

GuyaSim : un outil d'aide à la décision pour l'aménagement d'un territoire forestier, la Guyane

Vivien Rossi^{1, 2, 3}
Thomas DOLLEY^{3, 4}
Guillaume CORNU¹
Stéphane GUITET^{5, 6}
Bruno HÉRAULT³

¹ Cirad
UPR BSEF
Campus international de Baillarguet
34398 Montpellier Cedex 5
France

² Université de Yaoundé 1
UMI 209 UMMISCO
Yaoundé
Cameroun

³ Cirad
UMR EcoFoG
97379 Kourou Cedex
Guyane française
France

⁴ Cirad
DSI
TA 182/04
34398 Montpellier Cedex 5
France

⁵ IRD
UMR Amap
TA A51/PS2
34398 Montpellier Cedex 5
France

⁶ ONF R&D
Réserve de Montabo
BP 7002
97307 Cayenne Cedex
Guyane française
France



Photo 1.
Fragmentation d'un massif forestier par le développement des espaces agricoles
sur la commune de Roura proche de Cayenne.
Photo S. Guitet.

RÉSUMÉ

GUYASIM : UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'AMÉNAGEMENT D'UN TERRITOIRE FORESTIER, LA GUYANE

Les aménagements futurs nécessaires au développement rapide de la Guyane vont entraîner la conversion de terres forestières, participant ainsi au changement global. Les décideurs guyanais devront conjuguer ces aménagements avec la préservation des services écosystémiques forestiers. Le projet GuyaSim avait comme objectif l'approfondissement des connaissances sur ces services (stock de carbone, biodiversité et qualité du sol) et le transfert d'un logiciel aux décideurs pour faciliter l'intégration de ces connaissances dans les politiques d'aménagement du territoire. L'article présente les caractéristiques et les fonctionnalités de ce logiciel GuyaSim. Il s'agit d'un logiciel libre de type Sig, destiné *a priori* aux services d'aménagement des collectivités et du domaine forestier de Guyane. Le logiciel offre deux grands types de fonctionnalité : la mise à disposition d'informations et l'aide à l'aménagement. Les informations mises à disposition sont les scénarios de développement socio-économique, les scénarios climatiques et les valeurs des services écosystémiques. L'aide à l'aménagement consiste en des outils de construction des scénarios d'aménagement du territoire (changement d'usage des terres) et d'aménagement forestier (exploitation forestière), fournissant des informations sur l'impact environnemental. Les fonctionnalités du logiciel sont limitées par les connaissances sur les écosystèmes guyanais. Les avancées des projets de recherche en cours permettront de mettre à jour le logiciel à moyen terme.

Mots-clés : logiciel Sig, scénarios, services écosystémiques, simulateur, biodiversité, stock de carbone, biomasse, exploitation forestière, déforestation, changements d'usage des terres, forêt tropicale, Guyane française.

ABSTRACT

GUYASIM, A DECISION-SUPPORT TOOL FOR FOREST PLANNING: APPLICATION IN FRENCH GUIANA

Planning policies for rapid development in French Guiana will require the conversion of forested areas, thus contributing to global warming. Guiana's policy-makers will need to integrate the preservation of ecosystem services into their planning decisions. The GuyaSim project was conducted to produce more in-depth knowledge on these services (carbon sequestration, biodiversity and soil quality) and to transfer a software application, GuyaSim, to policy-makers to facilitate the use of this knowledge in the development of planning policies. This article presents the characteristics of the application. GuyaSim is a freeware package of the GIS type designed initially for local authority planners and forestry departments in French Guiana. The application has two main functions: information delivery and support for planning decisions. The information provided includes socio-economic development scenarios, climate scenarios and valuations of ecosystem services. The decision-support component consists of tools for building planning scenarios (land use changes) and forestry scenarios (logging), with information on their environmental impacts. The functionalities of the software are currently limited by the state of knowledge on Guiana's ecosystems. Advances made through current research projects are expected to upgrade the application in the medium term.

Keywords: GIS software, scenarios, ecosystem services, simulator, biodiversity, carbon stock, biomass, logging, deforestation, land use changes, tropical forest, French Guiana.

RESUMEN

GUYASIM: UNA HERRAMIENTA DE AYUDA A LA DECISIÓN PARA LA ORDENACIÓN DE UN TERRITORIO FORESTAL: LA GUAYANA

Las futuras ordenaciones territoriales que exige el rápido desarrollo de la Guayana Francesa implican la conversión de tierras forestales, participando así en el cambio global. Los responsables locales de la toma de decisiones tendrán que conciliar dichas ordenaciones con la conservación de los servicios ecosistémicos forestales. El objetivo del proyecto GuyaSim consistía en ahondar en el conocimiento de estos servicios (reserva de carbono, biodiversidad y calidad del suelo) y proporcionar un software a los responsables locales para facilitar la integración de estos conocimientos en las políticas de ordenación del territorio. El artículo presenta las características y funciones del software GuyaSim. Se trata de un software libre de tipo SIG destinado, en principio, a los servicios de ordenación de entidades territoriales y del dominio forestal de la Guayana. Este programa ofrece dos funciones principales: suministro de información y ayuda a la ordenación. La información que se facilita consiste en herramientas de elaboración de escenarios de ordenación del territorio (cambios en el uso de la tierra) y de manejo forestal (aprovechamiento forestal), proporcionando información sobre el impacto ambiental. Las funcionalidades del software están limitadas por los actuales conocimientos de los ecosistemas guayaneses. Los adelantos que proporcionen los proyectos de investigación en curso permitirán actualizar el software a medio plazo.

Palabras clave: software SIG, escenarios, servicios ecosistémicos, simulador, biodiversidad, reserva de carbono, biomasa, aprovechamiento forestal, deforestación, cambios en el uso de la tierra, bosque tropical, Guayana Francesa.

Introduction

La Guyane, plus grand département français avec une superficie de 83 846 km², est une des régions de l'Union européenne ayant la plus importante croissance démographique (+ 2,9 % par an entre 2006 et 2011 ; Insee, 2014) et économique (PIB, + 3 % par an entre 2008 et 2013 ; Insee, 2015). Cette forte croissance impose aux décideurs guyanais de faire rapidement des choix d'aménagement de leur territoire. Or la forêt tropicale humide, réputée pour être une des plus diverses de la planète tant en ce qui concerne la faune que la flore, occupe actuellement plus de 90 % du territoire (ONF-FAO, 2010). Dès lors, la quasi-totalité des nouvelles implantations de zones urbaines, commerciales, industrielles ou agricoles se feront au détriment de la surface forestière actuelle. Ceci est d'autant plus vrai que les travaux du Centre technique interprofessionnel des oléagineux métropolitains (Cetiom), dans le cadre du Plan de développement durable de l'agriculture guyanaise (PDDAG), montrent notamment que les sols favorables au développement des cultures annuelles telles que le maïs, le soja ou le sorgho, se trouvent actuellement sous couvert forestier. En outre, afin de promouvoir une production d'électricité réduisant les émissions de CO₂, certaines zones forestières de la bande littorale seront bientôt aménagées dans la perspective d'alimenter durablement une filière bois énergie.

Les aménagements futurs nécessaires au développement de la Guyane vont de fait entraîner la conversion de terres forestières, participant ainsi au changement global. En effet, il est accepté que les principales composantes (interdépendantes) du changement global soient le changement de la composition atmosphérique, le réchauffement climatique et le changement d'usage des terres. Or, les forêts tropicales humides sont au cœur de la stratégie mondiale d'atténuation du réchauffement climatique car elles constituent un stock de carbone et pourraient aussi être un puits de carbone (Phillips *et al.*, 1998) qui tendrait à s'amenuiser (Brienen *et al.*, 2015). Mais elles peuvent aussi être une source d'émission de carbone sur le long terme lorsqu'elles éprouvent des événements climatiques inhabituels tels que de longues sécheresses (Phillips *et al.*, 2009). Dans ce contexte de changement global, les forêts constituent un outil de régulation des émissions de CO₂ (Martin, 2008). Cependant, elles sont particulièrement menacées par les changements d'utilisation des terres (Sala *et al.*, 2000 ; Pereira *et al.*, 2010).

Une façon de faire face à cette menace est d'attribuer une valeur aux services rendus par les écosystèmes. Le concept de « service écosystémique » considère cette valeur comme complémentaire à la valeur économique de la valorisation directe de l'écosystème, par exemple la production de bois pour une forêt. Il plaide pour une intégration de l'évaluation de ces services dans l'aménagement du territoire. Il est admis que les écosystèmes fournissent de très nombreux services pour l'humanité (eau potable, pollinisation, biodiversité...), gratuits tant qu'ils sont préservés. Les services écosystémiques, classés en trois catégories (production, régulation et culturels), commencent à être quantifiés (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) et évalués économiquement (Chevasus-au-Louis *et al.*, 2009). Par exemple, la valeur économique potentielle des forêts vues comme un stock de carbone peut

être supérieure à celle des forêts vues comme fournisseurs de biens et services (Ebeling et Yasné, 2008). Ceci est d'autant plus vrai en Guyane, où l'exploitation forestière est largement subventionnée et où la valorisation de produits forestiers non ligneux reste actuellement marginale.

Pour la gouvernance de leur territoire, les décideurs guyanais devront donc conjuguer deux objectifs *a priori* antagonistes, développer le territoire en aménageant la forêt et préserver les services écosystémiques qu'elle rend. Il est donc important de trouver un compromis entre ces deux objectifs. Ce compromis doit partir du constat que le massif forestier guyanais n'est pas homogène, et qu'une typologie peut en être faite. Ces différents types forestiers n'ont pas les mêmes caractéristiques (écologiques, géomorphologiques, climatiques, etc.) et donc pas les mêmes valeurs économiques, que ce soit en termes d'exploitation forestière, de bois énergie ou de stockage de carbone. De récentes études démontrent effectivement que les niveaux de services peuvent être très variables à l'échelle d'une région (Guitet *et al.*, 2015b). De plus, ces différents types forestiers ne devraient vraisemblablement pas réagir de la même façon aux changements climatiques. Les conséquences à long terme des conversions des différents types forestiers ne seront donc pas identiques. La prise en compte dans les décisions d'aménagement du territoire de cette diversité de valeurs, de potentiels et de réactivités des types forestiers permettrait de valoriser les richesses naturelles de la Guyane tout en préservant au mieux les services des écosystèmes forestiers.

Le projet GuyaSim (Rossi, 2014) avait pour objectifs scientifiques de rassembler et approfondir les connaissances sur le stock de carbone, la biodiversité et la qualité du sol. Il visait également à transférer ces informations aux décideurs sous la forme d'un simulateur d'aménagement pour explorer l'impact environnemental des scénarios de développement de la Guyane. Cela a été réalisé en mutualisant et en complétant les résultats des travaux de scientifiques obtenus depuis plusieurs années par différents organismes de recherche (Cirad, Inra, CNRS, IRD, ONF) et d'enseignement supérieur (Université des Antilles et de la Guyane, AgroParisTech) sur la forêt guyanaise (cf. Goulet-Fleury *et al.*, 2004 pour une synthèse). Ces informations ont été intégrées sous une forme interactive dans le logiciel GuyaSim, afin que les services d'aménagement de la région, de l'État ou des collectivités locales puissent se les approprier pour leurs études. Ce logiciel assure ainsi un transfert des résultats scientifiques vers les décideurs de la société civile en allant plus loin qu'une liste de recommandations. Par exemple, une commune désirent convertir une parcelle forestière en terres agricoles va choisir la parcelle à convertir en fonction de plusieurs critères tels que les facilités (accès, eau et électricité), la qualité du sol, le stock de carbone, la biodiversité. Le logiciel GuyaSim permet d'apporter des informations préalables sur ces trois derniers critères et de simuler différentes options afin d'éclairer les choix en amont avant le lancement d'études d'impact plus approfondies.

L'objectif de cet article est de présenter les caractéristiques et les fonctionnalités du logiciel GuyaSim. Les deux sections suivantes y sont consacrées. La dernière section comporte une discussion sur les limites et les perspectives d'amélioration du logiciel ainsi que sur les possibilités d'application à d'autres territoires.

Caractéristiques du logiciel GuyaSim

De nombreuses entités territoriales (communautés d'agglomérations, départements ou régions) utilisent des systèmes d'information géographique (Sig) comme outils d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire. Ces Sig s'appuient sur des logiciels spécialisés qui peuvent être payants (ex. : Aigle, ArcGIS, DynMAP, GéoSoft, GéoConcept, Mapinfo) ou libres (ex : JUMP, QGIS, THUBAN, Udig). Ils permettent aux aménagistes des entités territoriales de naviguer facilement au travers de couches d'informations géolocalisées de leur territoire, puis de croiser ces informations et produire des cartes. Souvent, les informations géolocalisées sont centralisées sur un serveur permettant un accès à distance par Internet. Le logiciel GuyaSim a été développé avec le langage de programmation Java en utilisant la technologie et l'architecture *Eclipse Rich Client Platform* (McAffer *et al.*, 2010). Il vient compléter les fonctionnalités d'un logiciel Sig existant, « *User Friendly Desktop Internet Gis* » (Udig), diffusé sous une licence *open source* (Ramsey, 2006). GuyaSim est conçu pour fonctionner en local sur un poste de travail utilisant Windows comme système d'exploitation. Les informations géolocalisées sont intégrées dans le logiciel installé sur le poste de travail, car plusieurs communes de la région Guyane sont isolées et ne disposent pas

d'un accès à Internet satisfaisant. Des copies du logiciel ont été distribuées lors du comité de restitution final du projet en mai 2014, à Cayenne.

Une formation a été organisée afin de présenter aux agents des services d'aménagement des établissements publics et ONG de la région les fonctionnalités de GuyaSim. Comme GuyaSim est basé sur Udig, les personnes habituées à manipuler des logiciels Sig se l'approprient rapidement¹. Les utilisateurs peuvent importer dans GuyaSim des parcelles à aménager sous le format de fichier *shape*. Les indicateurs de services écosystémiques sont stockés dans le logiciel sous le format de fichier *raster*. Les utilisateurs n'ont pas la possibilité de modifier les données sur les services écosystémiques. Les résultats des simulations effectuées dans le logiciel peuvent être exportés sous la forme d'image pour les graphiques ou sous la forme de fichier CSV (*Comma-Separated Values*) pour les données numériques générées par les simulations.

Le principe de l'évaluation des scénarios d'aménagement par logiciel consiste à réaliser des opérations sur l'intersection entre les *rasters* des services écosystémiques et les parcelles aménagées. Par exemple, pour évaluer le stock de carbone perdu lorsqu'une parcelle de forêt est convertie en zone urbaine, la somme des pixels du *raster* « stock de carbone » contenus dans la parcelle est réalisée.

¹ Une vidéo de démonstration est consultable sur Internet : <http://youtu.be/miLBNBZXPak>



Figure 1.

Illustration du phénomène de mitage de la forêt autour des routes dans la zone de Saint-Laurent-du-Maroni (source ONF, composition image Landsat 5-7). Les zones orange ont été converties de la forêt à l'agriculture entre 2005 et 2008 ; les zones vert clair correspondent à la forêt en 2008.

Fonctionnalités de GuyaSim

Le logiciel offre deux grands types de fonctionnalité : mise à disposition d'information et aide à l'aménagement. Ces fonctionnalités sont détaillées séparément dans les sous-sections suivantes.

Mise à disposition d'informations

Le logiciel regroupe un ensemble d'informations scientifiquement à jour concernant la Guyane : scénarios de développement socio-économique du territoire, scénarios climatiques, valeurs de services écosystémiques (biomasse, biodiversité et qualité de sol). L'utilisateur peut accéder facilement à ces informations par l'intermédiaire de cartes de la région et zoomer sur des zones du territoire qui l'intéressent plus particulièrement.

Scénarios de développement socio-économique

Les scénarios prospectifs d'occupation de l'espace ont été construits en croisant les aménagements planifiés et les aménagements spontanés (Sanlaville et Salles, 2012). Les éléments les plus influents sont les tendances observées pour l'accroissement démographique des communes. Afin de localiser les surfaces d'extension urbaine et agricole prévues et leurs échéances, nous avons regroupé les documents d'aménagement disponibles des communes de la région. Parallèlement, afin d'évaluer les dynamiques territoriales spontanées, nous avons analysé les évolutions d'occupation des sols sur les cartes réalisées par l'ONF concernant la frange littorale de la Guyane pour les années 2001, 2005, 2008 et 2011. La forte augmentation de la population génère, surtout

dans l'ouest, une dynamique spontanée de mitage des forêts le long des axes routiers (figure 1 ; Tsayem-Demaze, 2008). Pour prendre en compte ce phénomène de mitage de façon réaliste dans le logiciel, nous avons relié l'intensité du mitage autour de routes à la croissance de la population dans les agglomérations voisines. Le croisement de ces deux sources d'information a permis de construire trois cartes, correspondant à trois hypothèses de développement (haute, moyenne et basse) et représentant l'occupation des sols sur le littoral guyanais en 2022 et 2032. Il est possible de visualiser ces cartes dans le logiciel ainsi que les principales statistiques qui y sont associées (figure 2).

Scénarios climatiques

Les scénarios climatiques globaux RCP (*Representative Concentration Pathway* ; Moss *et al.*, 2008) se basent sur le forçage radiatif. Le forçage radiatif peut être défini comme « l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère ». Le scénario le plus probable est le RCP 4.5. Dans ce scénario, en 2100, le forçage radiatif atteint $4,5 \text{ W/m}^2$, ce qui correspond à une concentration équivalente en CO_2 autour de 650 ppm (contre 400 ppm actuellement). La stabilisation se fait après 2100, mais commence vers 2060. Nous avons collaboré avec les membres du projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment²) pour régionaliser le scénario global à la zone de la Guyane. Nous avons ainsi pu obtenir des prédictions pour la pluviométrie, la température et l'évaporation. Le logiciel permet de consulter des cartes de ces prédictions climatiques à l'horizon 2070 et certaines informations relatives à celles-ci (figure 4).

² <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr>

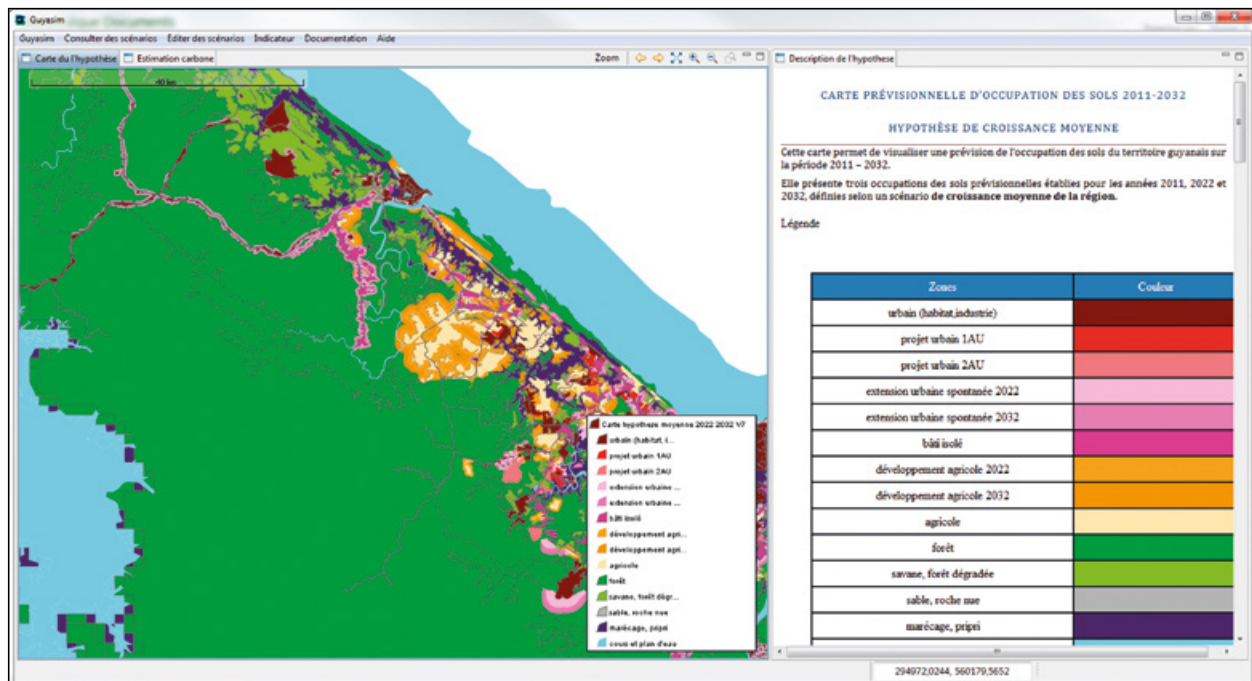


Figure 2.

Interface de visualisation des scénarios de développement socio-économique de la Guyane. Fenêtre de gauche : carte des prévisions d'extension des zones urbaines ou agricoles sur la forêt aux horizons 2022 et 2032. Il est possible de visualiser à l'échelle de la Guyane et de zoomer ; ici, un focus sur la commune de Kourou est représenté. Fenêtre de droite : légende détaillée et hypothèses sous-jacentes au scénario visualisé. Il est possible de visualiser les prévisions pour trois grandes hypothèses : croissance démographique faible, croissance démographique moyenne et croissance démographique forte.

Services des écosystèmes forestiers

Les niveaux de connaissances pour les trois services écosystémiques abordés dans le projet GuyaSim (stock de carbone, biodiversité et qualité du sol) n'étant pas les mêmes, ils n'interviennent pas de la même façon dans le logiciel.

Stock de carbone

La première carte d'estimation de la biomasse forestière aérienne de la Guyane a été produite par le projet GuyaSim (Molto, 2012 ; Rossi, 2014). Le passage de la biomasse sèche au stock de carbone s'effectue par la conversion $masse_{carbone} = 0,5 \times masse_{biomasse}$. L'estimation de la biomasse forestière aérienne à l'échelle de la Guyane a été obtenue à partir de l'extrapolation spatiale de la biomasse estimée dans des parcelles d'inventaires forestiers (Observatoire des dispositifs forestiers de Guyane française – GuyaFor ; figure 3). L'extrapolation spatiale des estimations de biomasse a été réalisée grâce à des variables environnementales et climatiques obtenues par télédétection. Cette carte ne présente pas *a priori* de biais d'estimation, contrairement aux cartes produites jusqu'à présent à partir de données satellitaires, qui sous-estiment les valeurs de biomasse

supérieures à 400 tonnes à l'hectare. Par ailleurs, comme nous avons développé une méthodologie permettant la propagation des incertitudes (Molto *et al.*, 2013), lors du changement d'échelle, dans les estimations de biomasse, nous avons également calculé une carte des écarts-types associés. Cette dernière carte permet de déterminer les intervalles de confiance associés aux estimations de stocks de carbone. Il est ainsi possible dans le logiciel d'obtenir une estimation du stock de carbone de n'importe quelle zone de la Guyane avec un intervalle de confiance associé (figure 5).

Biodiversité

La diversité locale (alpha-diversité) et les variations de composition spécifique à l'échelle régionale (bêta-diversité) sont abordées indirectement à partir d'une stratification géomorphologique (Guitet *et al.*, 2013). Cette stratification obtenue dans le projet Habitat de l'Office national des forêts (ONF) est actuellement la meilleure façon d'appréhender la biodiversité en Guyane. Elle caractérise aussi bien le milieu abiotique que les *corrigés* d'espèces floristiques et faunistiques qui y vivent (Guitet *et al.*, 2014, 2015a ; Richard-Hansen *et al.*, 2015). Elle permet de rendre compte des principales

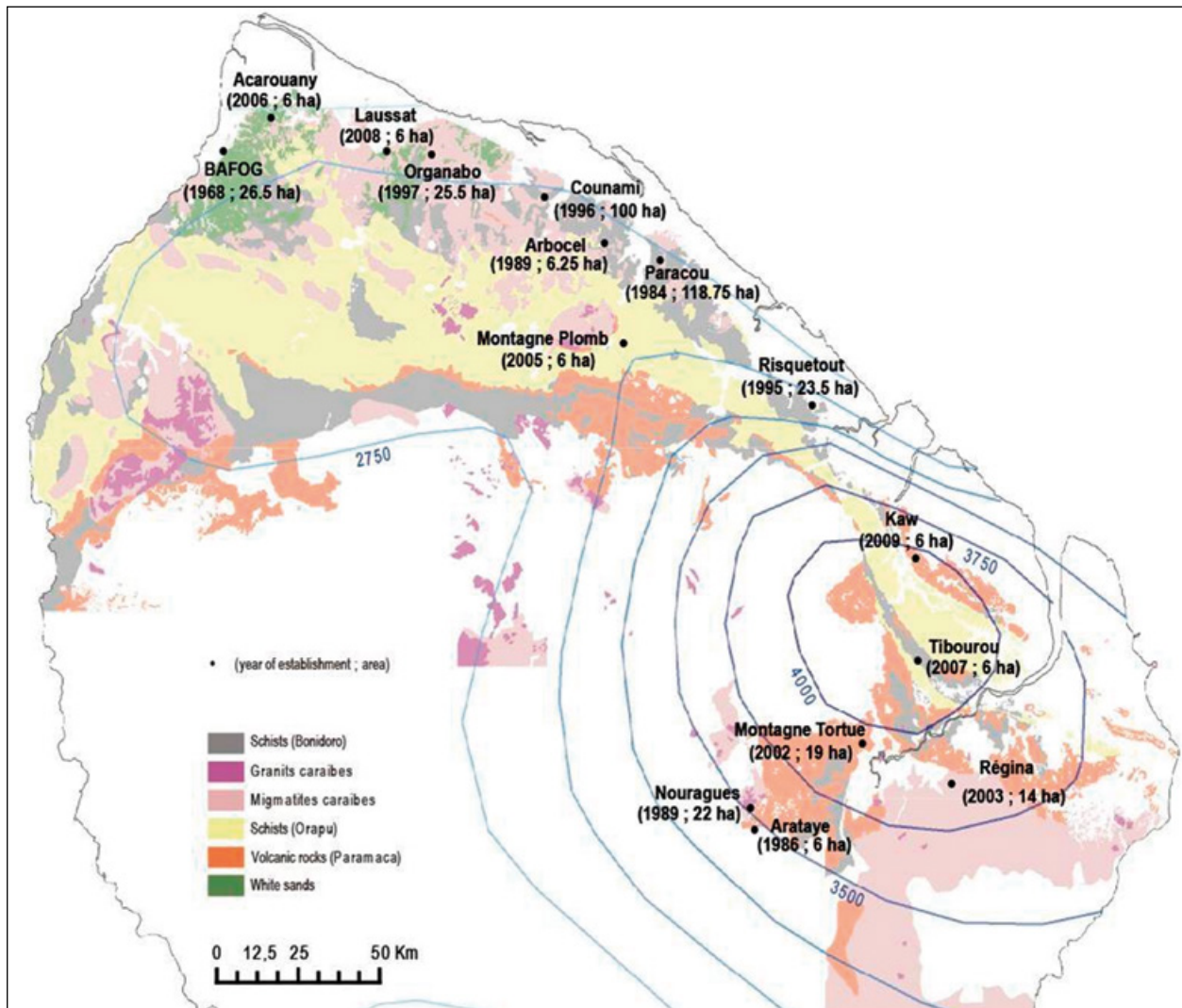


Figure 3.

Le réseau GuyaFor est constitué de 15 sites contenant 49 parcelles couvrant une surface de 235 ha. Les 164 470 arbres de ces parcelles sont identifiés espèce par espèce et leurs diamètres sont mesurés régulièrement. La base de données du réseau GuyaFor contient 1 258 779 mesures.

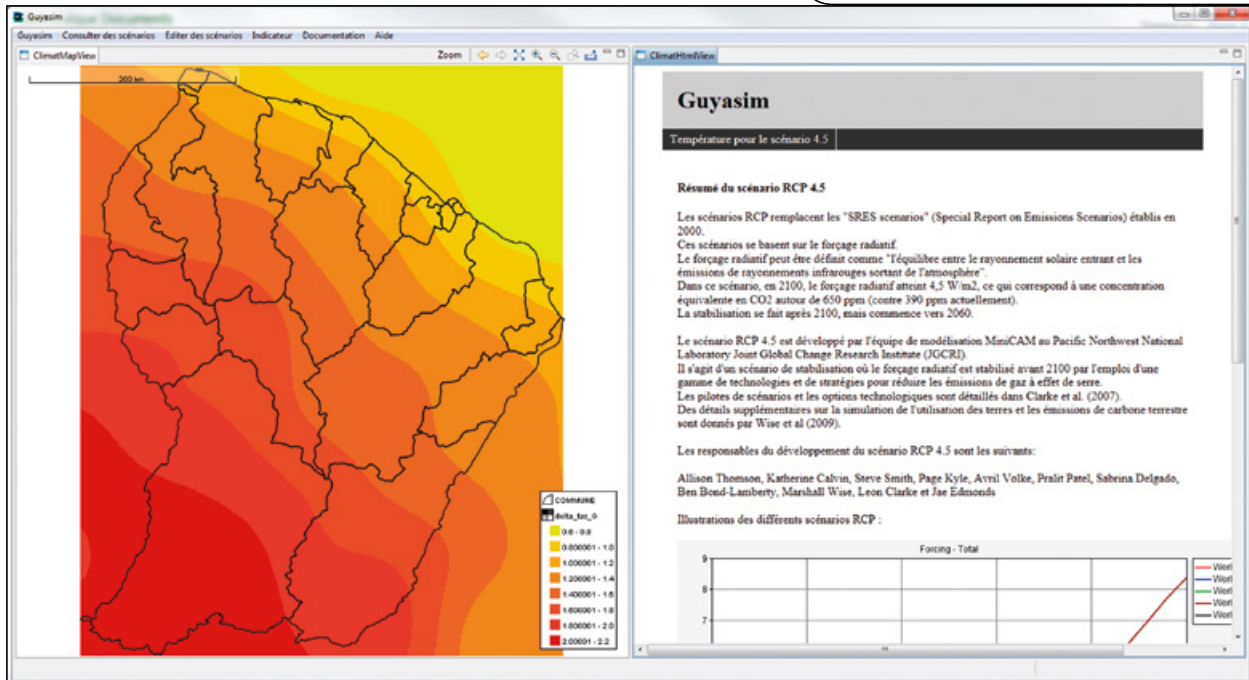


Figure 4.

Interface de visualisation des scénarios climatiques. Fenêtre de gauche : différence entre les périodes janvier 2020-novembre 2070 et janvier 1951-décembre 2001 des valeurs moyennes annuelles de température. L'unité est le degré Celsius. Les valeurs positives signifient que la valeur moyenne sur la période 2020-2070 est plus élevée que sur la période 1951-2001. Fenêtre de droite : informations sur le scénario de prédiction climatique considéré. Il est aussi possible de consulter les cartes des différentiels pluviométriques et d'évapotranspiration ainsi que de zoomer sur ces cartes.

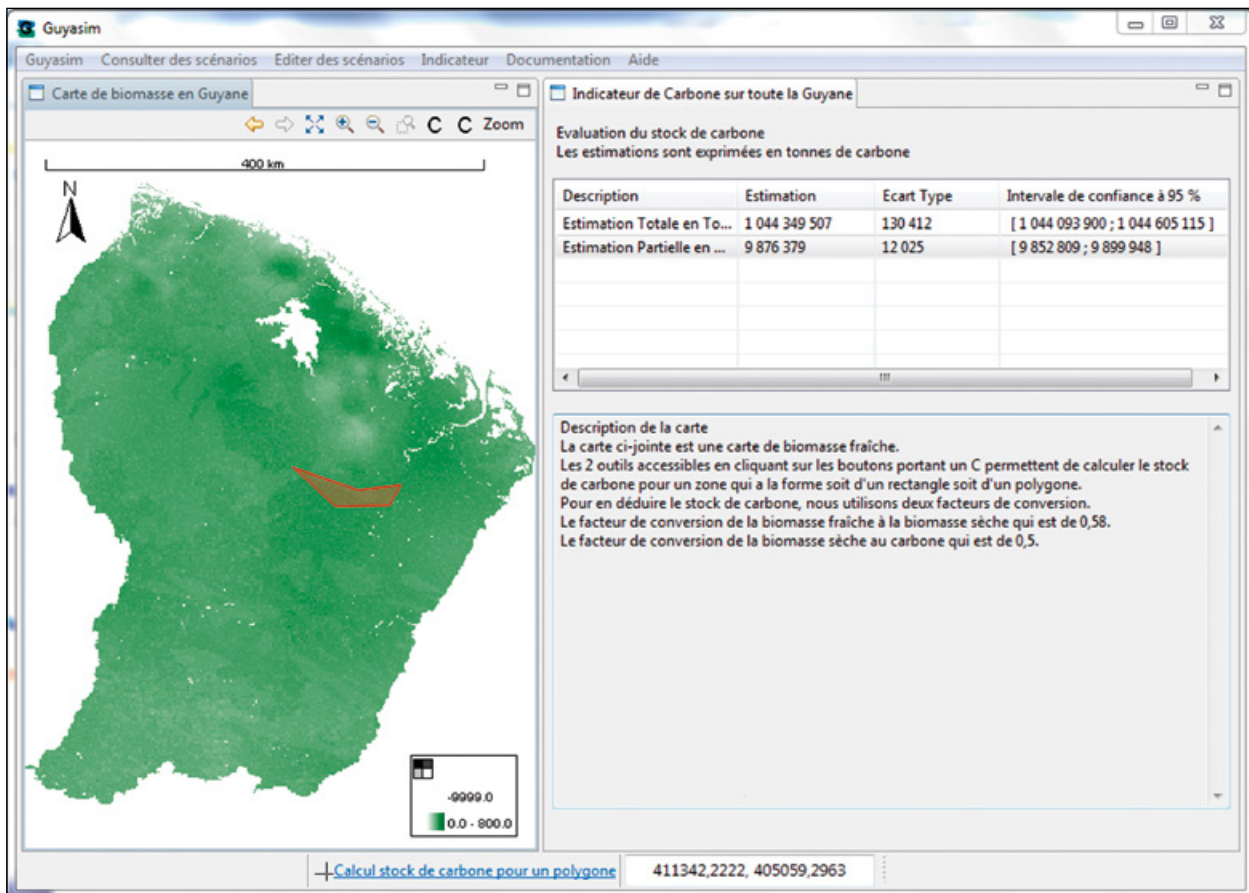


Figure 5.

Interface de visualisation du stock de carbone forestier. Fenêtre de gauche : carte de biomasse de la Guyane ; il est possible de zoomer et de sélectionner des zones comme le polygone rouge. Fenêtre de droite : estimation du stock de carbone (moyenne, écart-type et intervalle de confiance) de la Guyane et de la zone sélectionnée ; informations sur les méthodes de calcul.

variations de composition et de structure forestière liées aux effets de niche et aux effets biogéographiques. Elle fait partie des ressources consultables dans le logiciel. De même, la cartographie détaillée des types d'occupation du sol de la bande côtière est consultable dans le logiciel. Les Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) sont également intégrées dans ce logiciel. Elles sont utilisées pour évaluer les impacts environnementaux des projets d'aménagement du territoire.

Sol

Dans le cadre du projet GuyaSim, un réseau de zones de référence a commencé à être mis en place, afin de caractériser le « potentiel écologique » du sol de différents écosystèmes forestiers tropicaux naturels de Guyane (Roggy, 2013). Les résultats des analyses menées sur les 25 premières parcelles du réseau (11 parcelles de forêts naturelles témoins situées sur un gradient de texture de sols, 4 parcelles de forêts exploitées, 9 parcelles déforestées pour activités agricoles, 2 parcelles de savane) sont détaillés dans le logiciel. Le « potentiel écologique » est ici entendu comme une synthèse de bio-indicateurs mesurés de fonctions clés de l'écosystème. En effet, selon le rapport du Millennium Ecosystem Assessment (2005), la quasi-totalité des services rendus par les écosystèmes seraient garantis entre autres par un maintien des cycles biogéochimiques à l'équilibre et en particulier ceux du carbone et de l'azote. Ces cycles sont assurés par des fonctions biologiques appelées fonctions écosystémiques de soutien. Par exemple la respiration, la dénitrification et les nitrifications aérobie et anaérobie peuvent être considérées comme des fonctions clefs.

Aide à l'aménagement

Le logiciel GuyaSim permet de construire deux types de scénarios d'aménagement détaillés ci-après : aménagement du territoire (changement d'usage des terres) et aménagement forestier (exploitation forestière).

Outil d'aménagement du territoire

Un scénario d'aménagement du territoire est défini à l'aide d'un fichier *shape*. Ce fichier *shape* représente les zones géographiques qui vont être aménagées. Toutes les zones du fichier *shape* doivent avoir un attribut qui décrit le type d'occupation du sol. Les valeurs possibles de cet attribut sont : agricole, eau, forêt, mangrove, marécage, pâturages, savane, sol nu, verger et urbain. Il est possible de changer d'occupation du sol les zones agricole, forêt, pâturages, savane et verger, en définissant la date des transitions. Cet ensemble de transitions est appelé « scénario d'aménagement du territoire » (figure 6).

Une fois le scénario d'aménagement déterminé, il est possible d'avoir des informations sur son impact environnemental. Plusieurs informations sont fournies à l'utilisateur. D'une part, l'estimation de l'évolution du stock de carbone par zone et par compartiment est produite sous forme de graphiques et de tableaux exportables. D'autre part, des avertissements concernant la biodiversité sont affichés pour informer si les aménagements touchent des aires protégées (ZNIEFF) et quel est le niveau de protection de ces aires. Les projections

sur les stocks de carbone sont réalisées sur 35 ans pour les scénarios contenant des conversions « forêt vers pâturages », durée nécessaire à la stabilisation du carbone dans le sol d'après le résultat du projet CARPAGG (Blanfort *et al.*, 2013) ; et sur la durée du scénario pour les scénarios n'en contenant pas, les évolutions des valeurs des stocks de carbone étant alors supposées instantanées à la date de la conversion.

Outil d'aménagement d'un massif forestier

Un scénario d'aménagement forestier est défini à l'aide d'un fichier *shape* représentant le parcellaire du massif forestier exploité. Il est possible, pour chaque parcelle, de définir les dates et le mode d'exploitation. Deux modes d'exploitation sont disponibles, s'agissant de l'exploitation sélective conventionnelle (de l'ordre de 10 à 25 m³/ha) ou de l'exploitation sélective de bois d'œuvre associée à des prélèvements de bois énergie (pouvant atteindre 120 m³/ha). Cet ensemble d'exploitations est appelé « scénario d'aménagement forestier » (figure 7).

Une fois le scénario défini, il est possible de calculer les impacts sur la biomasse forestière. Il est nécessaire alors de sélectionner une méthode d'évaluation de la biomasse à l'hectare avant l'exploitation pour chaque parcelle. Deux méthodes sont disponibles : la valeur de la carte de la biomasse de la Guyane (variable selon la localisation des parcelles), ou le recours à une valeur constante (par exemple 300 t/ha). Ensuite, il est possible d'établir des prédictions sur 110 ans de l'évolution de la biomasse cumulée de toutes les parcelles et d'estimer la biomasse exploitable par parcelle. C'est la durée nécessaire à la stabilisation de la biomasse après exploitation selon les modèles de dynamique forestière construits en Guyane (Gourlet-Fleury *et al.*, 2005). Ces estimations sont représentées sous forme graphique et sous forme numérique.

Discussion et conclusion

Le logiciel GuyaSim fournit des cartes et des bilans, pour des indicateurs relatifs à la forêt, établis à partir d'extrapolations des données d'inventaires dont nous avons pu disposer. Les méthodes et les résultats obtenus ont été validés par la communauté scientifique, ayant fait l'objet de publications dans des revues scientifiques internationales reconnues et listées par Rossi (2014). Cependant, étant donné la faible intensité de l'échantillonnage, les résultats présentés dans GuyaSim doivent être considérés comme indicatifs. Ils ne doivent en aucun cas être utilisés comme une alternative aux études d'impact réalisées sur le terrain ou à toute autre obligation légale concernant un aménagement.

Actuellement, peu d'informations sur la dynamique du stock de carbone après la conversion de forêt tropicale en zone agricole sont disponibles. Les bilans de carbone obtenus pour ce type de transition d'occupation, dans les scénarios d'aménagement du territoire, sont de ce fait assez génériques. Il n'est donc pas possible de différencier l'impact des types de cultures ou des pratiques sur l'évolution du stock de carbone dans le sol en fonction de l'occupation initiale de la zone. Cependant, l'observatoire du carbone de Guyane créé en 2014 devrait apporter des informations

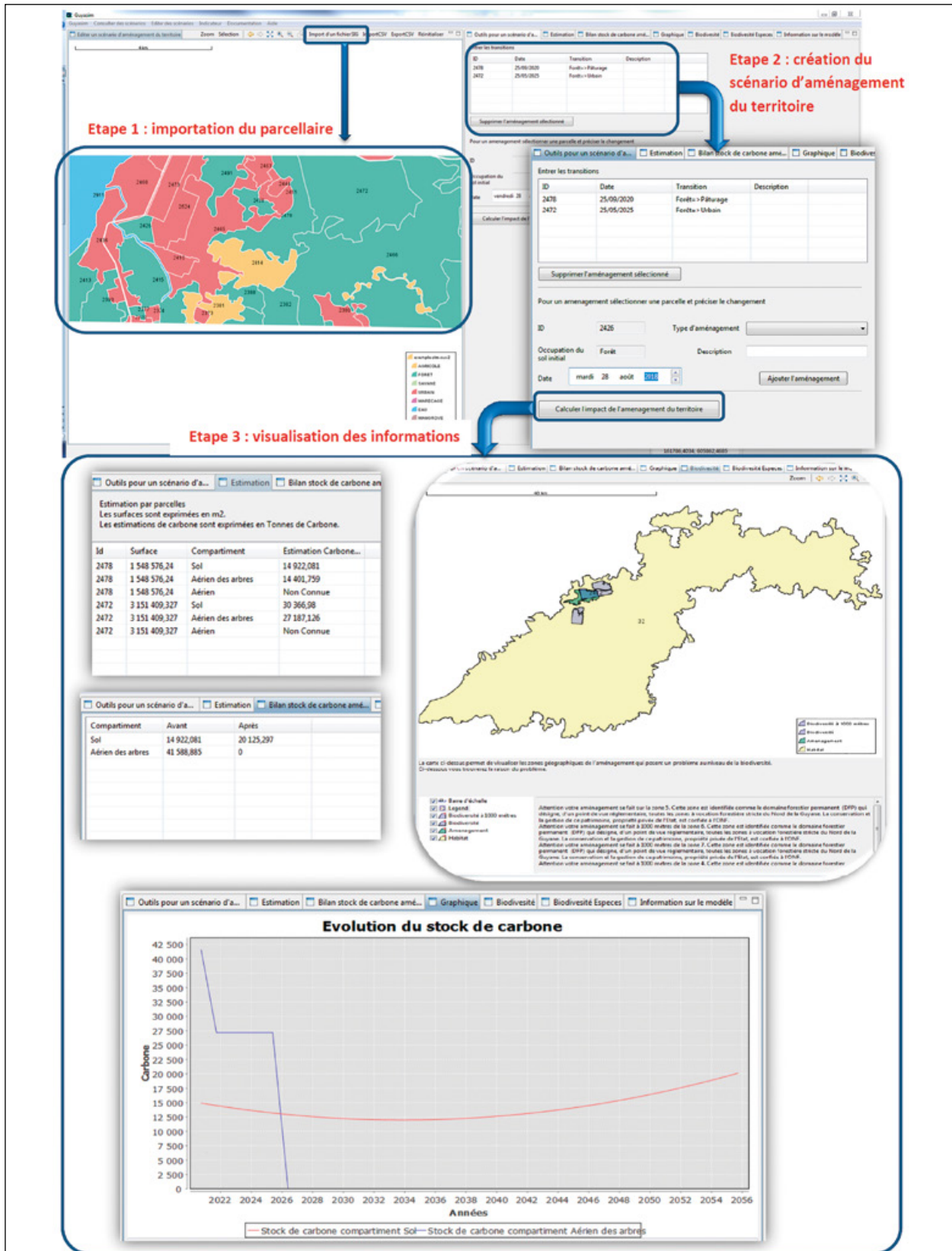


Figure 6. Analyse d'un scénario d'aménagement du territoire avec GyaSim : trois grandes étapes à partir de l'interface de scénario d'aménagement du territoire. Étape 1 : importation d'un parcellaire à partir d'un fichier *shape* en cliquant sur le bouton « Import Fichier SIG ». Étape 2 : construction du scénario d'aménagement du territoire en sélectionnant des parcelles puis en indiquant le type de conversion d'usage et la date. Étape 3 : visualisation des informations concernant l'impact environnemental du scénario en cliquant sur le bouton « Calculer l'impact de l'aménagement du territoire ». Les différentes informations disponibles sont accessibles via les onglets « Estimation stock initial », « Bilan carbone aménagement », « Graphique », « Biodiversité »...

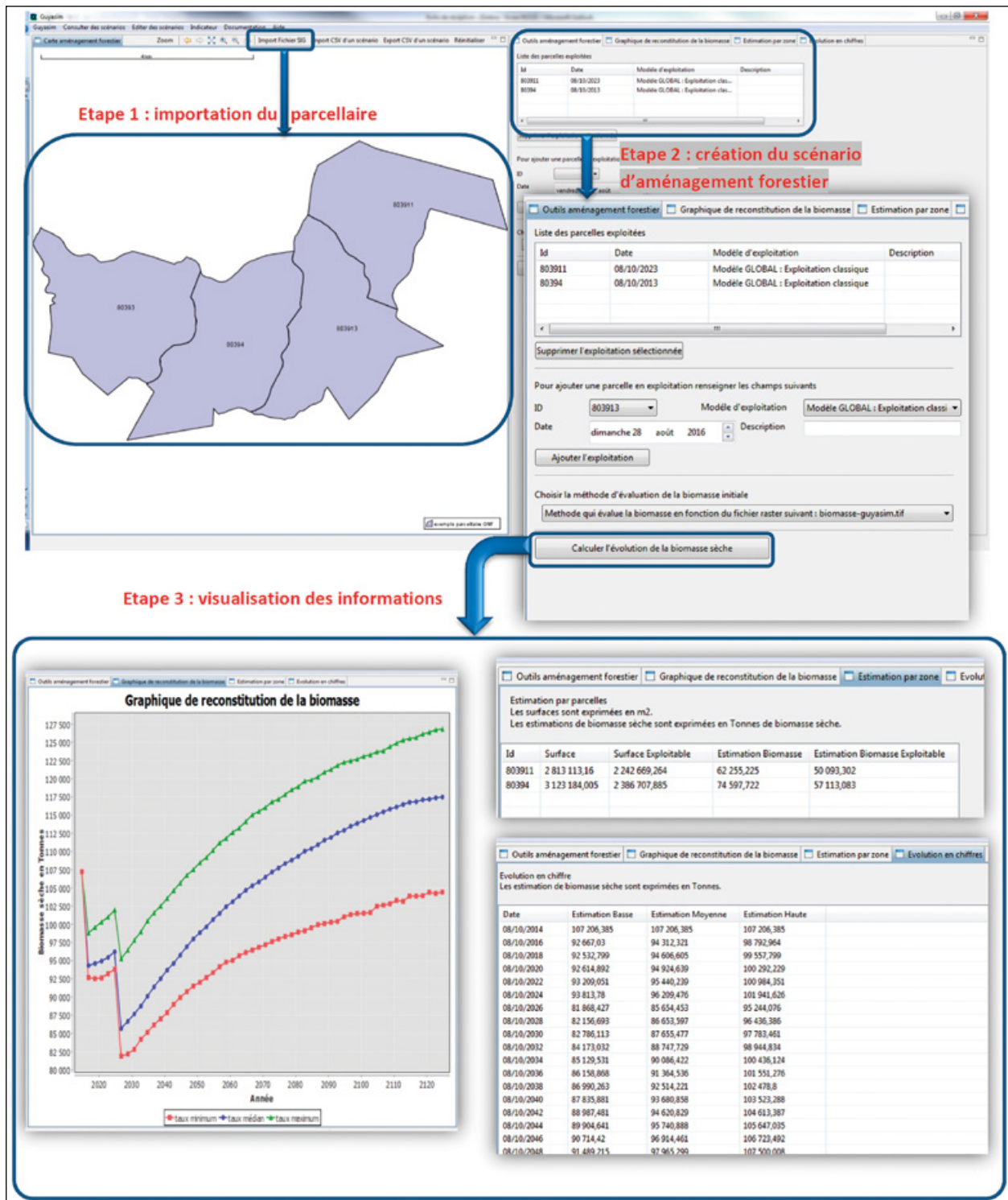


Figure 7.

Analyse d'un scénario d'aménagement forestier avec GUYASIM : trois grandes étapes à partir de l'interface de scénario d'aménagement forestier. Étape 1 : importation d'un parcellaire à partir d'un fichier *shape* en cliquant sur le bouton « Import Fichier SIG ». Étape 2 : construction du scénario d'aménagement forestier en sélectionnant des parcelles puis en indiquant le type d'exploitation (conventionnel, ou conventionnel + bois énergie) et la date. Étape 3 : visualisation des informations concernant l'impact biomasse du scénario en cliquant sur le bouton « Calculer l'évolution de la biomasse sèche ». Les différentes informations disponibles sont accessibles via les onglets « Graphique de reconstitution de la biomasse », « Estimation par zone » et « Évolution en chiffres ».

sur la dynamique du stock de carbone après la conversion de forêt en zone agricole. Le logiciel GuyaSim permettant d'identifier les informations manquantes pour fournir un bilan carbone du territoire, il permettra de cibler les efforts pour l'acquisition de nouvelles données.

Pour l'instant, seules les prédictions d'évolution de la biomasse sont fournies dans les scénarios d'aménagement forestier. Il sera bientôt possible d'ajouter d'autres indicateurs comme le volume exploitable et la nature du volume de bois énergie, les données statistiques nécessaires étant depuis peu disponibles par type d'habitat forestier (Guitet *et al.*, 2015a et b).

La Guyane ne fait pas partie des « hot spots » identifiés pour la biodiversité mondiale. Cependant, le plateau des Guyanes apparaît comme un massif tout à fait original dans l'ensemble amazonien, notamment du fait d'une composition très contrastée (Ter Steege *et al.*, 2006), d'un endémisme assez marqué (Prance, 1996) et d'une grande richesse faunistique (Olson et Dinerstein, 2002). Les données floristiques actuelles permettent d'ores et déjà d'identifier des types forestiers à plus forte richesse spécifique ou contribuant plus fortement à la diversité régionale du fait de leur singularité (Guitet *et al.*, 2014, 2015a). Néanmoins, beaucoup de progrès restent à réaliser pour aborder les questions de diversité de façon plus complète, notamment en intégrant la petite faune, les champignons, ou les organismes du sol. Plusieurs initiatives allant dans ce sens sont en cours, notamment le projet Diadema du Labex CEBA dont le principal objectif est de mettre en place des méthodes d'évaluation quantitatives de la biodiversité amazonienne de Guyane française. La région Guyane et la Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement veulent constituer une grande base de données de la biodiversité guyanaise. Cette initiative de fédération de données pourrait permettre d'établir des modèles de répartition des espèces déterminantes et définir ainsi de façon plus précise des « hot spots » de biodiversité. Les connaissances sur la biodiversité disponibles dans le logiciel pourraient également être complétées dans un avenir proche.

Les informations concernant la conversion d'usage des terres et les nouveaux indicateurs des scénarios d'aménagement forestier pourront être intégrées dès qu'elles seront disponibles dans GuyaSim. En effet, cela ne nécessitera que quelques jours de travail car les fonctionnalités du logiciel ont été conçues comme si ces informations étaient connues. Pour celles concernant la biodiversité, leur intégration sera plus compliquée et attendra certainement une nouvelle version du logiciel. Le format de ces données n'étant pas encore défini, il faudra redéfinir et reprogrammer les fonctionnalités du logiciel.

Ce logiciel peut être décliné sur d'autres territoires. En effet, les pays du plateau des Guyanes ou les pays d'Afrique centrale ont des besoins similaires pour l'aménagement de leur territoire forestier. La structure du logiciel GuyaSim, client Sig personnalisé basé sur Udig, peut être largement conservée. L'adaptation consisterait essentiellement à changer les sources de données du logiciel (fichiers rasters contenant les valeurs des services écosystémiques) et éventuellement à adapter les fonctionnalités aux problématiques du territoire.

N. B.

Une copie du logiciel peut être obtenue en s'adressant au Cirad-Guyane (dir.guyane@cirad.fr), la résolution des bogues et les modifications mineures étant assurées par l'équipe Cirad qui a développé GuyaSim.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet GuyaSim, cofinancé par les Fonds européens de développement régionaux (Feder PO 2007-2013) et le Cirad. Les auteurs remercient la région Guyane, l'ONF, l'UMR EcoFoG, l'UPR BSEF, l'UMR Selmet et l'UMR Amap pour leur participation au projet. Les auteurs remercient aussi les différents intervenants rencontrés lors de ce projet. Les travaux ont été conduits en collaboration avec le projet Carpagg (CARbone des PAtures de Guyane et Gaz à effet de serre), cofinancé par les Fonds européens de développement régionaux (Feder PO 2007-2013) et le Cirad, et le projet Climfor (Modélisation des impacts des changements climatiques sur la biodiversité de la forêt tropicale de Guyane française) cofinancé par la FRB et la Fondation GDF Suez.

Le projet GuyaSim s'est notamment appuyé sur les dispositifs suivants : réseau Guyafor, inventaires papetiers, dispositif GuyaFLux, projet Amalin, projet Bridge, projet Ecerex, projet Habitat, données IGN.

Références bibliographiques

- Baraloto C., Rabaud S., Molto Q., Blanc L., Fortunel C., Hérault B., Dávila N., Mesones I., Rios M., Valderrama E., Fine P. V. A., 2011. Disentangling stand and environmental correlates of aboveground biomass in Amazonian forests. *Global Change Biology*, 17 (8): 2677-2688.
- Baraloto C., Paine C. E. T., Patino S., Bonal D., Hérault B., Chave J., 2010. Functional trait variation and sampling strategies in species-rich plant communities. *Functional Ecology*, 24 (1): 208-216.
- Blanfort V., Ponchant L., Dezecache C., Freycon V., Picon-Cochard C., Blanc L., Fontaine S., Stahl C., 2013. Dynamique du carbone dans les sols de prairies issues de la déforestation de la forêt guyanaise. *In* : Blanfort V., Stahl C. (éds). Actes de la journée : Le carbone en forêt et en prairies issues de déforestation en Guyane, processus, bilans et perspectives, 1^{er} octobre 2013, Cayenne, Guyane française. Montpellier, France, Cirad, 42-45.
- Brienen R. J. W., Phillips O. L., Feldpausch T. R. *et al.*, 2015. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519: 344-348.
- Chevassus-au-Louis B., Salles J. M., Bielsa S., Richard D., Martin G., Pujol J. L., 2009. Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes – Contribution à la décision publique. Paris, France, La Documentation française, 376 p.
- Ebeling J., Yasué M., 2008. Generating carbon finance through avoided deforestation and its potential to create climatic, conservation and human development benefits. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363 (1498): 1917-1924.

- Gourlet-Fleury S., Guehl J.-M., Laroussinie O., 2004. Ecology and management of a neotropical rainforest: lessons drawn from Paracou, a long-term experimental research site in French Guiana. Paris, France, Elsevier, 311 p.
- Gourlet-Fleury S., Cornu G., Jéssel S., Dessard H., Jourget J. G., Blanc L., Picard N., 2005. Using models to predict recovery and assess tree species vulnerability in logged tropical forests: a case study from French Guiana. *Forest Ecology and Management*, 209 (1-2): 69-86.
- Guitet S., Cornu J.-F., Brunaux O., Betbeder J., Carozza J. M., Richard-Hansen C., 2013. Landform and landscape mapping, French Guiana (South America). *Journal of Maps*, 9 (3): 325-335.
- Guitet S., Sabatier D., Brunaux O., Hérault B., Aubry-Kientz M., Molino J.-F., Baraloto C., 2014. Estimating tropical tree diversity indices from forestry surveys: a method to integrate taxonomic uncertainty. *Forest Ecology and Management*, 328: 270-281.
- Guitet S., Brunaux O., de Granville J. J., Gonzalez S., Richard-Hansen C., 2015a. Catalogue des habitats forestiers de Guyane. ONF-Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Guyane (DEAL), 120 p.
- Guitet S., Pélissier R., Brunaux O., Jaouen G., Sabatier D., 2015b. Geomorphological landscape features explain floristic patterns in French Guiana rainforest. *Biodiversity and Conservation*, 24 (5) : 1215-1237.
- Guitet S., Pélissier R., Brunaux O., Jaouen G., Sabatier D., 2015c. Geomorphological landscape features explain floristic patterns in French Guiana rainforest. *Biodiversity and Conservation*, 24 (5): 1215-1237.
- Guitet S., Hérault B., Molto Q., Brunaux O., Couteron P., 2015d. Spatial structure of above-ground biomass limits accuracy of carbon mapping in rainforest but large scale forest inventories can help to overcome. *Plos One*, 10 (9): e0138456.
- Insee (Institut national de la statistique et des études économiques), 2014. Présentation de la région Guyane (à partir du recensement de la population de 2011). Cayenne, France, Insee.
- Insee (Institut national de la statistique et des études économiques), 2015. Le bilan économique 2014 de la Guyane. Cayenne, France, Insee, coll. Insee Conjoncture Guyane n° 1.
- Lescure J. P., Puig H., Riera B., Leclerc D., Beekman A., Beneteau A., 1983. La phytomasse épigée d'une forêt dense en Guyane française. *Acta Oecologica*, 4 (3) : 237-251.
- Martin R. M., 2008. Déforestation, changement d'affectation des terres et REDD. *Unasylva*, 59 (230) : 3-11.
- McAffer J., Lemieux J.-M., Aniszczyk C., 2010. Eclipse Rich Client Platform. 2nd edition. Upper Saddle River, NJ, USA, Addison-Wesley.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Washington, DC, USA, Island Press, 201 p.
- Molto Q., Rossi V., Blanc L., 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 4 (2): 175-183.
- Molto Q., 2012. Estimation de la biomasse en forêt tropicale humide : propagation des incertitudes dans la modélisation de la distribution spatiale de la biomasse en Guyane Française. Thèse de doctorat en physiologie et biologie des organismes, Université des Antilles et de la Guyane, Kourou, France.
- Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J. A. *et al.*, 2008. *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Genève, Suisse, Intergovernmental Panel on Climate Change, 132 p.
- Olson D. M., Dinerstein E., 2002. The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 89 (2): 199-224.
- ONF, FAO, 2010. Évaluation des ressources forestières mondiales 2010. Rapport national. Guyane française. Rome, Italie, FAO, 55 p. [En ligne] <http://www.fao.org/docrep/013/al507F/al507F.pdf>
- Pereira H. M., Leadley P. W., Proença V., Alkemade R., Scharlemann J. P. W., Fernandez-Manjarrés J. F. *et al.*, 2010. Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. *Science*, 330 (6010): 1496-1501.
- Phillips O. L., Aragão L. E. O. C., Lewis S. L., Fisher J. B., Lloyd J., López-González G. *et al.*, 2009. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323 (5919): 1344-1347.
- Phillips O. L., Malhi Y., Higuchi N., Laurance W. F., Núñez P. V., Vásquez R. M. *et al.*, 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 282 (5388): 439-442.
- Prance G. T., 1996. Islands in Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Sciences*, 351: 823-833.
- Ramsey P., 2006. Udig desktop application framework. *In: Presentation at FOSS4G 2006 conference*.
- Richard-Hansen C., Jaouen G., Denis T., Brunaux O., Marcon E., Guitet S., 2015. Landscape patterns influence communities of medium-to large-bodied vertebrates in undisturbed terra firme forests of French Guiana. *Journal of Tropical Ecology*, 31 (5): 423-436.
- Roggy J. C., 2013. Programme GuyaSim : Qualité biologique des sols. Rapport de recherche. Kourou, France, Solicaz, 21 p.
- Rossi V., 2014. GuyaSim 2011-2014 : un simulateur pour explorer l'impact des scénarios de développement de la Guyane sur les services des écosystèmes forestiers. Rapport final. Montpellier, France, Cirad, 219 p. [En ligne] <http://www.ecofog.gf/spip.php?article429>
- Sala O. E., Chapin F. S., Armesto J. J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R. *et al.*, 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287 (5459): 1770-1774.
- Sanlaville M., Salles J. M., 2012. Bilan activité 2 du projet GuyaSim : Scénarios socio-économiques et dynamiques territoriales de la Guyane. Rapport technique. Kourou, France, Cirad Guyane, 46 p.
- Ter Steege H., Pitman N. C. A., Phillips O. L., Chave J., Sabatier D. *et al.*, 2006. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. *Nature*, 443: 444-447.
- Tsayem-Demaze M., 2008. Croissance démographique, pression foncière et insertion territoriale par les abattis en Guyane française. *Norois*, 206 : 111-127.