



Master 2 Informatique  
Spécialité Géomatique

---

# **Conceptualisation et développement d'outils pour cartographier des indicateurs relatifs à divers risques environnementaux**

---

## **Cas d'application : Le paludisme**

---

Gilles ENTRINGER

Stage réalisé du 06.02.2012 au 06.08.2012 à l'IRD sous la direction de Bertrand GUERRERO.

Tuteur pédagogique : Thérèse LIBOUREL

Date de soutenance : 25.09.2012

Membres du Jury : Thérèse LIBOUREL, Bertrand GUERRERO, Jean-Christophe DESCONNETS, Maud LOIREAU, Christelle PIERKOT, Nadine DESSAY, Vincent HERBRETEAU, Mireille FARGETTE

## **Lettre de « mission de stage » - Master 2 Géomatique - 2011/2012**

**Nom / Prénom stagiaire : Entringer Gilles**

### **Mission du stage**

#### **Objectif**

Le stage s'insère dans la thématique santé et environnement.

Dans un premier temps il s'agit de travailler autour d'un cas d'étude particulier relatif au paludisme dans la région du Niger afin de dégager une méthodologie générique et les techniques afférentes afin de réutiliser les avancées du stage dans des cas de maladies climato-dépendantes variées.

#### **1. Volet Environnement-santé**

Le stagiaire doit, dans un premier temps, s'approprier les concepts de maladies climato-dépendantes, de risques anthropiques, d'aléas et de vulnérabilité. Dans une deuxième phase il doit conceptualiser les divers éléments qui permettraient l'obtention de cartes d'aléas et si possible de vulnérabilité. Ce volet du stage est donc théorique.

#### **2. Volet Informatique :**

L'équipe d'accueil dispose d'un outil de modélisation (SIEL) enchaînant divers traitements qui est un plugging sur ARCGIS (écrit en Visual basic).

Le stagiaire devra conceptualiser (à partir de son appropriation du SIEL) puis mettre en œuvre une chaîne de traitements de données géographiques pour la production de cartes dans le cas d'étude sélectionné. Les données relatives au cas d'étude existent en grande majorité au sein d'une base de données Niger.

Le stagiaire devra prototyper une première chaîne de traitements réalisée en vision open source (ce qui devrait assurer indépendance et réutilisation). L'objectif étant à plus long terme de généraliser et pérenniser cet outil.

### **Compétences requises**

Géomatique, Développements informatique, Base de données et Géographie de la santé..

### **Résultats escomptés**

- 1- Conceptualisation et réalisation de la base de données liées aux concepts de risques anthropique (maladie climato dépendante)
- 2- Conceptualisation et réalisation d'un prototype de chaîne de traitements en vue d'obtention de cartes diverses liées au sujet d'étude.

### **Nom du tuteur de stage dans la structure d'accueil**

Nadine Dessay, Maud Loireau, Vincent Herbreteaux

Bertrand Guerrero (encadrant principal)

Fonction du tuteur : Géomaticien, ingénieur d'étude

Coordonnées du tuteur : 500 rue Jean-François Breton

F-34093 Montpellier Cedex 5

N° Tel, fax et e-mail : [Bertrand.guerrero@ird.fr](mailto:Bertrand.guerrero@ird.fr)

**Conditions du stage****Lieu et descriptif rapide de la structure d'accueil :**

LIRMM et UMR Espace Dev Montpellier

Maison de la télédétection

500 rue Jean-François Breton

F-34093 Montpellier Cedex 5

**Équipements géomatiques :**

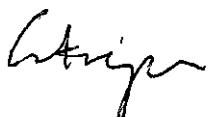
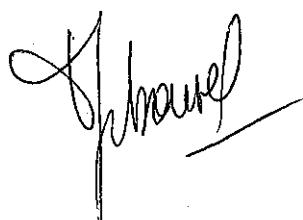
ArcGIS, PostgreSQL, PostGIS, QGis

**Dates et durée :**

06.02.2012 – 06.08.2012 (durée 6 mois)

**Rémunération :**

Gratification réglementaire

**Nom de l'enseignant/chercheur chargé du suivi du stage (ou tuteur pédagogique) :****Fonction:** Professeur Thérèse Libourel**Coordonnées :** Université Montpellier 2.**N° Tel, fax et e-mail : 04 67 41 85 34, 04 67 41 85 00****therese.libourel@univ-montp2.fr****Le stagiaire****L'enseignant/chercheur****Le tuteur en entreprise**

# **Remerciements**

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage Bertrand Guerrero qui m'a permis de réaliser mon stage dans les meilleures conditions possibles. Je le remercie pour ses conseils, le temps qu'il m'a consacré et pour ses commentaires sur mon travail.

Je remercie également mes cotuteurs Nadine Dessay, Maud Loireau et Vincent Herbreteau pour leur disponibilité, leurs conseils et leur aide tout au long de mon stage.

Merci aussi à Christelle Pierkot, Jean-Christophe Desconnets, Samuel Andres et tous les membres de l'équipe SIC de l'UMR Espace-Dev pour leurs conseils techniques et pour leur patience.

Je tiens aussi à remercier Mireille Fargette et tous les membres de l'équipe AIMS de l'UMR Espace-Dev qui sont intervenus tout au long de l'élaboration de mon travail de stage.

Je voudrais remercier tout particulièrement mon tuteur pédagogique Thérèse Libourel de m'avoir aidé à trouver ce stage et à découvrir le monde de la recherche et pour ses conseils et pour le temps qu'elle m'a consacré.

Enfin, je tiens à remercier le personnel administratif de l'IRD, de l'UM2 et du LIRMM pour le temps qu'ils m'ont consacré.



# Sommaire

<b>Sommaire</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Contexte et problématique</b>	<b>3</b>
2.1 Principes généraux . . . . .	3
2.2 Le logiciel SIEL . . . . .	4
2.2.1 Architecture SIEL . . . . .	4
2.2.2 Les chaînes de traitements du SIEL . . . . .	5
2.3 Problématiques du stage . . . . .	10
<b>3 Etat de l'art sur le thème environnement-santé</b>	<b>11</b>
3.1 Interactions environnement-santé . . . . .	11
3.1.1 Définitions . . . . .	11
3.1.2 Facteurs de risque de transmission du paludisme . . . . .	14
3.2 Approches logicielles existantes . . . . .	20
3.2.1 Cas d'utilisation concret dans le contexte environnement-santé : . . . . .	22
3.2.2 Conclusion . . . . .	22
<b>4 Méthodologie</b>	<b>23</b>
4.1 Analyse . . . . .	23
4.1.1 Données disponibles . . . . .	26
4.1.2 Modèle UML simplifié . . . . .	27
4.2 Raisonnement . . . . .	27
4.2.1 Description des données et des traitements . . . . .	29
4.2.2 Les catégories de données et de traitements . . . . .	32
4.2.3 Conceptualisation de la chaîne de traitements . . . . .	34
4.3 Conception . . . . .	38
4.3.1 Architecture informatique de la chaîne de traitements et du logiciel ouvert	38
4.4 Opérationnalisation . . . . .	41
4.4.1 Fonctionnement chaîne de traitements "fermée" . . . . .	41
4.4.2 Fonctionnement du logiciel "ouvert" . . . . .	47

<b>5 Résultats</b>	<b>53</b>
5.1 Planning final . . . . .	53
5.2 Prototype . . . . .	53
5.3 Validation des résultats . . . . .	54
5.4 Difficultés rencontrées . . . . .	57
5.4.1 Java . . . . .	57
5.4.2 PostgreSQL/PostGIS . . . . .	58
5.4.3 R . . . . .	58
5.5 Perspectives . . . . .	59
5.6 Conclusion . . . . .	60
<b>6 Glossaire et définitions</b>	<b>63</b>
<b>7 Annexes</b>	<b>69</b>
7.1 Configuration prérequise pour l'utilisation des outils . . . . .	69
7.2 Packages R utilisés . . . . .	69
7.3 Les traitements effectués par la chaîne de traitements fermée . . . . .	71
7.4 Divers . . . . .	82
7.4.1 Planning provisionnel . . . . .	82
<b>Bibliographie</b>	<b>83</b>

## CHAPITRE 1

# Introduction

---

Le stage s'inscrit dans la formation du Master 2 Géomatique et s'est déroulé au sein de deux équipes de l'UMR Espace-Dev<sup>1</sup> : l'équipe SIC et l'équipe AIMS.

Les objectifs de l'UMR Espace-Dev sont multiples. L'UMR s'inscrit dans une perspective de développement durable des territoires et propose des méthodologies de spatialisation des dynamiques de l'environnement. L'UMR développe et exploite également un réseau de stations de réception d'images satellites d'observation de la terre.

L'UMR se regroupe en trois équipes de recherche :

- Equipe OSE (Observation spatiale de l'environnement), spécialisée dans la télédétection et les images satellitaires
- Equipe AIMS (Approche intégrée des milieux et des sociétés) qui est spécialisée dans le domaine de l'environnement, de la télédétection et dans l'élaboration de dynamiques socio-environnementales ou d'indicateurs et de modèles des interactions milieux/sociétés.
- Equipe SIC (Systèmes d'information et de connaissances) qui a pour objectif l'acquisition, la gestion, la représentation et le partage des données et des connaissances. D'autres objectifs de l'équipe sont la modélisation de dynamiques spatio-temporelles, la visualisation, la cartographie sémantique et l'aide à la décision

Tout scientifique qui travaille à établir des cartes de risque fonde ses recherches sur un raisonnement qui consiste à enchaîner des procédures, traitements ou algorithmes.

Depuis plusieurs années au sein de l'UMR Espace-Dev (équipes SIC et AIMS) est développé le SIEL (Système d'Information sur l'Environnement l'Echelle Locale). Le SIEL est un logiciel d'aide à la décision dans la gestion de l'environnement. Il permet notamment d'évaluer le risque de dégradation de la végétation en milieu aride et de produire des **indices environnementaux spatialisés** sous la forme de cartes. L'objectif du SIEL est de mettre à la disposition

---

1. <http://www.espace.ird.fr/index.php>

des scientifiques des outils informatiques pour automatiser au mieux leur démarche.

L'objectif du présent stage est d'élargir les potentialités du SIEL en définissant dans un premier temps un nouveau contexte, celui dénommé environnement-santé et plus précisément celui relatif au paludisme. Le développement d'un outil autorisant la mise en œuvre de chaînes de traitements dédiées à l'évaluation de risques environnementaux est donc un des objectifs poursuivis. Basé sur une plateforme Open Source, l'outil devrait permettre à long terme un fonctionnement plus ouvert, plus facile et plus adapté à diverses problématiques. Cet outil sera aussi éprouvé et validé dans le contexte environnement-santé pour ce stage.

Le mémoire s'organise de la façon suivante :

- Une première partie sera dédiée à la présentation du contexte du stage. Dans cette partie sera présenté plus en détail le SIEL ainsi que les problématiques liées à la définition des facteurs de risque, à la construction des indicateurs et au développement d'une chaîne de traitements permettant de les cartographier.
- Dans la deuxième partie, le contexte de la thématique de recherche sous-jacente au stage sera expliqué. A partir d'une recherche bibliographique les principes généraux du thème environnement-santé ainsi que les approches logicielles existantes relatives à l'enchaînement de traitements et à la cartographie des indicateurs de risque seront présentés.
- Une troisième partie présentera la méthodologie de mon travail. De manière classique, nous commencerons par une phase d'analyse. Celle-ci sera dédiée à la compréhension des éléments liés au cycle du paludisme. A partir du modèle conceptuel de ces éléments, l'analyse des experts sera formalisée sous forme de chaînes de traitements préfigurant d'une part leur raisonnement et d'autre part donnera les spécifications nécessaires pour l'élaboration et le développement du prototype. Les différentes étapes de l'élaboration de la chaîne de traitements seront proposées en commençant avec la conceptualisation des traitements et des données utilisées pour arriver à l'automatisation de la chaîne de traitements automatisée "fermée" et du logiciel ouvert.
- Dans la dernière partie du mémoire seront présentés les résultats, les difficultés rencontrées et les perspectives de mon travail.

Par la suite, les termes en **gras** seront définis dans le glossaire en fin du mémoire.

# Contexte et problématique

---

## 2.1 Principes généraux

A l'heure actuelle, le logiciel SIEL permet d'effectuer un certain nombre de traitements bien définis dans le contexte de la désertification et des risques de dégradation du sol. Le contexte environnement-santé est également une des préoccupations de l'UMR Espace-Dev et la réutilisation de cet outil, pour la création d'indicateurs du risque de transmission de maladies infectieuses, nous a apparu particulièrement intéressante. Afin d'optimiser et de généraliser cette réutilisabilité, il faut penser les chaînes de traitements dans ce nouveau contexte.

De plus, le SIEL est disponible en tant que plugin ArcGIS et fonctionne avec des séries de traitements et d'opérations ciblées sur le type d'indice à produire. L'objectif à long terme est de retravailler ce logiciel pour qu'il devienne plus modulaire et générique, de préférence dans un contexte "Open Source". Nous avons donc décidé d'ouvrir l'outil et à repenser son architecture dans un contexte Open Source.

Dans ce contexte, la conception et le développement d'une chaîne de traitements liés aux indices santé-environnement avaient comme objectif de servir d'expérience préliminaire à la conception et à la réalisation d'une nouvelle architecture informatique du logiciel. L'intégration de la création automatisée d'indicateurs dans le domaine environnement-santé constituera de plus, une première piste dans l'objectif plus large qui consiste à faire du SIEL un outil générique adaptable à divers autres contextes comme par exemple la déforestation.

Nous allons maintenant présenter brièvement le SIEL, ses principes, son architecture informatique et la chaîne de traitements qu'il exécute. Par la suite les problématiques du présent stage seront expliquées en détail.

## 2.2 Le logiciel SIEL

Le SIEL est un logiciel qui instrumente un modèle environnemental (Loireau *et al.*, 2007) spatialisant les pratiques d'exploitation des ressources sur un territoire, modélisant les paysages et évaluant les risques de dégradation des ressources.

Le SIEL est un outil conçu pour répondre aux besoins des scientifiques et décideurs concernés par la lutte contre la dégradation et la gestion des ressources naturelles. Le SIEL est capable d'anticiper les risques et de les suivre, ce qui est important notamment dans le cadre de la mise en place d'observatoires. Cet outil donne également la capacité aux scientifiques et aux décideurs de mesurer l'impact des opérations déjà effectuées sur un territoire et d'optimiser les actions futures notamment en terme de gestion des ressources (Loireau *et al.*, 2012).

Le logiciel a été conceptualisé à partir de 1993 par Maud Loireau dans le cadre de sa thèse. En même temps un premier prototype a été développé. En 2000, dans le cadre de la lutte contre la désertification, la démarche scientifique et le modèle général du SIEL ont été adoptés par le programme ROSELT<sup>1</sup> de l'OSS<sup>2</sup>. Ceci a permis de développer un premier logiciel SIEL qui couvrait l'ensemble de la chaîne de traitements proposée. Une première version du logiciel traitant la ressource « végétation » a pu être déployée dans le réseau ROSELT/OSS dès la fin de l'année 2003. A partir de 2006, les différents acteurs ont poursuivi les développements du logiciel. Ceci a débouché sur un logiciel opérationnel et prêt à être diffusé, une documentation (guide d'utilisateur, aide en ligne), une documentation technique (guide développeur, dictionnaire des données), une base de données exemple et des supports de formations. Actuellement, l'objectif principal reste le développement informatique du logiciel et le responsable du projet informatique est depuis 2010 Bertrand Guerrero.

### 2.2.1 Architecture SIEL

Le SIEL se présente sous forme d'un plugin ArcGIS et se base sur deux modules propriétaires :

- Module données (Logiciel Microsoft Access **SGBD**, langage de programmation : Visual Basic for Application (VBA)) pour la gestion et le stockage des tables attributaires (format .mdb).
- Module SIG (Logiciel : ArcGIS Desktop avec l'extension Spatial Analyst, langage de

---

1. Réseau d'observatoires de Surveillance Ecologique à Long Terme

2. Observatoire du Sahara et du Sahel

programmation : Visual Basic 6.0 et langage ESRI ArcObjects) pour la gestion et le stockage des couches géographiques et les géotraitements.

Le système d'exploitation supporté est Windows XP, les logiciels supportés sont "Microsoft Office 2003" et "Microsoft Office 2007" pour le module données et "ArcGIS 9.1" et "ArcGIS 9.3" pour le module SIG. Les deux modules sont donc basés sur des outils propriétaires. Le SIEL a été développé en Visual Basic, langage informatique qui n'est plus supporté par les nouvelles versions d'ArcGIS ce qui cause un certain nombre de restrictions par rapport à son utilisation et le développement futur.

### 2.2.2 Les chaînes de traitements du SIEL

Les deux modules (Données et SIG), en faisant différents traitements, créent des **indices environnementaux spatialisés** qui permettent la cartographie des risques de dégradation des ressources. Les données utilisées et les résultats sont stockés dans une base de données Microsoft Access.

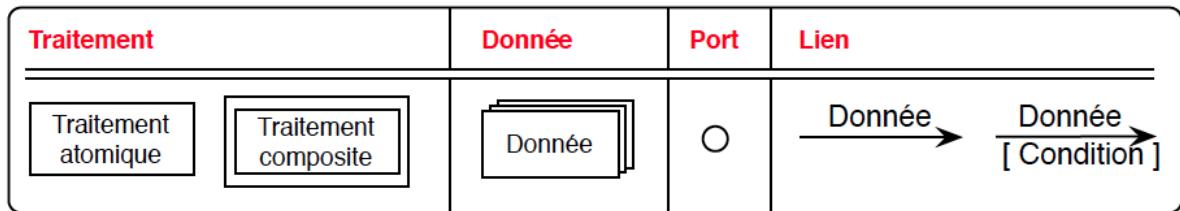


FIGURE 2.1 – Langage graphique proposé par Yuan Lin (Lin, 2011)

A ce stade, nous utiliserons, pour formaliser les chaînes de traitements, le formalisme défini par Yuan Lin (cf. fig 2.1).

#### Description générale

Le schéma 2.2 explique de façon très simplifié le fonctionnement du SIEL. A partir de données statistiques et de données vectorielles le SIEL exécute des chaînes de traitements et fournit en sortie des indices de risque multi-usage.

#### Chaîne de traitements abstraite

Les traitements du SIEL peuvent être divisés en plusieurs sous-catégories :

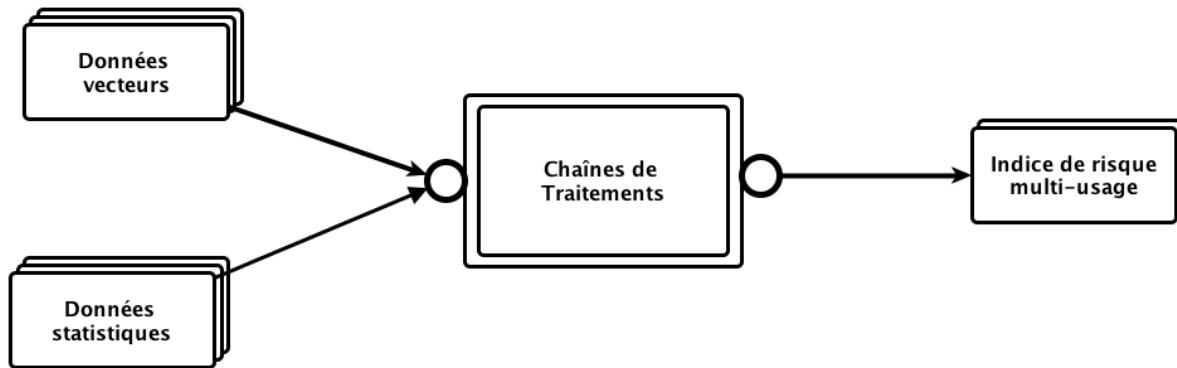


FIGURE 2.2 – Description générale du SIEL

- Les traitements liés au territoire d’exploitation potentiel<sup>3</sup>
- Les traitements liés aux unités spatiales de référence<sup>4</sup>
- Les traitements liés aux indices de risque multi-usages

Les données d’entrée du SIEL sont des données vecteurs et des données statistiques. Au cours de l’exécution de la chaîne, des données intermédiaires sont également créées (au format raster, vecteur et statistique).

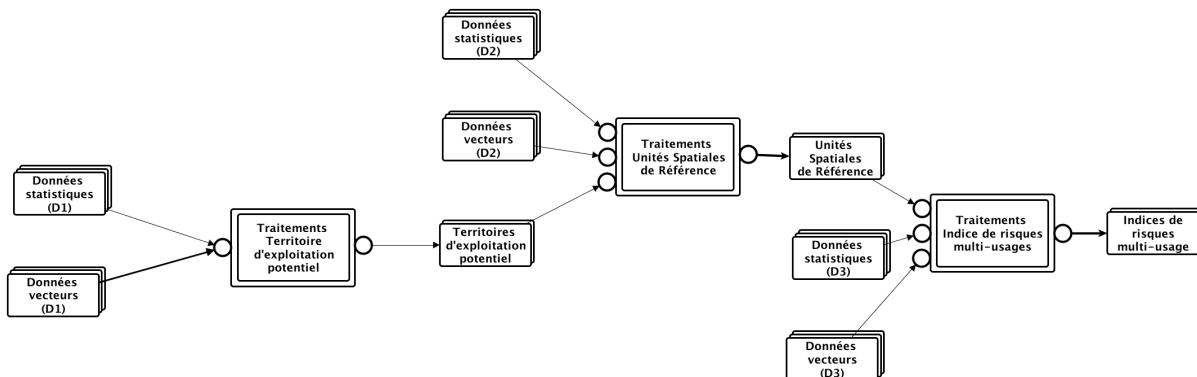


FIGURE 2.3 – Chaîne abstraite du SIEL

3. Aire potentielle d’exploitation des ressources naturelles par un ou plusieurs groupes d’agents autour d’un centre d’activités, pour une période d’observation donnée. (Loireau *et al.*, 2012)

4. Une Unité Spatiale de Référence (USR) correspond à une délimitation spatiale d’un paysage par voie de modélisation (Loireau *et al.*, 2012)

**Chaîne de traitements abstraite avec traitements élémentaires**

Le SIEL délimite dans un premier temps les territoires d'exploitation potentiels. Par la suite, le calcul des besoins et la spatialisation des pratiques permettent de délimiter les pratiques sur le territoire et plus précisément, à partir d'une intersection avec les unités paysagères, de créer des unités spatiales de référence.

A partir de différentes données d'entrée, le SIEL spatialise les prélèvement ce qui permet de déterminer les prélèvements en fonction de l'usage et de l'aire. Ce résultat temporaire et les unités spatiales de référence permettent finalement de calculer les indices de risque multi-usage en analysant l'usage par rapport aux prélèvements.

Les figures [2.4](#) et [2.5](#) montrent les traitements élémentaires du SIEL.

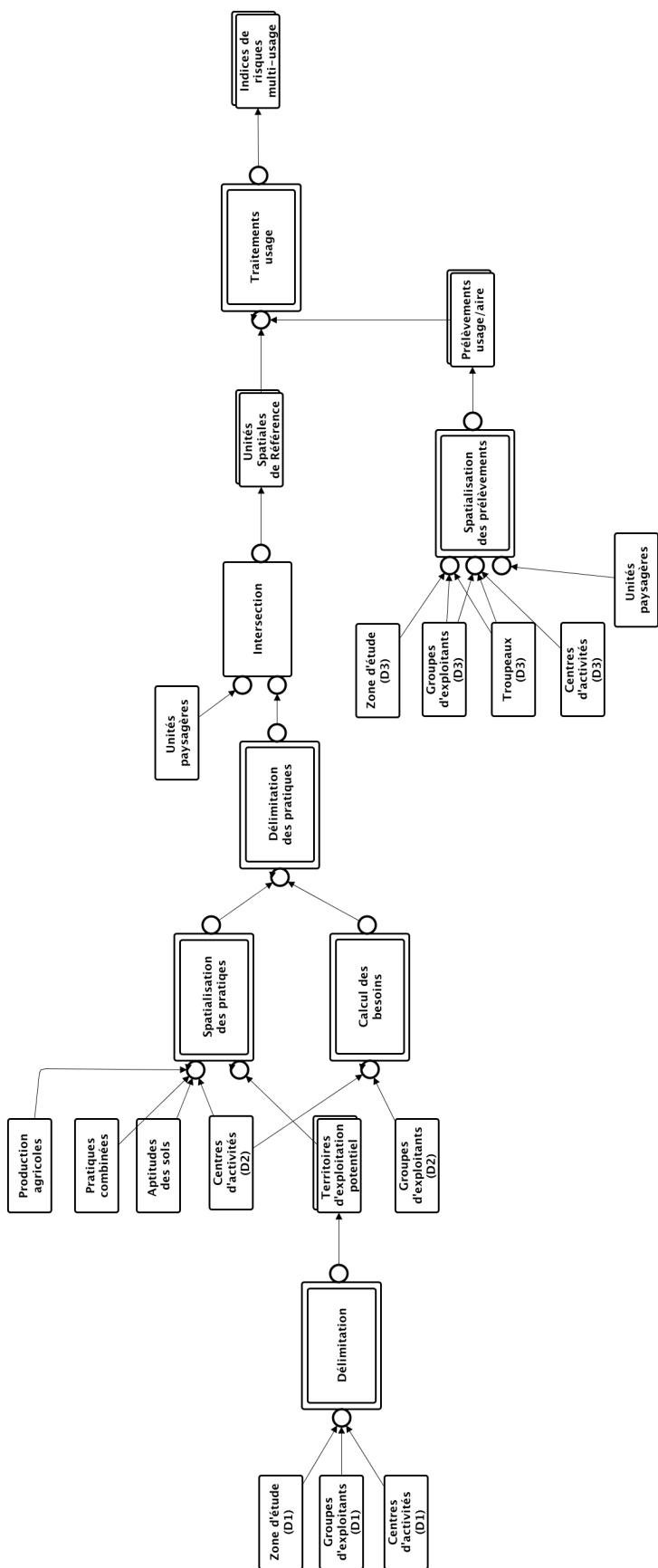


FIGURE 2.4 – Chaîne abstraite avec traitements élémentaires du SIEL

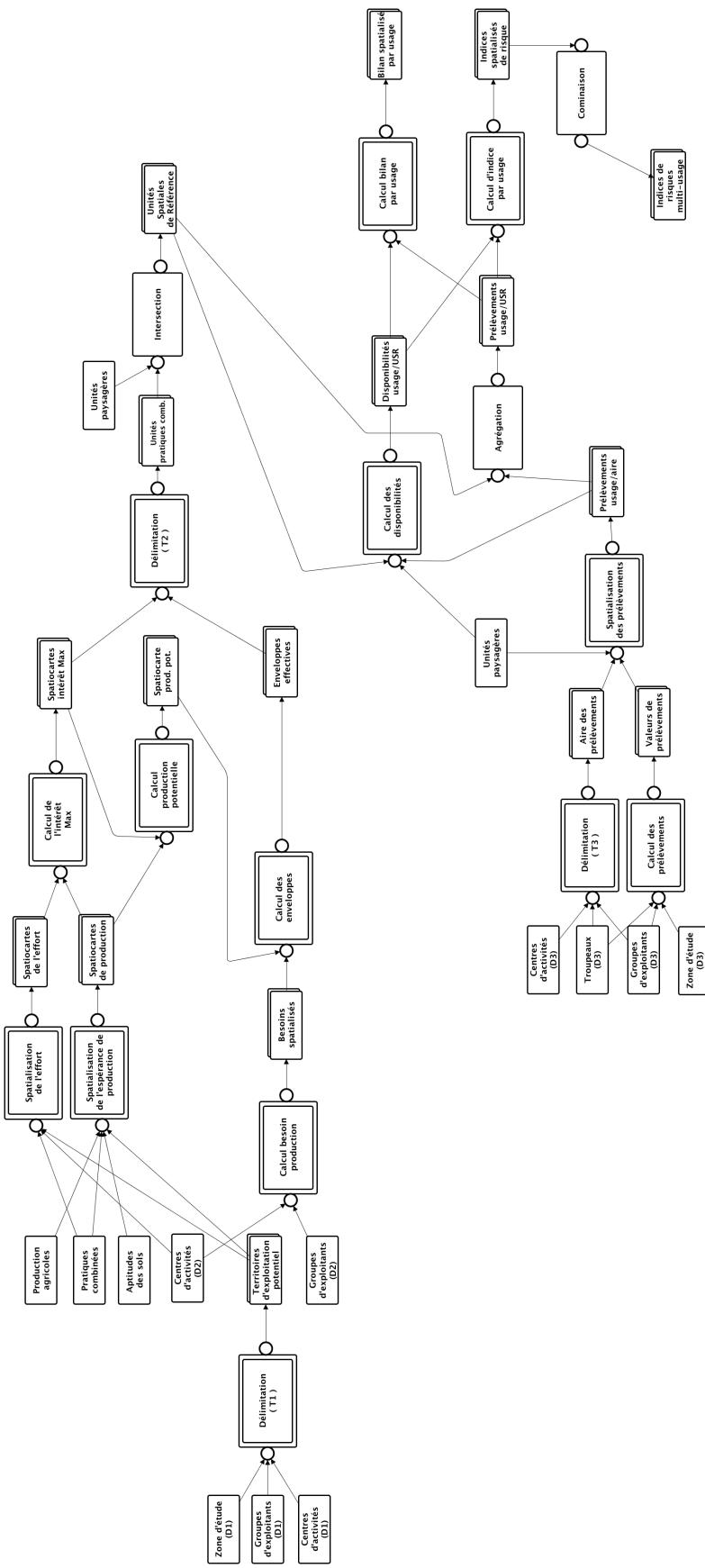


FIGURE 2.5 – Chaîne abstraite de plus en plus détaillée

## 2.3 Problématiques du stage

Étant donné la pluridisciplinarité du sujet de stage, les problématiques se regroupent en 2 catégories :

- Problématiques environnement-santé : Paludisme et les facteurs de risque de transmission
- Problématiques informatiques : Conceptualisation des chaînes de traitements dans le contexte environnement-santé, choix de l'architecture et implémentation des outils (chaîne de traitements et logiciel ouvert).

Concernant le thème 'environnement-santé', la problématique principale est la compréhension du phénomène, la définition des facteurs de risque et la formalisation des éléments nécessaires à la mise en œuvre de la chaîne de traitements.

Au niveau informatique les points à traiter relèvent du choix de l'architecture informatique et de la réalisation d'un prototype de chaîne de traitements. Les principes de réutilisation et de généréricité nous amènent à réfléchir sur une architecture "boîte blanche", qui consiste à ouvrir la boîte de la chaîne de traitements et à la déstructurer en boîtes élémentaires réutilisables. Le logiciel "ouvert" ainsi obtenu, permettra d'exécuter chaque traitement de la chaîne indépendamment les uns des autres et à les combiner selon les besoins de l'utilisateur.

En résumé la problématique générale du stage se dégage :

**Conceptualisation et développement d'outils pour cartographier des indicateurs relatifs à divers risques environnementaux.**

## CHAPITRE 3

# Etat de l'art sur le thème environnement-santé

---

Sans être exhaustifs, nous relatons ici, les principes relatifs au thème environnement-santé appliqué au paludisme, puis un rapide survol des logiciels et chaînes de traitements existants traitants d'indicateurs de risque épidémiologique.

## 3.1 Interactions environnement-santé

Je me suis focalisé dans un premier temps sur la définition des facteurs de risque de transmission dans le contexte des interactions environnement-santé et plus précisément dans le contexte de la maladie du paludisme. Dans une première partie les termes pertinents pour ce travail sont définis. Par la suite sont expliqués de façon détaillée les facteurs de risques de transmission identifiés à partir d'une recherche bibliographique.

### 3.1.1 Définitions

#### Approche environnement-santé

L'approche environnement-santé s'intéresse à l'influence de la qualité de l'environnement physique, chimique et biologique sur la santé des hommes et des animaux d'un point de vue spatial et dynamique. Il s'agit donc d'une science dont les frontières sont extrêmement difficiles à délimiter tant les domaines couverts sont potentiellement vastes et susceptibles d'interférer les uns avec les autres (AFSSET, 2006).

#### Paludisme

Le paludisme, appelé également malaria, est une parasitose due à un protozoaire transmis par la piqûre de la femelle d'un moustique (**anophèle**), provoquant des fièvres intermittentes. Le paludisme est la maladie vectorielle la plus commune dans le monde avec une estimation de 216 millions de cas et 665000 décès en 2010 (WHO, 2012) principalement dans les régions tropicales et en Afrique sub-saharienne. Ces chiffres seraient bien inférieurs à l'étendue réelle

de cette maladie, dont la mortalité est tout de même observée à la baisse grâce à l'action positive des programmes de contrôle (Murray et al, 2012).

Le médecin français Alphonse Laveran a découvert la cause de la maladie en 1880 à Constantine (Algérie). Le moustique anophèle se reproduit dans les zones marécageuses. Le parasite qui possède plusieurs hôtes intermédiaires, dans l'état endémique, infecte les cellules hépatiques de la victime puis circule dans le sang. Au cours de son cycle de vie, le parasite à l'intérieur de l'organisme humain, fait un certain nombre de transformations qui lui permettent d'échapper au système immunitaire humain. Au final, lorsqu'un moustique non-infecté pique une personne contaminée, le parasite est également transmis de l'homme au moustique.

En France et dans les autres pays développés, le paludisme a disparu depuis les années 1960. Malgré tout, depuis les années quatre-vingt les nombreux voyages effectués dans les pays où il est endémique, notamment dans les régions tropicales et subtropicales ont causé une réapparition de la maladie dans les pays développés.

Actuellement, le paludisme est responsable de plus de 300 millions de cas de maladie aiguë et d'au moins un million de décès dans le monde. Quatre-vingt-dix pour cent des décès dus au paludisme surviennent en Afrique, au Sud du Sahara, principalement chez les jeunes enfants. De nos jours, aucun vaccin efficace n'a encore pu être développé et les scientifiques doutent de plus en plus qu'ils trouveront un jour la solution miracle contre cette maladie (Faire reculer le paludisme, 2010).

## **Vulnérabilité**

La vulnérabilité dans le domaine de l'environnement-santé est la probabilité qu'une personne soit affectée (dans notre cas d'étude de la source d'une maladie) en fonction de sa susceptibilité aux effets de l'aléa et du niveau d'exposition. La précarité social et la vulnérabilité médicale sont étroitement associées et s'additionnent souvent (Picheral, 2001).

## **Aléa**

Pour définir l'aléa pour le risque sanitaire, nous nous appuyons sur les travaux de (C. Aschan-Leygonie, 2009). Ces auteurs définissent l'aléa comme une menace d'origine naturelle ou humaine sur un système et distinguent deux types d'aléas. Les perturbations sont des événements ponctuels, repérables dans le temps, dont l'ampleur dépasse la variabilité habituelle du phénomène. Le « stress » est un autre type d'aléa qui exerce une pression continue sur le système, mais dont la variabilité est limitée.

## Risque

Le risque peut être défini comme la combinaison entre l'aléa et la vulnérabilité. Le risque est la probabilité, aléatoire ou non d'un événement qui menace la santé ou met en danger la vie d'un individu ou d'une population. Le risque dépend de la capacité d'une population ou d'un système de faire face à des menaces (aléas). On peut distinguer des risques de nature différente : risques génétiques, risques naturels, risques anthropiques ou risques technologiques (Nord-pas-de-Calais, 2010).

En France et dans les pays de développement le paludisme a disparu parce que les responsables ont été capables de diminuer au minimum la vulnérabilité de la population et leur exposition au risque (en éradiquant les moustiques par exemple).

D'autres notions associées au risque doivent être prises en compte dans l'analyse d'un risque sanitaire. La perception d'un risque donnée varie d'une personne à une autre, d'une société à une autre et conduit à des comportements protecteurs différents. Aussi l'enjeu du risque varie selon les personnes : être malade peut avoir des conséquences sociales et économiques graves pour un foyer, tout comme pour une société.

## Facteur de risque

Un facteur de risque est la caractéristique individuelle ou collective, endogène ou exogène, augmentant de façon statistiquement significative la probabilité d'apparition et de développement d'une maladie. Un facteur de risque n'est donc pas une "cause". Il est également important de différencier facteur de risque et marqueur de risque (par exemple âge, sexe, groupe sanguin etc) car tout facteur de risque peut être contrôlé ou supprimé (Picheral, 2001).

Dans le cadre de cette étude, les facteurs de risques sont l'ensemble des éléments qui augmentent la probabilité que la maladie (le paludisme) se développe sur un territoire. Un facteur de risque concerne donc aussi bien les aléas que la vulnérabilité. L'ampleur d'un risque, sa fréquence, sa durée, son aire d'extension et de diffusion éventuelle (espace à risque) à sont fonction de facteurs de risque.

## Indicateur

Selon la norme ISO 8402, un indicateur est une "information choisie, associée à un phénomène, destinée à en observer périodiquement les évolutions au regard d'objectifs périodiquement définis". Un indicateur est donc une variable qui décrit un élément d'une situation ou une évolution d'un point de vue quantitatif. Un indicateur est un outil d'aide à la décision et n'a d'intérêt que par les choix qu'il aide à faire dans ce cadre (ANAES, 2002).

## **Carte de risque**

Une carte de risque permet de visualiser les zones de risque principales face à un "risque" spécifique. Une carte de risque est généralement obtenue en combinaison des cartes de vulnérabilité (par exemple densité de population) et des cartes d'aléas (par exemple proximité d'une surface d'eau ou de végétation dans le cas du paludisme). Ces cartes permettent, dans le futur, d'aménager le territoire de façon plus adapté au risque et de savoir par exemple, quels quartiers d'une ville sont particulièrement exposés à un risque. Une carte de risque permet de présenter de façon synthétique les risques. De telles cartes doivent être prudemment interprétées et utilisées et ne pas être distribuées sans explications. La façon de présenter et de discréteriser les données dans une carte peut conduire à de mauvaises interprétations.

### **3.1.2 Facteurs de risque de transmission du paludisme**

En me basant sur une recherche bibliographique, j'ai élaboré une liste des différents facteurs causant respectivement le développement et la transmission du paludisme et qui sont susceptibles d'agrandir la vulnérabilité des habitants sur un territoire. Les facteurs peuvent être les mêmes pour d'autres maladies climato-dépendantes. Les facteurs sont regroupés en 3 catégories : Les facteurs liés à l'environnement, les facteurs biologiques et les facteurs humains. Les facteurs jouent un rôle plus ou moins important dans le développement du paludisme. Pour chaque catégorie un tableau présentera les différents facteurs. Chaque facteur sera par la suite expliqué en détail afin d'illustrer les caractéristiques spécifiques à chaque facteur de risque.

## Facteurs environnementaux

Les facteurs environnementaux sont en lien direct avec par exemple les conditions météorologiques ou avec la morphologie des sols sur un territoire. Toutes ces conditions vont influencer le risque que le paludisme puisse être transmis sur un territoire.

Numéro	Facteur
1	Précipitation
2	Température
3	Distance au point d'eau le plus proche
4	Caractéristiques du point d'eau
5	Altitude
6	Humidité
7	Humidité du sol
8	Température mois précédent les précipitations
9	Végétation

**Précipitation :** Les précipitations sont parmi les facteurs de risque les plus importants du paludisme puisqu'elles conditionnent l'écologie des moustiques, vecteurs des parasites. En examinant des territoires avec des cas de paludisme et des territoires sans cas de paludisme, il faut qu'il pleuve pendant 3 à 5 mois au moins 80 mm par mois pour que le paludisme puisse se développer (Adjuik *et al.*, 1998). Les précipitations créent également des points d'eau temporaires, souvent difficilement repérables et idéaux pour le développement des moustiques. Ces points d'eau temporaires sont généralement de bonne qualité (non-pollués), ce qui est un autre facteur important.

**Température :** Le pourcentage de survie des moustiques sur un territoire est étroitement lié à la température (Ermert *et al.*, 2011a). Les moustiques disparaissent à partir d'une température de moins de 5°C et ne supportent pas des températures supérieures à 40°C. D'autres expériences montrent également que les moustiques ne peuvent pas survivre les 56 jours de leur cycle de reproduction normal si les températures sont inférieures à 16°C et/ou supérieures à 32°C. La température idéale pour le cycle de reproduction du moustique est de 22°C. Dans ce cas-là, le cycle est fini après seulement 22 jours. (Adjuik *et al.*, 1998)

**Distance point eau** Les moustiques anophèles peuvent se déplacer d'un maximum de 7 kilomètres par rapport à un point d'eau (Ermert *et al.*, 2011a). Les hommes habitant à plus de 7 kilomètres d'un point d'eau (de bonne qualité) ne sont donc, en théorie, exposés à aucun risque

de paludisme. Néanmoins il est plutôt rare, notamment dans les pays en développement et donc dans les zones de risque majeures du paludisme que les gens habitent aussi éloigné d'un point d'eau. En plus, des expériences ont démontré que les moustiques infectés du paludisme peuvent être amenés par des voitures (par exemple) dans des zones non-vulnérables auparavant.

**Caractéristiques du point eau** La surface et surtout la turbidité de l'eau jouent un rôle non négligeable dans le développement du paludisme. Lorsque le courant est trop fort, les œufs des moustiques sont lavés, les moustiques ne peuvent donc pas se reproduire. Des essais en laboratoire (Minakawa *et al.*, 1999) ont montré que les moustiques anophèles pondent plus d'œufs dans les points d'eau se situant sur des sols inondés ou humides que dans de l'eau "sans sol". En plus, les moustiques anophèles n'aiment pas, en général, les habitats ombragés tels que des réservoirs d'eau sans substrats de sol. En effet, le sol fournit des éléments nutritifs qui favorisent l'accumulation de bactéries qui sont la source de nourriture pour les larves.

**Altitude** L'altitude maximale retenue généralement est de 2000m. Ce facteur est bien évidemment étroitement lié au facteur de la température car la température diminue de 0.7°C tous les 100 mètres.

**Humidité de l'air** L'humidité relative de l'air a un impact important sur la présence et la persistance des sites de reproduction des moustiques. Le taux de survie des moustiques est également influencé par ce facteur.

Le facteur peut être extrait à partir d'autres facteurs météorologiques comme les précipitations et la température mais doit être utilisé avec précaution . L'humidité est fortement influencée par la température de l'air et peut donc significativement changer pendant un seul jour. A noter que ce facteur dépend également de l'altitude. L'humidité idéale pour les moustiques est de 60 % (Protopopoff *et al.*, 2009).

**Humidité du sol** L'humidité du sol dépend directement des températures, de la végétation ou de la présence de points d'eau. Ce facteur est particulièrement intéressant car il peut être extrait à partir des images satellites. (Machault *et al.*, 2011)

**Végétation :** Certains types de végétation servent comme habitat pour les moustiques adultes.(Minakawa *et al.*, 1999) (à revoir)

### Facteurs biologiques = marqueur de risque

Les facteurs de risque de transmission biologiques sont liés par exemple à l'organisme humain ou à l'organisme du moustique. L'état de l'organisme humain, sous certaines conditions, peut augmenter le risque de l'apparition du paludisme sur un territoire. Certains de ces facteurs comme l'âge sont également des marqueurs de risque et ne peuvent pas être influencées respectivement modifiées.

Numéro	Facteur
1	Etat de santé de la personne
2	Densité du vecteur
3	Transmission Homme-Moustique
4	Immunité
5	Age

**État de santé de la personne** L'état de santé de la personne joue un rôle majeur dans le développement du paludisme. Les personnes les plus en risque sont les enfants de moins de trois ans et les femmes enceintes et donc les personnes avec les systèmes immunitaires les plus fragiles. Les adultes ou les adolescents présentent généralement des systèmes immunitaires suffisamment puissants pour combattre le paludisme. (Protopopoff *et al.*, 2009)

**Densité du vecteur** Pour combattre le paludisme, il n'est pas nécessaire d'éradiquer complètement les moustiques sur le territoire mais il suffit de réduire la densité vectorielle (Gaudart *et al.*, 2005). En général, la densité de l'anophèle diminue avec l'éloignement du gîte, avec la densité du tissu urbain et de la périphérie vers le centre (Gaudart *et al.*, 2005). En analysant les densités vectorielles sur différents territoires, il est possible de déterminer les végétations ou écosystèmes les plus favorables pour le développement des larves.

**Transmission Homme-Moustique** En cas de piqûre, un humain porteur du parasite du paludisme transmet la maladie aux moustiques non-infectés par avant. Ceci est un autre facteur de risque à ne pas négliger, le taux de transmission est de 20% (30% pour une transmission moustique-homme).

**Immunité** La capacité d'un organisme humain pour combattre l'infection du paludisme dépend de son immunité (Protopopoff *et al.*, 2009). A partir de 2 à 3 ans, l'organisme humain développe et augmente l'immunité indépendamment du nombre de piqûres. Dans des régions avec peu de piqûres, le nombre de cas cliniques et d'infection est le même pour tous les groupes

d'âge. Il faut donc que l'homme soit piqué régulièrement afin de développer une certaine immunité contre l'infection du paludisme.

**Age** Les enfants de moins de 3 ans sont piqués plus souvent, il semble que la proportion entre piqûres et un être humain soit liés à la taille du corps de l'hôte. (?)

### Facteurs humains

Les facteurs humains sont les facteurs liés à la présence humaine sur un territoire qui augmentent la vulnérabilité des habitants du territoire par rapport à la transmission du paludisme.

Numéro	Facteur
1	Urbanisation
2	Agriculture
3	Qualité système santé
4	Croissance démographique et Facteurs socio-économiques

**Urbanisation** L'urbanisation généralement diminue le risque du paludisme. Les points d'eau sont pollués, il y a peu de végétation etc. Ceci dépend malgré tout de la taille de l'urbanisation. Forcément, dans une grande ville le risque d'être piqué est moins grand car il y plus de "cibles" pour les moustiques, en même temps de nouveaux facteurs de risques peuvent apparaître comme par exemple les lumières et télévisions étant une source d'attraction pour les moustiques.

**Agriculture / Irrigation** Les activités agricoles influencent directement le risque du paludisme. Par exemple, en irriguant régulièrement les terres agricoles, ces surfaces (=surface d'eau temporaires et de bonne qualité) deviennent des endroits idéaux pour les moustiques pour pondre des œufs. La déforestation joue également sur le risque du paludisme. Des études récentes ont démontré que des habitations terrestres (des hommes) se situant en altitude, construits après une déforestation étaient des sites de reproduction préférés par les moustiques.(Krefis *et al.*, 2011)

**Qualité système de santé** La qualité du système de santé ou l'accès au système de santé influe directement sur le risque du paludisme (Protopopoff *et al.*, 2009). Des traitements préventifs permettent de réduire le taux de morbidité des femmes enceintes et des enfants, qui généralement ont le système immunitaire le plus fragile.

**Croissance démographique / Facteurs socio-économiques** Le statut socio-économique d'un individu est également d'importance. Les personnes les plus prospères sont capables de mieux se protéger contre les moustiques que les personnes très pauvres. Aussi, le niveau d'éducation peut influencer le risque de paludisme, sachant que souvent les personnes n'utilisent pas les filets anti-moustiques mis à leur disposition car ils ne comprennent pas vraiment le risque d'être piqués et le risque de paludisme, le niveau d'éducation des habitants est également à prendre en compte.

Le type d'habitat de l'homme joue également un rôle important. En fonction du type d'habitat, le moustique peut entrer plus ou moins facilement dans l'habitat et piquer l'humain. Certains types d'habitats (en fonction du type de construction) peuvent même servir comme lieu d'habitat aux moustiques.

### Alea et Vulnérabilité selon les facteurs

Les différents facteurs peuvent être regroupés en deux catégories différentes : les facteurs liés à l'aléa et les facteurs liés à la vulnérabilité. Certains facteurs peuvent créer un aléa et une vulnérabilité en même temps. Par exemple, en irriguant des terres, les agriculteurs créent involontairement un aléa (en créant des points d'eau temporaires) et aggravent en même temps la vulnérabilité des habitants du territoire. La figure 3.1 récapitule quels facteurs peuvent être à la base d'un aléa et lesquels peuvent agraver la vulnérabilité.

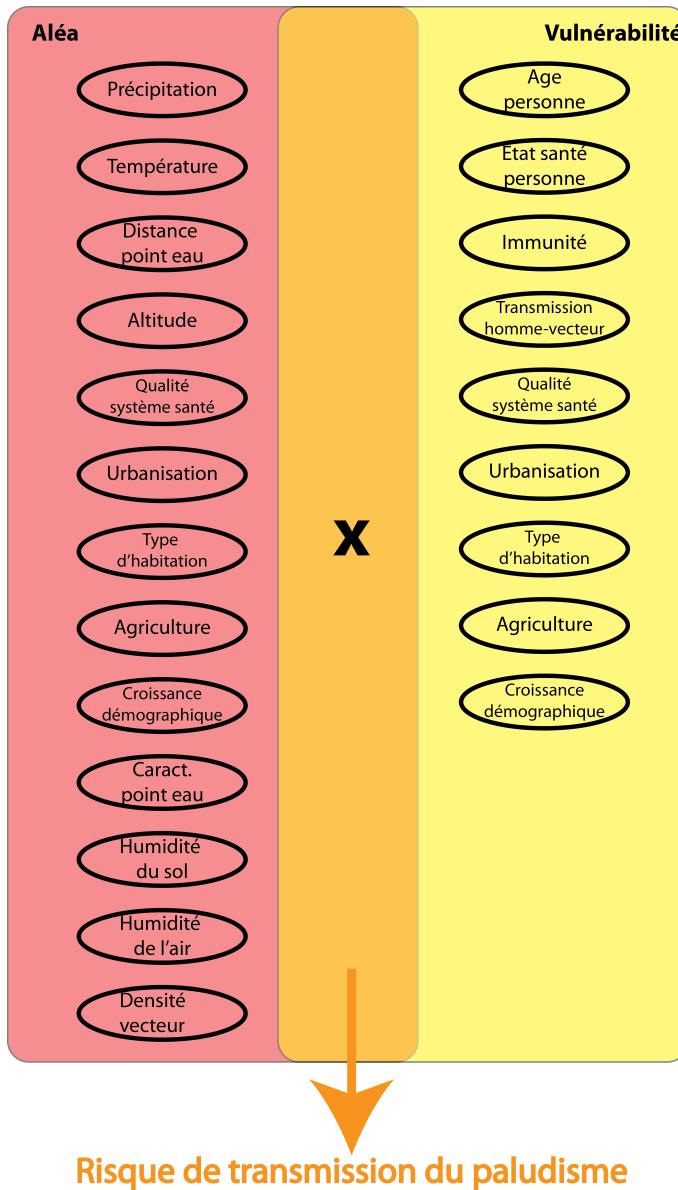


FIGURE 3.1 – Alea et Vulnérabilité selon les facteurs

## 3.2 Approches logicielles existantes

Nous nous sommes simultanément intéressés aux logiciels et aux chaînes de traitements existants qui traitent les mêmes problématiques et / ou des problématiques similaires. Je présenterai dans cette partie du mémoire les approches logicielles que j'ai pu découvrir en faisant des recherches.

Nous avons focalisé nos recherches sur des outils qui se basent sur le principe d'analyse par rapport à l'existence de certaines variables (par exemple présence de points d'eau sur un terri-

toire). Un autre principe d'analyse aurait été de définir le risque à travers l'absence de certaines variables (par exemple pas de végétation à proximité des lieux d'habitation des population).

### **Repast Simphony**

Repast Simphony est une plate-forme de modélisation basée sur **Java**. Repast Simphony est un plugin **Eclipse** et permet de développer des programmes avec de nombreuses interactions. Repast Symphony a déjà été utilisé dans de nombreux domaines, comme en sciences sociales ou en sciences humaines.

### **Maxent**

Maxent est un logiciel gratuit qui permet de prédire la distribution potentielle (modélisation de l'habitat) des espèces animales ou végétales en se basant sur la distribution ponctuelle et certains facteurs environnementaux des espèces.

L'outil utilise comme variables d'entrée des données géoréférencées des animaux respectivement de la végétation à modéliser et des données appropriées aux variables environnementales (par exemple pluviométrie, température, topographie etc.) au format ASCII (format ESRI). La modélisation est basée sur la méthode de l'entropie maximum. L'outil livre en tant que résultat une carte indiquant l'apparition potentielle des espèces ainsi que d'autres résultats statistiques. La visualisation des résultats se fait à l'aide d'un système d'information géographique. L'outil a été développé en Java et est disponible pour tous les systèmes d'exploitation.

### **OpenModeller**

OpenModeller vise à fournir un environnement multi-plateformes permettant la réalisation de l'ensemble du processus de "**niches fondamentales**". Le logiciel facilite la lecture de l'occurrence des espèces et des données environnementales, la sélection des couches de données environnementales, la création d'un modèle de niche fondamentale et la projection du modèle dans un scénario de l'environnement. Un certain nombre d'algorithmes est également fourni sous forme de plugins et le logiciel permettant notamment de générer plusieurs modèles en utilisant différents algorithmes face à une même problématique. Le projet est Open Source, multi-plateforme et développé en C++.

### **3.2.1 Cas d'utilisation concret dans le contexte environnement-santé :**

#### **Le projet SimMasto**

Le projet SimMasto s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur la dynamique des populations de rongeurs. Il vise à développer une plate-forme générique de simulation des rongeurs dans leur environnement. Les données utilisées sont des cartes géographiques numériques, des cartes raster, des grilles théoriques etc. La chaîne de traitements qui a été développée comprend les éléments permettant le traitement des images d'entrée (géoréférencement, détourage, changement de résolution, clipping, etc.) ainsi que tous les éléments de programmation nécessaires.

La chaîne de traitements est composée de plusieurs "modules", comme par exemple :

- Géoréférencement d'une image de type raster
- Vectorisation d'une image de type raster (utilisation de la librairie Grass)
- Modification du système de coordonnées

La chaîne de traitements fait par la suite appel à Repast Symphony pour mettre en place une simulation. Dans Repast Symphony est implanté un SIG, c'est-à-dire les différents fichiers de formes géoréférencés créés par avant ainsi qu'un fichier raster (une grille). D'autres outils / bibliothèques utilisés dans cette chaîne de traitements sont par exemples **PostgreSQL / PostGIS** ou **Eclipse**.

## **3.3 Conclusion**

Dans le contexte choisi de l'environnement-santé, le premier travail a consisté à s'approprier la terminologie et à rechercher les outils logiciels existants.

Nous disposons des différentes définitions clairement établies, par contre sur le volet informatique, aucun outil ne semble proposer la solution attendue. En effet il n'existe pas, à notre connaissance et à ce jour, de chaîne de traitements automatisée permettant de cartographier facilement les zones de risque du paludisme.

Il est donc particulièrement intéressant de proposer des prototypes d'outils permettant de cartographier les indicateurs relatifs à divers risques environnementaux.

# CHAPITRE 4

# Méthodologie

---

L'objectif principal du stage est de proposer un outil et une architecture logicielle permettant d'automatiser les **traitements** nécessaires pour cartographier le risque dans le contexte du paludisme (environnement-santé). Calculer le risque ou les indicateurs revient à définir des chaînes de traitements. Celles-ci sont conceptualisées à partir de l'expertise du domaine.

Une première partie d'analyse est dédiée à la compréhension du phénomène (paludisme) et à la conceptualisation des chaînes de traitements. Un modèle conceptuel UML des éléments nécessaires à l'élaboration des indicateurs permet de dégager les facteurs de risque les plus pertinents. A partir des données disponibles, un deuxième modèle UML simplifié servira comme base pour la définition des traitements nécessaires à l'élaboration et au développement de la chaîne. Dans un second temps, des **modèles conceptuels** des traitements permettent de d'analyser et de définir les différentes étapes nécessaires pour le développement informatique.

Dans une deuxième partie nous présentons l'architecture informatique des outils ainsi que tout le travail de conception mené autour du développement informatique.

Finalement, nous présentons l'opérationnalisation et l'implémentation des deux outils.

## 4.1 Analyse

Le cycle du paludisme (4.1) permet de comprendre de façon simplifiée le développement du paludisme. Ce qui est le plus important à retenir est que le moustique (qui a son propre cycle de développement) pique et infecte l'homme et les parasites se développent dans le foie et le sang de l'homme. Par la suite, un homme porteur du parasite piqué par un moustique sain, infecte celui-ci. Le cycle est donc complexe.

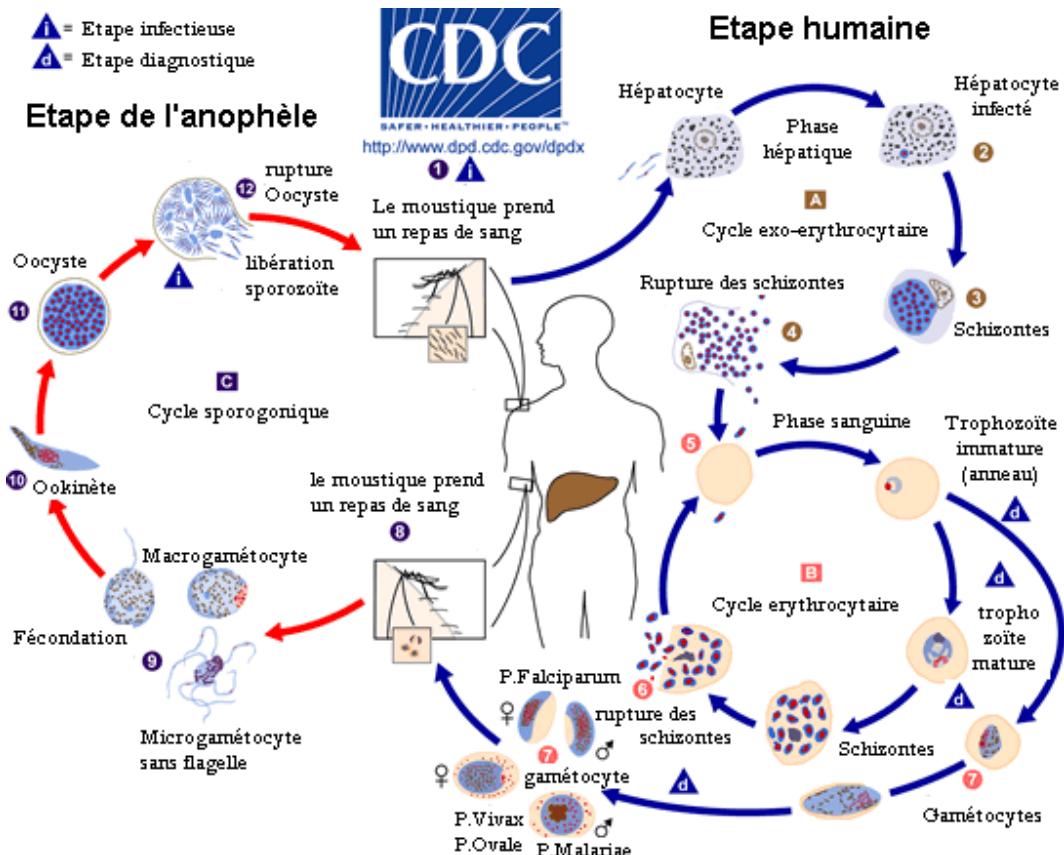


FIGURE 4.1 – Cycle du paludisme (Extrait de [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Malaria\\_LifeCycle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Malaria_LifeCycle))

### Modèle conceptuel des éléments nécessaires à l’élaboration des indicateurs

Le modèle conceptuel des éléments nécessaires à l’élaboration des indicateurs (4.2) permet d’avoir une vue d’ensemble des facteurs qui interviennent dans le développement du paludisme et qui peuvent être une source de risque. Les grandes caractéristiques du paludisme ont été définies dans une démarche participative lors d’une réunion avec des experts de différents domaines. A partir de ces caractéristiques j’ai élaboré un modèle conceptuel UML.

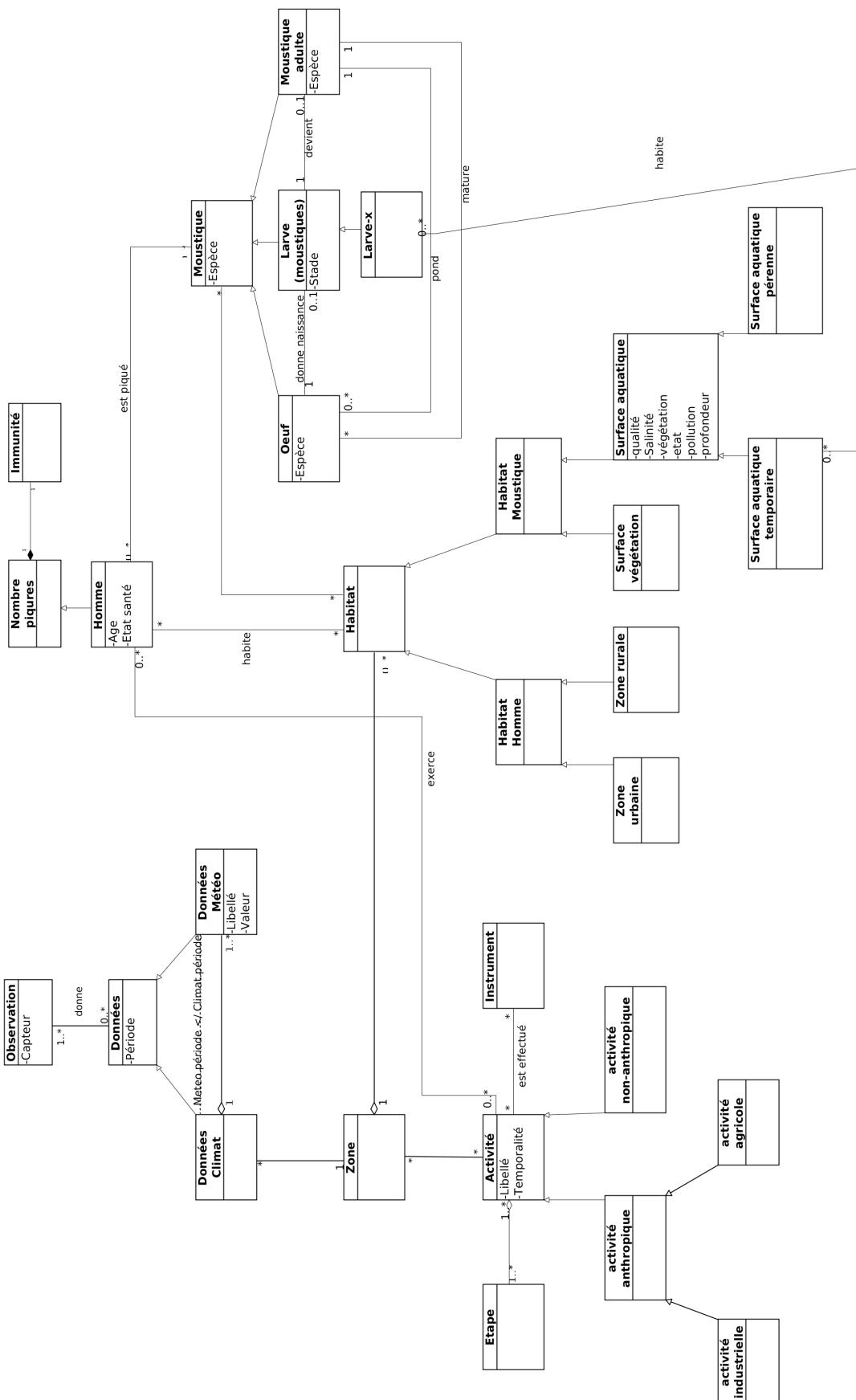


FIGURE 4.2 – Modèle conceptuel UML des éléments nécessaires à l’élaboration des indicateurs

## Précision modèle conceptuel

Des observations ont été effectuées sur un territoire (dans notre cas le village de Bandiagara au Mali). Les **observations** sont réalisées à l'aide de capteurs, comme par exemple des satellites. Une observation crée des **données** pour une période donnée. Dans le contexte de ce travail, il faut différencier les **données climat** et les **données météo**, c'est-à-dire que nous allons plutôt utiliser des données météo, qui elles font partie de données climatologiques. Les données climatologiques (généralement 30 ans) sont enregistrées sur une période plus longue, pour définir les grands principes du climat sur un territoire. Une donnée climatologique comprend donc plusieurs données météo, par exemple la température moyenne sur le territoire pendant le mois de Janvier 2008. Une donnée climatique correspond à une **zone** définie. Sur cette zone sont exercées des **activités**. Ces activités sont effectuées à l'aide d'**instruments**. Une activité se divise en plusieurs étapes et peut être de type **anthropique** ou de **typenon-anthropique**. Une activité anthropique est une activité relative à l'activité de l'homme comme par exemple les activités industrielles ou agricoles.

Les hommes habitent des **zones rurales** ou des **zones urbaines**. Cette différenciation est très importante, par exemple en zone urbaine le risque d'être infecté par le paludisme est beaucoup plus faible qu'en zone rurale car généralement les **eaux de surface** sont trop polluées pour abriter le moustique. Les moustiques ont besoin d'**habitats** et d'endroits pour pondre leurs œufs. Les *larves* nécessitent des surfaces aquatiques. La qualité, la salinité etc. d'une surface d'eau, la pollution et la profondeur jouent un rôle déterminant dans le cycle du développement de la larve. Généralement dans les zones à risque les **surfaces aquatiques pérennes** sont trop polluées et ne permettent pas le développement du moustique. Ainsi, un des facteurs de risque majeurs du paludisme est la présence de **surfaces aquatiques temporaires** car elles servent de lieu de pontage des œufs de moustique jusqu'à ce que les larves deviennent des moustiques. Les **moustiques adultes** généralement habitent des surfaces de végétation. Finalement les moustiques piquent les hommes. En fonction des nombres de piqûres, de l'âge de l'homme et de son état de santé, l'homme développe une certaine immunité. Un **homme** porteur du parasite peut également infecter un moustique non infecté auparavant.

### 4.1.1 Données disponibles

Nous disposons d'un certain nombre de données et d'informations relatives au territoire d'étude (Ville de Bandiagara). Ces données ont été extraites par Nadine Dessay à partir d'une image à très haute résolution Quick Bird (précision...). Les données correspondent aux facteurs de risque suivants :

- Végétation
- Eau
- Bâtiments

En plus, nous disposons de données statistiques (données matricielles) issu d'un recensement de la population de la ville de Bandiagara en 2004 (14133 habitants) et des limites administratives des quartiers obtenues à partir de relevés GPS sur le terrain.

#### 4.1.2 Modèle UML simplifié

A partir des données disponibles, nous avons élaboré un modèle conceptuel simplifié qui a servi comme point de départ pour la conceptualisation et l'élaboration de la chaîne de traitements. La partie concernant les activités effectuées sur une zone donnée a été écartée du modèle car il sera quasiment impossible de disposer de ces données. Il en est de même pour le cycle de vie du moustique qui n'interviendra pas dans les traitements. Finalement le modèle suivant a été retenu :

Le modèle conceptuel simplifié comprend les catégories de risques suivantes :

- Données climatologiques (précipitations, température etc). => aléa
- Présence de surface d'eau (temporaires ou pérennes) => aléa
- Présence de surface végétales => aléa
- Habitations humaines => vulnérabilité

La présence humaine est indispensable pour qu'il y ait un risque (vulnérabilité) dans une zone. La présence de bâtiments a été retenue comme facteur de risque lié à cette présence humaine. Les surfaces végétales et les surfaces d'eau sont retenues respectivement comme lieu d'habitation potentiel pour les moustiques anophèles et pour les larves de moustiques anophèles.

Ce modèle UML simplifié nous a servi de base pour conceptualiser le raisonnement de construction des indicateurs et la définition des traitements.

## 4.2 Raisonnement

A partir des données disponibles, du modèle conceptuel simplifié et en collaboration avec des experts dans le domaine de l'environnement-santé et de la télédétection le raisonnement

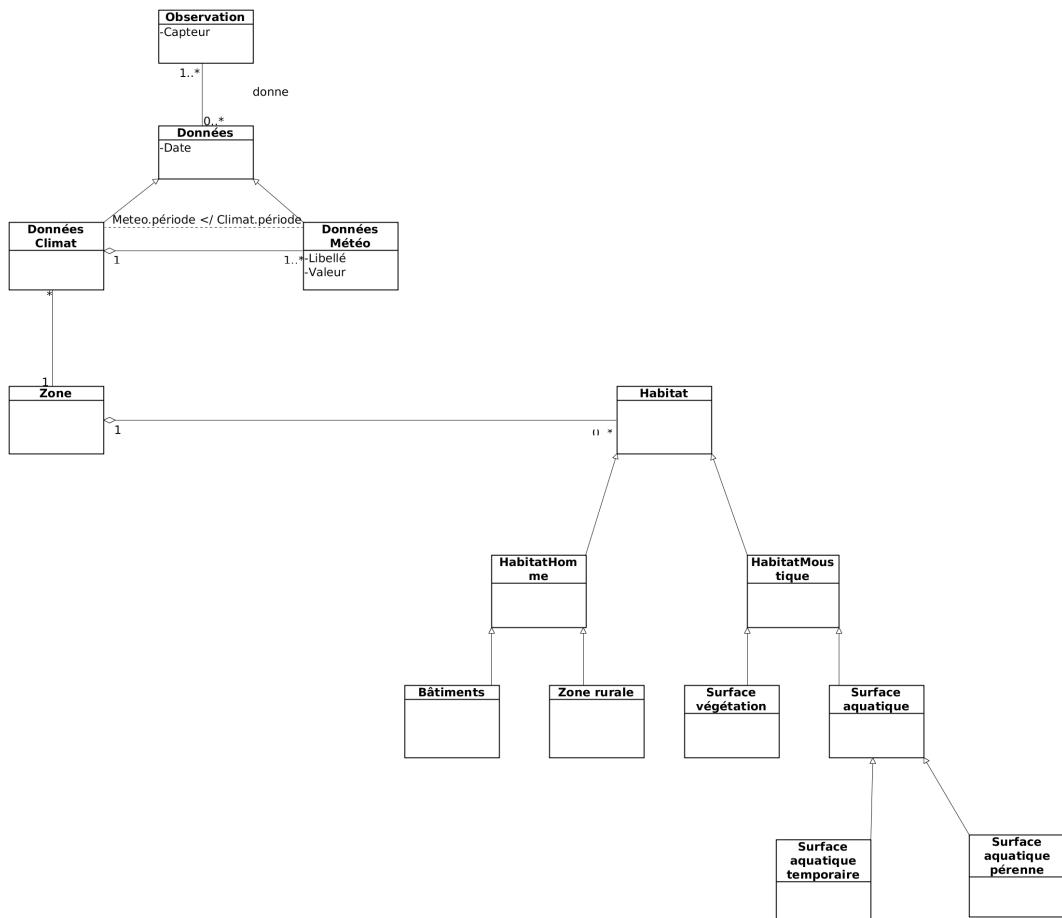


FIGURE 4.3 – Modèle UML simplifié des indicateurs du paludisme

nous a permis de définir les traitements nécessaires pour l'élaboration de cartes de risque du paludisme. Nous nous sommes basés sur les travaux réalisés par Nadine Dessay. Une fois les traitements nécessaires définis nous nous sommes intéressés à la conceptualisation de l'enchaînement des traitements et des données. Cette partie est indispensable pour comprendre le futur fonctionnement de la chaîne de traitements.

De façon très schématique le fonctionnement de la chaîne de traitements correspond au modèle suivant :

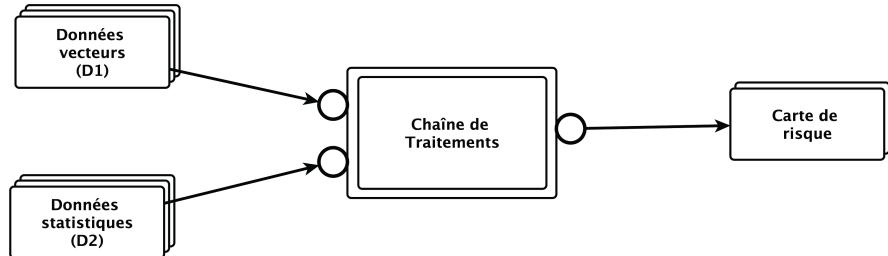


FIGURE 4.4 – Description générale de la chaîne de la chaîne de traitements

Des traitements sont effectués sur des données de format vecteur et sur des données statistiques pour obtenir en sortie une carte de risque. Nous expliquons dans un premier temps ce que fait un traitement et comment fonctionne une donnée. Ceci est fait à partir de **diagrammes de classes**.

Par la suite, des catégories de données et des catégories de traitements de la chaîne sont proposées à l'aide de **modèles conceptuels des hiérarchies**. Ceci permet de mieux comprendre le fonctionnement et les différentes étapes de la chaîne de traitements.

### 4.2.1 Description des données et des traitements

Nous allons décrire et expliquer les traitements réalisés au sein de la chaîne. Cette description peut être regroupée en 2 parties :

- La description globale de ce que fait un traitement
- La description des données

Dans la suite de cette partie, nous expliquons successivement les deux aspects cités ci-dessus. Le modèle (4.5) qui suit décrit le fonctionnement d'un traitement.

#### 1) Description globale de ce que fait un traitement

Un traitement correspond à un propriétaire (contact), celui qui a respectivement développé

ou défini le traitement. Chaque traitement correspond également à une ou plusieurs fonctionnalités et à une catégorie de traitements. Un traitement informatique comme par exemple l'édition nécessite les fonctionnalités comme par exemple ouvrir un fichier ou exporter un fichier. Un traitement correspond à diverses catégories de traitement qui pour nous ont été déterminées et nommées : pré-traitements, traitements et post-traitements. (cf. (Lin, 2011))

Un traitement met en jeu trois types de données : des données d'entrée, des données de sortie et des données de paramétrage. Les données seront expliquées plus en détail dans le paragraphe (4.2.1) suivant.

#### Exemple d'un traitement : shp2pgsql

- Propriétaire : PostGIS / GDAL
- Fonctionnalité(s) : Transformation du format, Reprojection
- Catégorie : Traitement
- Donnée d'entrée : Fichier au format vecteur (shape)
- Donnée en sortie : Fichier au format ".sql"
- Donnée de paramétrage : postgis.sql, spatial\_ref.sql

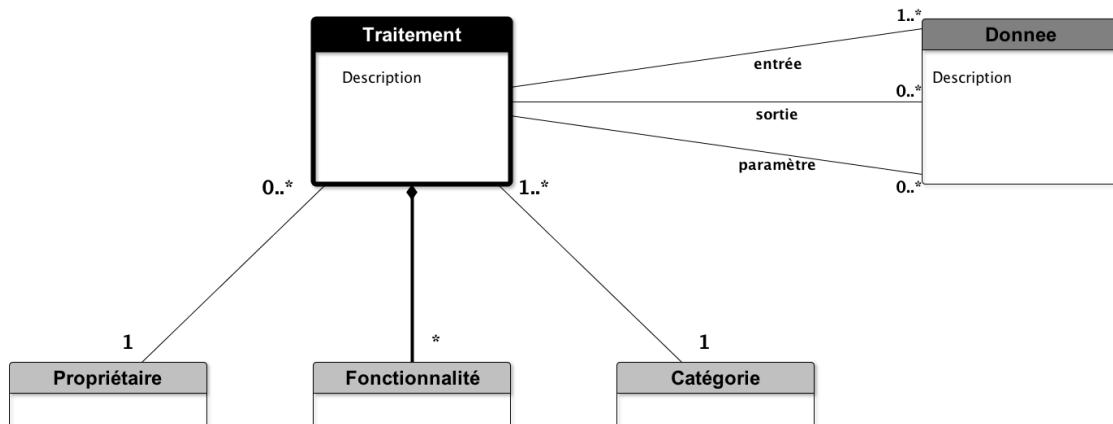


FIGURE 4.5 – Description du fonctionnement d'un traitement

## 2) Description des données

Décrire les traitements d'un système demande également de décrire les données utilisées. Une données correspond à une catégories de données, un propriétaire et un format. (cf. (Abd-el Kader, 2006))

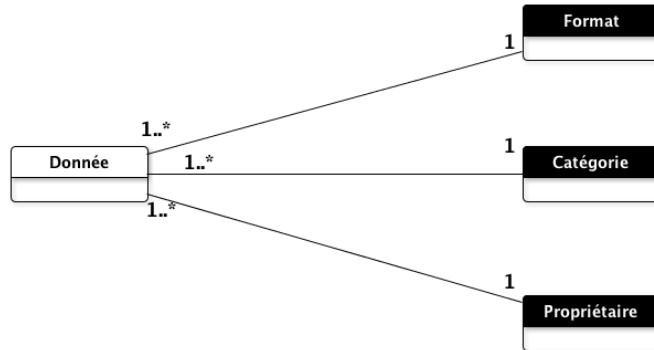


FIGURE 4.6 – Description des données

Dans le contexte de ce travail, les formats de données utilisés sont les suivants : Format vecteur (fichiers de forme géoréférencés), format raster (images composites géoréférencés) et format tableur (statistiques). Ces données correspondent à des fonctionnalités comme par exemple la création de zones tampons. Chaque donnée est également caractérisée par un propriétaire (contact) et une catégorie de données. Nous pouvons regrouper les données utilisées, dans notre contexte, en deux catégories principales : les données issues de capteurs satellites et les données récoltées sur le sol (stations ou capteurs au sol).

Exemple de donnée : **b\_bati.shp**

- Propriétaire : Nadine Dessay
- Catégorie : Raster
- Format : vecteur (shape)

## 4.2.2 Les catégories de données et de traitements

### Les catégories de données

Le modèle conceptuel des catégories de données (4.7) décrit de façon formelle les catégories de données qui sont utilisées par la chaîne de traitements.

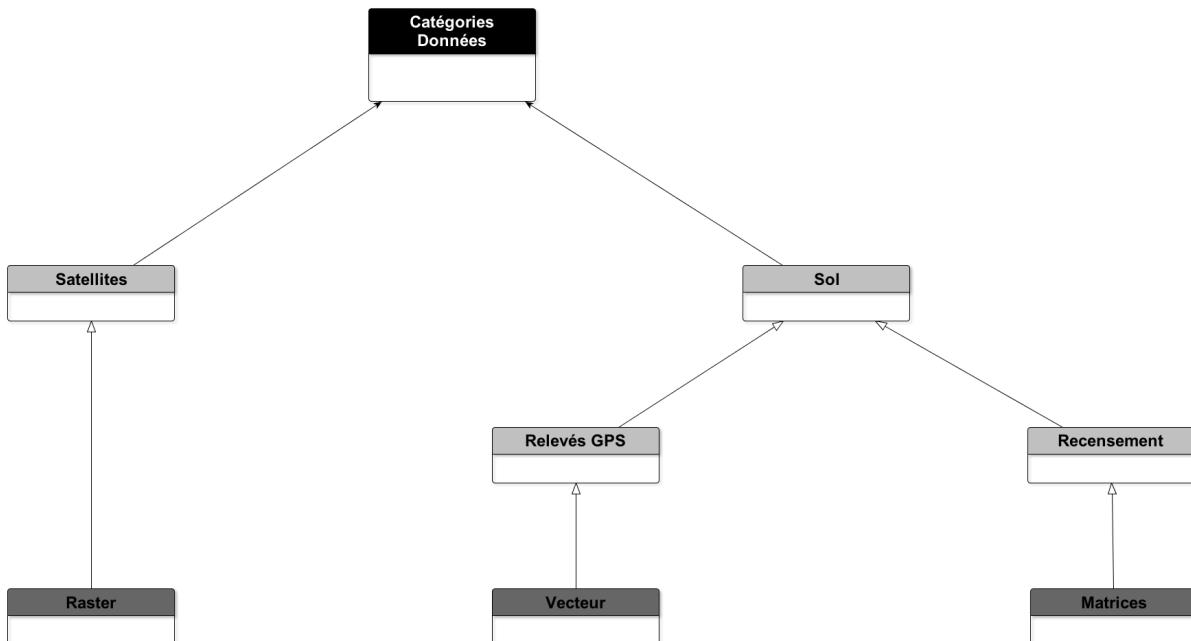


FIGURE 4.7 – Modèle conceptuel des catégories de données de la chaîne de traitements

Les données de la chaîne de traitements sont issues de sources diverses. Les **données issues de satellites** correspondent aux données obtenues à partir de satellites (passifs ou actifs). Les **données issues du sol** sont les données qui proviennent de capteurs ou de toute autre source se situant sur le sol terrestre.

Les satellites produisent des **images raster**, à partir desquelles, en ayant recours à des traitements de télédétection, peuvent être extraites de nombreuses informations. Pour notre chaîne de traitements, les informations suivantes ont été extraites par des experts en télédétection (Nadine Dessay) :

- Eau : Les surfaces d'eau
- Végétation : Les arbres etc.
- Urbanisation : Bâtiments

Les données récoltées sur le **sol** peuvent correspondre à différentes catégories. Par exemple, une station météo peut fournir des données de catégorie vecteur ou raster. Des relevés GPS fourniscent des vecteurs. Des statistiques (catégorie matrices) sont obtenues à partir de recensements de population par exemple.

## Les catégories de traitements

Nous proposons trois grandes catégories de traitements : Les **pré-traitements**, les **traitements** et les **post-traitements**. La catégorie des pré-traitements recouvre l'ensemble des opérations qui préparent les données pour qu'elles puissent être traitées. Dans le cadre de ce travail il est nécessaire de stocker les données et d'effectuer des requêtes SQL afin de sélectionner les données à en fonction des traitements.

La catégorie des traitements recouvre les traitements proprement dits, c'est à dire les traitements qui vont créer ou modifier des données. Cette catégorie présente trois sous-catégories : les traitements **statistiques**, les traitements **d'analyse spatiale** et les traitements de **transformation**.

Les traitements statistiques concernent les calculs de densités de population, de densité de points et le calcul de la taille de cellule des couches raster.

Les traitements d'analyse spatiale sont les traitements géographiques sur les **fichiers de forme** (shape) (par exemple intersection entre deux fichiers de forme vecteurs).

Les traitements de transformation correspondent aux traitements qui modifient le format des données. Par exemple, pour insérer un fichier vecteur dans une base de données spatiale, il est nécessaire d'effectuer une transformation vers le format ".sql".

Les post-traitements concernent tout ce qui est représentation des résultats obtenus, par exemple une reclassification d'une image raster pour faire ressortir une information plus clairement.

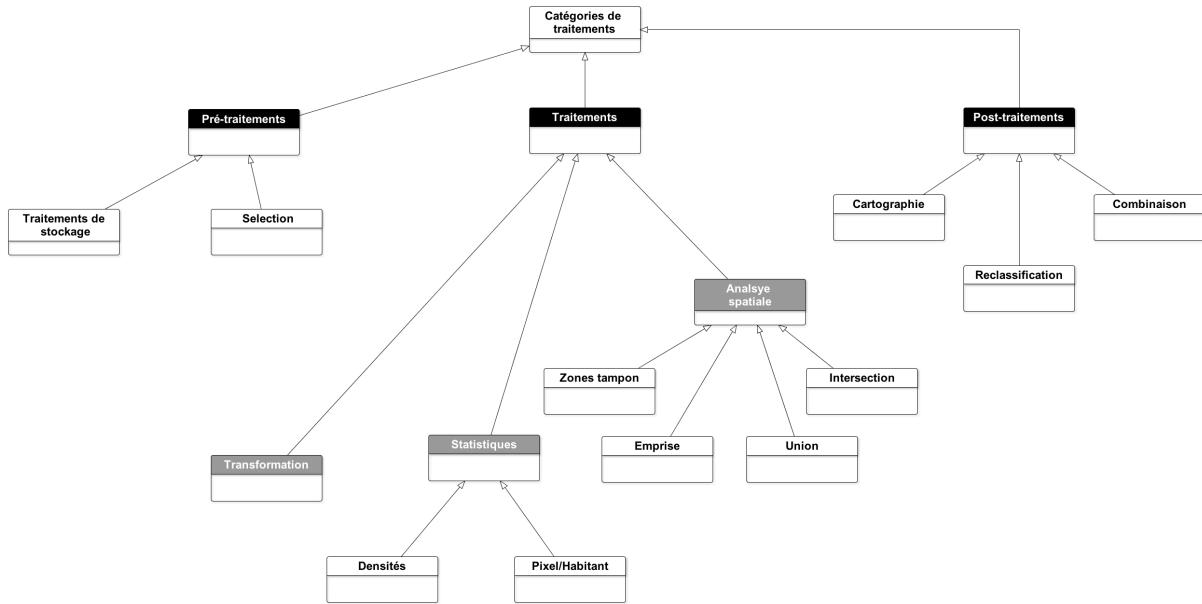


FIGURE 4.8 – Modèle conceptuel des hiérarchies de catégories de traitements de la chaîne de traitements

### 4.2.3 Conceptualisation de la chaîne de traitements

Le modèle conceptuel des traitements permet de représenter la dynamique de la chaîne de traitements, c'est-à-dire les opérations et traitements qui sont réalisées en fonction d'autres événements. Ce modèle permet donc de représenter et d'expliquer de façon conceptuelle le fonctionnement du système sans faire référence aux choix qui ont été réalisés (par exemple quelle librairie a été utilisée, quel langage informatique etc.). Le modèle explique donc les traitements qui sont effectués dans la chaîne mais il n'explique pas comment ils sont effectués.

Pour illustrer les différentes opérations de la chaîne de traitements, nous allons détailler successivement comment se construit la chaîne de traitements à partir des descriptions précédentes et comment l'instanciation est réalisable à partir du modèle de départ (cf 4.9)

#### Description générale

Pour créer une carte de risque, il est nécessaire d'effectuer des traitements sur des données. Les données d'entrée correspondent à deux formats différents : format vecteur et format statistique. Ces données sont utilisées par la chaîne de traitements pour effectuer les traitements nécessaires pour cartographier le risque.

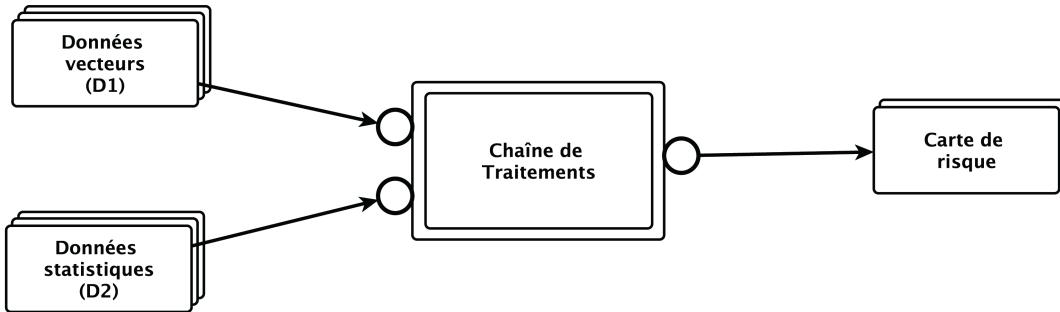


FIGURE 4.9 – Description générale

### Chaîne abstraite

Dans un premier temps, les données vecteurs sont stockées (traitements de stockage) dans une base de données. Par la suite, des **sélections** permettent de définir précisément les données qui seront traitées lors de chaque traitement.

Le risque est la combinaison entre **l'aléa** et la **vulnérabilité**. Deux grandes catégories de traitements sont effectuées : les traitements de vulnérabilité et les traitements d'aléa. Le traitement de risque permet de créer des cartes de risque.

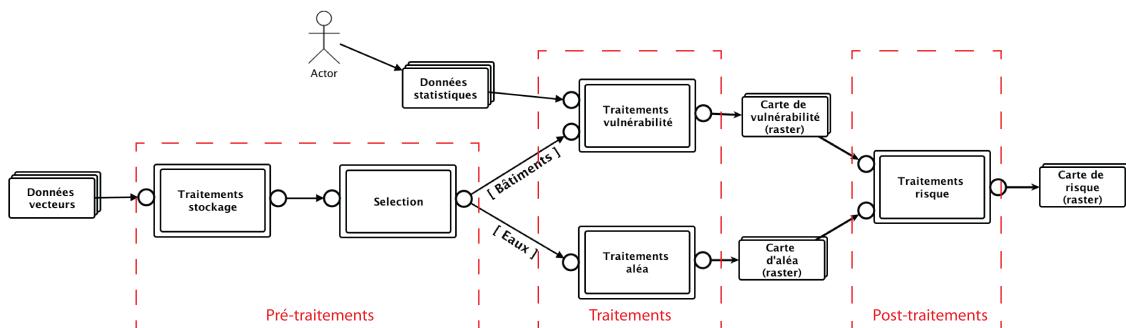


FIGURE 4.10 – Chaîne abstraite

### Traitements élémentaires de la chaîne de traitements

Chaque donnée vectorielle stockée dans la base de données est dans un premier temps re-projectée (la projection de la base de données spatiale et de toutes les données insérées sera la même). Les données sont insérées dans une base de données spatiale (créeée dans un **SGBD** au cours de l'exécution de la chaîne de traitements). Des requêtes SQL permettent de sélectionner

(filtrer) les données à utiliser pour chaque traitement.

Les traitements de vulnérabilité correspondent à deux catégories de traitements : des traitements d'analyse spatiale et des traitements statistiques. La chaîne de traitements demande à l'utilisateur le nombre d'habitants de la zone d'études (= données statistiques). La chaîne de traitements crée une carte de vulnérabilité en combinant les deux catégories de traitement.

Les traitements d'aléa correspondent à des traitements d'analyse spatiale sur les données "eau" (format vecteur). L'ensemble de ces traitements permettent de créer une carte d'aléa.

Les traitements de risque correspondent à la combinaison de la carte de vulnérabilité et de la carte d'aléa. La carte de risque est le résultat de l'ensemble des traitements.

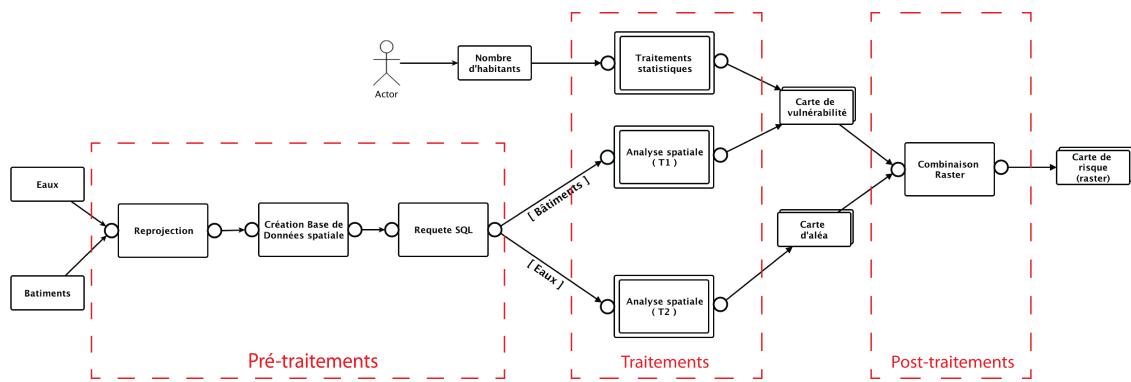


FIGURE 4.11 – Chaîne abstraite avec traitements élémentaires

### Chaîne de traitements de plus en plus détaillées

Des requêtes SQL permettent de calculer la surface totale de la couche "bâtiments". A partir des informations saisies par l'utilisateur (nombre d'habitants), la chaîne calcule la densité de population de la zone d'étude. A partir de ces informations, la surface qu'occupe en théorie un habitant permet de calculer la taille théorique d'une cellule pour un habitant. La couche "bâtiments" est ensuite **rastérisée** en fonction de la taille de la cellule calculée par avant. Pour chaque **cellule de ce raster**, un point est créé et le calcul de la densité des points permet de créer une carte de vulnérabilité.

En ce qui concerne les traitements d'analyse spatiale de l'aléa, plusieurs traitements sont successivement effectués : définition de l'emprise de la zone d'étude, zone tampons autour de la couche "eaux" (400 et 600 mètres), union et intersection des résultats pour arriver à la création

d'une carte d'aléa. (cf. Annexes)

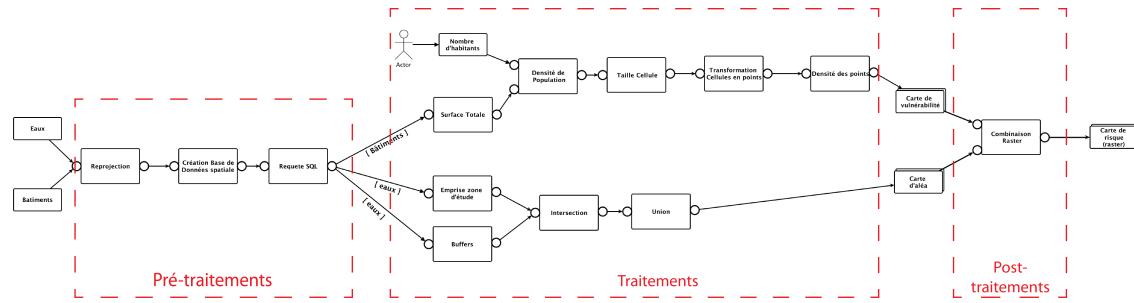


FIGURE 4.12 – Chaîne de traitements de plus en plus détaillée

### Chaîne de traitements instanciée

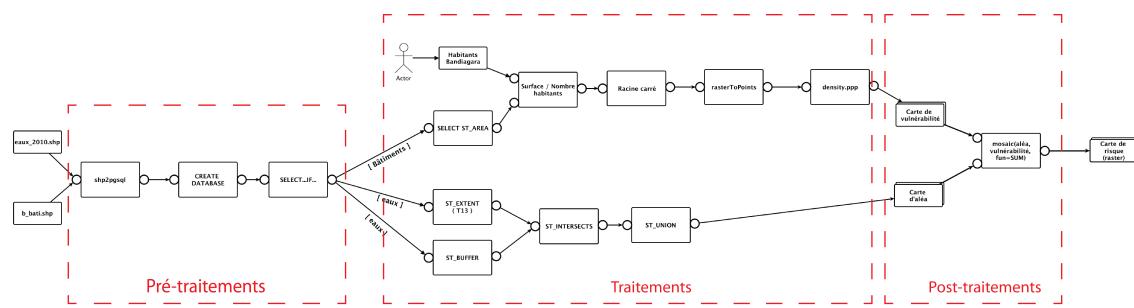


FIGURE 4.13 – Chaîne de traitements fermée instanciée

Nous utilisons pour l'exécution de la chaîne de traitements fermée deux fichiers de données en entrée : "b\_bati.shp" et "arbres.shp". La fonctionnalité PostGIS "shp2pgsql" permet de transformer et de reprojeter les deux données. Une base de données spatiale est créée et les données sont insérées dans cette base de données. Des requêtes SQL (select...if...) permettent de sélectionner (filtrer) les données nécessaires pour les différents traitements (par exemple "b\_bâti" pour les traitements de vulnérabilité). Les différentes fonctionnalités PostGIS comme "ST\_AREA" (surface d'une couche) ou "ST\_INTERSECTS" (intersection) ainsi que d'autre fonctionnalités R comme par exemple "density.pop" permettent d'effectuer les traitements souhaités (cf. Annexes). Finalement, la fonctionnalité R "mosaic(...)" permet de combiner la carte de vulnérabilité et la carte d'aléa.

## 4.3 Conception

Pour valider sur le plan opérationnel notre approche, nous avons réalisé deux types d'outils. Dans un premier temps, nous avons développé une chaîne entièrement automatisée de traitements. L'utilisateur choisit les données d'entrée et la chaîne effectue automatiquement tous les traitements nécessaires pour la création d'une carte de risque.

Dans un second temps, nous avons développé un logiciel ouvert, l'utilisateur peut ainsi choisir les traitements qu'il souhaite effectuer.

Dans cette partie du travail, nous présentons l'implémentation des deux outils, respectivement l'architecture informatique des deux outils. Les librairies et bibliothèques utilisées sont présentées en Annexe.

### 4.3.1 Architecture informatique de la chaîne de traitements et du logiciel ouvert

Le prototype de la chaîne de traitements et le logiciel ouvert appellent les fonctionnalités des outils PostgreSQL / Postgis (via le JDBC PostgreSQL) et R (via RCaller) via le langage Java. Le schéma suivant explique de façon très simplifiée l'architecture informatique des deux outils. Les deux outils peuvent également se connecter à une base de données distante. Les autres composants de l'architecture doivent être installés en local sur la machine de l'utilisateur.

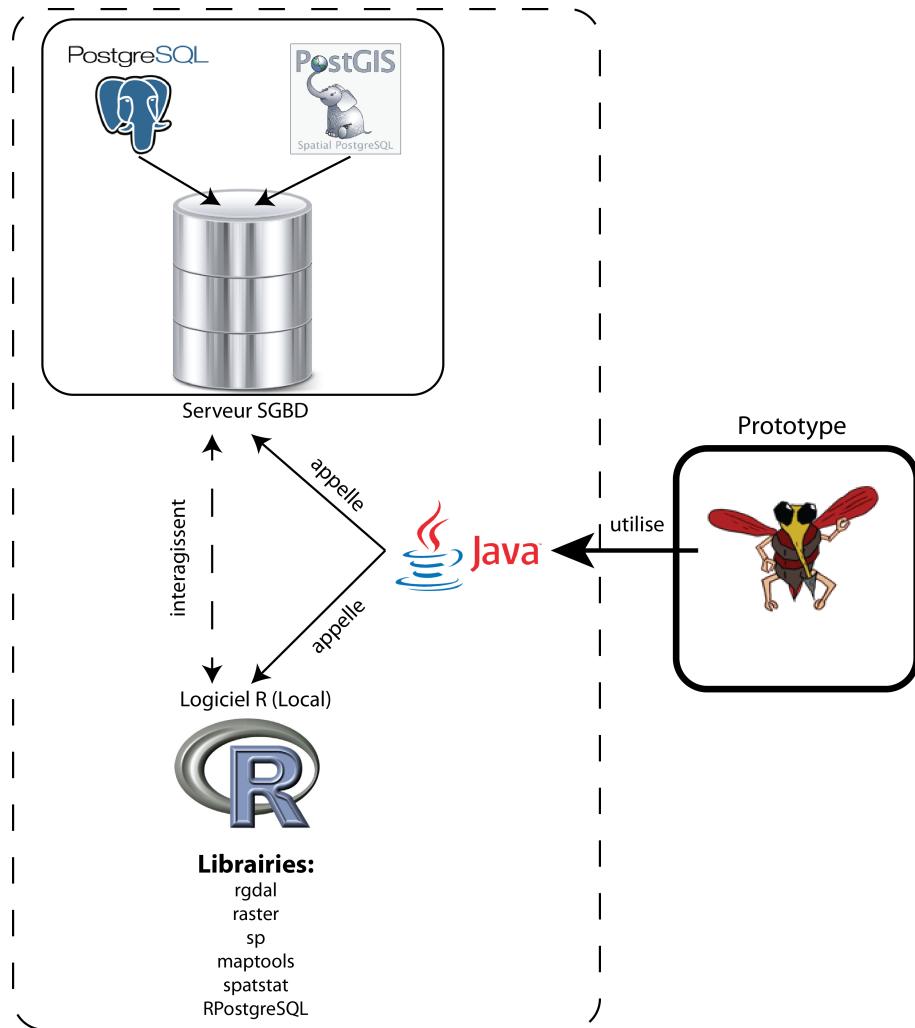


FIGURE 4.14 – Architecture informatique du prototype

### Présentation de l'outil vision "fermée" (boîte noire)

Les données utilisées sont insérées dans une base de données **PostgreSQL** (incluant l'extension **PostGIS**). Une nouvelle base de données spatiale est créée automatiquement lors de chaque exécution de la chaîne de traitements. Les différentes librairies utiliseront les données dans cette base de données et interagissent entre elles. Par exemple, des données se trouvant dans la base de données **PostgreSQL** vont être chargées dans **R** afin de permettre le calcul la densité de population de la zone d'étude.

L'architecture informatique est basée exclusivement sur des outils et librairies Open Source et a permis de créer un prototype générique et modulaire. Les fonctions respectivement de PostgreSQL et de Postgis permettent d'effectuer la majorité des traitements sur des données vecteurs

comme des intersections, des buffers ou des unions. Depuis la version 2.0, Postgis gère également les fichiers au format raster. Ainsi, il est désormais possible d'insérer des fichiers raster dans la base de données PostgreSQL ou de transformer des fichiers au format vecteur en format raster. Cette version de Postgis est encore en cours de développement, de nouvelles fonctionnalités raster vont certainement être rajoutées dans le futur.

L'outil R permet de manipuler des données aux formats différentes grâce aux nombreuses librairies disponibles pour cet outil. La librairie "spatstat" nous permet par exemple de calculer une densité de population ou d'effectuer une reclassification d'une image raster. La librairie "rgdal" nous permet de disposer des fonctionnalités de la librairie **GDAL** et de charger dans R les données raster ou vecteurs stockées dans une base de données.

Certaines fonctionnalités sont disponibles dans les deux outils et nous avons faits plusieurs tests pour trouver l'outil le plus pertinent par rapport à une problématique. Par exemple la transformation d'un vecteur en raster nécessite beaucoup plus de temps sous R qu'en utilisant la fonction "ST\_Raster" de PostGIS.

La multiplicité des fonctions disponibles avec ces deux outils, sachant qu'il existe des librairies R par rapport à de nombreuses problématiques, garantit que cette architecture pourra servir comme base pour un futur développement information du SIEL et être réutilisable par des experts de différents domaines.

### Présentation du logiciel vision "ouverte" (boîte blanche)

Le logiciel ouvert fonctionne sur le même principe que la chaîne de traitements. Le logiciel a été développé en Java et se connecte à un **SGBD** via un **JDBC** et au logiciel R via **RCaller**. En fonction des traitements que l'utilisateur veut effectuer, le logiciel appelle les fonctionnalités PostgreSQL/PostGIS ou R.

Néanmoins, un certain nombre de fonctionnalités supplémentaires a été rajouté. Le logiciel est à ce jour un logiciel de création ou de gestion de données, permettant d'insérer, de créer, de modifier ou de supprimer des données dans une base de données spatiale. Ainsi, le logiciel peut intéresser un grande nombre de personnes, spécialistes et non-spécialistes dans le domaine des **SIG** ou des base de données.

## 4.4 Opérationnalisation

### 4.4.1 Fonctionnement chaîne de traitements "fermée"

#### Choix des fichiers d'entrée

L'utilisateur choisit les données d'entrée. Seules des données au format shape (vecteur) peuvent être sélectionnées. L'utilisateur doit choisir au moins deux fichiers de données : les données correspondant aux bâtiments et les données correspondant aux surfaces aquatiques de la zone d'étude (conformément aux facteurs de risque retenus) ; et au maximum cinq données (correspondant aux données dont nous disposons).

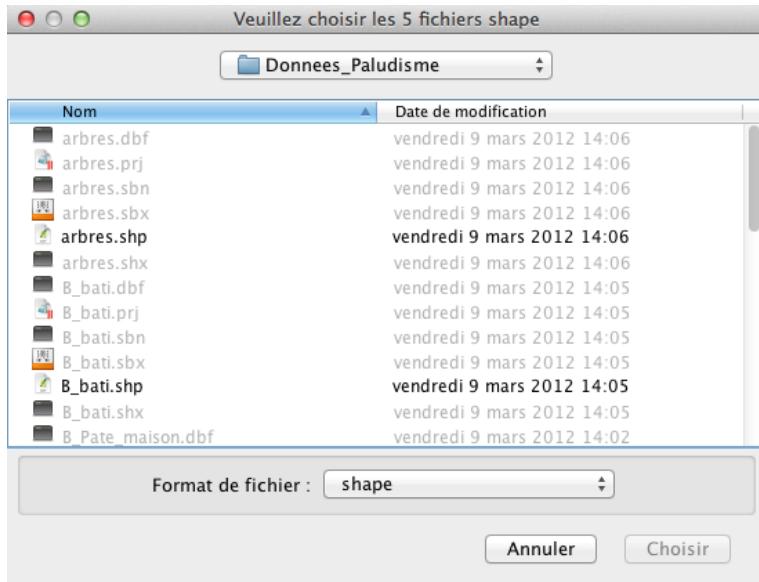


FIGURE 4.15 – Choix fichiers d'entrée

#### Correspondance des couches

Par rapport aux données sélectionnées par l'utilisateur, il est nécessaire de connaître quelle information correspond à quelle donnée. L'utilisateur choisit donc par exemple que la couche "b\_bati" correspond à l'information sur les bâtiments de la zone d'étude et la chaîne gardera en mémoire cette information pour la suite des traitements.



FIGURE 4.16 – Correspondances des données

### Création d'une nouvelle base de données spatiale

La chaîne de traitements crée une nouvelle base de données. Ceci nécessite un certain nombre d'informations : l'hôte sur lequel PostgreSQL / PostGIS sont installés (localhost si installation en local sur l'ordinateur), le port sur lequel PostgreSQL / PostGIS sont installés, le nom d'utilisateur pour la base de données, le nom de la nouvelle base de données, le mot de passe et la **projection** souhaités pour la base de données.

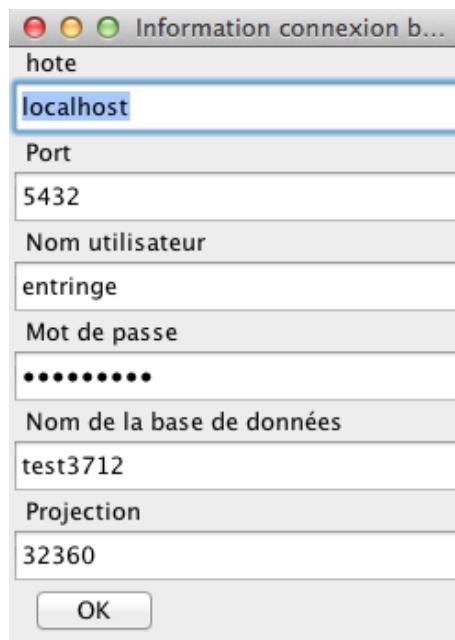


FIGURE 4.17 – Informations création base de données

### Insertion des données vectorielles dans la base de données

A l'aide du module de transformation shp2pgsql les données vectorielles sont insérées dans la base de données. Ce module transforme les fichiers au format ".shp" en fichiers ".sql" qui sont par la suite insérés dans la base de données à l'aide de la fonctionnalité "pgsql".

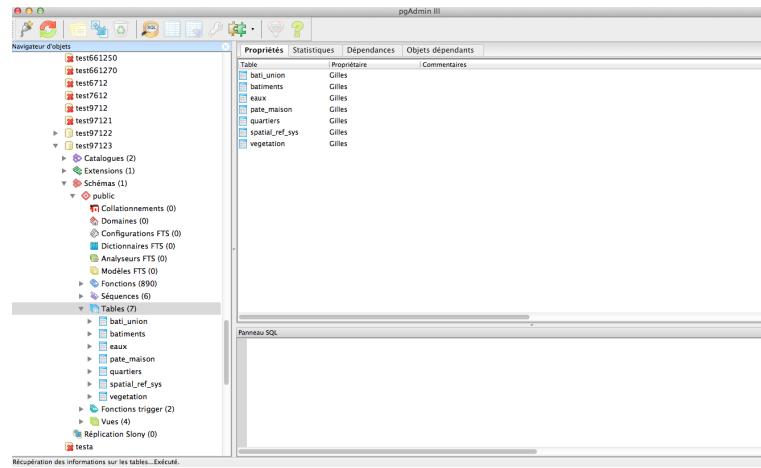


FIGURE 4.18 – Base de données avec données insérées

## Nombre d'habitants

L'outil demande à l'utilisateur le nombre d'habitants pour la zone d'étude.

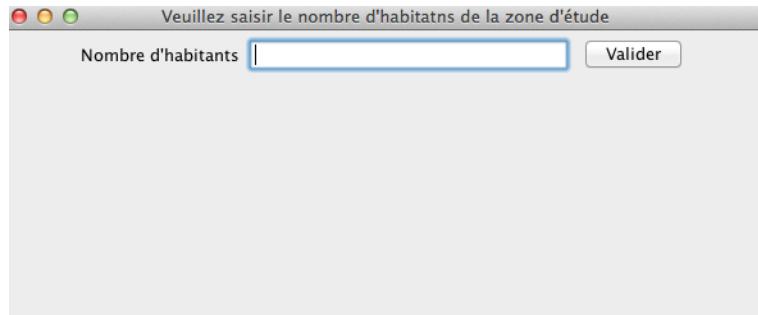


FIGURE 4.19 – Nombre d'habitants

## Calcul densité de population et taille pixel

L'outil calcule automatiquement, à partir de la couche qui correspond aux bâtiments, la densité de population de la zone d'étude et la taille de cellule qu'un habitant occupe en théorie. Par exemple, pour une population de 15.000 habitants sur une superficie totale de 300.000 mètre

carrés, nous effectuons le calcul suivant :

$$300.000 / 15.000 = 20 \text{ m}^2 \text{ par habitants}$$

$$1 \text{ habitant} = \sqrt{20} \text{ m} \quad 1 \text{ habitant} = 1 \text{ cellule} = 4.47 * 4.47 \text{ m}$$

Un habitant correspond donc en théorie à 20 mètres carrés et à une taille de cellule théoriques de  $4.47 * 4.47$  mètres.



```

INSERT 0 1
COMMIT
Surface: 249394.703579867
Nombre Habitants: 14133.0
Taille pixel: 4.200746106818336
4.200746106818336
test97124 Gilles
/Users/Gilles/Documents/sql

```

FIGURE 4.20 – Taille de cellule / Densité de population

### Calcul et affichage carte de vulnérabilité

A partir des différentes opérations et calculs, l'outil calcule une densité des points, affiche et stocke une carte de vulnérabilité.

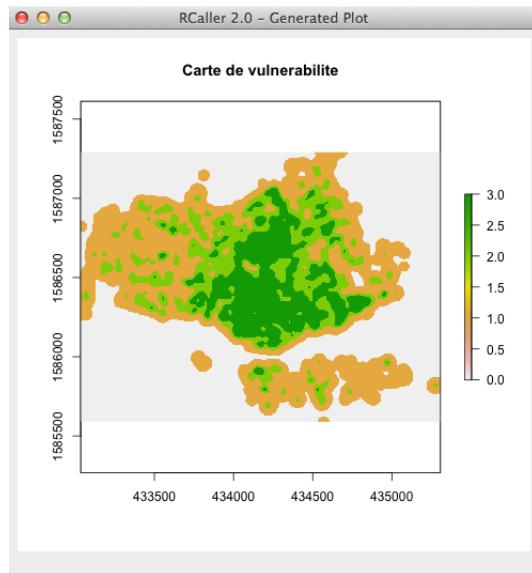


FIGURE 4.21 – Carte de vulnérabilité

### Suppression des surfaces aquatiques polluées

Par rapport aux données que nous possédons, il est nécessaire de supprimer des surfaces aquatiques polluées car les moustiques ne peuvent pas survivre dans les eaux polluées. L'outil permet de sélectionner quelles surfaces sont polluées à partir d'une colonne de la **table** de la base de données qui permet à l'utilisateur d'identifier ces surfaces.

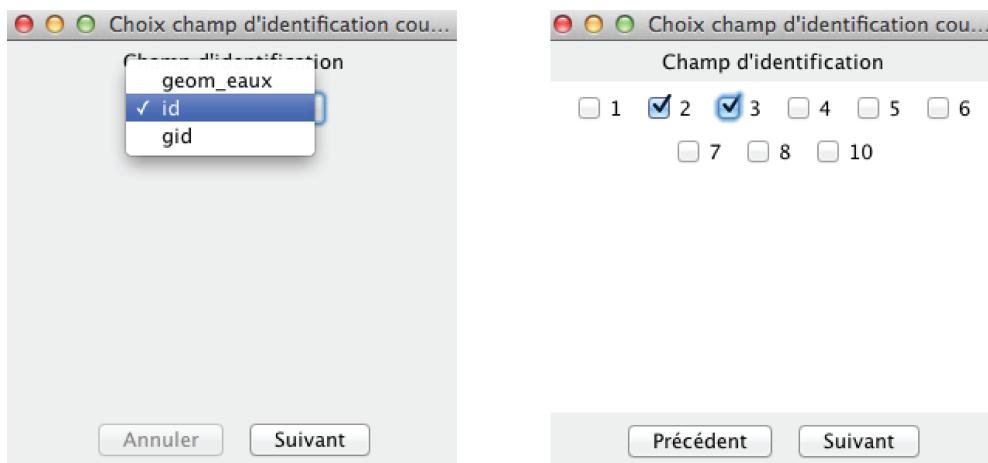


FIGURE 4.22 – Supprimer surfaces aquatiques polluées

## Carte d'aléa

La carte d'aléa est calculée en combinant plusieurs opérations et traitements d'analyse spatiale : Intersection, création de **zones tampon**, Union, extent (emprise géographique). Comme il n'y aura pas de risque dans les zones où il n'y a pas de vulnérabilité, il est intéressant de supprimer les parties concernant l'aléa qui n'intersectent pas avec la carte de vulnérabilité. Finalement nous obtenons donc une carte d'aléa. Cette carte, en combinaison avec la carte de vulnérabilité crée une carte de risque de transmission, affichée à la fin du traitement.

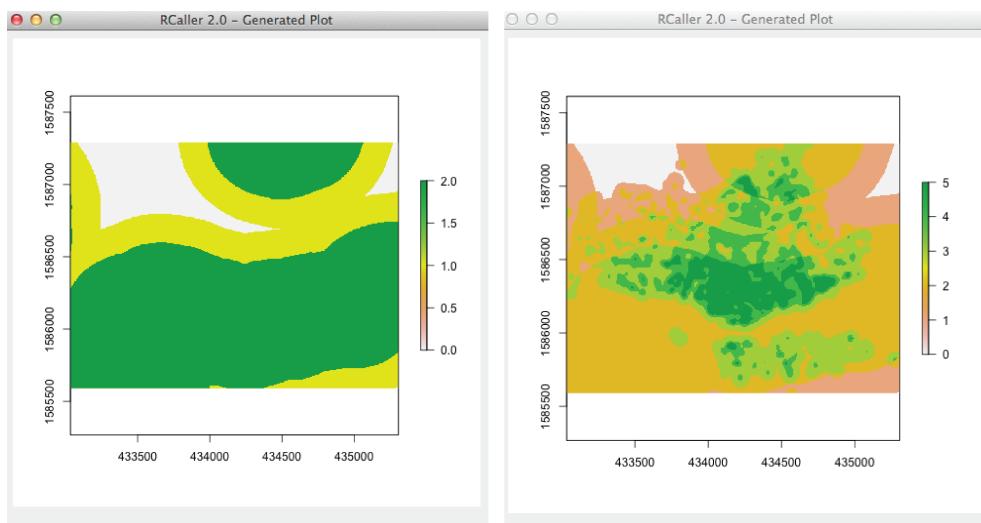


FIGURE 4.23 – Exemple de carte d'aléa et carte de risque

#### 4.4.2 Fonctionnement du logiciel "ouvert"

Le **logiciel ouvert** utilise les mêmes librairies et bibliothèques (R, PostGis, PostgreSQL) que la chaîne de traitements fermée. Au fur et à mesure de l'avancement du développement du logiciel, nous avons rajouté certaines fonctionnalités que nous avons jugées importantes pour l'utilisation du logiciel, comme par exemple l'export des données ou la possibilité de renommer les tables de la base de données. Dans cette partie sera illustrée l'implémentation de l'outil à partir des fonctionnalités les plus intéressantes et innovantes.

#### Choix emplacement des données

L'utilisateur dispose de trois choix possibles par rapport à l'emplacement des données qu'il souhaite traiter :

- Données dans une base de données PostGIS existante : les données stockées dans la base sont utilisées
- Données sur disque dur : une nouvelle base de données est créée
- Données sur disque dur et dans base de données : des données sont insérées dans une base de données existantes



FIGURE 4.24 – Choix de l'emplacement des données

#### Information connexion base de données

L'utilisateur indique les informations relatives à la base de données. En fonction du choix précédent (emplacement des données), les données stockées dans une base de données existante sont chargées ou une nouvelle base de données est créée et les données des fichiers sélectionnés par l'utilisateur y sont stockées. De plus, l'utilisateur indique la projection de la base de données. Lors de la création d'une nouvelle base de données, toutes les données sont projetées par rapport à cette information, dans le cas d'une base de données existante, toutes les données stockées dans la base sont analysées et, si nécessaire, reprojetées.

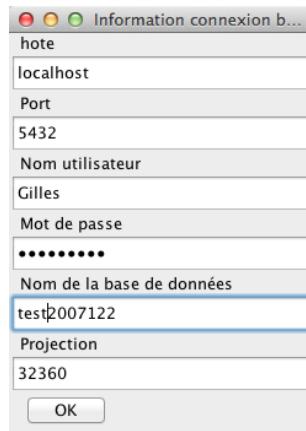


FIGURE 4.25 – Informations base de données

## Menu du logiciel

Un menu présente les différents traitements en fonction des catégories de traitements définies auparavant (cf. 4.2.2). L'utilisateur peut choisir indépendamment les traitements qu'il souhaite effectuer.

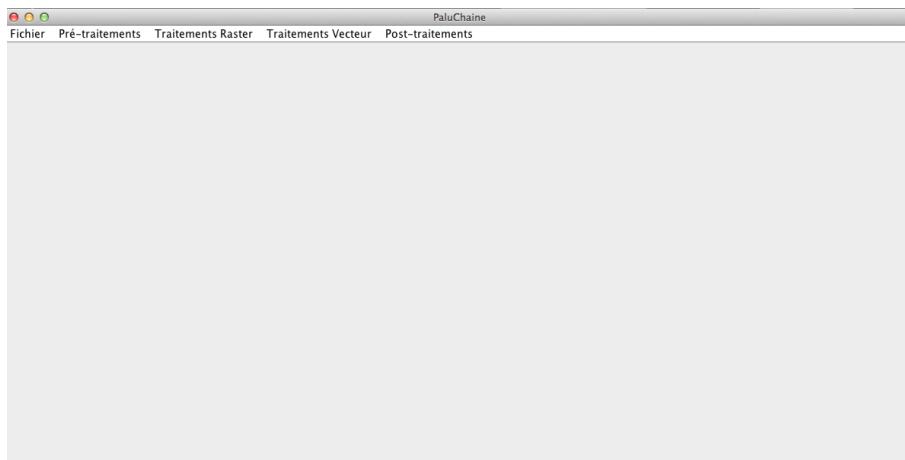


FIGURE 4.26 – Le menu de l'outil

## Les traitements possibles

En fonction des catégories de traitements définies auparavant, les traitements suivants peuvent être effectués :

### **Pré-traitements :**

- Insertion de données raster et vecteur dans la base de données
- Suppression de données raster et vecteur stockées dans la base de données

### Traitements :

#### *Analyse Spatiale*

- Intersection entre des couches vecteurs
- Union entre des couches vecteurs
- Création des zones tampons
- Calcul de la différence entre deux couches vecteur
- Création d'une couche représentant l'emprise d'une couche

#### *Statistique*

- Calcul de la surface totale d'une couche
- Calcul de la taille théorique d'une cellule (cf. Chaîne de traitements)
- Calcul d'une densité des points à partir d'une couche vecteur

#### *Transformation*

- Rastérisation de couches vecteurs
- Changement de la projection de la base de données

### Post-traitements

- Suppression de certaine information d'une couche
- Reclassification un raster
- Combinaison de plusieurs rasters
- Renommage des données dans la base (raster et vecteur)
- Visualisation de données vecteur et raster

### Spécificités techniques du logiciel

#### Mémoire

Le logiciel mémorise les traitements déjà effectués (et ce à des fins de contrôle). Par exemple, il n'est pas possible de calculer une taille théorique d'une cellule sans calculer la surface totale de la donnée auparavant. Lorsque l'utilisateur a calculé la taille de cellule et veut rastériser une donnée au format vecteur, le logiciel se rappelle du calcul de la cellule effectué auparavant.

L'utilisateur peut bien évidemment également saisir manuellement la taille de pixel qu'il souhaite appliquer pour le traitement.

Après avoir calculé la superficie pour une donnée, elle n'apparaît plus dans la liste des données disponibles pour effectuer ce traitement. Il en est de même pour le calcul de la taille de pixel.

### Affichage

L'utilisateur peut afficher à tout moment les données stockées dans la base de données. Cet affichage se fait sous la forme de la fonctionnalité "plot" du logiciel R.

### Exporter des données

Les données stockées dans la base de données peuvent être exportées. Exemple : L'utilisateur, après avoir créé des zones tampons, peut exporter cette nouvelle donnée (au format shape) et l'utiliser dans le SIG de son choix.

### Gestion des données

A tout moment, des nouvelles données (vecteur ou raster) peuvent être insérées dans la base de données. Il est également possible de supprimer des données et de renommer les données (tables).

### Aperçus du logiciel ouvert

La figure 4.27 donne un bref aperçu du logiciel et de ses fonctionnalités.

The figure consists of nine screenshots illustrating the use of the PaluChaine software:

- Screenshot 1:** A dialog box titled "Choisir les couches" (Select layers) showing a list of layers: "b\_bati" (509358.13790...), "b\_parc\_maison" (1131481.3351...), "eau\_201008" (247754.9695...), and "quartierwetter" (2697945.1149...). Buttons include "Supprimer" (Delete), "valider" (Validate), and "Charger Taille Pixel".
- Screenshot 2:** A dialog box titled "Sélectionnez les données vectorielles à renommer" (Select vectorial data to rename) showing a list of features: "Nom" (Name), "old\_name" (old name), and "new\_name" (new name). Items listed include "b\_parc\_maison" (old\_name: b\_parc\_maison, new\_name: eau), "b\_bati" (old\_name: b\_bati, new\_name: b\_bati), and "quartierwetter" (old\_name: quartierwetter, new\_name: b\_bati). Buttons include "enlever" (remove) and "valider".
- Screenshot 3:** A screenshot of the main application window showing a menu bar with "Fichier", "Pré-traitements", "Traitements", "Post-traitements", and "PaluChaine". The "Traitements" menu is open, showing sub-options: "Analyses Sociales", "Statistiques", "Transformation", and three others. The "Transformation" option is highlighted.
- Screenshot 4:** A dialog box titled "Choisissez les rasters à supprimer" (Select rasters to delete) listing several raster layers: "bati\_raster", "densite\_batiment", "b\_bati\_rasterpoints\_densite\_reclassifie", and "b\_bati\_rasterpoints\_densite". Buttons include "Enlever" (Remove) and "valider".
- Screenshot 5:** A dialog box titled "Choix champ d'identification couche eau" (Selection of identification field for water layer) showing a large list of fields (1 to 164) with checkboxes. Fields 115 and 116 are checked. Buttons include "Précédent" (Previous) and "Suivant" (Next).
- Screenshot 6:** Three overlapping windows showing vectorial data: "Affichage vecteur arbres" (Tree vector display), "Affichage vecteur b\_bati" (Building vector display), and "Affichage vecteur b\_parc\_maison" (Garden vector display). Each window shows a map with specific features highlighted.
- Screenshot 7:** A table titled "JTable5678" showing a list of raster points with their density values. The columns are "Nom" (Name), "Nombre de classes" (Number of classes), and "Maximum". The data includes:

Nom	Nombre de classes	Maximum
b_bati_rasterpoints_densite_0.0	0.00817914605140686	
b_bati_rasterpoints_densite_0.00817914605140686	0.01635829210281372	
b_bati_rasterpoints_densite_0.01635829210281372	0.02453743815422058	
b_bati_rasterpoints_densite_0.02453743815422058	0.03271658420562744	
b_bati_rasterpoints_densite_0.03271658420562744	0.0408957302570343	
- Screenshot 8:** A dialog box titled "JTable5678" showing a list of raster points with their density values. The columns are "Nom" (Name), "Table" (Table), and "Maximum". The data includes:

Nom	Table	Maximum
b_bati	4.171314934322128	
- Screenshot 9:** A dialog box titled "JTable5678" showing a list of raster points with their density values. The columns are "Nom" (Name), "Table" (Table), and "Maximum". The data includes:

Nom	Table	Maximum
b_bati	4.171314934322128	

FIGURE 4.27 – Aperçus du logiciel libre



## CHAPITRE 5

# Résultats

---

## 5.1 Planning final

Le diagramme de Gantt (cf. 5.1) montre le planning final de mon stage. Contrairement au planning élaboré en début de stage, la chaîne de traitements était déjà opérationnel au bout de quatre mois de travail et nous avons pu réadapter nos objectifs et développer en plus un logiciel ouvert.

Work Plan	Calendrier					
	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
<b>Partie 1 Approbation du sujet</b>						
1.1 Bibliographie						
1.2 Définition facteurs de risque						
<b>Partie 2 Chaîne de traitements</b>						
2.1 Conceptualisation des chaînes de traitements						
2.2 Développement informatique						
<b>Partie 3 Développement de l'outil générique</b>						
3.1 Développement informatique						

FIGURE 5.1 – Planning final

## 5.2 Prototype

Nous avons développé deux outils, basés sur des plateformes Open Source. Le premier outil, une chaîne de traitements automatisée fermée qui permet d'effectuer des traitements dans un ordre bien défini pour cartographier des indicateurs de risque environnemental. Le deuxième outil, un **logiciel ouvert**, donne à l'utilisateur la possibilité d'exécuter et de combiner chacun des traitements de la chaîne selon ses besoins.

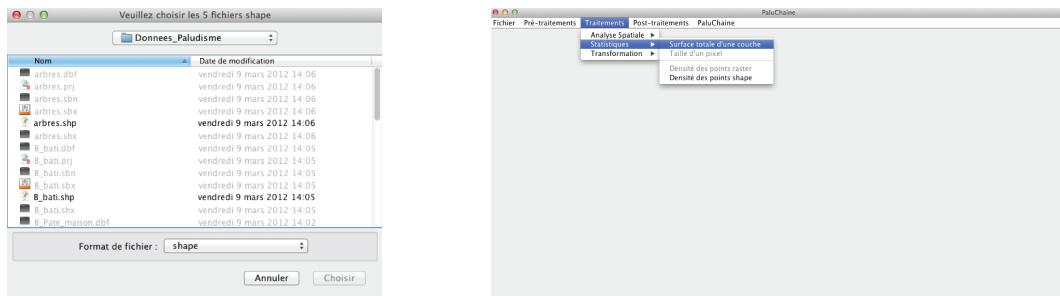


FIGURE 5.2 – Aperçus des deux outils ("ouvert à droite")

## 5.3 Validation des résultats

Pour valider les résultats et surtout le fonctionnement de la chaîne de traitements, nous comparons une carte de vulnérabilité, une carte d'aléa et une carte de risque créées par la chaîne aux cartes de risque élaborée par Nadine Dessay en utilisant le logiciel ArcGIS.

### Comparaison cartes de vulnérabilité

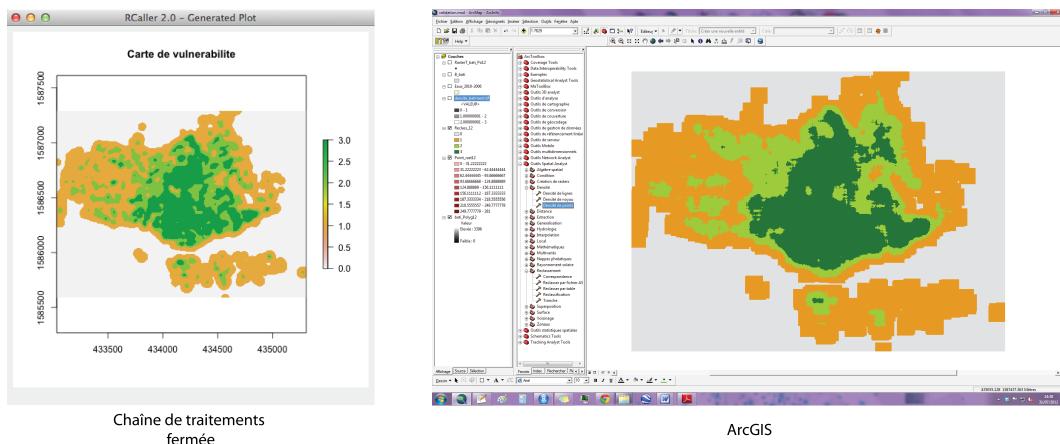


FIGURE 5.3 – Cartes de vulnérabilité

Les deux cartes se ressemblent fortement. En analysant les statistiques des deux images raster générées, nous pouvons nous apercevoir que les résultats sont très similaires.

La carte générée à partir de la chaîne de traitements fermée présente les résultats suivants :

- Moyenne : 0.855 (valeur moyenne des cellules)
- Ecart-type : 1.0249 (Ecart-type des cellules de l'image)

La carte générée avec l'outil ArcGIS présente les résultats suivants :

- Moyenne : 0.9287 (valeur moyenne des cellules)
- Ecart-type : 1.0461 (Ecart-type des cellules de l'image)

Les différences entre les deux cartes sont donc minimes et comme l'aperçu des deux cartes est également très similaire nous pouvons donc valider le résultat de la carte de vulnérabilité.

Les petites différences peuvent être expliquées par le fait que ArcGIS et R (utilisé pour les calculs statistiques dans la chaîne de traitements fermée) utilisent des algorithmes différents pour effectuer les différentes calculs. Par exemple, lors du calcul de la densité des points, sous ArcGIS on a la possibilité de choisir entre plusieurs types de voisinage (rectangulaire, circulaire...). Nadine Dessay utilise le voisinage rectangulaire pour son travail. R et plus précisément le package "raster" utilise par défaut un voisinage circulaire ce qui fait qu'en sortie les pixels des deux cartes ne sont pas identiques (rectangulaire sous ArcGIS et circulaire sous R).

### Carte d'aléa

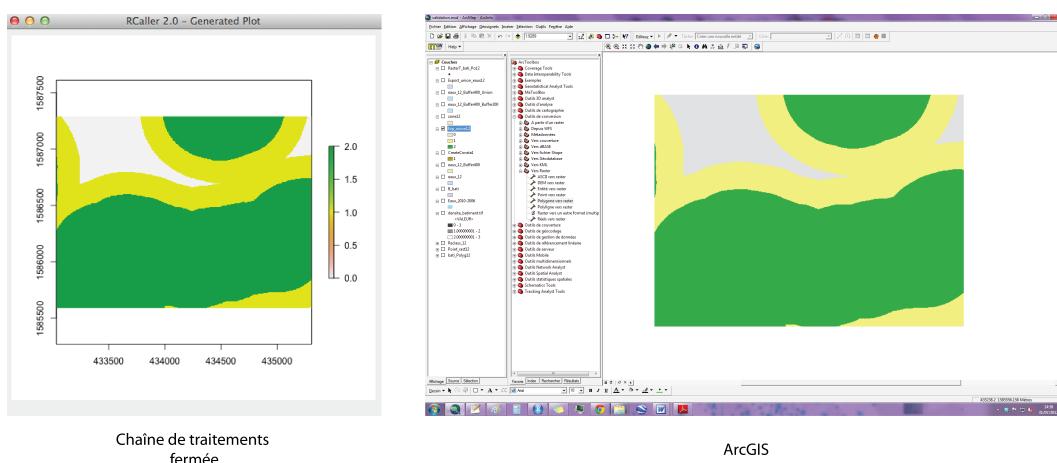


FIGURE 5.4 – CARTES D’ALÉA

Pour l’élaboration de cette carte nous créons 2 **zones tampons** différentes :

Une zone tampon de 400 mètres autour des surfaces aquatiques. Sous ArcGIS, il existe la possibilité de créer par la suite une deuxième zone tampon autour de cette nouvelle couche créée

(zones tampon de 400 mètres), dans notre cas de 200 m.

A l'intérieur de la chaîne de traitements cette opération est effectuée de la manière suivante : Création d'une zone tampon de 400 mètres et création d'une zone tampon de 600 mètres autour des surfaces aquatiques.

Par la suite nous créons une nouvelle donnée en soustrayant ces deux couches. Nous obtenons donc une couche correspondant à la zone tampon (200 mètres) autour de la zone de tampon de 400 mètres.

Comme on peut s'apercevoir en comparant les deux cartes (cf. 5.4), les résultats sont tout à fait identiques et nous pouvons valider le résultat de la chaîne de traitements fermée concernant la carte d'aléa.

## Carte de risque

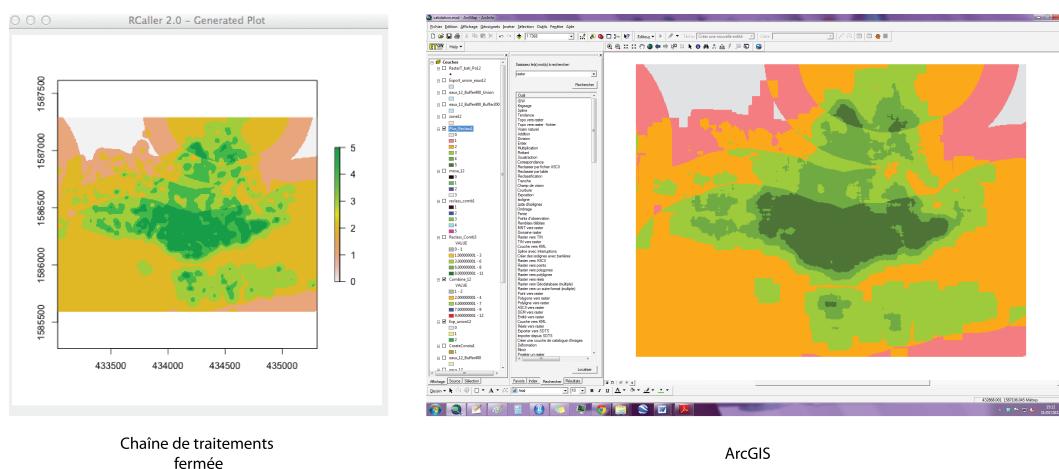


FIGURE 5.5 – Cartes de risque

La carte de risque est obtenu est combinant la carte d'aléa et la carte de vulnérabilité.

Sous R, nous avons testé plusieurs possibilité pour effectuer ce genre d'opération. Nous avons obtenu le meilleur rendu en effectuons une addition des deux raster. Pour chaque pixel d'une image qui superpose avec un autre pixel d'une autre image, les valeurs des deux pixels sont additionnées.

Afin de valider cette approche, nous avons effectué la même opération sous ArcGIS. Les deux cartes valident nos résultats car ils sont à nouveau très similaires.

## 5.4 Difficultés rencontrées

Tout au long du développement informatique de la chaîne de traitements et du logiciel ouvert, nous avons été confrontés à de nombreuses difficultés. Dans cette partie j'expliquerai les problèmes majeurs afin de faciliter le futur développement informatique de l'outil. Les difficultés sont regroupées en trois sous-parties : Difficultés liées au développement en Java, difficultés liées à l'utilisation de PostgreSQL / PostGIS et difficultés liées au logiciel R.

### 5.4.1 Java

Sur internet, il existe un nombre infini de forum et de tutoriels sur tout ce qui est programmation en Java. Ainsi, j'ai pu acquérir de nouvelles connaissances dans ce domaine. Néanmoins ce qui a été très compliqué, était de comprendre le fonctionnement de Rcaller, permettant d'utiliser les fonctionnalités de R sous Java. Il existe en effet que très peu de documentations et informations sur internet pour cette extension de Java.

La prise en main de Rcaller a nécessité un certain temps. Par exemple, nous avons dû faire face au problème que lors de l'affichage d'une donnée (plot), la fermeture d'une fenêtre causait automatiquement la fermeture de tout le programme. Pour résoudre ce problème, le résultat (l'image affichée) doit être stocké temporairement et par la suite être affiché dans une nouvelle fenêtre.

Une autre difficulté a été de comprendre comment intégrer des variables Java dans le code "R". Par exemple, en ce qui concerne la reclassification d'une image raster, l'utilisateur peut choisir le nombre de classes et les valeurs minimales et maximales de chaque classe. La commande "addDoubleArray" de RCaller permet d'intégrer un tableau composé de valeurs du type double dans le code R. En fonction des choix de l'utilisateur, Rcaller crée à l'intérieur du code R une "matrice" comportant les valeurs du tableau Java.

Il est également possible de récupérer les résultats de calculs effectués dans R. On peut seulement récupérer le résultat de la dernière ligne du code R. Par exemple, si on calcule deux moyennes différentes, il est nécessaire de stocker les deux moyennes dans une "liste" (moyenne <- list(moyenne1,moyenne2) sous R). Avec la commande "runAndReturnResult (moyenne)" il est par la suite possible de récupérer le résultat des calculs stocké dans la liste "moyenne".

Ces illustrations rendent compte très partiellement des nombreuses difficultés que nous avons rencontrées en utilisant RCaller. Finalement il faut aussi préciser que l'exécution de cette extension est en général très lente, notamment si l'utilisateur ne dispose pas d'une machine performante.

### 5.4.2 PostgreSQL/PostGIS

En ce qui concerne l'utilisation de PostGIS et de PostgreSQL, ce qui a été le plus compliqué était certainement l'installation. Lorsque nous avons démarré le développement informatique de la chaîne de traitements, nous utilisions une version antérieure de PostgreSQL et de PostGIS. Le 3 avril 2012 est sortie PostGIS 2.0 avec comme principale nouveauté la gestion des images rasters. Le passage à la nouvelle version a été assez compliqué, notamment sous le système d'exploitation Linux. En effet, toutes les librairies utilisées par PostGIS comme GDAL, PROJ etc. ont dû être mises à jour, tout comme la version de PostgreSQL (minimum 8.4). Sous Windows et MacOS ceci a posé moins de problèmes car des exécutables d'installation sont disponibles sur internet et les anciennes versions peuvent être supprimées plus facilement.

Souvent il n'est pas possible d'effectuer des opérations sur des données spatiales stockées dans la base de données, probablement parce qu'il y a eu un problème de type de géométrie lors de la construction de la donnée. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire pour chaque traitement PostGIS (par exemple Intersection entre deux couches) de créer une donnée "temporaire" à l'aide la fonctionnalité PostGIS "ST\_Buffer". Cette fonctionnalité crée théoriquement des zones tampons. En créant des zones de tampons de taille zéro, la fonctionnalité permet également de résoudre ce genre de problème.

### 5.4.3 R

Par rapport à l'utilisation de R, nous avons été confronté à une difficulté majeure qui est l'utilisation de la librairie "rgdal". Sous Linux, il a été assez facile d'installer cette librairie à l'aide de la commande R "install.packages("rgdal")", néanmoins il est important de vérifier que lors de l'installation les versions de GDAL, PROJ et GEOS soient mises à jour car sinon un certain nombre de fonctionnalités risque de ne pas fonctionner.

Sous MacOS, il est nécessaire de faire l'installation à partir de la source du package. Sur le site <http://www.r-bloggers.com/installing-rgdal-on-mac-os-x-2/> sont expliquées les informations nécessaires pour cette opération.

Sous Windows, l'installation de rgdal est facile et se fait à l'aide de la commande "install.packages". Malheureusement, il est impossible d'influencer la version GDAL utilisée lors de l'installation du package. Ainsi, il est actuellement impossible de charger des données dans R à partir d'une base de données PostgreSQL en utilisant rgdal. Ainsi, sous Windows, la chaîne

de traitements ne fonctionne pas encore et le logiciel libre présente des fonctionnalités limitées (tous les traitements liés à l'utilisation de R ne fonctionnent pas).

## 5.5 Perspectives

L'objectif principal du stage était la conceptualisation et le développement informatique d'une chaîne de traitements permettant de cartographier le risque de transmission du paludisme. La définition des facteurs de risque de transmission du paludisme a été une première étape indispensable de ce travail.

Le modèle conceptuel ainsi que les listes concernant les différents facteurs de risque de transmission permettent aux experts, mais également à des non-experts, de comprendre les éléments du cycle du paludisme et comment le paludisme se développe.

A partir de ce modèle conceptuel, nous avons pu définir les traitements nécessaires pour cartographier le risque. Par la suite, de nombreuses réflexions autour de l'architecture informatique ont été menées. L'objectif était que la chaîne soit réutilisable pour le plus grand nombre de personnes. Créer un logiciel basé sur une architecture OpenSource et libre était donc indispensable. Nous avons décidé de développer la chaîne en Java. Par la suite, nous avons recherché pour chaque traitement les libraires et outils nécessaires. Très rapidement, nous nous sommes aperçus que PostgreSQL, PostGIS (traitements d'analyse spatiale) et R (notamment pour les traitements statistiques et les traitements raster) permettent d'effectuer tous les traitements que nous devions enchaîner.

Au bout de quatre mois, le développement informatique a abouti à une première chaîne de traitements fermée. Cette chaîne de traitements effectue un certain nombre de traitement dans un ordre bien précis, l'utilisateur n'a aucune influence sur le déroulement des traitements.

Avec les différents encadrants (et comme le travail avait avancé plus vite que prévu), nous avons décidé qu'il serait intéressant de développer, en se basant sur les traitements de la chaîne de traitements, un logiciel qui permettra d'effectuer chaque traitement indépendamment.

Le logiciel qui a été développé permet d'imaginer de nombreuses perspectives. A court terme, il peut être très intéressant de faire évaluer l'outil et de bien sûr rédiger un mode d'emploi pour l'outil et relever les retours des utilisateurs. D'ores et déjà, nous pensons qu'il serait bien

d'améliorer l'affichage des données (avec Grass par exemple) et d'améliorer la gestion des couches dans la base. La possibilité de se connecter à une base de données externe (hébergé sur un serveur internet) permet aussi d'envisager l'utilisation de l'outil dans de nombreux projets. Beaucoup de gens sont intéressés par les fonctionnalités de PostGIS, mais ne disposent pas des connaissances nécessaires pour son utilisation. Le logiciel leur permet dans un premier temps de créer une base de données, d'insérer des vecteurs et des rasters dans cette base et d'effectuer un certain nombre de traitements sur ces données. A long terme, l'intégration de nouveaux traitements pourrait faire de ce logiciel un outil précieux pour les gens souhaitant d'effectuer des traitements d'analyse spatiale de base (intersection, union, zones tampon etc.).

A long terme, il peut être envisagé de créer un équivalent du "ModelBuilder" d'ArcGIS. L'utilisateur pourrait donc créer ses propres chaînes de traitements en fonction de ses besoins. En plus, il est alors envisageable que ces chaînes soient capitalisables et réutilisables.

## 5.6 Conclusion

Au terme des six mois de stage, la collaboration avec des experts dans des domaines divers (informatique, environnement, environnement-santé, biologie etc.) m'a permis d'acquérir un grand nombre de connaissances et de compétences et de travailler sur une multitude de thématiques.

L'élaboration d'un modèle conceptuel autour des éléments du paludisme a nécessité une recherche bibliographique importante ainsi qu'une longue phase de réflexion. Ce travail m'a donc surtout apporté beaucoup sur le plan scientifique.

Dans un deuxième temps, le développement respectivement d'une chaîne de traitements fermée et d'un logiciel ouvert m'a permis d'approfondir mes connaissances dans plusieurs domaines de l'informatique : Gestion des bases de données (spatiales), R et surtout programmation en Java sans oublier bien évidemment la conceptualisation et toutes les étapes de réflexion de la chaîne en amont.

Toutes les étapes, les erreurs et les leçons tirées de ce stage m'ont beaucoup aidé à évoluer dans le monde des SIG et plus particulièrement dans le domaine de l'informatique.

La qualité des résultats obtenus avec la chaîne de traitements fermée comparé à celle des résultats obtenus à partir d'ArcGIS démontre les capacités des outils développés dans le cadre de ce travail et des outils et librairies libres et gratuites comme PostGIS/PostgreSQL et R. Les

outils peuvent intéresser beaucoup de personnes, non seulement en ce qui concerne la cartographie de risques environnementaux, mais également pour effectuer des traitements d'analyse ou pour gérer et créer des bases de données spatiales. La possibilité de se connecter à une base de données distante est certainement un des atouts de cet outil.

Finalement, les objectifs du stage ont été atteints. La chaîne de traitements fermée est opérationnelle. Le logiciel ouvert permet, quant à lui, d'effectuer chacun des traitements de manière indépendante.



## CHAPITRE 6

# Glossaire et définitions

---

**Diagramme de classes** : Un diagramme de classes fournit une vue globale d'un système en présentant ses classes, interfaces et collaborations, et les relations entre elles. Les diagrammes de classes sont statiques : ils affichent ce qui interagit mais pas ce qui se passe pendant l'interaction<sup>1</sup>

**Données vecteur / Fichiers de forme / Données shape** : Le mode vecteur où chaque objet représenté sur la carte est décrit par des points successifs composant son pourtour. Chaque point est localisé par ses coordonnées rectangulaires et est joint au point suivant par un segment de droite (d'où le terme de vecteur).

Le mode vecteur ne peut s'appliquer qu'à une carte. Le mode raster peut s'appliquer indifféremment à une carte ou à une image. On peut convertir des données raster en données vecteur (vectoriser), ou convertir des données vecteurs en pixels (pixeliser ou rasteriser)<sup>2</sup>.

**Eclipse** : L'environnement de programmation en Java le plus connu est le projet "Eclipse" de la fondation Eclipse. Ce logiciel simplifie la programmation grâce à un certain nombre de raccourcis et notamment grâce à la possibilité d'intégrer de nombreuses extensions. Au fur et à mesure de l'avancement du code, Eclipse compile automatiquement le code et signale les problèmes qu'il détecte.

**GDAL** : GDAL est une bibliothèque de transformation pour les images raster géoréférencées qui est publié sous une licence du type X / Open Source MIT défini par l'Open Source Geospatial Foundation. La bibliothèque OGR fait également partie de GDAL et fournit une fonctionnalité similaire pour des données vectorielles<sup>3</sup>.

**Indices environnementaux spatialisés** : Des indices environnementaux spatialisés sont par

---

1. [http://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/fr/D%C3%A9finition\\_des\\_diagrammes\\_de\\_classes\\_UML\\_1.5](http://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/fr/D%C3%A9finition_des_diagrammes_de_classes_UML_1.5)

2. <http://seig.ensg.ign.fr/fichchap.php?NOCONT=CONT3&NOCHEM=CHEMS001&NOFICHE=FP1&NOLISTE=0&N=0&RPHP=&RC0=&RCH=&RF=&RPF=>

3. <http://www.gdal.org/index.html>

exemple des indices de risques de désertification et visent à rendre l'information environnementale plus compréhensible, plus simple, plus claire, plus immédiate et plus pertinente. L'approche qui intègre la notion de "risque" a comme objectif d'analyser au mieux l'intervention humaine actuelle et future sur les ressources naturelles face aux conditions climatiques et aux potentialités et écologiques (Loireau *et al.*, 2012).

**Java :** Java est un langage orienté objet, c'est-à-dire que le programme est vu comme un ensemble d'entités (de classes). Au cours de l'exécution du programme, les entités collaborent entre elles pour arriver à un but commun.

#### **JDBC :**

JDBC est une API (Application Programming Interface) java. JDBC est un nom déposé et non un acronyme, en général on lui donne la définition suivante : Java DataBase Connectivity. ([http://java.developpez.com/faq/jdbc/...](http://java.developpez.com/faq/jdbc/)) Cette API est constituée d'un ensemble d'interfaces et de classes qui permettent l'accès, à partir de programmes java, à des systèmes de gestion de bases de données relationnelles (par exemple PostgreSQL).

**Logiciel fermé :** Un logiciel fermé est un logiciel sur lequel l'utilisateur ne peut pas influencer le déroulement de l'exécution des traitements. Les logiciels fermés sont également dénommés "boîtes noires".

**Logiciel ouvert :** Un logiciel ouvert est, dans le cadre de ce travail, un logiciel qui permet d'exécuter de façon indépendante des traitements. Un logiciel ouvert est également appelée "boîte blanche" (contrairement à un logiciel fermé appelé "boîte noire").

**Moustiques anophèle :** Moustique de la famille des culicidés, dont la femelle transmet le paludisme<sup>4</sup>.

**Niches fondamentales :** Ensemble des ressources potentielles qu'une espèce peut utiliser dans son milieu lorsque les conditions sont idéales<sup>5</sup>.

#### **PostgreSQL :**

PostgreSQL est un système de gestion de bases de données relationnelles objet (Manuel PostgreSQL). PostgreSQL est un outil Open Source et disponible gratuitement, compatible avec les systèmes d'opérations les plus connus (Linux, Unix (Mac OSX, Solaris etc.) et Windows).

---

4. <http://dictionnaire.reverso.net/francais-definition/anoph%C3%A8le>

5. [http://www.ese.u-psud.fr/epc/conservation/EE/pdf/Ecologie\\_Communautes\\_15112009.pdf](http://www.ese.u-psud.fr/epc/conservation/EE/pdf/Ecologie_Communautes_15112009.pdf)

PostgreSQL propose des interfaces de programmations pour des langages de programmation comme Java, C++, Python etc. Le développement de PostgreSQL a débuté en 1986 (appelé à l'époque Postgres). En 1995, les développeurs ajoutent un interpréteur de langage SQL à l'outil. A partir de 1996, l'outil s'appelle PostgreSQL afin de souligner le lien entre Postgres et le langage SQL. PostgreSQL peut être facilement étendu par l'utilisateur en ajoutant de nouvelles fonctions, de nouveaux opérateurs ou même de nouveaux langages de procédure.

**PostGIS :** PostGIS est une extension du système de gestion de base de données PostgreSQL qui permet de stocker des données (objets) géographiques dans la base de données. Cette extension permet d'utiliser une base de données PostgreSQL comme une base de données dans n'importe quel projet SIG. Depuis avril 2012, la dernière version de PostGIS (PostGIS 2.0) offre de nombreuses améliorations. La nouveauté la plus "innovante" est celle que PostGIS gère désormais les données raster (données images). PostGIS est compatible avec des nombreux autres outils comme par exemple Mapserver.

**Rastériser :** Conversion de données vectorielles en images raster.<sup>6</sup>.

**Reprojeter :** Changer la projection d'une donnée géoréférencée.

**SGBD :** Système de gestion des de base de données - Un ensemble de programmes qui permettent l'accès à une base de données<sup>7</sup>.

**SRID :** Le SRID est un entier qui identifie de façon unique le système de références spatiales.

### Traitements :

Un traitement est un outil qui permet de transformer une information ou une donnée fournie en entrée et livrée en sortie. Comme nous nous intéressons aux traitements informatiques, nous nous intéresserons principalement à la partie logicielle (software) de ces traitements. "Un traitement réalise une fonctionnalité. Pour être précis, il faudrait dire qu'un traitement spécifie la façon de réaliser une fonctionnalité. Cette spécification peut être exprimée en langage informatique." ((Abd-el Kader, 2006))

Dans ce mémoire, nous excluons donc une partie des traitements comme la saisie et la création de données (par exemple à partir d'une image satellite). Nous nous intéresserons aux traitements informatiques géographiques nécessaires pour créer une carte du risque. Les tra-

---

6. <http://www.olecorre.com/1298/Rasterization>

7. [http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/informatique-3/d/sgbd\\_2525/](http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/informatique-3/d/sgbd_2525/)

tements informatiques géographiques regroupent les traitements qui manipulent les données géographiques.

**Quickbird** : Une image Quickbird est une image de très haute résolution. Ce type d'images se caractérisent par une résolution spatiale de moins de 2.5 mètres. Les bâtiments, les rues, les voitures et même les arbres sont visibles sur ces images<sup>8</sup>.

**Projection** : Les définitions les plus "techniques" caractérisent la projection cartographique comme étant une méthode mathématique faisant correspondre à un point géoréférencé de l'ellipsoïde terrestre un autre point sur un support en deux dimensions, relativement au système de coordonnées géographiques. Des définitions plus générales présentent la projection comme une méthode géodésique permettant de représenter la Terre sur la surface plane d'une carte<sup>9</sup>.

#### (Logiciel) R :

R est un langage et un environnement pour des calculs et des graphiques statistiques qui fournit une grande variété de techniques statistiques. R est Open Source et disponible gratuitement. R ne fonctionne pas sous le principe du "clique bouton" mais doit être compris comme un langage informatique. Un grand nombre d'extensions (packages) est disponible et permet d'utiliser R dans des domaines très divers. Ces extensions permettent également d'appeler R à partir d'autres langages de programmation.

#### RCaller :

RCaller est une extension de Java permettant d'appeler le logiciel R et d'utiliser les fonctionnalités de R dans un programme Java. Cet outil est particulièrement intéressant comme il permet d'appeler les librairies de R comme par exemple rgdal et donc d'utiliser les fonctionnalités de GDAL dans notre chaîne de traitements.

**SIG** : Système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace<sup>10</sup>

**Table dans une base de données** : Dans les bases de données relationnelles, une table est un ensemble de données organisées sous forme d'un tableau où les colonnes correspondent à des catégories d'information (une colonne peut stocker des numéros de téléphone, une autre des noms ou encore la géométrie) et les lignes à des enregistrements footnote<http://fr.>

8. [http://www.gim.be/C12574AD00426BEC/\\_/6626A938C60147B1C12574CC0054F8D3?OpenDocument](http://www.gim.be/C12574AD00426BEC/_/6626A938C60147B1C12574CC0054F8D3?OpenDocument)

9. <http://cartographe.servhome.org/projection.php>

10. [www.cartographie.ird.fr/publi/documents/sig1.pdf](http://www.cartographie.ird.fr/publi/documents/sig1.pdf)

[wikipedia.org/wiki/Table\\_%28base\\_de\\_donn%C3%A9es%29.](https://en.wikipedia.org/wiki/Table_%28base_de_donn%C3%A9es%29)

**Taille de cellule Raster :** La taille de la cellule (pixel) détermine le niveau de détail qui peut être représenté dans un raster<sup>11</sup>.

**Zone tampon / Buffer :** Une zone tampon ou un buffer est une zone à distance fixe autour d'une entité.

---

11. <http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html>



# Annexes

---

## 7.1 Configuration prérequisée pour l'utilisation des outils

Avant d'utiliser le logiciel, l'utilisateur doit tout d'abord s'assurer d'avoir un environnement Java, ou **JRE** sur sa machine. Les explications nécessaires peuvent être trouvées sur le site suivant : <http://www.siteduzero.com>

L'utilisateur doit également disposer d'un accès à une base de données spatiale PostGIS. Pour ceci, il y a deux possibilités : L'utilisateur installe ou a déjà installé PostgreSQL et PostGIS en local sur sa machine (en local). Sinon, il existe également la possibilité de se connecter à une base de données stockée en ligne. Afin de pouvoir traiter et gérer des données raster, il faut que la version 2.0 de PostGIS soit installée. La possibilité de se connecter à une base de données distante augmente les possibilités de réutilisation du logiciel.

Finalement, l'utilisateur doit également avoir installé sur sa machine le logiciel R, ainsi les "packages" suivant :

- rgdal
- RPostgreSQL
- raster
- spatstat
- maptools

A l'instant, toutes les fonctionnalités peuvent être utilisées sous Linux et sous MacOS. Sous Windows, un certain nombre de fonctionnalités ne sont pas disponibles (cf Difficultés rencontrées).

## 7.2 Packages R utilisés

*rgdal*

Rgdal est une extension de R et permet d'utiliser les fonctionnalités de la bibliothèque GDAL à partir du langage de programmation R. Cette extension permet donc tout d'abord de gérer et de représenter des fichiers spatiaux, mais également d'effectuer des traitements statistiques sur les objets géographiques.

#### *RPostgreSQL*

RPostgreSQL fournit une interface de gestion permettant d'accéder aux bases de données PostgreSQL et au driver PostgreSQL pour R. Cet outil est particulièrement intéressant car il permet de se connecter à la base de données spatiale de la chaîne de traitements et d'y récupérer les données nécessaires pour les traitements sous R.

#### *spatstat*

Spatstat est un librairie de R permettant de traiter et d'analyser des données spatiales. Ainsi, il permet par exemple de calculer une densité des points.

#### *raster*

Raster est un paquet de R permettant de traiter les images raster. Ce paquet permet également de créer des fichiers raster à partir de données d'entrée de formats diverses.

#### *maptools*

Paquet permettant de lire et de traiter des données géographiques comme par exemple des données au format shape ("\*.shp").

## 7.3 Les traitements effectués par la chaîne de traitements fermée

Pour chaque traitement effectué, la chaîne utilise différentes librairies et outils. Dans cette partie du travail, chaque traitement est expliqué en détail et quelles opérations informatiques ont été utilisées pour effectuer les différents traitements. Les traitements sont divisés en trois catégories (cf. Catégories des traitmens) :

- pré-traitements
- traitements
- post-traitements

### Pré-traitements

#### Modification du système de coordonnées

L'utilisateur peut choisir individuellement les données d'entrée (ici les fichiers de forme Végétation, Bâtiments et Eau) en fonction de ses besoins. Il est donc nécessaire d'homogénéiser les systèmes de coordonnées de ces données. Ceci est fait lors de la transformation des fichiers vecteurs (shape), à l'aide de la commande shp2pgsql.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Fichiers de forme géoréférencés (vecteur)

**Données temporaires :** Fichiers .sql

**Données en sortie :** Données avec système de coordonnées dans base de données

---

#### Algorithme 1: shp2pgsql

---

Syntaxe : shp2pgsql -d -g nomGeom -s SRID fichier.shp nomTable -> fichier.sql

Pour la modification de la projection, c'est l'option -s SRID de la commande "shp2pgsql" qui va effectuer cette opération. Cette option définit le système de coordonnées ou, s'il existe déjà, le modifie. A l'intérieur de la chaîne de traitements, cette option est définie une seule fois lors de la création de la base de données et toutes les données vectorielles insérées dans la base de données auront le même système de coordonnées afin de garantir l'homogénéité de l'ensemble des données.

## Création base de données

Il existe plusieurs moyens pour créer une base de données. Nous utilisons la méthode suivante : Connexion à la base de données de maintenance "postgres" et création d'une nouvelle base de donnée. Attention, cette base de données n'est pas encore compatible avec les données spatiales (géographiques).

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** /

**Données en sortie :** Base de données PostgreSQL

### **Algorithme 2:** create database

Syntaxe : CREATE DATABASE nomBase

## Initialisation de la base de données aux fonctionnalités PostGIS

Il est nécessaire d'inclure 3 fichiers dans la base de données afin de la rendre compatible avec les fonctionnalités PostGIS : postgis.sql, spatial\_ref\_sys.sql, rtpostgis.sql.

- postgis.sql : Permet de charger dans la base de données, les types, les fonctions géographiques et les tables associées qui sont utilisées avec PostGis.
- spatial\_ref\_sys.sql : Permet de charger dans la base de données, la table spatial\_ref\_sys qui contient environ 300 systèmes de référence spatiales et les détails nécessaires à leur transformation.
- rtpostgis.sql : Permet de charger dans la base de données les fonctionnalités nécessaire pour qu'elle supporte les fichiers raster.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Base de données PostgreSQL

**Données en sortie :** Base de données PostgreSQL compatible PostGIS

### **Algorithme 3:** Initialisation base de données PostGIS

Syntaxe : psql -d nomBase -f postgis.sql (pareil pour spatial\_ref\_sys.sql et rtpostgis.sql)

## Traitements

### Transformation du format de fichier

Afin de pouvoir insérer des fichiers de forme vecteur dans une base de données spatiale il est nécessaire de les transformer. Cette transformation est également effectuée à l'aide du module

de transformation shp2pgsql intégré dans PostGIS. L'option -d de cette fonction indique au module de supprimer la table si elle existe déjà dans la base de données et de la recréer par la suite. Cette option permet donc de garantir que les données en entrée seront insérées correctement dans la base de données. L'option -g permet de choisir le nom de la colonne géométrique (créée automatiquement pour toute couche géométrique insérée dans une base de données PostgreSQL / PostGIS) ce qui facilitera les traitements par la suite. L'option -s a été détaillée ci-dessus et permet de choisir le système de coordonnées de la donnée. L'option "nomtable" attribue le nom de la table dans la base de données correspondant à la donnée d'entrée. Le paramètre "fichier.sql" indique l'emplacement du fichier ".sql" en sortie qui sera par la suite utilisé pour insérer les données dans la base de données.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** fichiers de forme géoréférencés (vecteur)

**Données en sortie :** Fichiers au format .sql

#### **Algorithme 4:** shp2pgsql

Syntaxe : shp2pgsql -d -g nomGeom -s SRID fichier.shp nomTable -> fichier.sql

La fonctionnalité "ogr2ogr" de la bibliothèque GDAL peut également être utilisée, notamment pour des conversions vers d'autres formats que le format ".sql".

#### **Calcul de la surface totale d'une couche de données**

La surface totale d'une couche de données est calculée à l'aide de la fonction PostGIS suivante : ST\_AREA(geom\_couche). Cette fonction calcule la surface totale pour chaque enregistrement d'une colonne géométrique d'une table. L'unité correspond automatiquement à l'unité du système de coordonnées de la base de données. A partir de ce calcul on obtient facilement la surface totale à l'aide d'une requête SQL classique (select SUM...).

#### **Algorithme 5:** Calcul surface

Syntaxe : SELECT ST\_AREA(geom\_table) from table as somme

#### **Calcul densité de population et taille pixel**

Dans les zones de risque, les habitations sont généralement des habitations sur un seul étage. Ainsi, il est possible de calculer à partir de la surface totale des bâtiments et de la population totale de la ville, la superficie qu'occupe en théorie un seul habitant.

Par exemple, pour une population de 15.000 habitants sur une superficie totale de 300.000 m<sup>2</sup>, nous effectuons le calcul suivant :

$300.000/15.000 = 20 \text{ m}^2 \text{ par habitants.}$

Un habitant correspond donc en théorie à 20 mètres carrés. A partir de ce calcul, nous pouvons déterminer la taille théorique d'un pixel. Pour les données d'essai utilisées, ce sont donc les calculs suivants qui sont effectués lors du lancement de la chaîne de traitements :

14 133 habitants = 249394,70358 mètres carrés

1 habitant = 17,646 mètres carrés

1 pixel = 4.2 m \* 4.2 m

Aucune fonctionnalité particulière n'est nécessaire pour ce calcul statistique, Java ou R peuvent facilement effectuer ces calculs de base.

### **Insertion fichiers de forme dans une base de données spatiale**

Pour l'insertion d'un fichier de forme dans une base de données les informations suivantes sont nécessaires : le serveur (en général localhost), le port sur lequel la base de données est installé (en général 5432), le nom de l'utilisateur qui est le propriétaire de la base de données, le nom de la base de données dans laquelle seront insérées les fichiers de forme et enfin le fichier ".sql" qui comporte les informations relatives au fichier de forme transformé par avant.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Fichiers au format .sql(vecteur)

**Données en sortie :** Table dans la SGBD

#### **Algorithme 6:** psql

---

Syntaxe : psql -h serveur - p port -U Utilisateur -d nomBase -f fichier.sql

---

### **Buffer**

Afin de pouvoir déterminer et représenter l'aléa lié au risque, il est nécessaire de créer des buffers (zones tampons) autour des points d'eau. Ce traitement est effectué à l'aide de la fonctionnalité Postgis "ST\_Buffer". Les informations obtenues sont stockées dans une nouvelle table à l'intérieur de la base de données, ce qui permet en même temps de créer une nouvelle table de données dans la base de données. A noter qu'il faut utiliser la colonne géométrique de la couche par rapport à laquelle on veut calculer les buffers.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Table géométrique dans une BDS

**Données en sortie :** Table géométrique dans une BDS

---

#### **Algorithme 7:** Buffer 400 mètres

---

Syntaxe pour un buffer de 400 mètres autour de la couche eau : create table  
buffer\_eaux400 as select gid, st\_buffer(geom\_eaux,400) from eaux ;

---

Cette opération crée des zones tampons autour de chaque point d'eau de la couche de source et donc plusieurs géométries différentes.

### **Union**

La création de buffers crée plusieurs géométries différentes à l'intérieur d'une table. Pour la suite des traitements il est nécessaire de créer une seule géométrie à partir des différentes géométries. Il faut donc disposer d'une géométrie unique pour la table buffer\_eaux400 par exemple. Cette opération est effectuée à l'aide de la fonctionnalité "ST\_UNION" de Postgis. Le résultat de cette opération est stocké dans une nouvelle table de la base de données.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Table géométrique dans une BDS

**Données en sortie :** Table géométrique dans une BDS

---

#### **Algorithme 8:** Union de plusieurs géométries

---

Syntaxe : create table tableNom as select st\_union(st\_geom) from table ;

---

### **Intersection**

La création de zones tampons crée logiquement des géométries se situant à l'extérieur de notre zone d'étude. Pour enlever cette partie d'information, qui va seulement ralentir le déroulement de notre chaîne de traitements, nous l'enlevons en utilisant la fonctionnalité Postgis "ST\_INTERSECTION". Nous créons une intersection des géométries des buffers par rapport à "l'emprise" de notre zone d'étude.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Table géométrique dans une BDS

**Données en sortie :** Table géométrique dans une BDS

---

**Algorithme 9:** Intersection de plusieurs géométries

---

Syntaxe : create table raster4001 as select st\_intersection(st\_geom,st\_envelope) from table1,extend ;

---

**Différence entre deux couches géométriques**

Il peut être nécessaire de calculer la différence entre deux géométries. La fonctionnalité à utiliser dans ce cas est la fonctionnalité Postgis "ST\_SymDifference".

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Table géométrique dans une BDS

**Données en sortie :** Table géométrique dans une BDS

---

**Algorithme 10:** Différence entre deux géométries

---

Syntaxe : select ST\_SymDifference(a.st\_geom,b.st\_geom) from table1 a, table2 b

---

**Rastérisation d'un fichier de forme**

Afin de traiter la couche "batiments" il est nécessaire de la transformer en raster. Ceci est fait en utilisant la commande PostGIS "select ST\_ASRaster" qui transforme la colonne géométrique d'une table en colonne de type "raster". Au stade de développement actuel de Postgis, il est indispensable que la nouvelle colonne s'appelle "rast", sinon les autres fonctionnalités (rgdal par exemple) n'arrivent pas à lire et à traiter l'information. La taille du pixel calculée par avant est également réutilisée et chaque pixel du raster aura la taille calculée par avant.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Fichiers au format .sql(vecteur)

**Données en sortie :** Table "raster" dans la SGBD

---

**Algorithme 11:** Transformation table batiments en table raster

---

Syntaxe : CREATE TABLE bati\_raster as SELECT

ST\_asraster(geom\_batiments,taillePixel,-taillePixel) as rast from batiments")

---

Cette opération peut également être effectuée sous R à l'aide de la librairie "raster" et de la fonction "rasterize". Les tests ont néanmoins démontré que Postgis est beaucoup plus rapide pour faire ce genre de traitement.

### Emprise d'une couche

Afin de délimiter d'autres données et informations par rapport à notre zone d'étude, il est nécessaire de connaître l'étendu de la zone. La fonctionnalité Postgis "ST\_ENVELOPE" effectue cette opération. En sortie, nous obtenons une géométrie qui représente (sous forme de rectangle) l'emprise d'une couche. Par la suite nous pouvons intersecter les autres données par rapport à cette géométrie. (cf 9 )

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, JDBC

**Données en entrée :** Table dans une BDS(vecteur)

**Données en sortie :** Table dans une BDS

---

**Algorithme 12:** transformation table géométrique en table raster

---

Syntaxe : create table extend as SELECT st\_envelope(rast) from densite\_batiment

---

### Chargement d'une donnée raster dans R à partir d'une base de données spatiale

Pour charger une donnée raster stockée dans une base de données spatiale nous utilisons la fonctionnalité "readGDAL" de la librairie "rgdal" du logiciel R.

**Librairies utilisées :** PostgreSQL, PostGIS, R, rgdal, RPostgreSQL

**Données en entrée :** Table dans une BDS(vecteur)

**Données en sortie :** Variable R (raster)

---

**Algorithme 13:** Charger données raster dans R à partir d'une base de données spatiale

---

Syntaxe : layers <- readGDAL("PG :host="hote" user="username" dbname="nomBase"  
password="mot de passe" port="port" table=coucheRaster")

---

La même opération peut être effectuée avec des données au format vectoriel et la fonctionnalité "readOGR" de la même librairie R.

Illustration de la couche "batiments" chargée à partir de la base de données PostgreSQL / Postgis :

### Transformation d'une couche raster en points

Afin de représenter la densité de population, nous allons calculer une densité des points. Il est donc nécessaire de transformer le raster (pour lequel un pixel correspond aux calculs effectués par avant) en points. Chaque pixel correspondra donc à un point. Le logiciel R avec sa

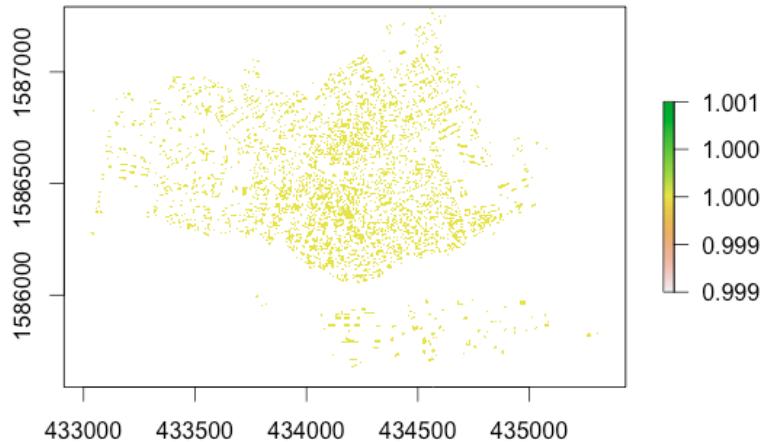


FIGURE 7.1 – Raster chargé dans R

librairie "raster" permet d'effectuer ce genre d'opération grâce à la commande "rasterToPoints".

**Librairies utilisées :** R, RCaller, rgdal

**Données en entrée :** Table raster dans BDS

**Données en sortie :** Fichier de points dans R

---

**Algorithme 14:** Transformation d'une couche raster en points

---

Syntaxe : rasterToPoints(raster,fun=function(x)x>0,spatial=TRUE)

L'opération nécessite tout d'abord une variable R au format R (chargée depuis la base de donnée spatiale dans notre cas). Par la suite la fonction "fun=function(x)x>0" permet de ne pas prendre en compte tous les pixel "vides".

Illustration de la couche "batiments" chargée à partir de la base de données PostgreSQL / Postgis

### Calcul densité des points

Pour calculer la densité des points, nous utilisons la librairie "spatstat" de R. 2 opérations différentes sont nécessaires : D'abord il faut transformer la variable au format points vers le format compatible spatstat qui est "ppp (point pattern)". Par la suite on peut calculer la densité à partir de cette variable à l'aide de la commande "density.ppp".

**Librairies utilisées :** R, spatstat

**Données en entrée :** Variable R (points)

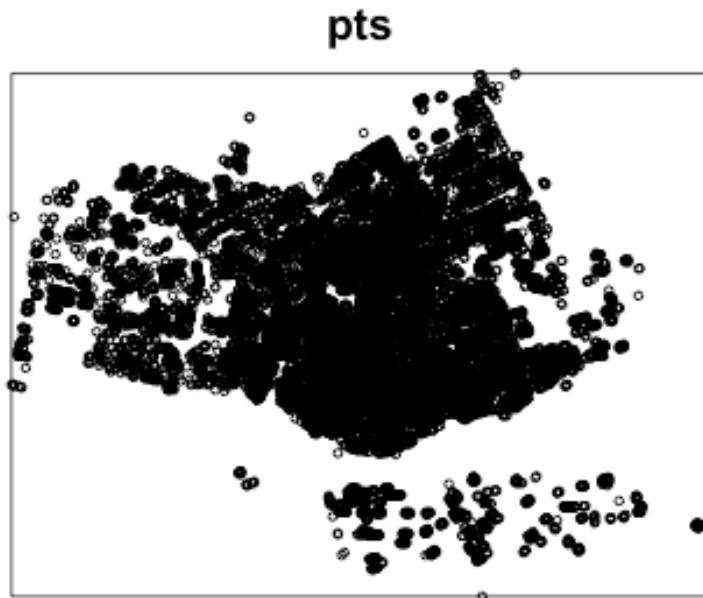


FIGURE 7.2 – Raster transformé en points

**Données en sortie :** Variable R (points pattern, densité des points)

---

**Algorithme 15:** Densité des points

---

Syntaxe : pts <- as(points,ppp)

dsty <- density.ppp(pts,eps=taillePixel,taillePixel ,adjust=taillePixel)

---

L'argument "eps" permet de définir la taille des pixels de la variable en sortie. Si on n'ajoute pas cet argument, R calcule automatiquement la taille des pixels en sortie. Il est donc important d'indiquer la taille de pixel calculée par avant pour obtenir le résultat souhaité. L'argument "adjust" permet à l'utilisateur de déterminer le "lissage du pixel en sortie". La fonctionnalité "density.ppp" offre un large nombre de possibilité pour régler ce paramètre. Plusieurs essais ont montré que le plus facile est d'utiliser l'argument "adjust" qui est une combinaison entre toutes les autres possibilités. Cet argument va par exemple multiplier le "sigma" automatiquement par cette valeur. A nouveau, il faut attribuer à cet argument comme valeur la taille du pixel calculée par avant.

Illustration des résultats selon les arguments utilisés :

### Rastérer une couche de points

Afin de pouvoir exporter une variable R représentant une densité de points (la variable R est au format "ppp") il est nécessaire tout d'abord de la transformer vers le format "SpatialGrid-

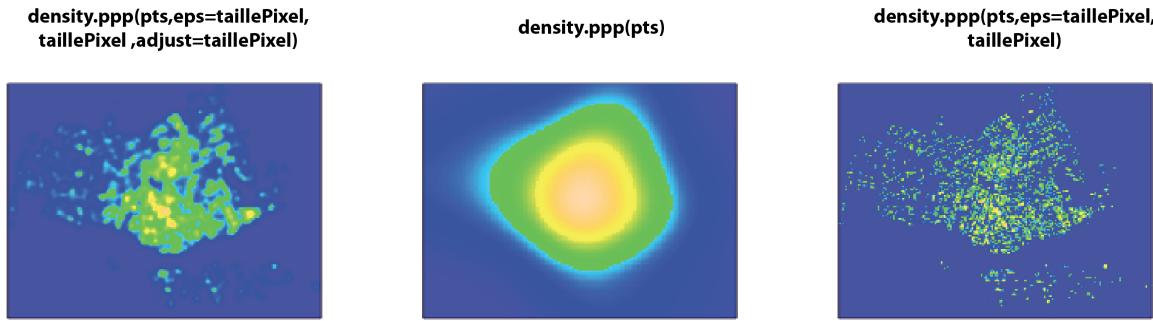


FIGURE 7.3 – Densités des points selon les paramètres

DataFrame". Par la suite, il est facilement possible de transformer ce format en format raster à l'aide de la fonction "raster(...)".

**Librairies utilisées :** R, spatstat, raster

**Données en entrée :** Variable R (densité de points)

**Données en sortie :** Variable R (raster)

---

#### **Algorithme 16:** Transforamtion points en raster

---

Syntaxe : ab <- as(densitePoints,"SpatialGridDataFrame")  
 ras <- raster(ab)

---

### Reclassification d'une couche raster

Chaque pixel du raster créé contient une valeur en fonction de la densité des points calculée par avant. Afin d'optimiser le résultat, il est nécessaire de faire une reclassification de l'image raster. Nous allons classifier l'image en 4 catégories : les pixels vides auront la valeur 0. Les autres pixels seront regroupés en 3 classes égales.

**Librairies utilisées :** R, raster

**Données en entrée :** Variable R (raster)

**Données en sortie :** Variable R (raster reclassifié)

**Algorithme 17:** Transformation points en raster

---

```

Syntaxe : maxim <- maxValue(ras)
minim <- minValue(ras)
somme <- maxim+minim
sixieme <- somme/6
tiers <- sixieme*2
m <- c(minim-1,0,0,0.0001, sixieme,1, sixieme,tiers,2, tiers,maxim,3)
rclmat <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
rc <- reclass(ras,rclmat)

```

---

Illustration des résultats avant et après la reclassification :

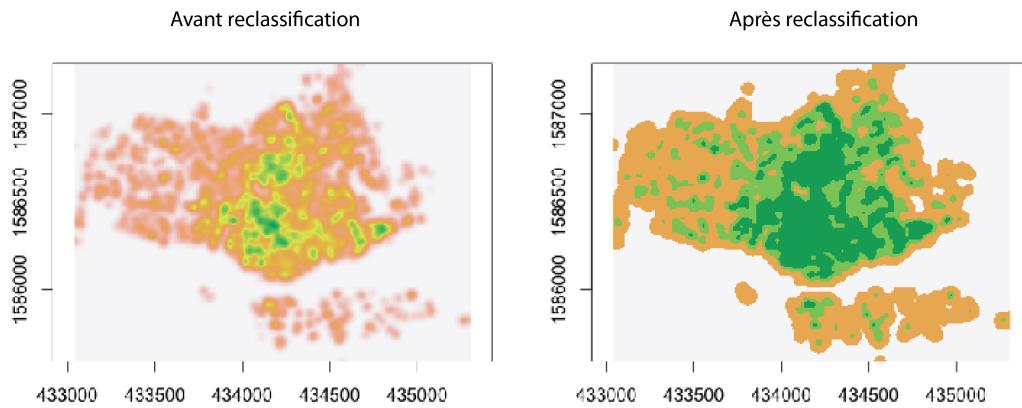


FIGURE 7.4 – Reclassification d'une image raster

## Post-traitements

### Combinaison de plusieurs couches raster

La combinaison de deux couches raster nous permet d'obtenir une combinaison entre la carte de vulnérabilité (=carte de densité des points) et la carte d'aléas (=carte buffers). La fonctionnalité à utiliser est "mosaic" de la librairie "raster".

**Librairies utilisées :** R, raster

**Données en entrée :** 2 données raster

**Données en sortie :** 1 donnée raster

**Algorithme 18:** Combinaison de deux données raster

---

```
Syntaxe : mosaic(raster1,raster2,fun=sum)
```

---

L'argument "fun" de cette fonction indique la méthode selon laquelle les deux raster sont combinés. Nous utilisons la méthode "sum" (somme) qui va donc calculer la somme des valeurs des pixels des raster combinés.

## 7.4 Divers

### 7.4.1 Planning provisionnel

Work Plan	Calendrier					
	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
<b>Partie 1 Approbation du sujet</b>						
1.1 Bibliographie						
1.2 Définition facteurs de risque						
<b>Partie 2 Chaîne de traitements</b>						
2.1 Conceptualisation des chaînes de traitements						
2.2 Définition architecture						
<b>Partie 3 Développement de la chaîne de traitements</b>						
3.1 Développement informatique						

FIGURE 7.5 – Planning provisionnel

# Bibliographie

- Abd-el KADER, Y. (2006). *Conception et exploitation d'une base de métadonnées de traitements informatiques, représentation opérationnelle des connaissances d'expert*. Thèse de doctorat.
- ABEKU, T. A., HAY, S. I., OCHOLA, S., LANGI, P., BEARD, B., VLAS, S. J. d. et COX, J. (2004). Malaria epidemic early warning and detection in african highlands. *Trends in Parasitology*, 20.
- ADJUIK, M., BAGAYOKO, M., BINKA, F., COETZEE, M., COX, J., CRAIG, M., DEICHMAN, U., DESAVIGNY, D., FONDJO, E., FRASER, C., GOUWS, E., KLEINSCHMIDT, I., LEMARDELEY, P., LENGELE, C., LE SUEUR, D., OMUMBO, J., SNOW, B., SHARP, B., TANSER, F., TEUSCHER, T. et TOURÉ, Y. (1998). Towards an atlas of malaria risk in africa. Rapport technique, MARA/ARM Collaboration.
- AFSSET (2006). Santé et environnement : définitions et évolutions récentes. Rapport technique, Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
- ANAES (2002). Construction et utilisation des indicateurs dans le domaine de la santé. Rapport technique, Agence Nationale d'Accréditation et d'Évaluation en Santé.
- C. ASCHAN-LEYGONIE, S.-M. (2009). Risque, vulnérabilité, résilience : comment les définir dans le cadre d'une étude géographique sur la santé et la pollution atmosphérique en milieu urbain. *Vulnérabilités sociétales, risques et environnement*, page 8.
- CONNOR, S. J., THOMSON, M. C., FLASSE, S. P. et PERRYMAN, A. H. (1998). Environmental information systems in malaria risk mapping and epidemic forecasting. *Disaster*, 22(1):18.
- de SAVIGNY, D. (2010). Le paludisme, le tsunami silencieux d'afrique. Rapport technique.
- DELANNOY, C. (2010). *Programmer en Java*. Mayenne.
- ERMERT, V., FINK, A. H., JONES, A. E. et MORSE, A. P. (2011a). Development of a new version of the liverpool malaria model. i. refining the parameter settings and mathematical formulation of basic processes based on a literature review. *Malaria Journal*, page 17.
- ERMERT, V., FINK, A. H., JONES, A. E. et MORSE, A. P. (2011b). Development of a new version of the liverpool malaria model. ii. calibration and validation for west africa. *Malaria Journal*.
- Faire reculer le PALUDISME, O. m. d. l. S. (2010). Qu'est-ce que le paludisme ? Rapport technique.

GAUDART, J., DESSAY, N., TOURÉ, O., FANÉ, M., SABATIER, P. et DOUMBO, O. (2005). Développement d'une méthodologie appliquée à l'évaluation du risque palustre, au mali. Rapport technique.

GAUDART, J., TOURÉ, O., DESSAY, N., DICKO, A., RANQUE, S., FOREST, L., DEMONGEOT, J. et DOUMBO, O. K. (2009). Modelling malaria incidence with environmental dependency in a locality of sudanese savannah area, mali. *Malaria Journal*.

GRAVES, P. M., RICHARDS, F. O., NGONDI, J., EMERSON, P. M., SHARGIE, E. B., ENDESHAW, T., CECACATO, P., EJIGSEMAHU, Y., MOSHER, A. W., HAILEMARIAM, A., ZERIHUN, M., TEFERI, T., AYELE, B., MESELE, A., YOHANNES, G., TILAHUN, A. et GEBREC, T. (2009). Individual, household and environmental risk factors for malaria infection in amhara, oromia and snnp regions of ethiopia. *Elsevier*, page 10.

GUTHMANN, J.-P., HALL, A., JAFFAR, S., PALACIOS, A., LINES, J. et LLANOS-CUENTAS, A. (2001). Environmental risk factors for clinical malaria : a cose-control study in the grau region of peru. *Transactions of the royal society of tropical medecine and hygiene*, 95:7.

HERBRETEAU, V., SALEM, G., SOURIS, M., HUGOT, J.-P. et GONZALEZ, J.-P. (2005). Sizing up human health through remote sensing : uses and misuses. *Parassitologia*, 47:17.

HIBLER, M. (2005). Le paludisme ne lâche pas prise.

KLEINSCHMIDT, I., BAGAYOKO, M., CLARKE, G., CRAIG, M. et SUEUR, D. L. (2000). A spatial statisitical approach to malaria mapping. *International Journal of Epidemiology*, 29:7.

KLINKENBERG, E., HOEK, W. v. d., AMERASINGHE, F. P., JAYASINGHE, G., MUTUWATTE, L. et GUNAWARDENA, D. M. (2003). Malaria and land use : A spatial and temporal risk analysis in southern sri lanka. Rapport technique, International Water Management Institute.

KREFIS, A. C., SCHWARZ, N. G., NKRUMAH, B., ACQUAH, S., LOAG, W., OLDELAND, J., SARPDONG, N., ADU-SARKODIE, Y., RANFT, U. et MAY, J. (2011). Spatial analysis of land cover determinants of malaria incidence in the ashanti region, ghana. *Plosone*, 6(3).

LIN, Y. (2011). *Méthodologie et composants pour la mise en oeuvre de workflows scientifiques*. Thèse de doctorat.

LOIREAU, M., SGHAIER, M., FÉTOUI, M., BA, M., ABDELRAZIK, M., d'HERBÈS, J.-M., DESCONNETS, J.-C., LEIBOVICI, D., DEBARD, S. et DELAÎTRE, [U+FFF] (2007). Système d'information sur l'environnement à l'échelle locale (siel) pour évaluer le risque de désertification : situations comparées circumsahariennes (réseau roselt). *Sécheresse*, pages 328–335.

- LOIREAU, M., SGHAIER, M., FÉTOUI, M., OUESSAR, M., TAAMALLAH, H. et BELGACEM, A. O. (2012). Guide utilisateur siel.
- MACHAULT, V., VIGNOLLES, C., BORCHI, F., VOUNATSOU, P., PAGES, F., BRIOLENT, S., LACAUX, J.-P. et ROGIER, C. (2011). The use of remotely sensed environmental data in the study of malaria. *Geospatial Health*, 5(2):151–168.
- MINAKAWA, N., MUTERO, C. M., GITHURE, H. I., BEIER, J. C. et YAN, G. (1999). Spatial distribution and habitat characterization of anopheline mosquito larvae in western kenya. *AMM. J. Trop. Med. Hyg.*, (61(6)).
- Nord-pas-de CALAIS, O. R. d. I. S. (2010). Risques, catastrophes, cirsés. Rapport technique, Observatoire Régional de la Santé Nord-pas-de-Calais.
- OMUMBO, J. A., HAY, S. I., SNOW, R. W., TATEM, A. J. et ROGERS, D. J. (2005). Modelling malaria risk in east africa at high-spatial resolution. *Tropical Medicine and International Health*, IO:10.
- PETERSON, I., BORRELL, L. N., EL-SADR, W. et TEKLEHAIMANOT, A. (2009). Individual and household level factors associated with malaria incidence in a highland region of ethiopia : A multilevel analysis. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 80(1):9.
- PICHERAL, H. (2001). Dictionnaire raisonné de géographie de la santé.
- PROTOPOPOFF, N., BORTEL, W. V., SPEYBROECK, N., GEERTRUYDEN, J.-P. V., BAZA, D., D'ALESSANDRO, U. et COOSEMANS, M. (2009). Ranking malaria risk factors to guide malaria control efforts in african highla. *PLoS ONE*, 4(11).
- PULLAN, R. L., BUKIRWA, H., STAEDKE, S. G., SNOW, R. W. et BROOKER, S. (2010). Plasmodium infection and its risk factors in eastern uganda. *Malaria Journal*, 9:11.
- SAFI, N., ADIMI, F., SOEBIYANTO, R. et KIANG, R. (2010). Toward malaria risk prediction in afghanistan using remote sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVIII:4.
- STEFANI, A., HANF, M., NACHER, M., GIROD, R. et CARME, B. (2011). Environmental, entomological, socioeconomic and behavioural risk factors for malaria attacks in amerindian children of camopi, french guiana. *Malaria journal*, page 12.
- VITTOR, A. Y., GILMAN, R. H., TIELSCH, J., GLASS, G., SHIELDS, T., LOZANO, W. S., PINEDO-CANCINO, V. et PATZ, J. A. (2006). The effects of deforestation on the human-biting rate of anopheles darlingin, the primary vector of falciparum malaria in the peruvian

- amazon the effect of deforestation on the human-biting rate of *Anopheles darlingi*, the primary vector of falciparum malaria in the peruvian amazon. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 74(1):9.
- WHO (2012). World malaria report 2011. Rapport technique, World Health Organization.