

Année de l'AAP : 2007

Projet N° 07054 Achevé

Titre du projet : Analyse numérique de la stabilité d'une pente forestière intégrant la dynamique spatiotemporelle du peuplement

Unité responsable du projet : AMAP (botanique et bioinformatique de l'Architecture des Plantes) (CIRAD, CNRS, INRA, IRD, UMII)

Porteur de projet : Thierry Fourcaud (thierry.fourcaud(a)cirad.fr)

Pays associé au projet : Togo

Unités de recherche du réseau scientifique d'Agropolis Fondation associés : ECO&SOLS, SYSTEM

Sous-axes thématiques : DSTI-1: Innovations agro-environnementales, agro-écosystèmes, gestion des ressources

Objectifs :

Dans de nombreuses régions du monde, l'augmentation des précipitations liée aux changements climatiques accroît considérablement les risques de glissement de terrain. Dans les pays du sud, ces risques sont aggravés par les fortes pressions exercées sur les sols par l'agriculture locale et les politiques d'aménagement. L'émergence de questionnements sur la meilleure façon de gérer durablement les sites exposés à de tels risques fait l'objet d'un thème de recherche appelé « éco-ingénierie de la stabilité des pentes ».

Le Togo est confronté à de graves problèmes de glissements de terrains dans la partie méridionale de la chaîne montagneuse Atakora. Depuis les années 70, de grandes surfaces de forêts ont été défrichées au profit de la culture du café, cacao, coton et de cultures vivrières. L'exploitation du bois d'oeuvre et du bois de chauffe ainsi que le prélèvement intensif de plantes destinées à la pharmacopée traditionnelle ont conduit à la dégradation de la végétation, à la perte de fertilité des sols, à l'érosion, aux glissements de terrains et à l'envasement des cours d'eau par sédimentation des particules érodées. Le Togo se trouve donc aujourd'hui confronté à un défi de taille majeure : restaurer et réhabiliter les sols dans les zones d'altitude. Pour ce faire, de nouveaux programmes de reboisement, d'aménagements et de restauration des sols en pente ont été initiés, soutenus par les pouvoirs publics, des ONG et les Associations de Village. Ces programmes sont financés par l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux. Pour élaborer les plans directeurs des travaux, il est nécessaire de disposer de données sur l'intensité de la dégradation des sols et la capacité des différentes espèces locales à renforcer et à conserver les pentes. Ces données font actuellement défaut.

La mise en place d'une végétation adaptée constitue une alternative écologique aux structures traditionnelles utilisées par les géotechniciens (filets, géotextiles, etc.). En effet les racines augmentent la cohésion du sol de part leur résistance à la traction et les propriétés d'adhésion et de friction de l'interface racine-sol. La végétation modifie par ailleurs le régime hydraulique de la pente via différents processus d'interaction entre le sol et les plantes. La contribution des racines à la stabilité des pentes est de plus en plus étudiée. Cependant les modèles anciens considèrent des végétations spatialement homogènes dans des plans parallèles à la surface du terrain. Ces modèles ne sont pas adaptés à une situation de forêt où la distribution des racines est hétérogène au niveau individuel et de la pente.

Nous avons développé au laboratoire un modèle « Eléments Finis » de stabilité des pentes. Cet outil d'analyse prend en compte la structure 3D d'un peuplement forestier, et permet de quantifier la contribution des systèmes racinaires d'arbres forestiers à la stabilité des sols en pentes, en tenant compte de la structure forestière (densité, distribution spatiale des espèces et de leur système racinaire). L'objectif du présent projet est d'intégrer les aspects spatio-temporels de la

croissance des arbres et de leurs racines (en intégrant les processus hydrologiques) afin d'évaluer l'impact de gestions forestières sur le renforcement des pentes à long terme.

Actions menées et résultats obtenus :

Ce projet a permis de mettre en place une batterie d'outils numériques et de modèles 2D et 3D (basés sur la méthode des éléments finis, MEF) permettant d'analyser de façon générique l'influence de la végétation sur la stabilité des pentes. Ces outils et modèles prennent en compte les effets mécaniques (renforcement du sol par les racines) et hydrologiques (influence des racines sur la conductivité hydraulique du sol et sur l'état hydrique de la pente). Ils ont été utilisés dans le cadre d'études menées au Togo (résultats non publiés) et sur le plateau du Loess en Chine (résultats en cours de publication).

Les actions réalisées concernent les points suivants :

Action 1- Développement d'une librairie d'outils (sous forme de scripts en langage Python) sous le code de calcul MEF Abaqus permettant de modéliser une pente forestière et de déterminer son degré de stabilité. Cette librairie est constituée principalement : 1- d'un constructeur de pente générique qui permet de paramétrer une pente rectilinéaire (profil, angle, hauteur, ...) et de lui associer des propriétés physico-mécaniques ; 2- d'un générateur de peuplement qui permet de paramétrer les compartiments racinaires en fonction de l'espèce (représentation volumique demi-sphère, cône ou cylindre ; dimensions ; cohésions additionnelles associées) et de distribuer les arbres sur la pente selon des motifs réguliers (rangées d'arbres) ou aléatoires ; 3- d'un gestionnaire d'analyses qui permet de lancer des simulations successives pour la détermination du facteur de sécurité (méthode de réduction de la cohésion) et de réaliser des études de sensibilité aux différents paramètres géométriques et mécaniques ; 4- d'un extracteur de données permettant de déterminer le facteur de sécurité de la pente, la profondeur de la surface de rupture et le volume de sol mobilisé à partir des résultats de simulations ;

Action 2- Développement d'un module permettant de lire des données racinaires (données de terrain, extraction de résultats de simulation d'architectures racinaires sous le simulateur AMAPsim, ...) à partir d'un domaine discrétisé en espaces voxels. Cet outil permet de définir des cartographies continues de cohésions additionnelles (via les densités racinaires) qui se superposeront aux propriétés initiales du sol nu aux échelles de l'individu ou de la pente. Ce travail est encore en cours et les futurs résultats feront l'objet d'une publication.

Action 3- Analyse numérique de l'impact de scénarios variés de reforestation des pentes en tenant compte de la morphologie des systèmes racinaires, des dimensions du système racinaire, de la structure et de la densité du peuplement. Le modèle et les résultats de l'analyse numérique ont fait l'objet d'un article accepté dans *Ecological Engineering*. Les résultats ont permis de quantifier les rôles relatifs des motifs racinaires et de plantation sur le renforcement des sols en pente.

Action 4- Prise en compte des facteurs hydrologiques dans le modèle numérique. Il s'agit de coupler les équations d'écoulement et de la mécanique du sol pour l'analyse de la stabilité de la pente. L'objectif final est de prendre en compte l'effet de la végétation sur le régime hydrique de la pente et son impact relatif sur son facteur de sécurité. Ce travail est en cours de finalisation dans le cadre de la thèse de Mlle Jinnan Ji (co-tutelle Université Montpellier 2 et Beijing Forestry University), 2008-2011).

Action 5- Applications à des cas d'étude au Togo et en Chine. Des études ont été réalisées sur des sites togolais et sur le plateau du Loess en Chine (thèse de Jinnan Ji). Elles avaient pour objectif de quantifier et spatialiser les propriétés d'enracinement (biomasse, nombre de racines, « root area ratio » RAR) dans des contextes de forêts de monoculture. Ces données ont été complétées par des essais de résistance à la tension menés en laboratoires et utilisés pour calculer la cohésion additionnelle. Ces informations ont ensuite été intégrées dans le simulateur de stabilité des pentes afin de quantifier leur contribution à l'augmentation du facteur de sécurité. La campagne de mesure effectuée en Chine a également permis de définir des corrélations entre la densité racinaire et la conductivité hydraulique du sol. Ces résultats permettront de calibrer le modèle d'hydrologie développé dans le cadre de la thèse de Jinnan Ji (cf action 5).

Articles :

Adzo Dzifa Kokutse, Alexia Stokes, Nomessi Kuma Kokutse, Kouami Kokou (2010) Which factors most influence heartwood distribution and radial growth in plantation teak? *Ann. For. Sci.* 67 (2010) 407

Ji, J.N., Kokutse, N., Zhang, Z.Q., Fourcaud, T., 2010. Towards a numerical simulation model of short-term impact of forested hillslope stability under rainfall condition. In: Chen, S.-C. (Ed.), INTERPRAEVENT 2010. International Research Society INTERPRAEVENT, pp. 446-453.

Perspectives :

Action 6- Mise en place de nouveaux projets (Master, thèse, Projet de coopération scientifique interuniversitaire AUF) et renforcements de partenariats: Appui au présent projet RTRA et cadre pour la poursuite des travaux futurs avec l'Université de Lomé (Faculté des sciences, Faculté agronomie, Ecole nationale supérieure d'ingénieurs), la Beijing Forestry University, l'Université d'Abomey Calavi (Bénin).

Financement total par Agropolis Fondation : 120 000 € (salaire du post-doctorant, frais de déplacement et mission)

Catégorie(s) de soutien : Allocation post-doctorale

Durée du projet : 1^{er} mars 2008 – 1^{er} juillet 2010

Mots clés : simulation – modèle – racines – agriculture – changement climatique – forêt – Togo