

Base de Données Numériques sur les SOls et le TERrain (SOTER) de l'Afrique Centrale (RD Congo, Rwanda et Burundi)

C. Goyens⁽¹⁾, A. Verdoodt⁽¹⁾, J. Van De Wauw⁽¹⁾, G. Baert⁽²⁾, V.W.P. van Engelen⁽³⁾, J.A. Dijkshoorn⁽³⁾ et E. Van Ranst⁽¹⁾

- (1) Département de Géologie et Pédologie, Laboratoire des Sciences du Sol, Université de Gand, Krijgslaan 281 (S8), Gand B-9000, Belgique.
- (2) BIOT, Département de Chimie du Sol et Nutrition Végétale, Ecole Supérieure de Gand, Voskenslaan 270, Gand B-9000, Belgique.
- (3) ISRIC - World Soil Information, BP 353, 6700 AJ Wageningen, Pays Bas

RÉSUMÉ

En Afrique Centrale, les données pédologiques et l'information détaillée sur les ressources naturelles sont difficiles d'accès, incomplètes et souvent sous des formats non standardisés, ce qui affecte l'accessibilité et la rapidité d'exploitation de l'information. Depuis l'élaboration de la « Carte des Sols du Congo belge et du Ruanda-Urundi » en 1959, des informations sur les sols et les terrains de ces trois pays ont été éditées et publiées. Il en résulte diverses cartes des sols, de la végétation et du relief aux échelles variées, des cartes lithologiques et une quantité de données morphologiques et physico-chimiques des profils pédologiques.

L'objectif principal du programme SOTER est la création d'une base de données sur les sols et le terrain au niveau mondial, contenant des unités cartographiques numérisées et les données de leurs attributs. La méthodologie SOTER est fondée sur l'identification de zones de terres en fonction des caractéristiques de terrain et de sol. Cette base de données, compatible avec d'autres bases de données, offrira ainsi les données nécessaires pour améliorer la gestion et le suivi des changements dans les ressources en sols et terrain.

A partir des cartes thématiques et des données accessibles, nous avons créé une base de données SOTER pour l'Afrique Centrale (SOTERCAF). SOTERCAF comprend une carte numérisée des unités SOTER de la RD Congo à l'échelle de 1/2 000 000 et deux cartes à l'échelle de 1/1 000 000, l'une du Rwanda, l'autre du Burundi. L'information supplémentaire décrivant les composants non cartographiables et les propriétés descriptives et physico-chimiques des profils pédologiques, ont été harmonisées et insérées dans une base de données relationnelle.

Mots clés

Base de données numériques, SIG, SOTER, sols, terrain, Rwanda, Burundi, RD Congo.

SUMMARY**Soil and Terrain Database (SOTER) of Central Africa (DR Congo, Rwanda and Burundi)**

In Central Africa, soil data and detailed information of natural resources are not easily accessible, sometimes missing and often not standardized, which makes them unmanageable and difficult to exploit. Since the production of the « Carte des Sols du Congo belge et du Ruanda-Urundi » in 1959, additional soil information has become available at national level in each of these three countries. This resulted in soil, vegetation, relief and lithological maps at various scales and abundant morphological soil profile descriptions accompanied by analytical data. The main objective of the SOTER programme is to create a soil and terrain database on a global level containing digitized map units and their attribute data. The SOTER methodology focuses on the identification of land areas with a distinctive pattern of terrain and soil characteristics. The SOTER database is compatible with other databases, and will provide the necessary data for improved mapping and monitoring of changes of the world soil and terrain resources.

Available thematic maps and data sources of the area were combined to create the SOTER database of Central Africa (SOTERCAF). SOTERCAF contains two SOTER unit maps at scale 1/1 000 000 for Rwanda and Burundi and at scale 1/2 000 000 for DR Congo. Information characterising the non-mappable terrain and soil components has been selected, harmonised and inserted in a large relational database containing a wealth of descriptive and analytical soil profile data.

Key-words

Numerical database, GIS, SOTER, soils, terrain, Rwanda, Burundi, DR Congo

RESUMEN**Banco de datos de los suelos y del terreno (SOTER) por África Central (RD Congo, Ruanda y Burundi)**

En África Central, los datos de los suelos y la información detallada de los recursos naturales son de difícil acceso, incompleto y a menudo en un formato no normalizado. Desde la elaboración del mapa "Carte des Sols du Congo belge et du Ruanda-Urundi" en 1959, una gran cantidad de datos de los suelos y del terreno de estos tres países ha sido publicada y editada. Quedaron múltiples mapas de los suelos, de la vegetación y del relieve a varias escalas, mapas litológicos y una gran cantidad de datos morfológicos y fisicoquímicos de los perfiles pedológicos.

El objetivo principal del programa SOTER es la creación de una base de datos de los suelos y terrenos a nivel mundial con unidades cartográficas numerizadas y los datos de sus atributos. La metodología SOTER es fundada sobre la identificación de zonas de tierras en función de las características del terreno y del suelo. Esta base de datos, compatible con otras bases de datos, facilitará los datos necesarios para mejorar la gestión y el control de los cambios en los recursos en suelos y terreno.

A partir de los mapas temáticos y los datos iniciales que poseemos, hemos realizado una base de datos SOTER para África Central (SOTERCAF). SOTERCAF contiene una carta numerizada de las unidades SOTER de la RD Congo a escala 1/2 000 000 y dos cartas a escala 1/1 000 000, una del Ruanda y otra del Burundi. La información complementaria con los atributos no espaciales de los componentes y las propiedades descriptivas y fisicoquímicas de los perfiles del suelo han sido armonizados e insertados en una base de datos relacional.

Palabras clave

Banco de datos numérico, SIG, SOTER, suelos, terreno, Ruanda, Burundi, RD Congo

L'utilité d'une base de données numérique pour le suivi des changements des ressources en sols et en terrain*, et la cartographie de ces changements au niveau mondial, est évidente (van Engelen et Wen, 1995 ; Selvaradjou *et al.*, 2005). C'est en 1986, à l'initiative de l'Association Internationale de la Science du Sol (AISS), que la conception d'une telle base de données a été évoquée. Il en résulta la mise en place du programme SOTER (SOils and TERrain Digital Database) (ISSS, 1986a et 1986b). Les objectifs principaux de SOTER sont : (1) la délimitation des zones formant un ensemble homogène de caractéristiques des sols et du terrain ; (2) la construction d'une base de données de qualité en relation avec les unités cartographiques et basée sur des critères différentiels bien définis ; et (3) le développement d'une méthodologie transférable et utilisable dans les pays en voie de développement pour une exploitation d'une base de données nationale (transfert de technologie) (van Engelen et Wen, 1995).

Des bases de données SOTER complètes ou préliminaires de l'Amérique Latine, l'Europe de l'Est, l'Afrique Australe et l'Afrique Nord-est et l'Eurasie Nord et Centrale ont déjà été élaborées (FAO *et al.* 1998a ; FAO *et al.* 1998b ; FAO and IIASA 1999 ; FAO and ISRIC 2000, 2003). Jusqu'à présent, l'Afrique Centrale constituait un grand vide sur la carte de l'Afrique. La cartographie vient d'être achevée dans le cadre du projet SOTERCAF (SOil and TERrain database of Central Africa).

SOTERCAF comprend la base de données pédologiques et paysagiques de RD Congo, Rwanda et Burundi et a été réalisé par ISRIC - World Soil Information et le Laboratoire des Sciences du Sol de l'Université de Gand (UGent), en collaboration avec le Département de Chimie du Sol et Nutrition Végétale (BIOT) de l'École Supérieure de Gand et le Musée Royal de l'Afrique Centrale, sous financement FAO (FAO *et al.*, 2007). Il existe une quantité d'information importante sur les sols et la géomorphologie de ces trois pays. Mais ces données sont diverses et hétérogènes tant d'un point de vue de l'échelle spatiale que de la terminologie (absence de lien entre les différentes classifications des sols, subjectivité de l'information). Ce fait rend les croisements et la synthèse de l'information très difficiles. Il affecte aussi la maniabilité et la rapidité d'exploitation de l'information (Sys, 1961 et 1972 ; Van Cutsem *et al.*, 2004). L'harmonisation et la traduction de cette grande quantité de données ont conduit vers un ensemble de trois cartes numérisées et une base de données complexe reprenant les données connues des sols et des terrains de la RD Congo, du Rwanda et du Burundi. La carte de la RD du Congo a été réalisée à une échelle de 1/2 000 000 et les cartes du Burundi et du Rwanda, à une échelle de 1/1 000 000, étant donné la plus grande quantité de données disponibles du Rwanda et Burundi.

SOTERCAF est d'une grande importance pour l'aménagement et la mise en valeur des terres de l'Afrique Centrale. L'analyse

de la sensibilité des sols à la dégradation (risques d'érosion), le suivi des changements globaux des ressources en sols (état de dégradation) et l'évaluation des impacts de la dégradation des sols sur l'environnement et la production agricole (impact de la dégradation), sont quelques champs d'étude de SOTER. Ceci demande une harmonisation des données au niveau continental voir même au niveau mondial (van Engelen et Wen, 1995 ; Nachtergaele, 2002). Cet article décrit en détail la structure de SOTERCAF, les différentes données stockées dans la base de données et les résultats obtenus.

MATÉRIELS ET METHODES

Sources des données

Les données sources utilisées pour la création de SOTERCAF, sont constituées de deux jeux de données distincts.

Données morphologiques

Le premier jeu de données est le modèle numérique de terrain - MNT et provient de la Shuttle Radar Topography Mission - SRTM (USGS, 2003). Ce MNT, d'une résolution de 90 mètres, fournit l'altitude pour chaque cellule, ou pixel, de l'Afrique Centrale. A partir de ce modèle, l'ISRIC a dressé une carte de la physiographie, réalisée à partir des classes de pente, de l'intensité du relief et de l'altitude, suivant partiellement l'approche développée par le Bureau Européen des Sols (Dobos *et al.*, 2005 ; van Engelen *et al.*, 2006). L'inclusion de la densité potentielle de drainage, qui fait partie de la méthode originale, n'a pas abouti à une délimitation compatible avec les unités observées sur le terrain. Les unités de terrain ont donc été définies en combinant pente, relief et altitude ; et les unités obtenues ont été généralisées à une échelle de 1 : 1 000 000.

Données pédologiques

Le deuxième jeu de données est constitué de cartes thématiques (*tableau 1*) et de notices explicatives. Ces cartes pédologiques, lithologiques et géomorphologiques résultent des divers projets menés par les différents partenaires du projet SOTERCAF.

RD Congo

Les relevés de terrains, menés de 1945 à 1960, par l'Institut National pour l'Étude Agronomique du Congo Belge (INEAC) ont permis de produire 26 cartes des sols et de la végétation à plusieurs niveaux d'échelle, de 1/10 000 à 1/500 000. De 1960 à nos jours, les cartes de l'INEAC ont été revues, les légendes pour les cartes des sols ont été standardisées et de nouvelles cartographies pédologiques détaillées, semi-détaillées et systématiques, ont été effectuées par le Laboratoire des Sciences - UGent. Les cartes élaborées depuis 1945 recouvrent 15 % de la totalité de la RD Congo et sont associées à un ensemble de notices explicatives (INEAC, 1962).

* Dans le contexte de l'approche SOTER, les ressources de terrain sont différenciées sur la base de leur physiographie et de leur lithologie.

La banque de données des profils de l'Afrique Centrale constitue une quantité importante d'informations sur les 231 profils étudiés pendant les différentes missions menées sur le terrain (Sys, 1972). La carte des sols du Congo Belge et du Rwanda-Burundi, à une échelle 1/5 000 000 (Sys, 1960) a également été utilisée. Cette carte est considérée par ses auteurs comme une esquisse provisoire et imparfaite, mais elle permet cependant de combler les lacunes dans les données disponibles. Elle est en effet la seule carte pédologique qui recouvre la totalité de la RD Congo.

Burundi

La carte des sols du Burundi à une échelle de 1/250 000 et sa notice explicative, contenant des profils de référence, ont été réalisées grâce à la collaboration entre les membres du groupe de Cartographie des Sols de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) et du Département des Sciences des Sols de l'Université Catholique de Louvain (UCL) (Sottiaux *et al.*, 1988).

Rwanda

Les 43 cartes de sols et les 43 cartes topographiques du Rwanda à l'échelle de 1/50 000 ont été réalisées par le Laboratoire des Sciences du Sol - UGent en partenariat avec l'Unité des Sciences du Sol - UCL et du Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et des Forêts du Rwanda (MINAGRI). Une carte des sols du Rwanda à l'échelle du 1/250 000 a été élaborée à partir des éléments des 43 cartes détaillées. La banque de données conçue à partir de ce projet contient 1835 profils pédologiques et une grande quantité de descriptions et d'analyses physico-chimiques des horizons.

Données sur la lithologie

Les données relatives à la lithologie ont été déduites de la carte géologique du Zaïre à l'échelle de 1/2 000 000 réalisée par Lepersonne (1974) et digitalisée par le Musée Royal de l'Afrique Centrale de Tervuren, de la carte lithologique du Burundi (Lambeaux, 1979) et de la carte lithologique du Rwanda à l'échelle de 1/250 000 (Lavreau *et al.*, 1981).

Structure de la base de données de SOTERCAF

Ayant comme objectif de réaliser une base de données numériques, la méthodologie SOTER impose une méthode de travail avec des critères de classification sévères et un format d'entrée de données rigide (ISSS, 1986b). La méthodologie de SOTER est fondée sur un jeu de relations entre les phénomènes physiques et biologiques, l'influence humaine et évolue en fonction du temps. Elle identifie des zones de terres, entités naturelles constituées d'une combinaison d'unités de terrain et de sols, en fonction des caractéristiques de terrain et de sol (van Engelen et Wen, 1995) (*figure 1*).

La base de données SOTER est constituée, d'une part de données géométriques (unités cartographiques numérisées dans un SIG) et d'autre part de données attributaires (ensemble de fichiers d'attributs géré par un Système de Gestion de la Base de Données Relationnelle). Les données géométriques indiquent la localisation et la topologie des unités (formes, délimitation et voisinage), et les «attributs» présentent les caractéristiques non spatiales des unités. La structure de la base de données de SOTER est subdivisée en 3 niveaux distincts (*figure 2*) :

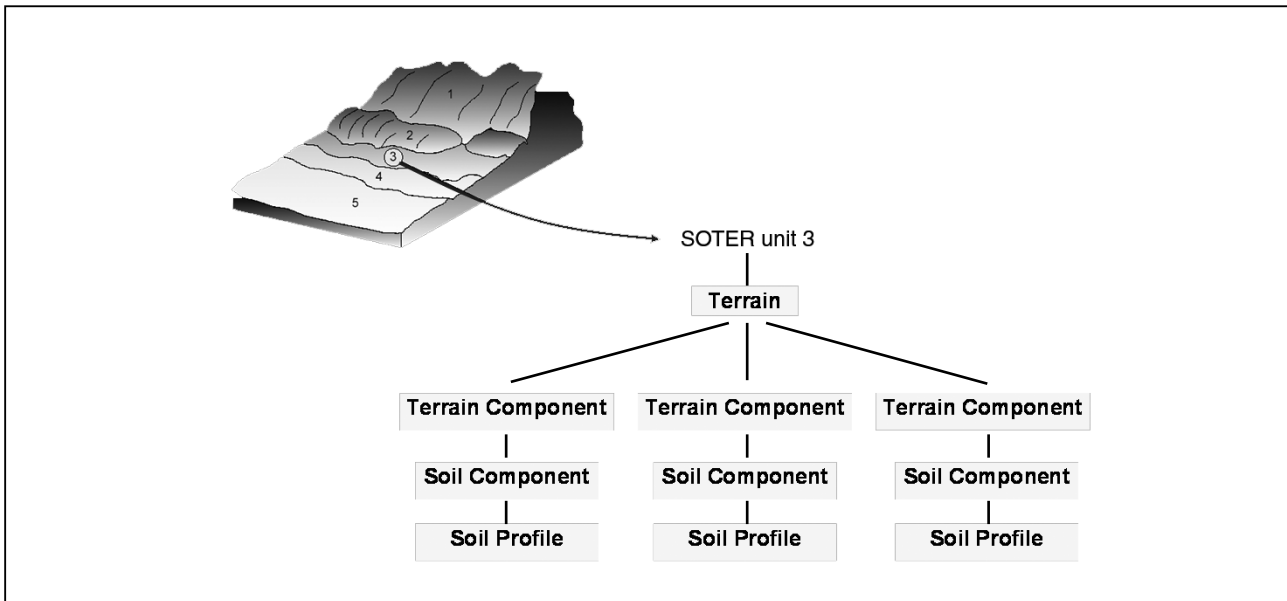
Tableau 1 - Cartes utilisées pour la réalisation de la base de données SOTERCAF.

Table 1 - Maps used for the realisation of the SOTERCAF database.

Pays	Description de la carte	Echelle	Année
R.D.Congo	Carte des Sols du Congo Belge et du Ruanda-Urundi	1/5 000 000	1959
	Carte Géologique du Zaïre	1/2 000 000	1974
	Cartes des Sols et de la Végétation de la R.D. Congo	1/10 000 à 1/500 000	1945 à 1960
	Carte des Sols de la Province du Bas Congo et Ville de Kinshasa (version non-finalisée)	1/200 000	2006
Burundi	Atlas du Burundi, Lithologie	1/250 000	1979
	Carte des Sols du Burundi	1/250 000	1988
Rwanda	Carte des Sols du Rwanda	1/250 000	1992
	Cartes des Sols du Rwanda (43 feuilles)	1/50 000	2000
	Carte Lithologique du Rwanda	1/250 000	1981
	Cartes du Relief du Rwanda (43 feuilles)	1/50 000	2001

Figure 1 - Entités naturelles constituées par la combinaison d'un type de terrains et de sols.

Figure 1 - Natural entities consisting of combinations of terrain and soil components.



- le premier niveau contient les unités de terrains, distinguées l'une de l'autre sur la base de la physiographie et de la lithologie ;
- ces unités sont à leur tour subdivisées en un ou plusieurs composants de terrain ;
- le dernier niveau décrit les composants de sols. Les attributs de ces composants sont les données générales telles que leur position et leur proportion dans les composants de terrain, ainsi que les paramètres plus détaillés des profils de sol et de chaque horizon. Le *tableau 2* présente tous les attributs non spatiaux des composants de sol de SOTERCAF.

La structure SOTER appliquée à SOTERCAF permet de construire une base de données relationnelle avec une quantité d'informations allant de la description générale du terrain jusqu'à la description détaillée des résultats d'analyses des différents profils.

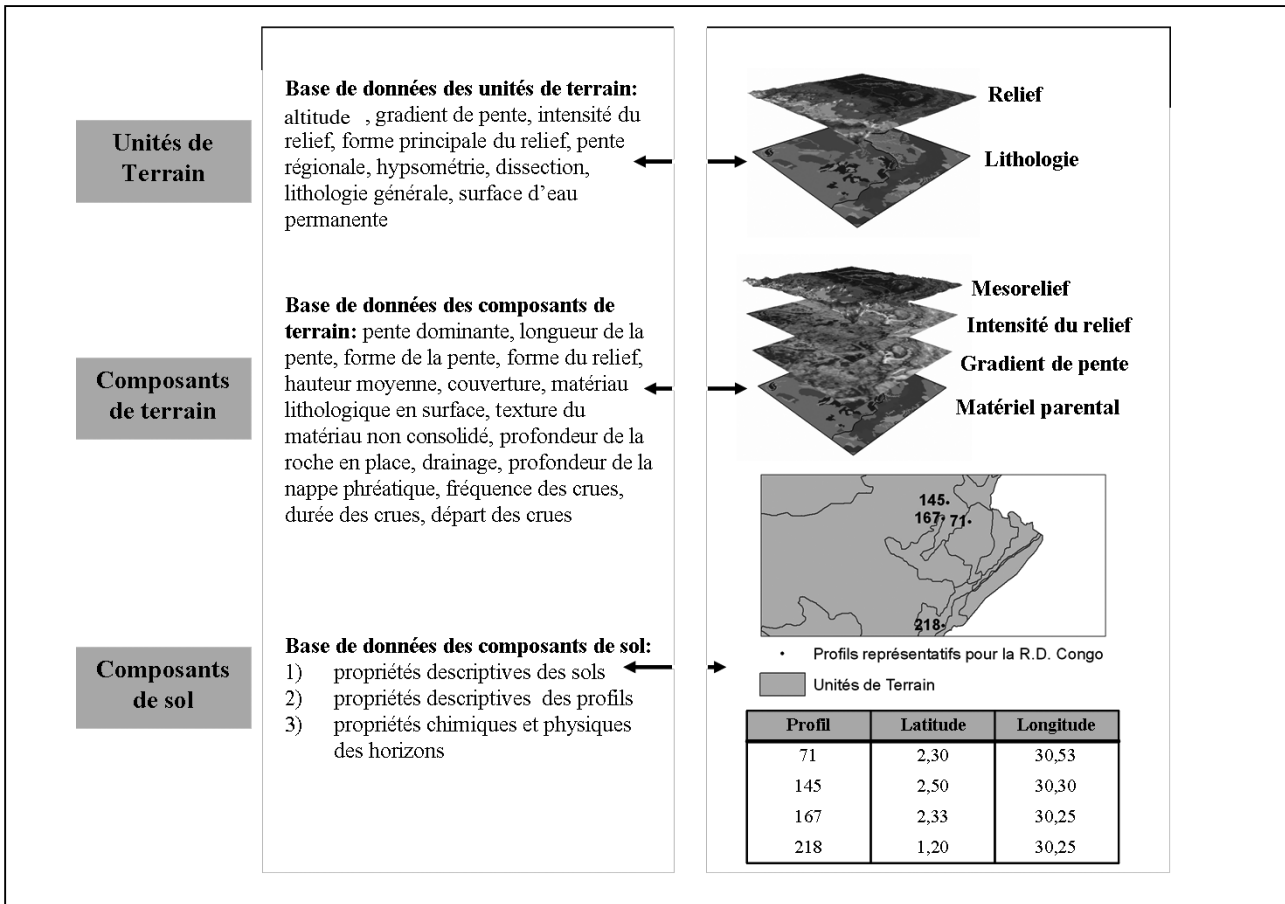
Approche cartographique de SOTERCAF

La délimitation des unités de terrain est essentiellement basée sur deux éléments, la géomorphologie et la lithologie. Un changement significatif de ces éléments est un critère de délimitation de nouvelles unités SOTER. La classification géomorphologique est basée sur la pente et l'intensité du relief, calculées à l'aide du MNT SRTM. La première démarche a été de généraliser la carte physiographique en différentes unités géomorphologiques sur la base de notices explicatives des cartes pédologiques et des conseils des pédologues ayant connaissance du terrain. Ceci permet, d'une part, d'avoir une idée générale des éléments composant le paysage et de mieux comprendre leur organisation, avant d'aborder la superposition et la corrélation entre la géomorphologie et la lithologie, et

d'autre part, de tenir compte du seuil de lisibilité adopté par SOTER. Ce seuil concerne la taille minimale des unités ainsi que le lissage des segments tracés sur la carte. La taille ne peut être inférieure à 100 km² pour la carte de la RD Congo (échelle de 1/2 000 000) et à 25 km² pour les cartes du Burundi et du Rwanda (échelle de 1/1 000 000). Les plus petites unités, formes étroites et allongées, correspondent le plus souvent à des crêtes, des vallées, des plaines alluviales, etc. Les segments doivent correspondre à un degré de détail cohérent avec l'échelle de la carte, ce qui implique un lissage des frontières « plissées ».

La taille des composants individuels et leur complexité peuvent empêcher dans certains cas leur représentation cartographique. Les composants non cartographiables et leurs caractéristiques sont néanmoins inclus dans la base de données SOTER (*figure 3*), bien que leur extension et leur localisation exactes ne puissent être déterminées sur la carte.

Dans la cartographie assistée par ordinateur, des problèmes se posent lors de la délimitation des unités. Les unités présentées sont en réalité beaucoup plus complexes que les unités distinguées sur la base des grandes formations lithologiques et la carte physiographique élaborée par l'ISRIC. Il est indispensable de tenir compte des observations de terrain qui sont décrites dans les notices explicatives des cartes pédologiques. La généralisation nécessite en effet une connaissance du terrain afin de découper, assembler ou encore fusionner les différentes unités avec leurs unités voisines tout en favorisant la disparité entre les unités. Il faut également tenir compte des erreurs de saisie de la base topographique de la carte lithologique, résultant de bruits et d'erreurs de superposition qu'il faut éliminer manuellement (Van Engelen *et al.*, 2006).

Figure 2 - Structure de la base de données de SOTER.**Figure 2 -** SOTER database structure.

Une autre difficulté, rencontrée lors de la délimitation des unités cartographiables, est due à l'hétérogénéité des polygones. Les phénomènes naturels se présentent souvent suivant des intensités et des mélanges variés. Une unité de terrain, étant un ensemble de phénomènes, n'est donc pas une unité discrète ; elle est souvent constituée de formes de terrains et de sols distincts, voire même très contrastés. L'homogénéité des unités de terrain, qui sont les seules unités qui ont été cartographiées dans le cadre du projet SOTERCAF, est donc fort improbable. Une unité, qui à l'échelle du projet ne peut être découpée en plusieurs unités, est une combinaison de plusieurs paramètres pédologiques, lithologiques et géomorphologiques. Dans le cadre de cette étude, les paramètres dominants sont enregistrés en tant qu'unité de terrain, les paramètres secondaires et tertiaires, comme composant de terrain. Au final, la taille des unités de terrain et le niveau de segmentation des différentes unités et composants dépendent donc essentiellement du niveau de détail (précision et résolution) de l'information disponible (van Engelen et Wen, 1995) et de l'échelle de la carte.

Classification et caractérisation du sol et du terrain

Les données sources sont très diverses tant du point de vue de leur échelle que du point de vue de leur légende et de leurs attributs. Or, le système créé par SOTER est rigoureux quant à la définition des classes d'attributs (van Engelen et Wen, 1995 ; Nachtergaele, 2002). La première difficulté fut donc d'interpréter les légendes des cartes existantes, de retrouver un lien entre les différentes classifications et de traduire celles-ci dans la terminologie imposée par la méthode de SOTER. La conversion de la légende lithologique met très clairement en lumière cette difficulté. En effet dans la plupart des documents de base, les roches sont regroupées suivant leur aptitude à produire un même type de paysage ou de sol. Au contraire, les roches dans le système de SOTER, sont regroupées selon leur mode de mise en place, et le système tient compte de leur composition minéralogique (Laboratoire des Sciences du Sol - UGent, 2006). Notons également l'ambiguïté de certains termes français tels que 'schistes, quartzites et argilites' qui rendent la classification suivant les termes imposées par SOTER difficile. Ce

Tableau 2 - Attributs non spatiaux d'un composant de sols.

Table 2 - Non spatial attributes of a soil component.

COMPONENT DE SOLS	drainage	sable très grossier
ID de l'unité SOTER	taux d'infiltration	sable grossier
numéro du composant de terrain	matière organique de surface	sable moyen
numéro du composant de sols	Classification BRM	sable fin
proportion de l'unité SOTER	classification FAO	sable très fin
ID du profil	version de la classification	sable total
nombre des profils de référence	classification nationale	limon
position dans le composant de terrain	Soil Taxonomy	argile
rochosité en surface	HORIZON	classe granulométrique
pierrosité en surface	ID du profil	Ca échangeable
types d'érosion/dépôt	numéro d'horizon	Mg échangeable
degré d'érosion	horizon diagnostique	Na échangeable
sensibilité au recouvrement	caractère diagnostique	K échangeable
profondeur d'enracinement	désignations des horizons	Al échangeable
<u>relation avec d'autres composants de sols</u>	profondeur inférieure	acidité d'échange
PROFIL	netteté de la transition	CEC du sol
ID du profil	couleur à l'état humide	équivalent carbonate total
ID de la base de données du profil	couleur à l'état sec	gypse
latitude	grade de la structure	carbone organique total
longitude	dimension des éléments structuraux	azote total
altitude	type de structure	Fe dithionite
date d'échantillonnage	abondance de fragments grossiers	Al dithionite

Figure 3 - Unités de terrain et base de données relationnelle des composants de terrain et de sols non cartographiables.

Figure 3 - Map units and database with non-mappable terrain and soil components.

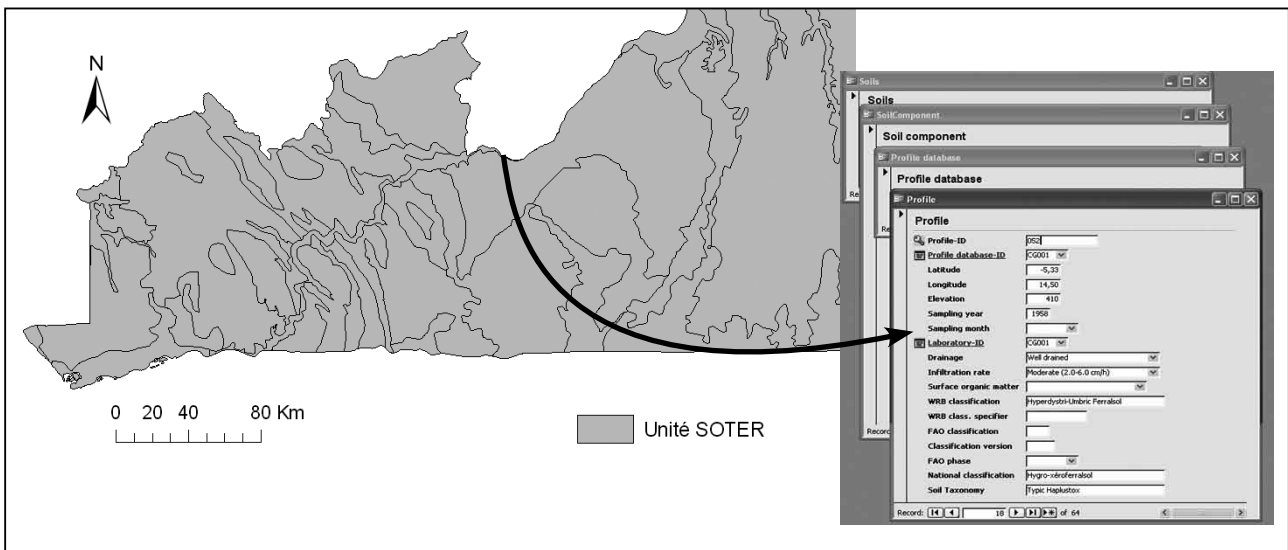
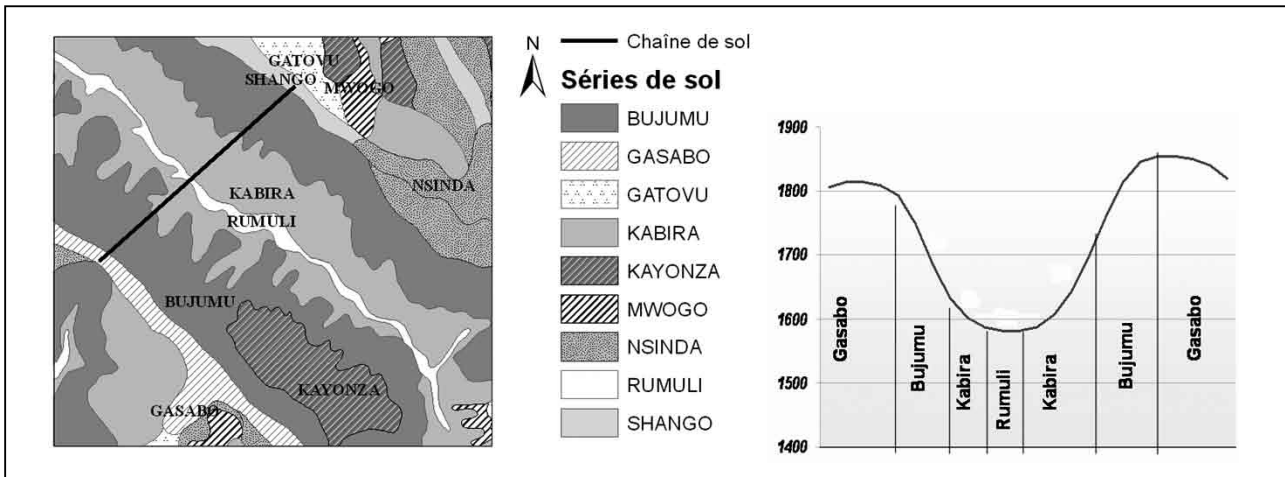


Figure 4 - Exemple d'une relation « sol-paysage » établie à partir d'une séquence des sols.

Figure 4 - Example of a soil-terrain relationship derived from a catena.



travail demande donc une analyse minutieuse et une connaissance approfondie du terrain et des sols.

Le problème de classification se manifeste également lors de l'introduction des profils dans la base de données SOTERCAF. Les données pédologiques sont en effet de nature extrêmement variée (Beaudou et Le Martret, 2004). La plupart des descriptions des profils de la RD Congo datent d'avant 1972, et la classification des sols tropicaux (INEAC : Sys, 1961) était à ce moment incomplète et imparfaite (Smith *et al.*, 1975). Cette classification des sols a été révisée plus tard par Smith *et al.* (1975) et retranscrite suivant la 'Soil Taxonomy' (Soil Survey Staff, 1975), ce qui a fortement facilité l'entrée des profils dans la base de données. Les profils de la RD Congo et du Burundi ont été définis suivant la Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sol (IUSS/ISRIC/FAO, 2006), la classification nationale (INEAC : Sys, 1961) et la classification de la 'Soil Taxonomy' (Soil Survey Staff, 1975). Les profils du Rwanda sont, en plus de ces 3 systèmes de classification, également décrits selon la classification de la FAO de 1990 (FAO/UNESCO/ISRIC, 1990).

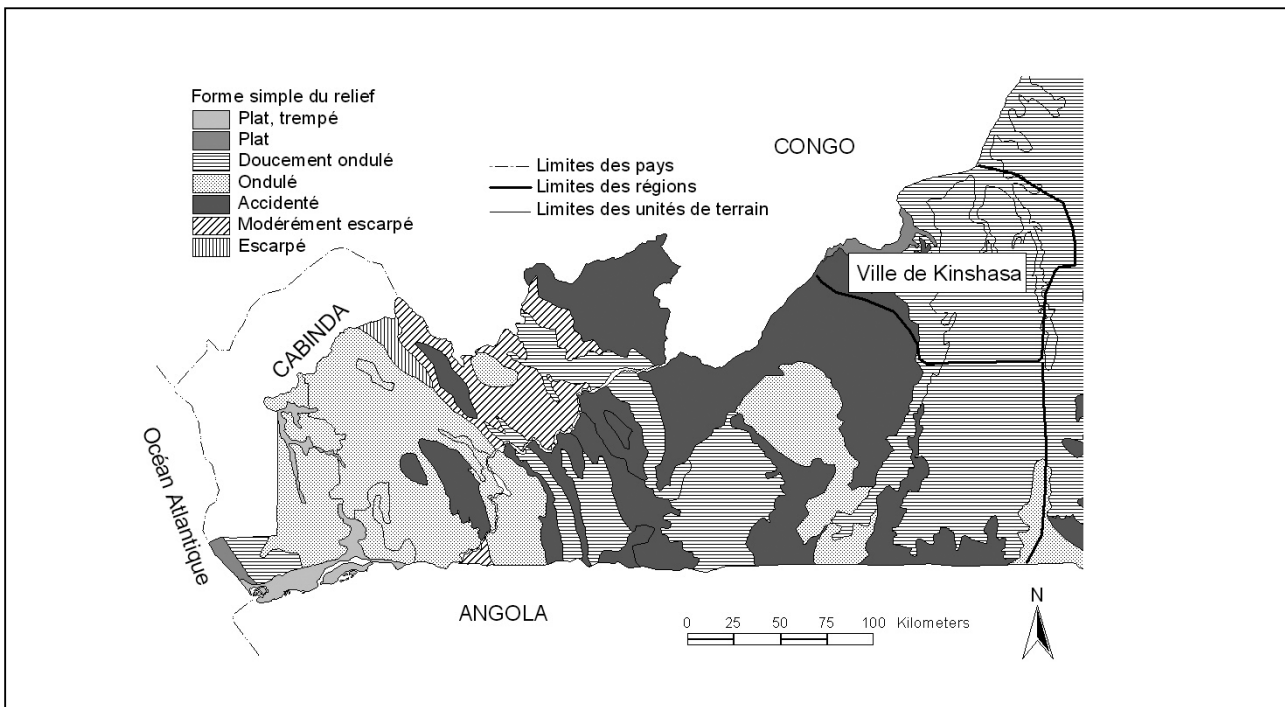
Lien entre les profils et les composants de sols

Chaque profil inséré dans la base de données est lié à un composant de sols. Ce lien a été établi à partir de l'hypothèse qu'une variation pédologique est associée à une modification de la forme morphologique et de la roche mère. A partir des variables topographiques insérées dans la description des profils, une relation sol-paysage a été établie sur la base des relations décrites dans les notices explicatives. Cette relation peut être visualisée à l'aide de séquences de sols créées à partir du MNT SRTM et des cartes pédologiques. La *figure 4* illustre un exemple de relation sol-paysage au nord-est de la province de Kigali. Sur la carte pédologique

nous distinguons une série de sols 'Bujumu' (sols développés dans un matériau dérivé de formations schisto-quartzitiques, limono-argilo-sableux, bien drainés et présentant une altération minimale), une série de sols 'Kabira' (sols développés dans un matériau dérivé des formations schisteuses, argileux, bien drainés et présentant une altération avancée et profonde ainsi qu'un horizon argillique) et une série de sols 'Rumuli' (sols développés dans des matériaux alluvionnaires, limono-argileux, pauvrement drainés et à horizon d'altération).

Les composants de sol couvrant les sommets et les versants fortement érodés sont donc associés à des profils avec des caractéristiques similaires à la série 'Bujumu'. Les bas de pentes sont au contraire caractérisés par des profils de sols de la série 'Kabira'. Enfin, dans les vallées, les composants de sol sont associés à des profils dont la description correspond à la description de la série 'Rumuli'. En établissant une clé de corrélation entre les sols, la lithologie et le relief, il est donc possible d'attribuer un profil représentatif à un composant de sol. Cette forme d'extrapolation permet de contourner le problème lié au faible nombre de profils saisis dans la base, en particulier pour la RD Congo.

D'autres paramètres environnementaux (non inclus dans la base de données SOTERCAF) ont également été utilisés pour la correction et la vérification de la délimitation des unités. Il existe en effet une étroite relation entre les caractéristiques des sols, les complexes paysagiques et les grandes formations végétales naturelles. Les cartes géographiques générales de la RD Congo au 1/2 000 000 (UCL-Geomatics, 2006) ont été consultées. Ces cartes ont été conçues récemment (2006), et les données sont donc plus récentes que celles des notices descriptives datant de 1970 (Vancutsem *et al.*, 2004). Enfin, la version finale de SOTERCAF a ensuite été expertisée par des pédologues de terrain ayant une grande expérience de l'Afrique Centrale.

Figure 5 - Carte des formes simples du relief du Bas Congo au 1/2 000 000.**Figure 5** - General landforms map of the lower Congo at scale 1/2 000 000.

RÉSULTATS

SOTERCAF est une base de données relationnelle associée à une carte numérisée des unités de terrain de la RD Congo à une échelle de 1/2 000 000 et deux cartes, l'une du Burundi, l'autre du Rwanda, à une échelle de 1/1 000 000.

La RD Congo

La RD Congo est découpée en 132 unités de terrain, chacune d'elle est subdivisée en 2 à 4 composants de terrain non cartographiés contenant 2 à 3 composants de sols non cartographiés. La base de données de la RD Congo contient également les propriétés descriptives de 64 profils et les propriétés chimiques et physiques de 391 horizons. Le nombre de profils renseignés dans la base de la RD Congo étant faible, nous n'avons pas pu attribuer un profil représentatif à tous les composants de sols. Sur les 287 composants de sols décrits dans la base de données, 155 composants n'ont pas pu être associés à un profil. La *figure 5* montre les unités de terrains du Bas-Congo classées suivant les formes simples du relief.

Le Burundi

Le Burundi est découpé en 56 unités de terrain, chacune d'elle est subdivisée en 1 à 4 composants de terrain non cartographiés, et chacun des composants de terrain, en 2 à 3 composants de sols non cartographiés. La *figure 6* présente la quasi-totalité des unités de terrain du Burundi associées aux grandes unités lithologiques.

Le Rwanda

Le Rwanda est subdivisé en 42 unités de terrain, représentées dans la *figure 7*, dans lesquelles 1 à 3 composants de terrain non cartographiés ont été déterminés, chacun des composants étant encore subdivisé en 1 à 3 composants de sols non cartographiés. Pour le Burundi et le Rwanda, chaque composant de sols est associé à un profil. Au total les bases de données du Burundi et du Rwanda contiennent respectivement, 20 et 51 profils et, 90 et 253 descriptions d'horizons.

Au total, la base de données SOTERCAF, qui résulte de ce projet, répond aux caractéristiques définies lors de la conception du projet SOTER (van Engelen et Wen, 1995) :

- SOTERCAF permet de stocker et récupérer des données harmonisées sur les sols et le terrain qui peuvent être utilisées dans une large gamme d'applications à différentes échelles ;
- SOTERCAF offre la possibilité d'extraire des données à une échelle de 1/1 000 000 pour le Rwanda et le Burundi et de 1/2 000 000 pour la RD Congo à la fois sous forme de cartes et de tableaux ;
- SOTERCAF est compatible avec des bases de données mondiales concernant d'autres ressources environnementales ;
- La mise à jour est aisée, les données manquantes ou incorrectes peuvent être facilement corrigées et/ou précisées ;
- SOTERCAF (FAO/ISRIC/UGent, 2007) est accessible à une

Figure 6 - Carte des grandes unités lithologiques du Burundi au 1/1 000 000.

Figure 6 - Lithological map of Burundi at scale 1/1 000 000.

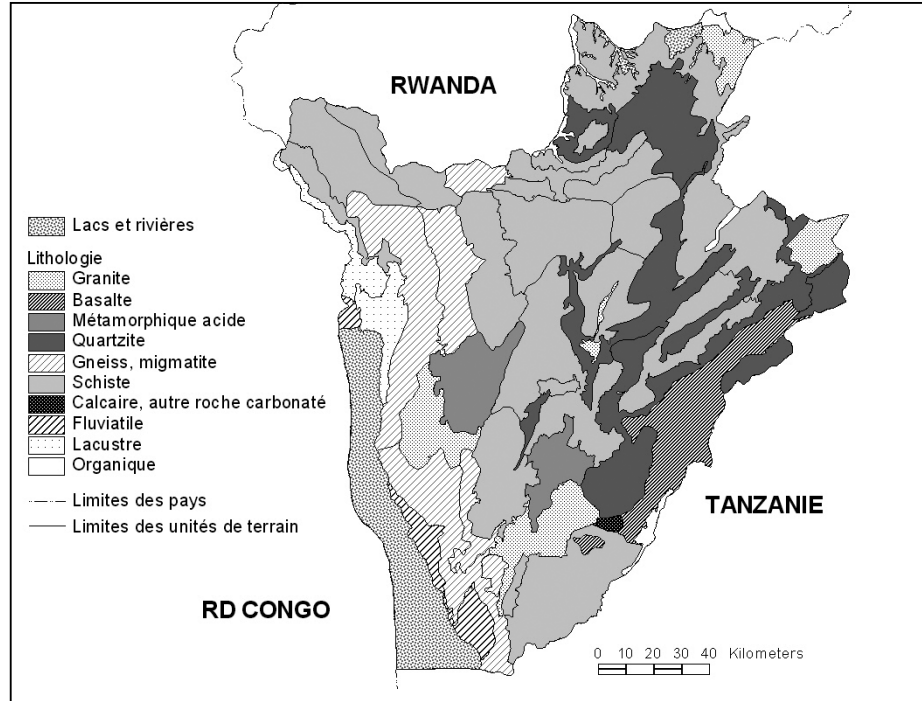
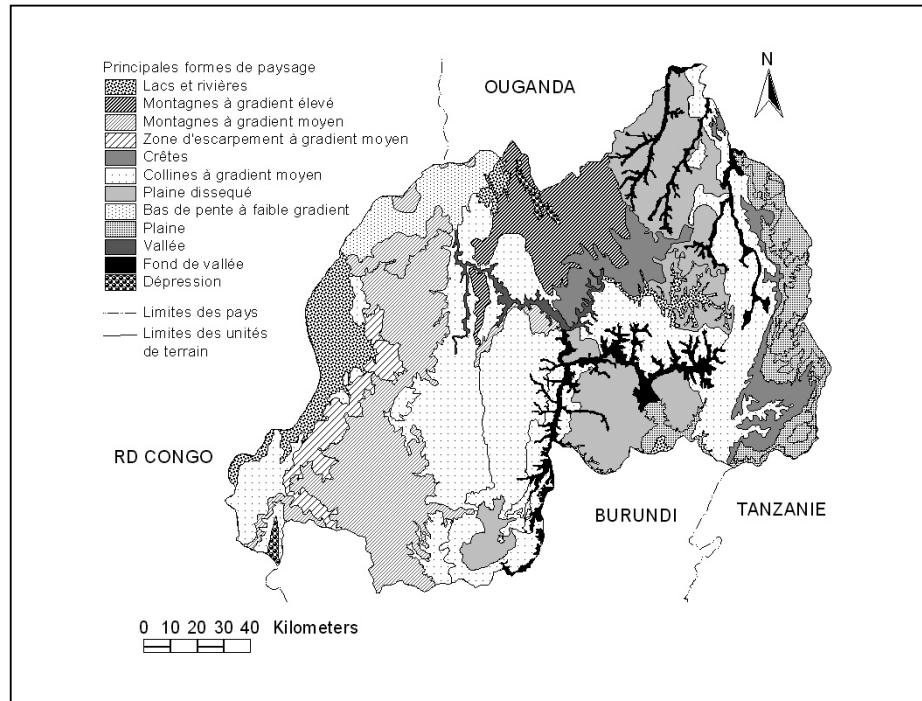


Figure 7 - Carte des principales formes de paysage du Rwanda au 1/1 000 000.

Figure 7 - Map of the major landforms of Rwanda at scale 1/1 000 000.



large gamme de spécialistes internationaux, nationaux et régionaux en environnement (<http://www.isric.org/NR/exeres/BC5BB444-DB94-4FE3-B102-2872B0B1A9F1.htm>) et peut être considérée comme un outil de base pour la gestion et la conservation des ressources environnementales.

CONCLUSION

De nombreuses études cartographiques et pédologiques ont déjà été réalisées en Afrique Centrale mais recouvrent rarement la totalité des pays. Les cartes existantes, qui ont servi comme sources de données pour la réalisation du projet SOTERCAF, sont soit très détaillées mais ne couvrent alors qu'un territoire limité (Laboratoire des Sciences du Sol - UGent, 2000 et 2001), soit trop générales et trop approximatives (INEAC, 1962). Une carte complète à une échelle internationale associée à une base de données relationnelle avec une grande quantité de données pédologiques géoréférencées, est un atout considérable pour améliorer la cartographie et le suivi des changements dans les ressources en sols et en terrain au niveau mondial (van Engelen et Wen, 1995 ; Beaudou et Le Martret, 2004 ; Van Cutsem *et al.*, 2004 ; Selvaldjou *et al.*, 2005). Notons également qu'une base de données numérique telle que celle de SOTER, permet une meilleure exploitation des données pédologiques et facilite l'échange d'informations. Les données peuvent également être actualisées, modifiées et réorientées selon les besoins de l'utilisateur.

Tout en rassemblant une multitude de données pédologiques non-digitalisées ultérieurement, la base de données SOTER de la RD Congo à l'échelle 1/2 000 000 montre aussi un déséquilibre entre la partie centrale du territoire étudié avant les années 1960 - caractérisé par une manque de profils pédologiques - et les zones décrites plus récemment. Fondées sur des cartes des sols semi-détaillées, les bases de données SOTER du Burundi et du Rwanda, sont caractérisées par plus de profils pédologiques et offrent une plus grande fiabilité (van Engelen *et al.*, 2006).

En RD Congo, au Rwanda et au Burundi, la population est essentiellement rurale et vit principalement des produits de l'agriculture. La conservation des sols et l'aménagement du territoire sont dès lors d'une importance cruciale dans ces pays (Sottiaux *et al.*, 1988 ; Van Cutsem *et al.*, 2004 ; Selvaldjou *et al.*, 2005). De nombreuses études y ont déjà été réalisées afin de promouvoir le développement et l'intensification agricoles. La mise à jour et la mise en commun de données pédologiques en une base de données telle que la base de données SOTER permettront de mieux gérer l'ensemble de ces projets, d'analyser et de comprendre les enjeux de la pression qu'exerce la population sur l'environnement à l'échelle nationale. La base de données SOTERCAF est un support de base optimal pour orienter des études plus approfondies.

De ce travail nous retiendrons un point fondamental de la cartographie, notamment la difficulté d'extraire de l'information à partir d'une superposition de cartes, et d'harmoniser les données

sources. Il faut, d'une part, tenir compte des différentes échelles et de la précision de l'information, et, d'autre part, gérer les erreurs liées à la digitalisation.

La généralisation des données est également un travail délicat pour lequel il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance du terrain. L'automatisation cartographique sans une correction manuelle est donc exclue et la compréhension du système d'interrelation entre les différentes variables environnementales (sols, terrains, végétation, eau,) est indispensable pour la réalisation d'une telle base de données.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement la FAO pour le support financier du projet. Nos remerciements s'adressent également aux géologues du Musée Royal de l'Afrique Centrale et au Professeur Emerite C. Sys, qui a une grande connaissance du terrain de l'Afrique Centrale, pour leur contribution au développement de la banque de données SOTERCAF, et aux lecteurs dont les remarques constructives nous ont aidé à améliorer ce manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- Beaudou, A., Le Martret, H., 2004 - MIRURAM/VALSOL : Un système d'information et une base de données pour représenter les sols tropicaux et leurs environnements. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 11, 3, 2004, pp. 271-284
- Dobos, E., Daroussin, J., Montanarella, L., 2005. An SRTM-based procedure to delineate SOTER Terrain Units on 1 : 1 and 1 : 5 million scales. EUR 21571 EN. Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, Ispra.
- FAO, Cooperazione-Italiana and IGAD, 1998a - The Soil and Terrain Database for northeastern Africa. Crop Production System Zones of the IGAD subregion. Land and Water Digital Media Series 2, FAO, Rome
- FAO and IIASA, 1999 - Soil and Physiographic Database for North and Central Eurasia at 1 : 5 Million scale. Land and Water Digital Media Series 7, FAO, Rome
- FAO and ISRIC, 2000 - Soil and Terrain Database, Land Degradation Status and Soil Vulnerability Assessment for Central and Eastern Europe, Version 1.0, 1 : 2.5 million scale. Land and Water Digital Media Series 10, FAO, Rome
- FAO and ISRIC, 2003 - Soil and Terrain Database for Southern Africa (1 : 2 million scale). Land and Water Digital Media Series 25, FAO, Rome
- FAO, ISRIC and UGent, 2007 - Soil and terrain database for Central Africa. Land and Water Digital Media Series, 33. FAO, Rome.
- FAO, ISRIC, UNEP and CIP, 1998b - Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean - SOTERLAC (version 1.0). Land and Water Digital Media Series 5, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, the International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), the United Nations Environment Programme (UNEP) and the International Potato Centre (CIP), Rome
- FAO, UNESCO and ISRIC, 1990 - Soil map of the world. Revised Legend. Reprinted with corrections. World Soil Resources Report 60. FAO, Rome.
- INEAC, 1962 - Carte des Sols et de la Végétation du Congo, Rwanda et Burundi. Notices explicatives des 26 feuilles. INEAC, Bruxelles.
- ISSS, 1986a - Project proposal 'World soils & terrain digital database at a scale 1 : 1 M (SOTER)'. Ed. M.F. Baumgardner - ISSS, Wageningen, 23 p.

- ISSS, 1986b - Proceedings of an international workshop on the structure of a digital international soil resources map annex database (20-24 January 1986, ISRIC, Wageningen). Ed. par M.F. Baumgardner et L.R. Oldeman. SOTER Report 1, ISSS, Wageningen. 138 p.
- IUSS/ISRIC/FAO, 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Reports, 103. FAO, Rome, 128 p.
- Laboratoire des Sciences du Sol - UGent, 2000 - Cartes des sols du Rwanda aux 1/50 000, 43 feuilles. Laboratoire des Sciences du Sol - UGent, Gand.
- Laboratoire des Sciences du Sol - UGent, 2001 - Cartes du relief du Rwanda aux 1/50 000, 43 feuilles. Laboratoire des Sciences du Sol - UGent, Gand.
- Laboratoire des Sciences du Sol - UGent, 2006 - Final Report, Compilation of a Soil and Terrain Database of the Great Lakes Area (DR Congo, Burundi and Rwanda). Non publié, 24 p.
- Lambeaux, J.C., 1979 - Lithologie, dans l'Atlas du Burundi. Association pour l'Atlas du Burundi, Gradignan.
- Lavreau, J., Waleffe, A., Petricec, V., 1981 - Carte Lithologique du Rwanda aux 1/250 000. Etablie par le Département de géologie et de minéralogie du Musée royal de l'Afrique Centrale avec la collaboration du service géologique du Rwanda, Institut Géographique National de Belgique, Bruxelles.
- Lepersonne, J., 1974 - Carte géologique du Zaïre. Echelle 1/2 000 000. Musée royal de l'Afrique Centrale et Institut Géographique Militaire, Bruxelles
- Nachtergaele, F.O., 2002 - Global soil resources information. Dans : Cihlar, J., Heimann, M., and Olson, R. (ed.), Terrestrial Carbon Observation - The Frascati report on *In situ* Data for Terrestrial Carbon Observation. Document GTOS-31, FAO, Rome, 120 p.
- Selvaradjou, S-K., Montanarella L., Spaargaren O. and Dent D., 2005 - European Digital Archive of Soil Maps (EuDASM) - Soil Maps of Africa. EUR 21657 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 386 p.
- Smith, G.D., Sys, C., Van Wambeke, A., 1975 - Application of Soil Taxonomy to the soils of Zaïre (Central Africa). *Pedologie* 25, pp. 5-24.
- Soil Survey Staff, 1975 - Soil taxonomy : A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. U.S. Dept. of Agric. Handb. 436, U.S. Govt. Print. Off. Washington, 754 p.
- Sottiaux, G., Opdecamp, L., Bigura, C., Frankart, R., 1988 - Carte des sols du Burundi. Echelle 1/250 000. Notice explicative. AGCD, Publication du Service Agricole, n° 9, Bruxelles, 142 p. + annexes 83 p.
- Sys, C., 1960 - Carte des sols du Congo Belge et de Ruanda-Burundi. Echelle 1/5 000 000. Notices explicatives. INEAC, Bruxelles, 84 p.
- Sys, C., 1961 - La cartographie des sols au Congo, ces principes et ces méthodes. INEAC, Série Technique n°66, Bruxelles, 149 p.
- Sys, C., 1972 - Caractérisation morphologique et physico-chimique de profils types de l'Afrique Centrale. INEAC, Bruxelles, 497 p.
- UCL-Geomatics, 2006 - Carte générale de la République Démocratique du Congo. Echelle 1/2 000 000. Université Catholique de Louvain, Louvain La Neuve
- USGS, 2003 - Shuttle Radar Topographic Mission Digital Elevation Model (<http://srtm.usgs.gov/>)
- Van Cutsem C., Pekel J.F., Evrard, C., Malaisse, F., Mayaux, P., Malingreau J-P., Defourny, P., 2004 - A new landcover map of the Democratic Republic of Congo, Proceedings of the 2nd international SPOT VGT users conference, Mars 24-26 2004. Anvers, 7 p.
- van Engelen, V.W.P., Wen, T.T., 1995 - Base de Données Numériques sur les Sols et le Terrain au Niveau Mondial et National (SOTER). Manuel de Procédures. Centre International de Référence et de l'Information Pédologique (ISRIC), Wageningen, 129 p.
- van Engelen, V.W.P., Verdoodt, A., Dijkshoorn, J.A., Van Ranst, E., 200 - Soil and Terrain Database of Central Africa (DR Congo, Burundi, and Rwanda). Report 2006/07, (available through : <http://www.isric.org>), ISRIC - World Soil Information, Wageningen.