éolienne au dessus de niveaux gréseux du Continental Terminal. L'épaisseur des formations alluviales est très variable et peut dépasser 30 m.

Le mur de l'aquifère est représenté par le premier niveau argileux rencontré dans le Continental Terminal.

En profondeur, dans le Continental Terminal et dans le Continental Hamadien, on trouve deux niveaux aquifères renfermant des nappes captives et artésiennes sur une grande partie du Dallol.

Les pluies et les apports par ruissellement provenant des bassins versants latéraux provoquent une remontée de la nappe qui affleure alors dans les zones basses.

##### 2) *Le Dallol Maouri*

C'est une vallée fossile située à environ 200 km au Sud Est de Niamey. Elle draine le flanc oriental de l'Adar Douthi et rejoint le fleuve Niger avant son entrée au Nigéria.

La vallée est creusée dans les formations tabulaires du Continental Terminal. On y trouve une nappe superficielle contenue dans les formations du quaternaire et dans le Continental Terminal. En profondeur, comme dans le cas du Dallol Bosso, on trouve deux nappes captives dans le Continental Terminal et dans le Continental Hamadien.

L'épaisseur de l'aquifère alluvial est en général de 10 à 15 m mais peut dépasser 20 m. La surface libre est rencontrée à moins de 10 m de profondeur sauf dans la partie nord où elle se situe à 20 m de profondeur.

### **2.3. AQUIFERES DE STRUCTURE COMPLEXE**

Dans cette étude, il s'agit des aquifères qu'il est difficile de caractériser comme étant soit du type discontinu (socle, sédimentaire ancien), soit du type continu (aquifère généralisé des bassins sédimentaires récents). C'est par exemple le cas des aquifères carbonatés qui peuvent présenter des secteurs karstifiés et des aquifères de la formation complexe du Karoo, souvent à double porosité (interstitielle et de fissures).

#### **2.3.1. Aquifères de la formation du Karoo**

La formation du Karoo (*Karoo Supergroup*), mise en place du Carbonifère au Jurassique, est constituée par une succession de roches sédimentaires (grès, shales, mudstones, siltstones, tillites ...) avec intercalations de roches volcaniques. On la rencontre au sud du continent: en Afrique du sud où elle couvre une grande partie du territoire, au Botswana (Sud-Ouest et Est du pays), en Namibie, en Zambie (frontière Est) et au sud de la Tanzanie.

Le tableau 3 (extrait de la référence 12) en donne une description pour le "*Localane-Ncojane basin*" au Botswana où elle est en partie recouverte par des formations basaltiques peu aquifères et par la formation du Kalahari d'âge Paléogène-Néogène (renfermant des nappes superficielles fournissant de bons débits dans des zones correspondant à des paléo-chenaux).

Dans la formation du Karoo, les aquifères sont de type multicouches. En reprenant l'exemple du "*Localane-Ncojane basin*", on trouve deux aquifères principaux:

- l'aquifère des grès du "*Lebung Group*" (cf tableau), aquifère à surface libre ("*Lebung-Ntane aquifer*") caractérisé par la coexistence de deux types de porosité: interstitielle et de fissures. Les débits extraits peuvent atteindre 40 m<sup>3</sup>/h.
- l'aquifère de la formation de *Boritse*, principal aquifère de l' *Ecca Group*; il est caractérisé par des séquences de grès feldspathiques alternant avec des roches carbonées. Il s'agit d'un aquifère en grande partie captif, de 100 à 200 m d'épaisseur, le toit se rencontrant à une profondeur de 300 à 400 m dans la partie centrale. Des débits de 50 m<sup>3</sup>/h sont atteints.

Age	Group Series	Formation	Lithology	
Cainozoic	Kalahari group	Kalahari Group	Loose sands, calcrets, silcretes, calcareous sandstones and mudstones	
Mesozoic	Stormberg Lava Group	Stormberg Lava Group	Variably weathered, green or reddish purple, amygdaloidal lava flows.	
Upper Palaeozoic	Karoo Super Group	Lebung Group	Ntane sandstone Formation	Fine to medium grained, clean, friable sandstone, brownish red/pink
			Mosolotsane Formation	Red/brown mudstones and siltstones with minor sandstones. Basal conglomerate to the north and west
		Beaufort Group	Kwetla Formation	Grey mudstones/siltstones with minor sandstone. Arenaceous to the west and to the north
		Ecca Group	Boritse Formation	Fine to coarse, white, quartz sandstone interbedded with coal, carbonaceous mudstone and siltstone
			Otshe Formation	Fine to coarse, brown/grey, feldspathic, micaceous sandstone interbedded with carbonaceous mudstone and rare coal seams.
			Kweneng Formation	Medium to coarse grained sandstone with subordinate siltstone and mudstone
			Bori Formation	Dark micaceous siltstone/mudstone and minor sandstone
			Kobe Formation	Dark micaceous siltstone/mudstone and minor sandstone
		Dwyka Group	Dukwi Formation	Massive, dark grey, sandy mudstone/siltstone
			Mmalogong formation	Tillite with quartzite/granite clasts in a sandstone matrix.
			Khuis Formation	Purple mudstone rythmites/varvites with dropstones
			Middlepits Formation	Purple siltstone and very fine sandstone

Tableau 2 - Litho-stratigraphie du Karoo dans le bassin de Localane-Ncojane au Botswana (réf. 12)

### **2.3.2. Aquifères carbonatés**

#### **2.3.2.1. Aquifères du Jurassique et du Crétacé.**

Ces aquifères (localisés sur la figure 4 en annexe) présentent beaucoup d'intérêt lorsqu'ils sont karstifiés ce qui est surtout le cas en Afrique du Nord (Algérie, Maroc), dans les bassins côtiers de l'Afrique de l'Est (par exemple formation de Tanga en Tanzanie) et de Madagascar.

Ces formations couvrent un vaste territoire en République démocratique du Congo, en périphérie de la cuvette du Congo (mais a priori peu karstifiées) de même qu'Ethiopie. Elles se rencontrent aussi au Gabon et au Nigéria.

#### **2.3.2.2. Aquifères du Paléogène.**

Les formations carbonatées du Paléogène (non différenciées sur la carte au 1/10 M) se rencontrent en Egypte (Plateau d'El Galala), au Sénégal (périphérie du horst de N'diass).

## **2.4. AQUIFERES DES FORMATIONS VOLCANIQUES DU PHANEROZOÏQUE**

### **2.4.1. Coulées et projections**

Les coulées et projections couvrent une grande partie de Djibouti et de l'Ethiopie. On les rencontre aussi au Cameroun, dans le Nord de la Guinée.

Les coulées basaltiques ("trapp") constituent des aquifères discontinus intéressants à exploiter en particulier lorsque les coulées alternent avec des intercalations poreuses de tufs.

### **2.4.2. Les filons**

Les secteurs à injection de dolérites peuvent constituer (ce n'est pas systématique) des aquifères intéressants en raison de la fracturation qui s'est créée dans la zone de contact entre les filons et la formation encaissante.

Des filons doléritiques se rencontrent par exemple au Mali, en Mauritanie, au Zimbabwe.





## 3. Méthodologie

### 3.1. CARTOGRAPHIE HYDROGEOLOGIQUE

#### 3.1.1. Type de cartes

En fonction des objectifs assignés à la carte, on peut élaborer:

- des cartes hydrogéologiques au sens strict,
- des cartes de ressources en eau souterraine

Les cartes hydrogéologiques traduisent essentiellement :

- des connaissances relatives aux structures géologiques, qui déterminent l'occurrence et la circulation des eaux souterraines;
- des informations sur les nappes contenues dans ces formations.

Les cartes des ressources sont plus finalisées, à vocation décisionnelle; elles fournissent principalement:

- une caractérisation de la ressource à l'aide de descripteurs tels que: *accessibilité, exploitabilité, durabilité, ...*
- des données chiffrées.

Le tableau 3 ci-dessous synthétise les types possibles de cartographie en hydrogéologie.

Volume des données Utilisation possible	Faible Données agrégées	Important Variables et paramètres Nombreux	Elevé Analyse détaillée de systèmes aquifères
Connaissance des structures	<b>Cartes hydrogéologique générale (sens strict)</b>	<b>Carte de paramètres hydrogéologiques</b>	<b>Cartes régionales de systèmes aquifères</b>
Planification et développement	<b>Carte des ressources en eau</b>	<b>Carte de planification spécialisée</b>	Représentations graphiques élaborées : diagrammes, scénarios,...
Protection de la ressource	<b>Carte de vulnérabilité</b>		
<b>Paramètres de représentation</b>			
- échelle	petite		grande
- superficie représentée	grande		petite
- dépendance en fonction du temps	statique		dynamique

Tableau 3 - Classification possible des cartes en hydrogéologie (d'après réf. 21 )

La carte du projet SIG-Afrique\_Eau se range dans la première cellule du tableau ci-dessus: il s'agit en effet d'une carte:

- hydrogéologique générale (au sens strict)
- à petite échelle (1/10 M pour la maquette, 1/5 M pour la carte qui pourrait succéder à la maquette)
- à données faiblement agrégées

### 3.1.2 Entités hydrogéologiques

Pour éviter toute ambiguïté pouvant porter sur le concept d'aquifère (et bien préciser la démarche adoptée pour la construction du SIG) il est utile de rappeler que le concept d'aquifère se réfère d'abord à des caractères hydrogéologiques structuraux permettant une productivité en eau souterraine supérieure à un minimum conventionnel.

Ce minimum conventionnel est relatif à un contexte socio-économique donné. Dans certains pays à ressource en eau rare, une formation géologique susceptible de fournir un débit de 0.5 m<sup>3</sup>/h peut être considérée comme aquifère .

L'échelle de travail ne permet pas de localiser précisément les formations réellement non aquifères. **A la notion d'aquifère on substituera donc la notion d'entité hydrogéologique**, plus large (potentiellement aquifère), que l'on peut subdiviser en 5 classes, correspondant à autant de classes d'aquifères potentiels:

- entités alluviales,
- entités des bassins sédimentaires, incluant les systèmes karstiques,
- entités fissurées/fracturées du socle cristallin et cristallophyllien et des terrains sédimentaires anciens assimilables au socle d'un point de vue hydrogéologique,
- entités des formations volcaniques,
- entités des formations intensément plissées

Plus précisément, sur le plan du comportement hydrodynamique et de la productivité, on peut proposer aussi la classification suivante, les entités étant alors définies par rapport à un type de structure du réservoir géologique:

- structure *continue*, des milieux poreux, définissant des aquifères à porosité interstitielle appelés et comprenant ici les aquifères alluviaux et les aquifères des bassins sédimentaires du paléogène, du néogène et du quaternaire;
- structure *discontinue*, des milieux fissurés et fracturés, définissant les aquifères du socle (cristallin et cristallophyllien) et des terrains sédimentaires anciens consolidés;
- structure "*mixte*", à double porosité (pores et fissures) ;
- structure *karstique*, des terrains sédimentaires carbonatés.

Cette classification a été reprise ici, mais l'échelle de travail ne permettant pas d'identifier précisément les secteurs karstifiés, les aquifères carbonatés (avec possibilité de karstification) et les aquifères " mixtes" ont été regroupés dans un même ensemble sous la dénomination de "*structure complexe*".

## 3.2. CONSTRUCTION DE LA CARTE

### 3.2.1. Démarche

#### 3.2.1.1. Point de départ

La carte est construite à partir des cartes géologiques établies dans le cadre du projet SIG-Afrique :

- au 1/10 M (ensemble de l'Afrique)
- au 1/2 M (pour les 11 pays participants)

D'une façon générale, s'agissant d'une maquette, l'échelle du 1/10 M semblait appropriée pour travailler à l'échelle du continent ; celle du 1/2 M aurait nécessité un travail d'élaboration plus fin nécessitant une validation d'experts nationaux pour les pays autres que ceux du projet.

#### 3.2.1.2. Idée directrice

L'idée directrice de la construction de la carte est de croiser deux catégories d'information dont la combinaison fournit une indication sur l'importance des ressources en eau d'une **formation affleurante**. Il s'agit:

- d'une part du type de réservoir: un réservoir à porosité d'interstices (milieu poreux des grands bassins sédimentaires) est a priori plus productif qu'un réservoir fissuré/fracturé du socle cristallin ou de terrains sédimentaires anciens consolidés;
- d'autre part de la fraction des précipitations susceptible d'alimenter ces réservoirs (la recharge).

**On identifie donc, sur une base géologique, un réservoir, qui sera (potentiellement) plus ou moins aquifère selon le type de porosité et la zone climatique dans laquelle il se situe.**

### 3.2.2. Délimitation de grandes entités hydrogéologiques

A partir de la carte géologique au 1/10 M, faisant apparaître les affleurements de 36 formations géologiques, des regroupements ont été opérés aboutissant à 11 entités hydrogéologiques (tableau 4 et figure 6), différenciées sur une base litho-stratigraphique.

Globalement, on a la répartition suivante:

Socle cristallin et cristallophyllien	20.7 %
Sédimentaire ancien	20.8 %
Formations du Karoo	3.5 %
Sédimentaire "récent"	51 %
Volcano-plutonisme du phanérozoïque	4%

Formations géologiques identifiées sur la carte au 1/10 M	Nature des formations	% superficie ( Afrique+ Madagascar)	Structure du réservoir
10	Sédimentaire du Quaternaire	22.4	Continu
13	Sédimentaire du Paléogène-Néogène	14.4	
19	Formations du type "Grès nubiens"	4.9	
40	Formations du type "Karoo"	3.5	Double porosité
22, 25	Formations carbonatées du Crétacé	6.8	Structures complexes Localement karstiques
34	Formations du Jurassique -Trias	2.5	
43, 46, 55, 56, 67, 70, 79	1) Formations sédimentaires détritiques / carbonatées à volcano-sédimentaires. <i>Néoprotérozoïque à Paléozoïque</i> (43 et 46) et <i>Précambrien</i> (55, 56, 67, 70, 79)	13.4	Fissuré/fracturé dominant
58, 82, 85, 88,94,98	2) Formations sédimentaires à volcano-sédimentaires et volcano-plutonisme associé <i>Précambrien</i>	7.4	
49, 61, 62, 64, 76, 89, 91, 97, 111	Complexes plutoniques et métamorphiques ( <i>Précambrien à Paléozoïque</i> )	17.6	Fissuré/fracturé
52, 73, 83	Massifs plutoniques ( <i>Cambrien au Précambrien</i> ) "Older Granites", "Complexe du Bushveld", Plutonisme des "ceintures de roches vertes"	3.1	
16, 28, 31, 37	Massifs volcaniques et volcano-plutoniques du Phanérozoïque	4.0	Fissuré/fracturé dominant mais intercalation de matériaux poreux possible (ex : Tuf)

Tableau 4 - Regroupement des formations géologiques en 11 entités hydrogéologiques

### 3.2.3 La recharge

#### 3.2.3.1. Difficultés d'évaluation

La recharge d'un aquifère est une variable difficile à quantifier fonction de nombreux facteurs. Les bilans hydro-climatiques peuvent fournir, sur une période donnée, une lame d'eau appelée écoulement total ou pluie efficace ("*runoff*" ou "*efficient rainfall*"). Cette lame d'eau se décompose en deux sous-écoulements:

- l'un alimentant les cours d'eau: c'est le ruissellement
- l'autre pénétrant dans le sous-sol et alimentant les nappes: c'est la recharge

L'écoulement total peut être évalué à partir des données (précipitations et ETP) des stations météo (si le territoire est vaste, il faut de nombreuses stations, spatialement bien réparties). Par contre l'évaluation de la recharge est plus délicate, car elle dépend notamment de la topographie (les pentes fortes favorisent le ruissellement) et de la nature des formations affleurantes (pour une même pluie efficace, l'infiltration sera par exemple plus importante en zone karstique qu'en zone granitique).

#### 3.2.3.2. Prise en compte de travaux récents (2004-2005)

Les valeurs de recharge introduites dans le SIG-Afrique\_Eau sont issues des travaux d'évaluation de la recharge à l'échelle mondiale réalisés à l'Université de Francfort en Allemagne et décrits dans les références suivantes :

Döll P., Kaspar F., Lehner B., (2003) - *A global hydrological model for deriving water availability indicators : model tuning and validation*. Journal of Hydrology, 270 (1-2)

Döll P., Flörke M., (2005) - *Global scale Estimation of diffuse groundwater recharge* -Frankfurt Hydrology Paper 03 -Institute of Physical Geography, Frankfurt University.

Cette dernière publication nous a été transmis par P. Döll ainsi que les valeurs de recharge calculées à l'échelle mondiale avec une résolution spatiale de 0.5° (mailles de 0.5° par 0.5°, soit environ 55.5 km × 55.5 km).

#### 3.2.3.3. Méthode de calcul

Dans chaque maille du modèle hydrologique utilisé (WaterGap Global Hydrological Model WGHM) une valeur d'écoulement total  $R_T$  est calculée au pas de temps journalier en utilisant des données temporelles de la période 1961-1990.

La recharge  $R_A$  des aquifères est ensuite calculée comme fraction de l'écoulement total en utilisant des données sur la topographie, sur la texture des sols, sur les formations géologiques affleurantes (et, pour les zones concernées, sur le permafrost).

$$R_A = f_r \cdot f_s \cdot f_g \cdot f_p \cdot R_T$$

- $f_r$  est le facteur de réduction lié au relief ( $0 < f_r < 1$ )
- $f_s$  est le facteur de réduction lié au type de sol ( $0 \leq f_s < 1$ )
- $f_g$  est le facteur de réduction lié à la géologie ( $0 < f_g < 1$ )
- $f_p$  est le facteur de réduction lié à la présence de permafrost ( $0 \leq f_p \leq 1$ )

1) *Facteur lié au relief*

Il est fonction de la pente du terrain. Celle-ci a été calculée à partir du modèle numérique de terrain GTOPO30 (USGS EROS Data Center).

Pente (%)	Facteur $f_r$
< 2	1
2 – 5	0.95
5 – 8	0.90
8 – 16	0.75
16 – 30	0.6
30 – 45	0.3
> 45	0.15

Valeurs du facteur  $f_r$  en fonction de la pente

2) *Facteur lié à la géologie*

Unités Hydrogéologiques	$f_g$	$f_g$ en climat chaud et humide
Formations sédimentaires du Cénozoïque et du Mésozoïque (bonne perméabilité)	1	1
Formations sédimentaires du Paléozoïque et du Précambrien (faible perméabilité)	0.7	0.8
Formations non sédimentaires à très faible perméabilité	0.5	0.7

Valeurs du facteurs  $f_g$  en fonction des grandes unités hydrogéologiques

3) *Facteur lié au sol*

Il décroît suivant l'importance de la fraction argileuse. La base pédologique utilisée pour identifier les sols est celle établie par la FAO.

3.2.3.4. Introduction d'un indicateur de recharge dans le SIG

Pour tenter de quantifier la recharge susceptible d'alimenter les grandes entités hydrogéologiques définies ci-dessus, des zones de recharge ont été délimitées, chacune affectée d'une plage de valeurs indicatrice d'une recharge potentielle.

A partir de la grille de valeurs de recharge (figure 7 en annexe) qui nous a été transmise par les auteurs de l'article de 2005 cité ci-dessus, une série de manipulations sous ArcView nous a conduit aux zones de recharge souhaitées:

- introduction des coordonnées du centre des mailles et création d'un fichiers de points pour interpolation,
- interpolation et tracé des isovaleurs,
- extraction des isovaleurs souhaitées,
- découpage du continent (+ Madagascar) par les isovaleurs extraites

La dernière opération fournit les zones de recharge affectées d'une plage de valeurs:

Classe de recharge	% superficie correspondante
< 5 mm	34,2
5 à 20	14,9
20 à 50	11,6
50 à 100	11,3
100 à 300	21,5
> 300 mm	6,5

Tableau 5 - Classes de recharge retenues dans la cartographie

La figure 8 présente la zonation obtenue et la figure 9 en donne une répartition moyenne par pays.





## 4. Présentation de la carte et du SIG associé

### 4.1. PRINCIPES DE REPRESENTATION CARTOGRAPHIQUE

#### 4.1.1. Zones de recharge

Le premier principe ayant guidé la construction de la carte a été de considérer les grandes zones de recharge comme devant être visuellement dominantes.

La carte fait donc d'emblée apparaître ces zones (7 classes de recharge distinguées) sous la forme d'une gamme de couleurs allant du jaune (recharge inférieure à 5 mm) au bleu foncé (recharge > 300 mm) avec une gamme intermédiaire de verts (vert clair : de 20 à 50 à mm, vert plus foncé : de 50 à 100 mm).

#### 4.1.2. Structures hydrogéologiques

Compte tenu du choix ci-dessus, la représentation des structures hydrogéologiques (11 entités) ne pouvait être envisagée que sous la forme de figurés linéaires ou ponctuels laissant apparaître, par transparence, les zones de recharge.

(Une représentation des 7 × 11 combinaisons uniquement sous forme de plages colorées n'aurait pas été clairement perçue).

L'échelle litho-stratigraphique simplifiée adoptée se décline cartographiquement avec les figurés suivants :

##### 1) *Structures discontinues* :

- Socle de roches plutoniques et métamorphiques:

*symbole + de couleur rouge*

- Formations sédimentaires ancienne: volcanosédimentaire et plutonisme associé :  
*hachures obliques de couleur rouge ///*

- Formations sédimentaires anciennes détritiques / carbonatées et volcanosédimentaires : *hachures horizontales de couleur marron*

- Massifs plutoniques et volcano-plutoniques (Précambrien à Cambrien) :  
*symbole x de couleur pourpre*

- Volcano-plutonisme du phanérozoïque :  
*symbole x de couleur rouge*

##### 2) *Structures complexes*

- Formations du type "Karoo":  
*pavage continu gris*

- Formations sédimentaires carbonatées du Jurassique-Trias:  
*pavage discontinu plein de couleur bleue v v v*

- Formations sédimentaires carbonatées du Crétacé  
*pavage discontinu bleu □ □ □*

### 3) Structures continues des grands bassins sédimentaires "récents"

- Formations du type "Grès nubiens" :  
*symbole === de couleur orange*
- Formations détritiques du Paléogène-Néogène :  
*pointillés de couleur noire*
- Formations détritiques du Quaternaire  
*aucun symbole : la zone de recharge seule apparaît*

## 4.2. LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Le SIG\_Afrique\_EAU est géré par le logiciel ArcView. Le système de projection utilisé est le même que celui de la carte géologique au 1/10 M, à savoir le " Double Transverse Mercator" dans le référentiel géodésique WGS84 (World Geodetic System 1984).

Le SIG intègre de nombreuses couches d'informations regroupées en géodatabases.

### 4.2.1. Couches de données reportées sur la carte

#### 1) Géodatabase "*Entités hydrogéologiques*"

- formations sédimentaires détritiques du Quaternaire,
- formations sédimentaires détritiques du Paléogène-Néogène,
- formations sédimentaires détritiques continentales (Grès Nubiens),
- formations sédimentaires du Karoo,
- formations sédimentaires carbonatées du Crétacé,
- formations sédimentaires du Jurassique-Trias,
- formations sédimentaires détritiques anciennes et volcano-sédimentaires
- formations sédimentaires à volcano-sédimentaires et volcano-plutonisme associé,
- complexes métamorphiques et plutoniques,
- plutonisme et volcano-plutonisme du Précambrien au Cambrien,
- massifs volcaniques et volcano-plutoniques du phanérozoïque.

#### 2) Géodatabase "*Géographie*"

Elle comprend les éléments suivants:

- les villes (*Digital Chart of the World*, DCW)
- les capitales (sélectionnées à partir de la DCW)
- les frontières des pays

### 3) Géodatabase "*Hydrographie*"

Elle comprend les éléments suivants (avec tables attributaires) sélectionnés à partir de la base de données Hydro1K :

- les grands bassins hydrographiques au nombre de 22 (figure 10),
- les grands fleuves (Nil, Congo, Niger, Sénégal, ...) et leurs principaux affluents.
- les grands lacs (Victoria, Tanganyka, Malawi, Tchad, ...)

### 4) Géodatabase "*Aquifères*"

Elle comprend les éléments suivants (avec tables attributaires) :

- les limites des grands bassins sédimentaires contenant des systèmes aquifères multicouches
- les directions des écoulements des aquifères profonds captifs
- les limites de l'intrusion d'eau salée (Grès nubiens et aquifère du Maastrichtien au Sénégal)

## 4.2.2. Autres couches de données

1) La base de données des formations géologiques cartographiées au 1/10 M et celle des formations géologiques cartographiées au 1/2 M dans les 11 pays participants

2) Le modèle numérique de terrain (figure 11) issu de la base de donnée Hydro1K de l'USGS

3) La base de données Aquastat de la FAO fournissant par pays des informations quantitatives sur les ressources en eau (exemple donné par la figure 12)

4) Une base de points d'eau fournie par certains des pays participants, contenant notamment des informations sur le débit et la profondeur des ouvrages:

- Burkina Faso: 15 777 points
- Guinée: 6 204 points
- Mali: 24 576 points
- Niger: 19 118 points
- Sénégal: 2024 points



## **Conclusion**

La maquette de carte hydrogéologique à l'échelle du 1/10 M produite dans le cadre du projet "Réseau Sig-Afrique" constitue un point de départ et un support de discussions pour passer à une cartographie hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/5 M. Ce travail a aussi permis de construire un Système d'Information Géographique (pilote par le logiciel ArcGIS) intégrant de nombreuses couches d'informations (jusqu'à présent il n'existait pas de carte hydrogéologique numérique de l'ensemble de l'Afrique).

Il est encore à compléter sur un certain nombre d'aspects: annotations (toponymie, ...), hydrochimie, notice explicative,...

Le prolongement de ce travail passe par un élargissement du réseau de partenaires africains (11 dans le cadre du projet) et par la mise en place d'un groupe d'experts internationaux pour la validation de la future carte.

D'ores et déjà, une démarche entreprise auprès de l'Unesco a permis d'aboutir à l'inscription de la cartographie à venir au Programme Hydrologique International.



## Références bibliographiques

- 1] Armand C., 1987 – Actualisation de l'atlas des eaux souterraines du Niger. Rapport BRGM 87 NER 108 EAU.
- 2] Dakouré D., 2003 - Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso - Mali). Essai de modélisation. Thèse Université Paris VI , Pierre et Marie Curie.
- 3] Döll P., Flörke M., 2005 - *Global scale Estimation of diffuse groundwater recharge*. Frankfurt Hydrology Paper 03 -Institute of Physical Geography, Frankfurt University.
- 4] Döll P., Kaspar F., Lehner B., 2003 - *A global hydrological model for deriving water availability indicators : model tuning and validation*. Journal of Hydrology, 270 (1-2).
- 5] Faillat J.P., 1986 - Aquifères fissurés en zone tropicale humide. Structure, hydrodynamique et hydrochimie. Thèse d'Etat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- 6] Gossel W., Ebraheem A.M., Wycisk , 2004. A very large scale GIS-based groundwater flow model for the Nubian sandstone aquifer in Eastern Sahara (Egypt, northern Sudan and eastern Libya). Hydrogeology Journal, Vol.12, n°6, Dec. 2004.
- 7] Gries S., 2000 - Etude géochimique et isotopique des nappes profondes au Sahara-Sahel. Implications pour la gestion des ressources en eau et les reconstitutions paléoclimatiques. Thèse Université Paris XI, U.F.R. scientifique d'Orsay.
- 8] Guiraud R., 1988 - L'hydrogéologie de l'Afrique - Journal of African Earth Sciences, Vol. 7, n° 3, 1988.
- 9] Margat J., Struckmeier W.F., 1995 - Hydrogeological Maps. A guide and a standard legend. International Association of Hydrogeologists – Verlag Heinz Heise.
- 10] Puyô S., Steenhoudt M., 1991 – Etude en vue de l'élaboration du plan directeur de l'hydraulique rurale du Sénégal. Rapport BRGM R32320.
- 11] Shahin M., 2002 – Hydrology and water resources of Africa. Kluwer Academic Publishers.
- 12] Tefo Boyboy Rahube, 2003 - Recharge and groundwater resources evaluation of the Lokalane-Nkojane basin (Botswana) using numerical modelling. International Institute for Geo-information Science and earth observation. Enschede, The Netherlands.

### Ouvrages et documents collectifs

- 13] Exploration des réserves d'eau souterraine en zones aride et semi-aride, 1982. BRGM- Hydrogéologie-Géologie de l'ingénieur, section III, n°2- 1982.
- 14] FAO,2003 - Aquastat. Système d'information de la FAO sur l'eau et l'agriculture. Synthèse Afrique.
- 15] FAO, 2003 - Review of world water resources by country. Water reports n° 23.
- 16] Hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest – Synthèse des connaissances. Socle cristallin et cristallophyllien et sédimentaire ancien. 1990 (2<sup>ième</sup> édition). Ministère de la coopération et du développement.
- 17] Internationally shared aquifer resources management. Their significance and sustainable management. A framework document. IHP VI, Non Serial Documents in Hydrology – 2001, UNESCO.
- 18] Les eaux souterraines de l'Afrique orientale, centrale et australe, 1988 – Ressources naturelles / Série Eau n°19 – Publication des Nations Unies.
- 19] Les eaux souterraines de l'Afrique septentrionale et occidentale, 1987 – Ressources naturelles / Série Eau n°18 – Publication des Nations Unies.
- 20] Managing shared aquifer resources in Africa – IHP VI, Series on Groundwater n°8, 2004, UNESCO.
- 21] Memoires of the International Symposium on hydrogeological maps as tools for economic and social development.. Hannover , 30 May – 2 June 1989 – Verlag Heinz Heise.
- 22] Observatoire du Sahara et du Sahel, 2003 - Système Aquifère du Sahara Septentrional. Gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse (1<sup>ère</sup> édition).

### Cartes

- Cartes géologiques du projet SIG-AFRIQUE (1/10 M et 1/2 M) - BRGM - 2004
- Carte hydrogéologique internationale de l'Afrique (1/5 M)  
*Organisation Africaine de Cartographie et de Télédétection* - 1993
- Ressources en eau communes des pays de la région de l'OSS. Bassins fluviaux et aquifères profonds transfrontaliers - (1/10 M).  
*Observatoire du Sahara et du Sahel* - J. Margat - 1995
- Afrique – Ressources en eaux souterraines (1/25 M).  
*Carte n° 3431 (F) - Nations Unies* - J. Margat – 1987
- Carte de potentialité des ressources en eau souterraine de l'Afrique Occidentale et Centrale (1/5 M).  
*Comité Interafricain d' Etudes Hydrauliques. BRGM – Geohydraulique* – 1986 .
- Carte mondiale des conditions hydrogéologiques et des écoulements souterrains  
*Institut de l'Académie Russe des Sciences – UNESCO* - 1999



## **Annexe - Figures**

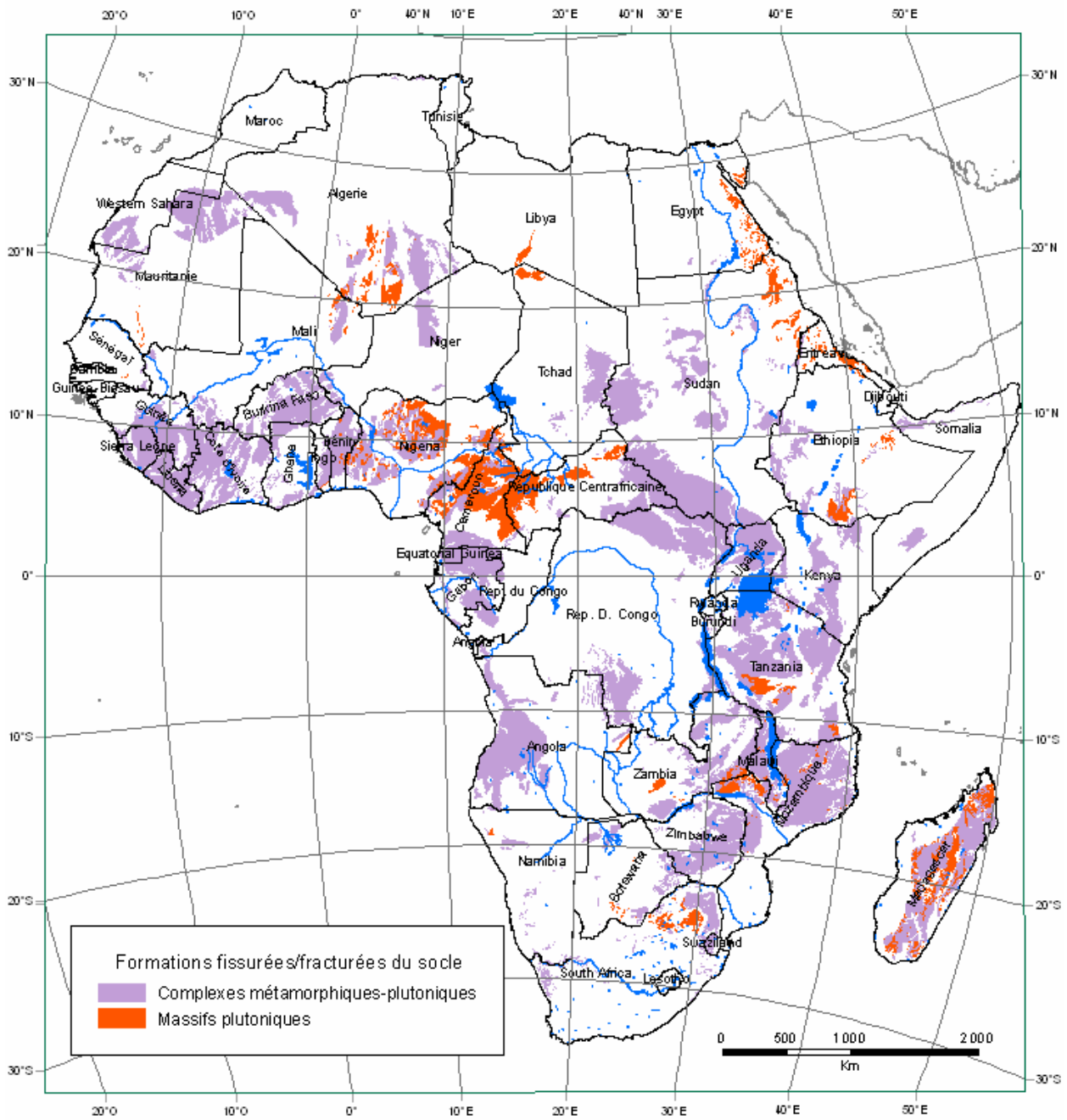


Figure 1- Réservoirs fissurés-fracturés dans les roches du socle (Précambrien à Cambrien)  
(d'après la carte géologique au 1/10 M)

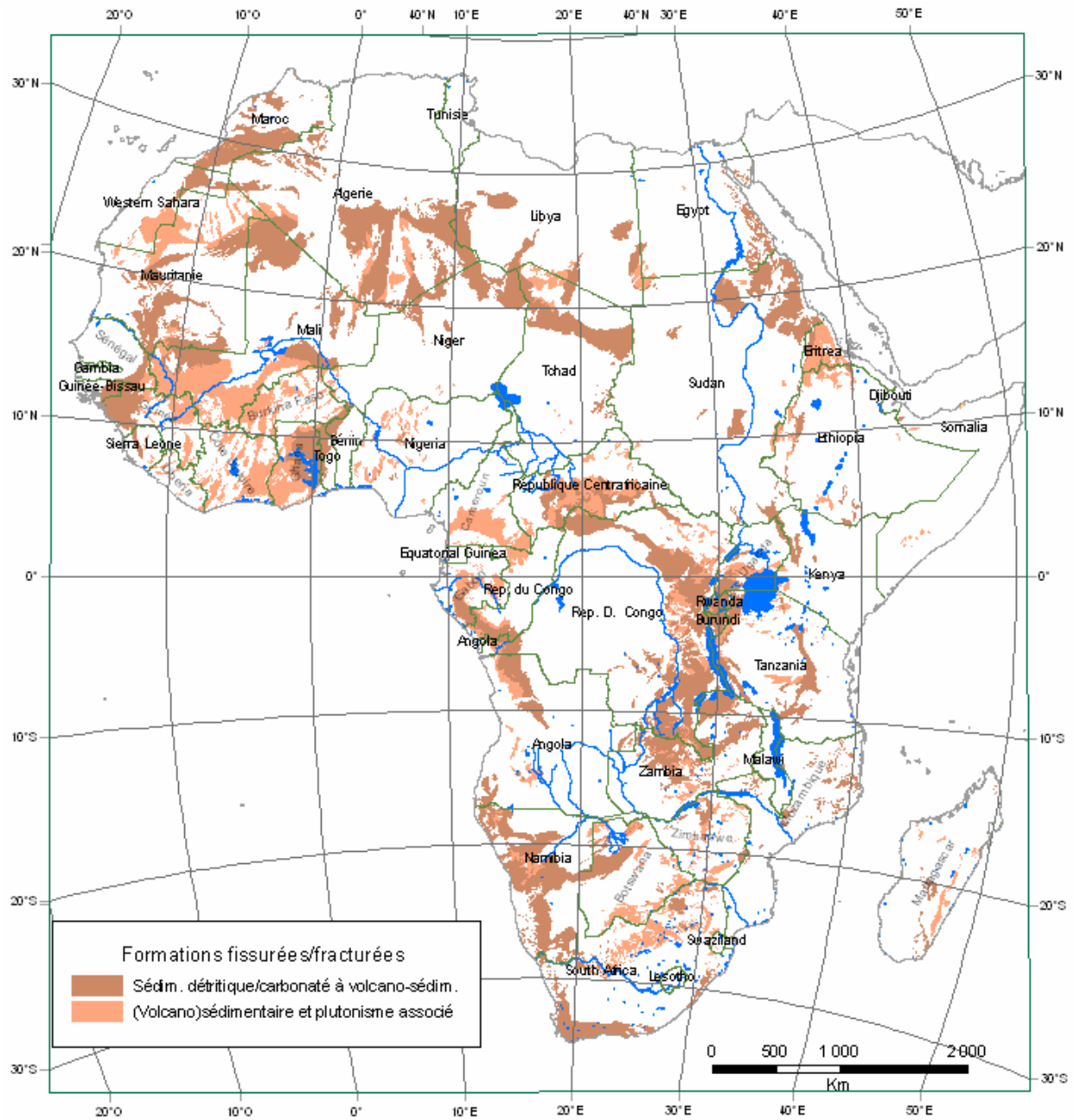


Figure 2 - Réservoirs fissurés-fracturés dans le sédimentaire ancien (majoritairement Précambrien)  
(d'après la carte géologique au 1/10 M)



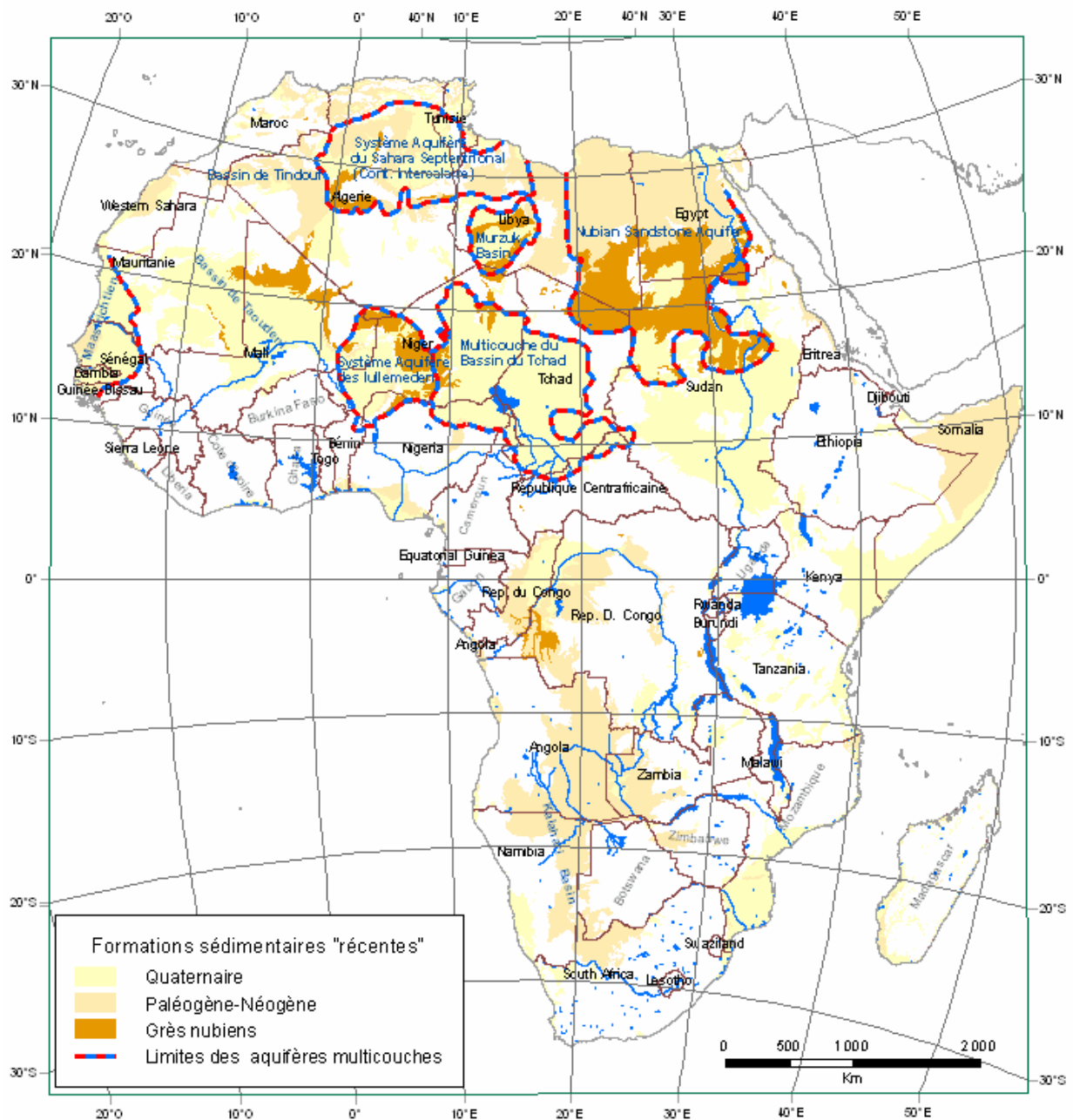


Figure 3 - Réservoirs à porosité interstitielle (majoritairement) dans les bassins sédimentaires récents et délimitation des grands aquifères multicouches à ressource en eau non renouvelable.



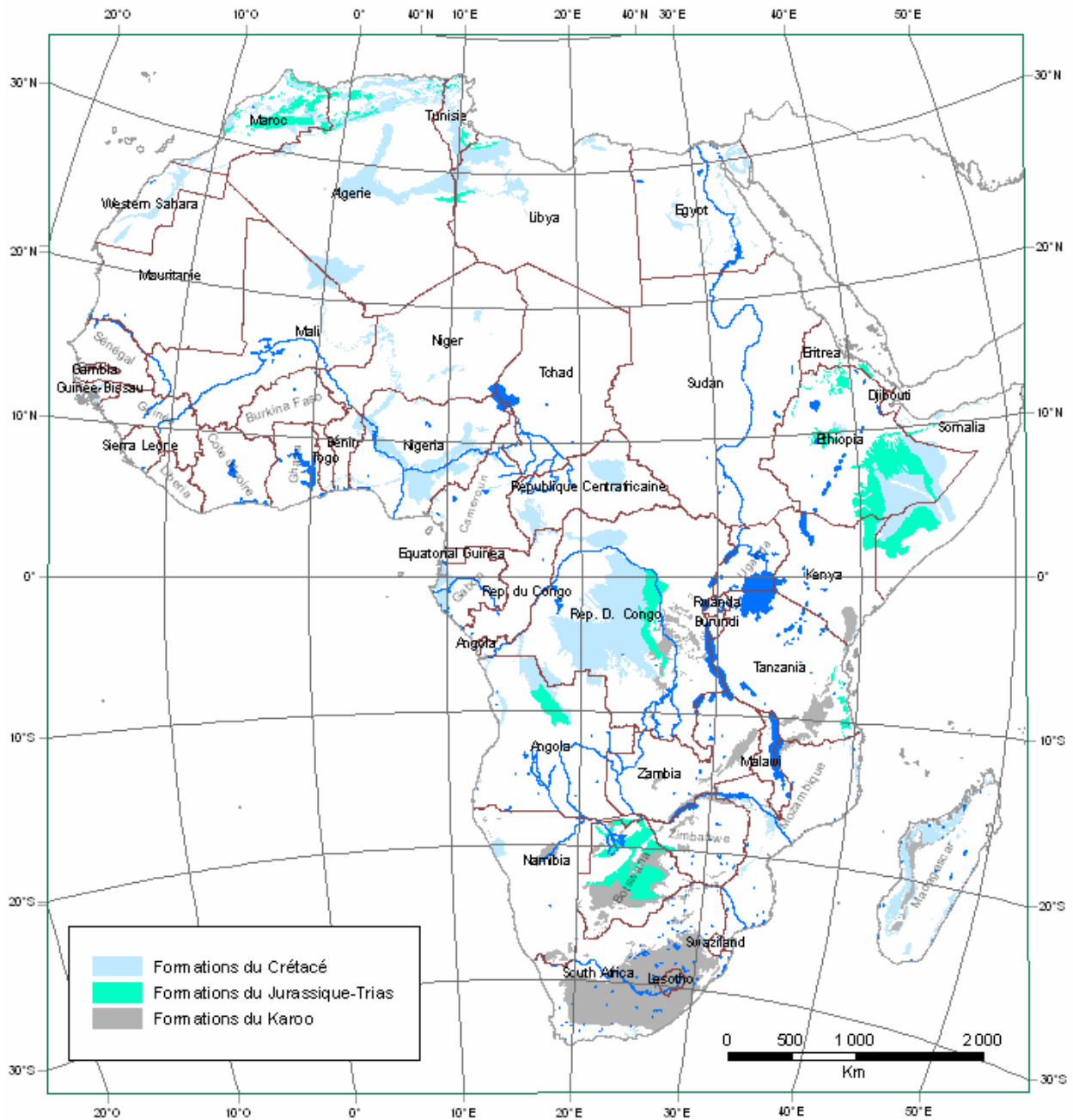


Figure 4 - Structures complexes: formations du Crétacé , du Jurassique-Trias et du Karoo. (d'après la carte géologique au 1/10 M)





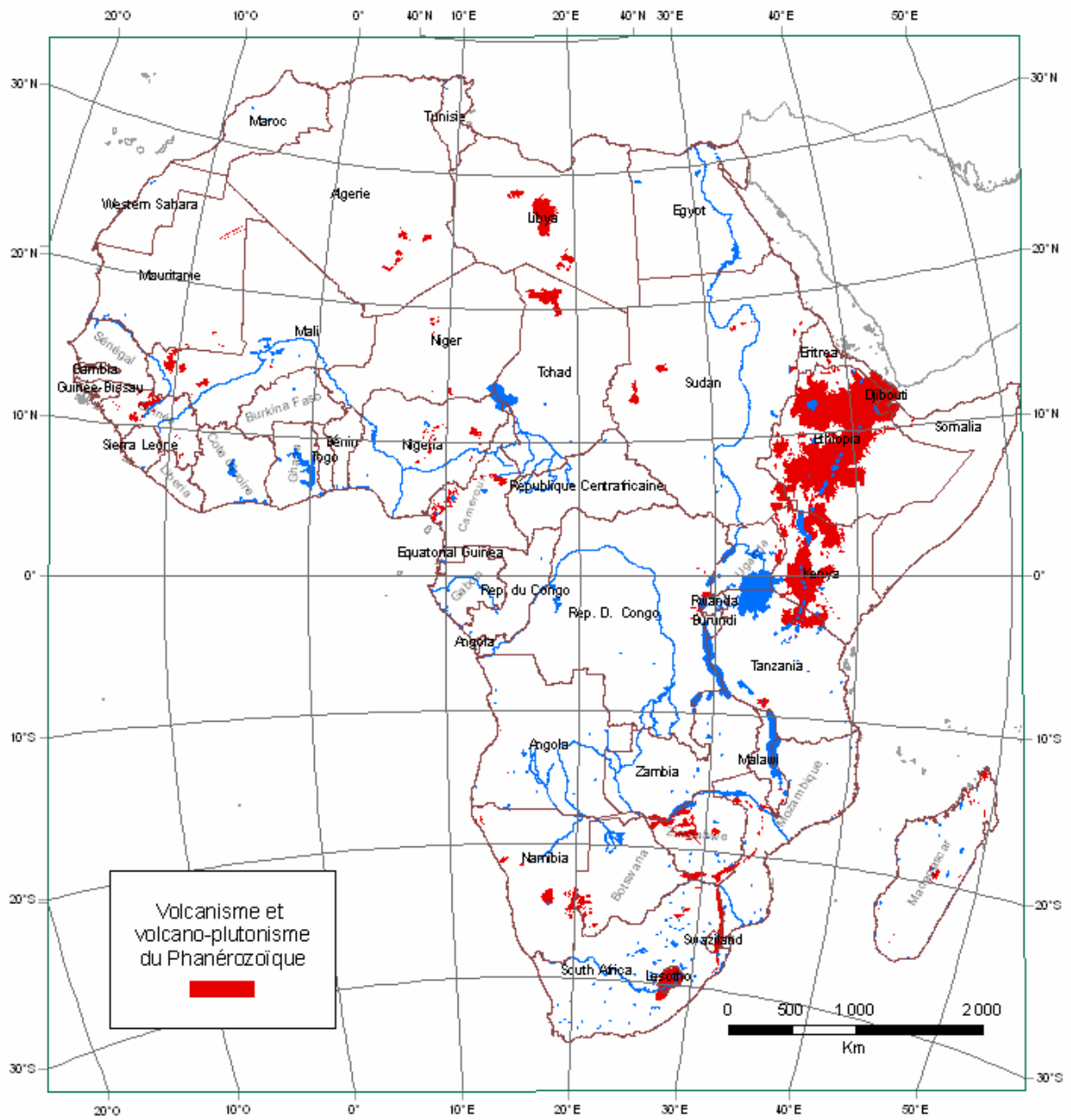


Figure 5 - Formations volcaniques et volcano-plutoniques du Phanérozoïque (d'après la carte géologique au 1/10 M)



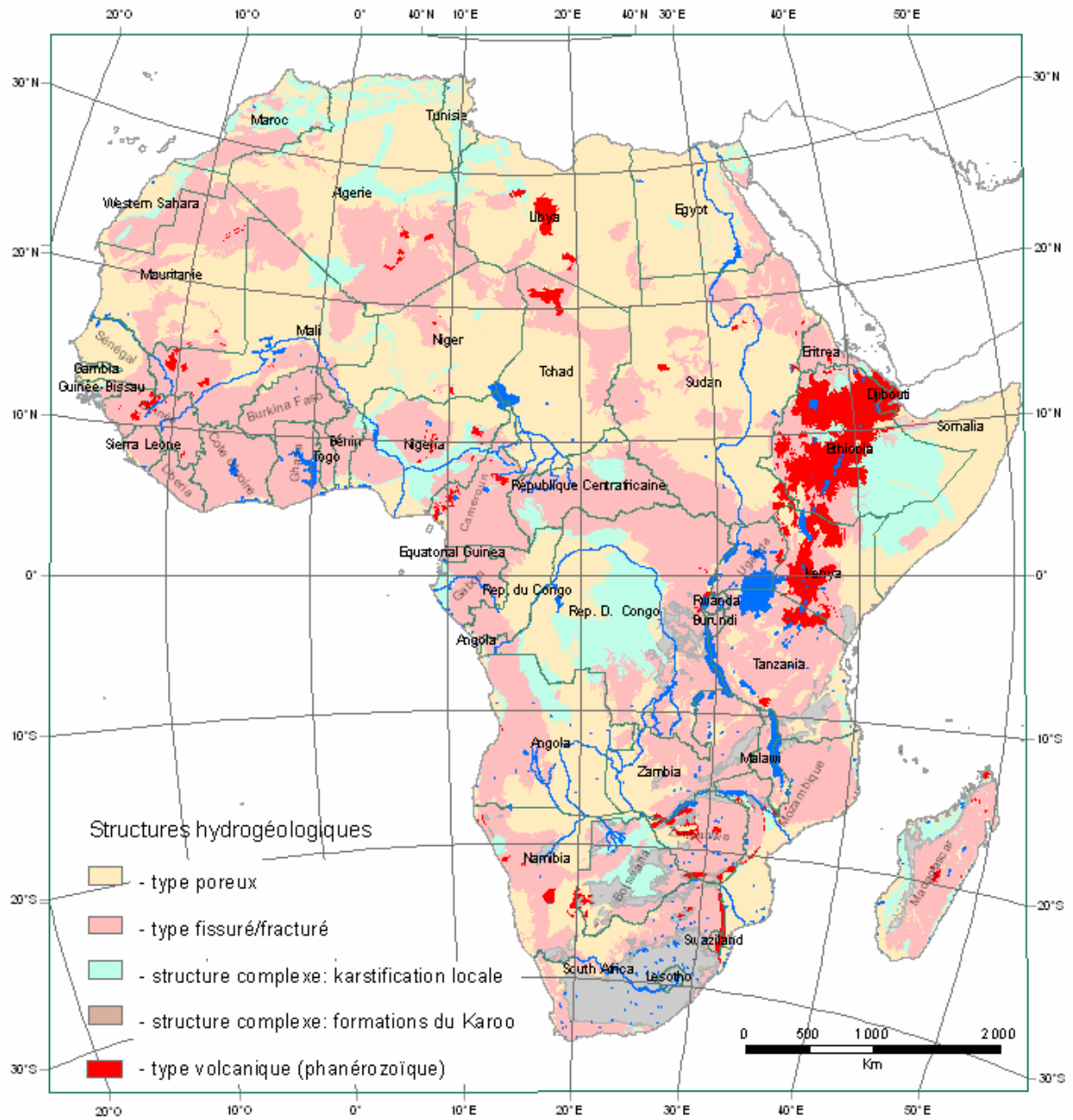


Figure 6 - Grands types de structures hydrogéologiques



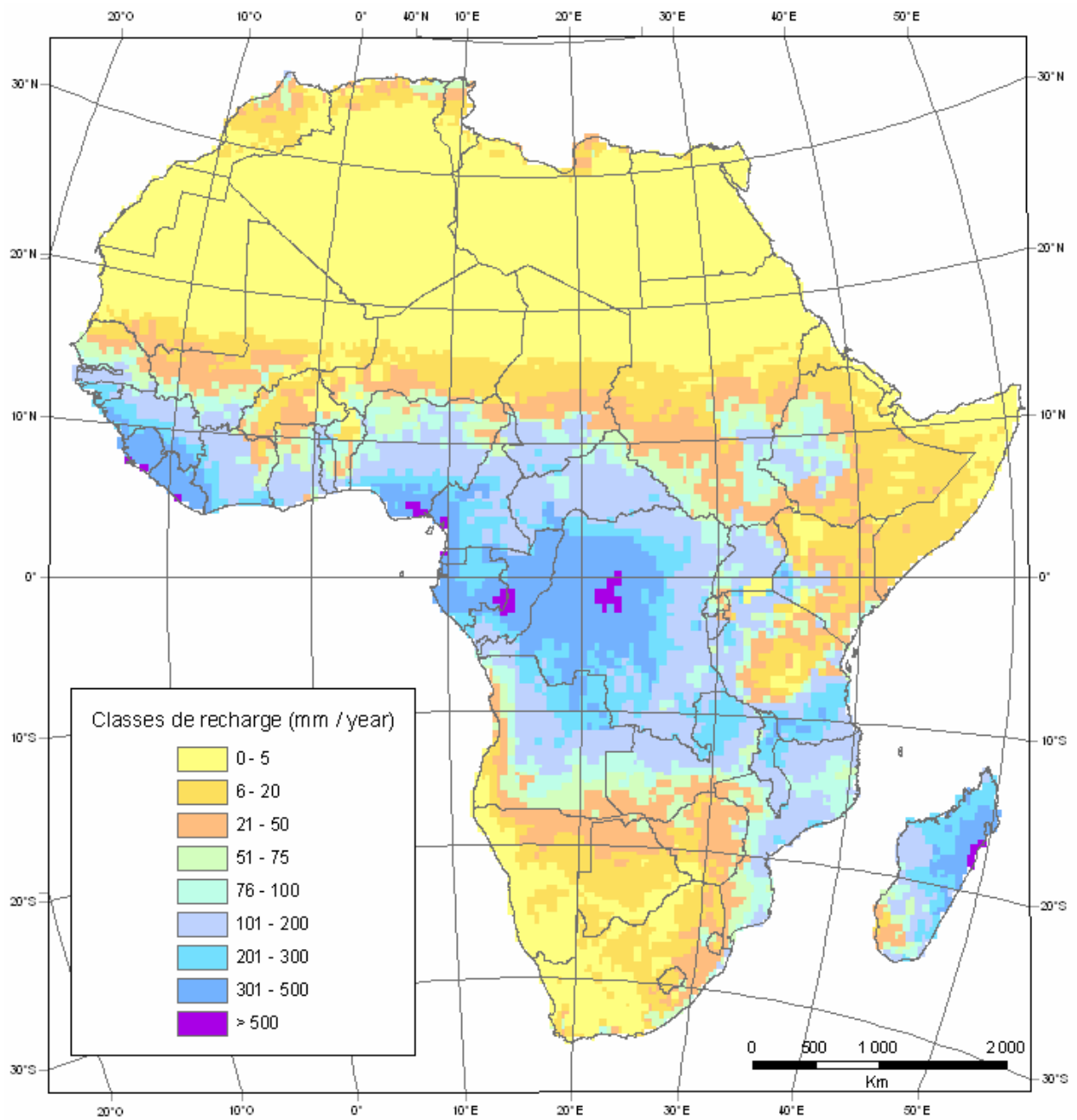


Figure 7 - Valeurs de recharge calculées sur une grille à mailles de 0.5° (Döll P., Flörke M., 2005)



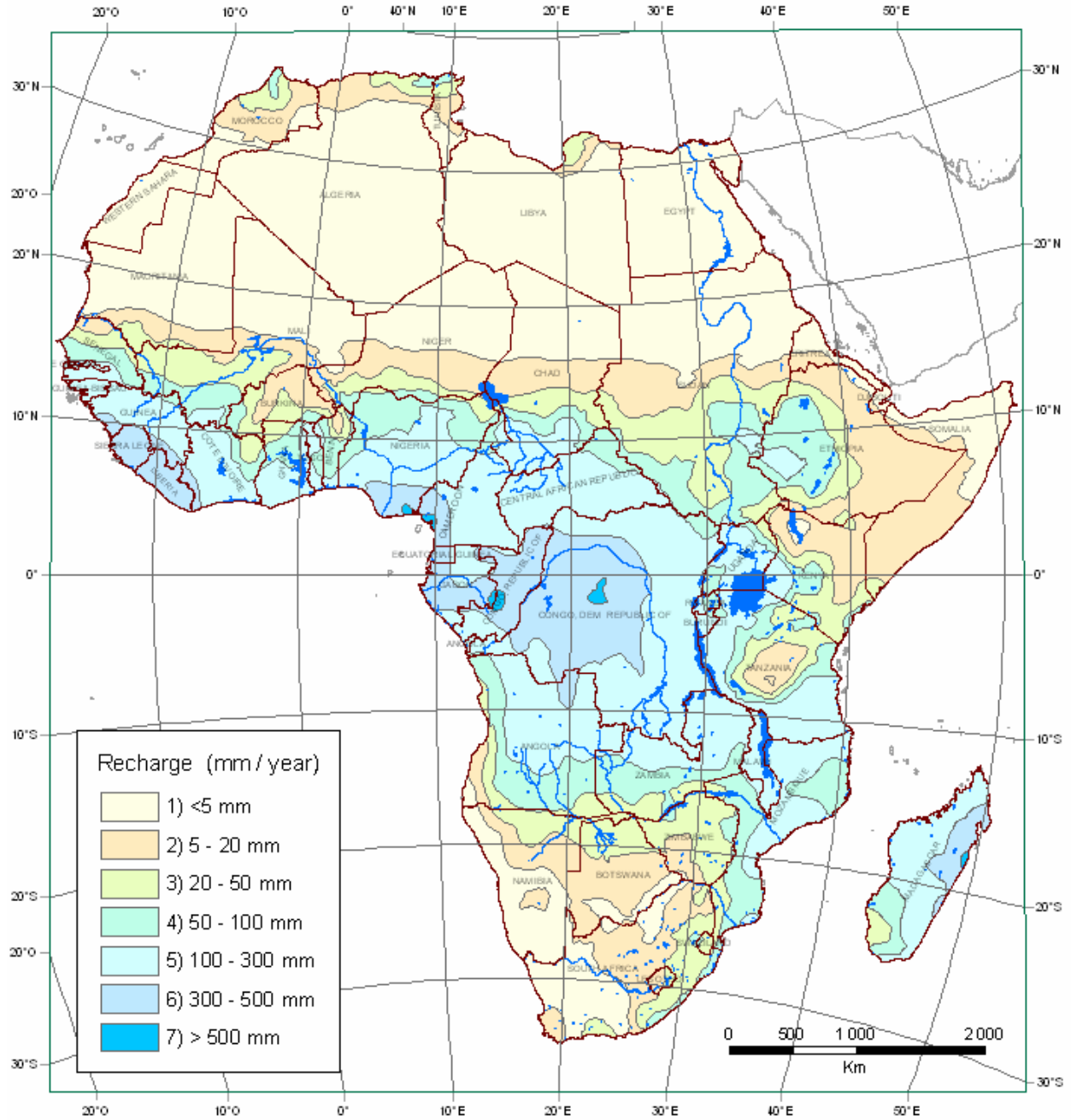


Figure 8 - Délimitation de zones de recharge





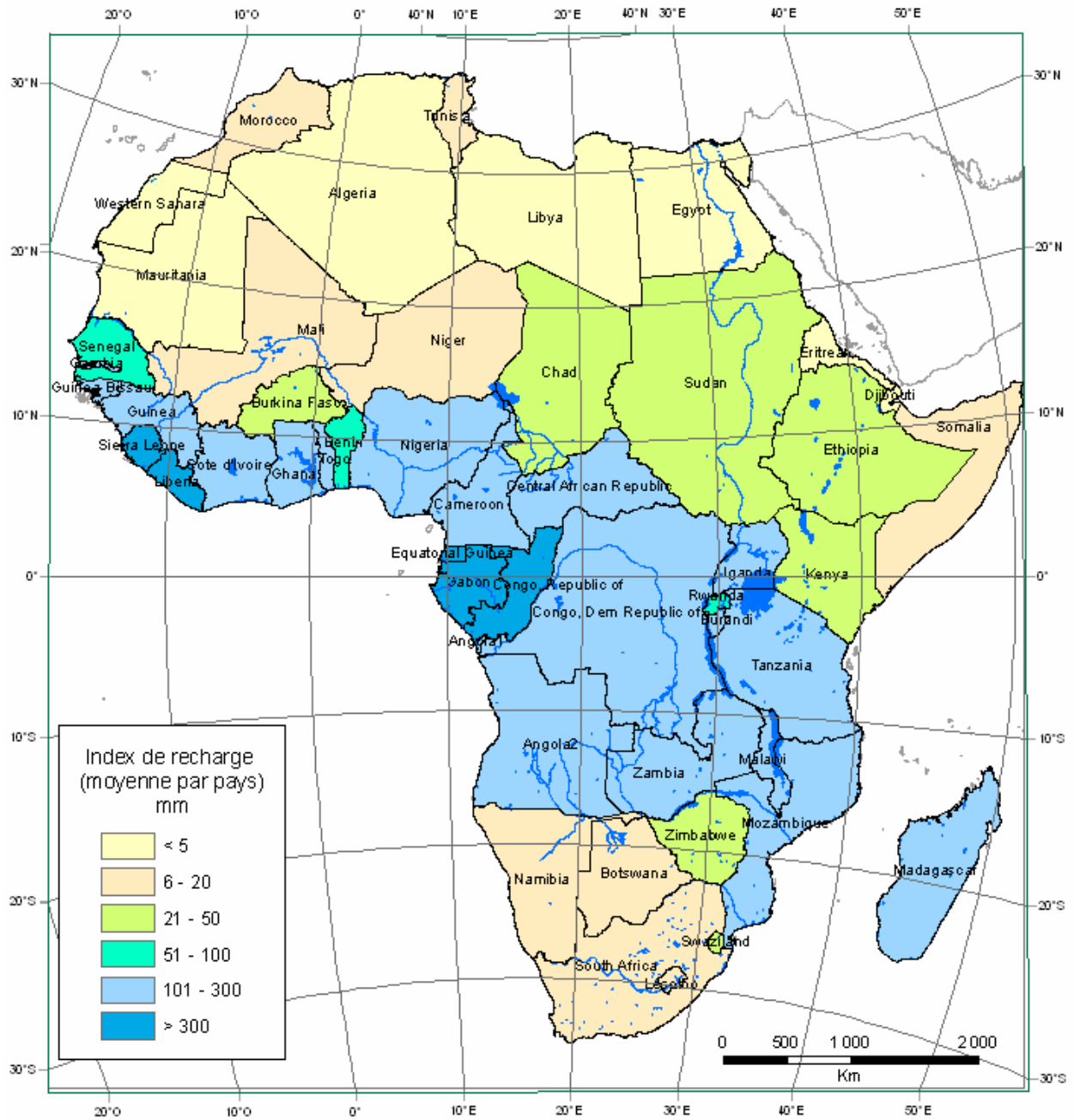


Figure 9 - Index de recharge (moyenne par pays)



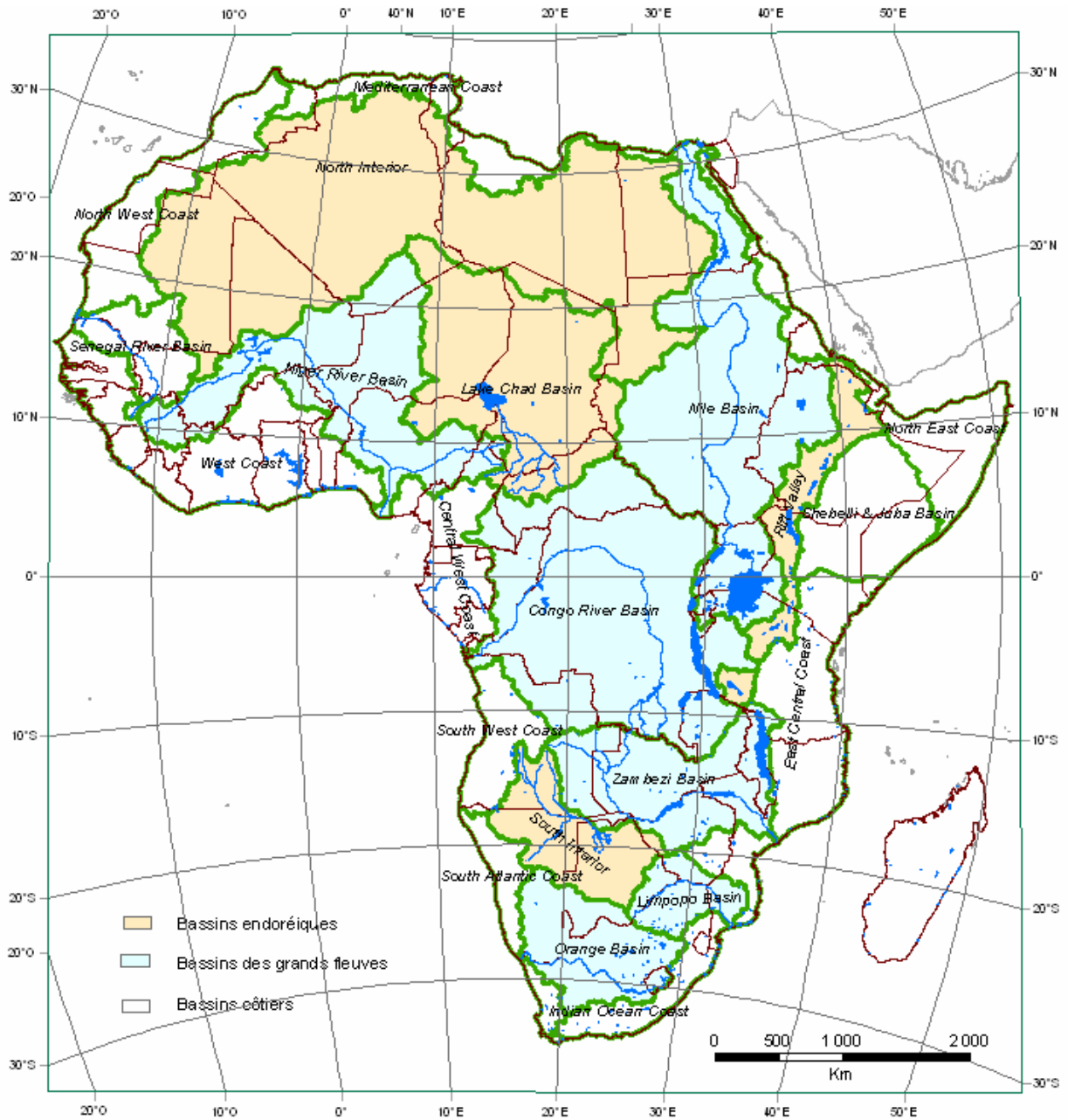


Figure 10 - Grands bassins hydrographiques



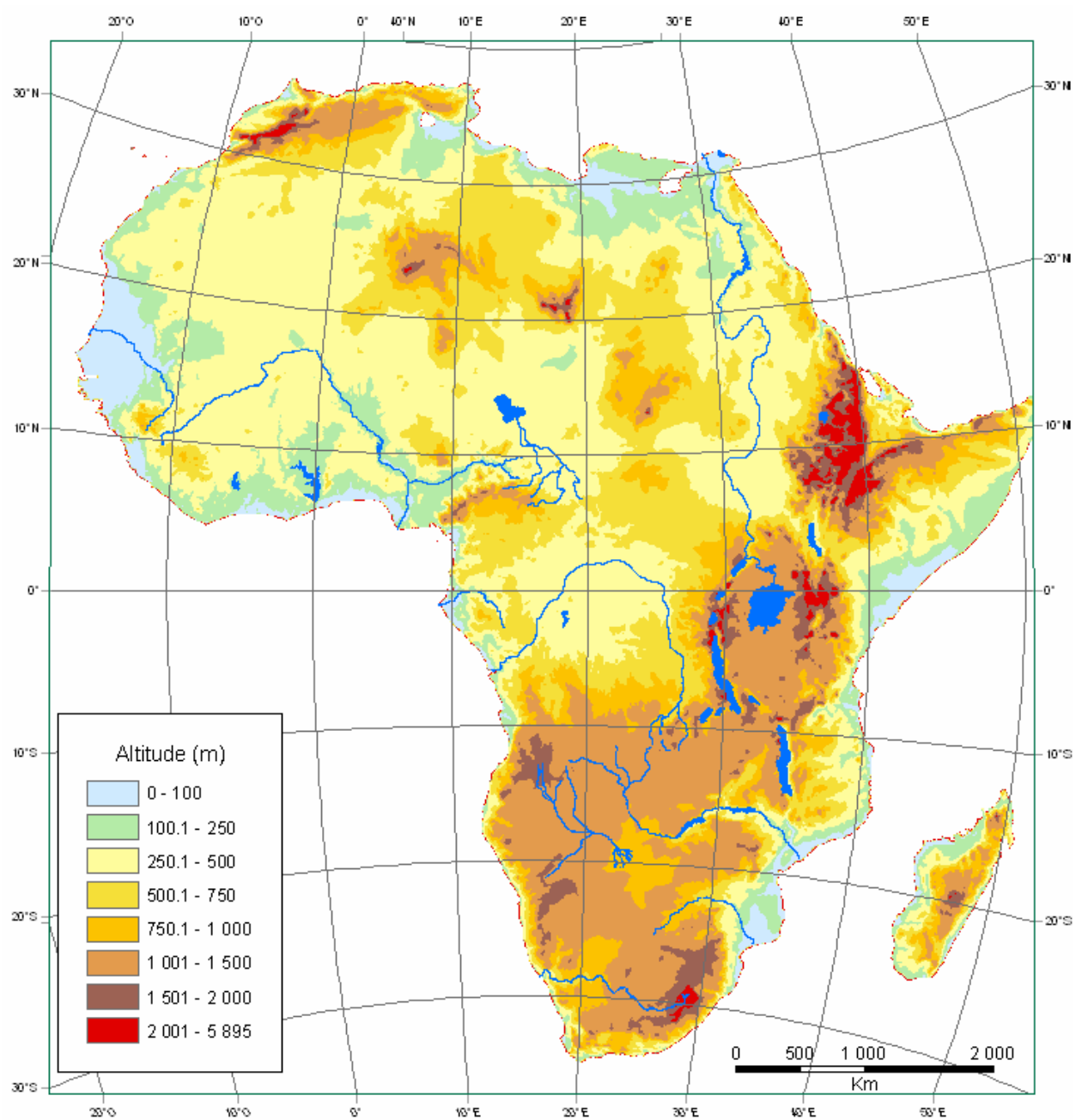


Figure 11 - Relief de l'Afrique (d'après le MNT de la base Hydro1K de l'USGS)