



Australian National University  
RMAP Program - Coombs Building  
Canberra ACT 0200



ENSAR  
65, rue de St Briec  
35042 RENNES



CIRAD CA  
Avenue Agropolis  
34000 Montpellier

Mémoire  
Pour l'obtention du DAA Physique des Surfaces Naturelles et Génie Hydrologique  
De l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes

# **MODÉLISATION DE LA GESTION DES LENTILLES D'EAU DOUCES SUR SOUTH TARAWA A L'AIDE DES SYSTEMES MULTI-AGENTS**

**Anne DRAY**

Sous l'encadrement de :

Dr. Pascal Perez, CIRAD CA

Dr. Ian White, ANU CRES

Dr. Christophe Lepage, CIRAD TERA

Septembre 200

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Pascal Perez qui m'a accueilli dans son équipe dans un cadre de travail extrêmement chaleureux. Je lui suis particulièrement reconnaissante de m'avoir fait profiter de ses qualités scientifiques et humaines avec autant de simplicité et de disponibilité. Il m'a aussi introduite à la vie australienne dont j'ai pu découvrir les petits bonheurs du quotidien « made in OZ land » que j'ai quittés avec regret.

Côté français, un immense merci à Christophe Le Page et Pierre Bommel, pour leur formation « à la carte » aux systèmes multi-agents, leur accueil dans la forteresse de Baillarguet et surtout leur très efficace « on line » qui m'a été d'un immense secours tout au long de l'été dans la chasse aux bugs du modèle !

Côté australien, a lot of thanks to Ian White and Tony Falkland, pour leur collaboration et leurs encouragements, pour m'avoir fait part de leur expérience et leur connaissance du terrain et pour avoir, à maintes reprises, dépanné l'ingénieur hydrologue que je ne suis pas encore, dans la compréhension de sa spécialité « in english ».

Je ne saurais également oublier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, surtout en phase de synthèse bibliographique : Jean-Paul Latouche et Marie-Claire Bataille pour leur éclairage anthropologique, Philip Hugues pour ses précieux documents et le récit de ses expériences peu paradisiaques à Tarawa.

Enfin un grand merci à tous les membres de RMAP, et plus généralement du labyrinthique Coombs, qui m'ont accompagnée dans cette aventure australienne et ont toujours su faire preuve de patience à l'égard de mon anglais « so so » !

## TABLE DES MATIERES

|   |          |
|---|----------|
| <b>REMERCIEMENTS .....</b>                    | <b>2</b> |
| <b>TABLE DES MATIERES .....</b>               | <b>3</b> |
| <b>LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....</b> | <b>5</b> |
| <b>INTRODUCTION .....</b>                     | <b>6</b> |

### **PREMIER CHAPITRE :..... UNE GESTION DES RESSOURCES EN EAU SUR SOUTH TARAWA RENDUE DIFFICILE PAR LE MILIEU PHYSIQUE ET HUMAIN .....**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 LE MILIEU PHYSIQUE.....</b>  | <b>7</b>  |
| 1.1 <i>Situation géographique .....</i>   | <i>7</i>  |
| 1.2 <i>Climat.....</i>  | <i>10</i> |
| 1.3 <i>Géologie, sols et occupation du sol.....</i>                                       | <i>12</i> |
| 1.4 <i>Hydrologie et ressources en eau.....</i>   | <i>13</i> |
| <b>2 LE MILIEU HUMAIN .....</b>   | <b>18</b> |
| 2.1 <i>Evolution de la population sur l'ensemble de South Tarawa: .....</i>               | <i>18</i> |
| 2.2 <i>Analyse du taux de croissance sur South Tarawa.....</i>                            | <i>19</i> |
| 2.3 <i>Répartition de la population et du nombre de foyers sur les quatre zones:.....</i> | <i>20</i> |
| 2.4 <i>Analyse de la structure des foyers.....</i>  | <i>21</i> |
| 2.5 <i>Age de la population et scénarios de croissance .....</i>                          | <i>22</i> |
| 2.6 <i>Population et secteurs d'activité économique.....</i>                              | <i>22</i> |
| <b>3 GESTION DES RESSOURCES EN EAU .....</b>  | <b>23</b> |
| 3.1 <i>Exploitation des lentilles d'eau douce de Bonriki et Buota .....</i>               | <i>23</i> |
| 3.2 <i>Les autres sources d'approvisionnement en eau.....</i>                             | <i>25</i> |
| 3.3 <i>Bilan sur la gestion des ressources en eau sur South Tarawa.....</i>               | <i>26</i> |
| <b>4 PROBLEMATIQUE .....</b>  | <b>27</b> |
| <b>5 QUEL OUTIL, QUELLE DEMARCHE ?.....</b>   | <b>28</b> |
| 5.1 <i>Un modèle destiné à l'exploration du système.....</i>                              | <i>28</i> |
| 5.2 <i>Quel modèle pour étudier le système?.....</i>                                      | <i>29</i> |
| 5.3 <i>Intérêt des SMA.....</i>   | <i>32</i> |
| <b>6 DEMARCHES ET METHODES .....</b>  | <b>33</b> |
| 6.1 <i>Le cadre de la modélisation.....</i>   | <i>33</i> |
| 6.2 <i>Les démarches de modélisation .....</i>  | <i>34</i> |

### **DEUXIEME CHAPITRE : ELABORATION DU MODELE.....**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 LA PLATE-FORME DE MODELISATION .....</b>                                      | <b>35</b> |
| <b>2 REPRESENTATION DE L'ESPACE .....</b>  | <b>36</b> |
| 2.1 <i>Délimitation du système d'étude.....</i>                                    | <i>36</i> |
| 2.2 <i>Un espace à plusieurs couches .....</i>                                     | <i>38</i> |
| <b>3 LES MODELES BIOPHYSIQUES .....</b>  | <b>40</b> |
| 3.1 <i>Modèle de bilan hydrique.....</i>   | <i>40</i> |
| 3.2 <i>Le modèle hydrogéologique.....</i>  | <i>46</i> |
| <b>3 LES ACTEURS DU SYSTEMES : CARACTERISTIQUES, DYNAMIQUES ET DECISIONS .....</b> | <b>50</b> |
| 3.1 <i>Les entités de la classe « foyer ».....</i>                                 | <i>50</i> |
| 3.2 <i>L'entité « agent PUB ».....</i>   | <i>52</i> |
| <b>4 ARCHITECTURE DU MODELE ET DEROULEMENT D'UNE SEQUENCE.....</b>                 | <b>53</b> |
| 4.1 <i>Initialisation et lancement du modèle.....</i>                              | <i>53</i> |
| 4.2 <i>Organisation d'un pas de temps .....</i>                                    | <i>54</i> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>TROISIEME CHAPITRE : VALIDATION ET COHERENCES INTERNES DU MODELES .....</b> | <b>56</b> |
| 1 VALIDATION DE LA RECHARGE SUR BONRIKI .....                                  | 56        |
| 2 VALIDATION DE LA PROFONDEUR DE LA LENTILLE SUR BONRIKI .....                 | 57        |
| 3 VALIDATION DU VOLUME DE LA LENTILLE DE BONRIKI .....                         | 59        |
| <br>   |           |
| <b>CONCLUSION .....</b>  | <b>60</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>   | <b>61</b> |

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

|   |    |
|---|----|
| FIGURE 1 : LOCALISATION DE LA REPUBLIQUE KIRIBATI.....  | 7  |
| FIGURE 2 : LOCALISATION DES TROIS ARCHIPELS DE KIRIBATI ET DE L' ATOLL DE TARAWA .....  | 7  |
| FIGURE 3 : ATOLL DE TARAWA (IN. WHITE & AL., 1999).....   | 8  |
| FIGURE 4 : LOCALISATION DES UNITES GEOGRAPHIQUES DE SOUTH TARAWA .....  | 9  |
| FIGURE 5 : PLUIE ANNUELLE (MM) 1947-1991 .....  | 10 |
| FIGURE 6 : PLUIE MENSUELLE MOYENNE (MM) CALCULEE SUR LA PERIODE 1947-1992 .....   | 10 |
| FIGURE 7 : VARIATION DE LA PLUIE ANNUELLE ET DU SOI, 1947-1991 .....  | 11 |
| FIGURE 8 : EVAPORATION POTENTIELLE MOYENNE MENSUELLE MM .....   | 12 |
| FIGURE 9 : SCHEMA DU POSITIONNEMENT D'UNE LENTILLE D'EAU DOUCE ET SENS DE CIRCULATION .....   | 14 |
| FIGURE 10 : LOCALISATION DES RESERVES DE BONRIKI ET BUOTA .....   | 15 |
| FIGURE 11: PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE LA RESERVE DE BONRIKI ET DE LA PISTE D' ATERRISSAGE .....                                       | 15 |
| FIGURE 12: TRANSECT SUR BONRIKI MONTRANT LA STRATIGRAPHIE ET LA DISTRIBUTION DE LA SALINITE<br>ASSOCIEE A LA LENTILLE .....         | 16 |
| FIGURE 13: PLUVIOMETRIE ANNUELLE ET RECHARGE SUR TARAWA 1954-2000 .....   | 17 |
| FIGURE 14 : VARIATION DE LA RECHARGE MENSUELLE, DE L'EPaisseur DE LA LENTILLE ET DE LA PROFONDEUR<br>DE LA ZONE DE TRANSITION ..... | 17 |
| FIGURE 15 : EVOLUTION DE LA POPULATION SUR SOUTH TARAWA .....   | 19 |
| FIGURE 16 : EVOLUTION DU TAUX DE CROISSANCE ENTRE 1931 ET 1995.....   | 19 |
| FIGURE 17: EVOLUTION DU NOMBRE DE FOYERS SUR SOUTH TARAWA ENTRE 1990 ET 2000 .....  | 20 |
| FIGURE 18: EVOLUTION DU NOMBRE MOYEN DE PERSONNES PAR FOYER.....  | 21 |
| FIGURE 19: REPARTITION DU NOMBRE DE PERSONNES PAR FOYER .....   | 21 |
| FIGURE 20 : REPRESENTATION IMAGEE D'UN SYSTEME MULTI-AGENTS .....   | 31 |
| FIGURE 21 : LES TROIS MODULES DE LA PLATE-FORME CORMAS.....   | 35 |
| FIGURE 22 : COMPARAISON ENTRE DEUX REPRESENTATIONS DE LA ZONE, UNE IMAGE SATELLITE ET NOTRE GRILLE<br>REALISEE SOUS CORMAS.....     | 37 |
| FIGURE 23 : ENVIRONNEMENT D' ATOLLSCAPE .....   | 38 |
| FIGURE 24 :POINT DE VUE « PROFONDEUR DES SOLS » SUR BONRIKI .....   | 39 |
| FIGURE 25 : POINT DE VUE « OCCUPATION DES SOLS » SUR RURAL TARAWA 1 (EN HAUT) ET BONRIKI (EN BAS) ..                                | 39 |
| FIGURE 26 : POINT DE VUE « PROFONDEUR DES LENTILLES » .....   | 39 |
| FIGURE 27 : POSITIONNEMENT DES FOYERS SUR BONRIKI.....  | 40 |
| FIGURE 28 : STRUCTURE DU MODELE DE BILAN HYDRIQUE DANS LA ZONE NON SATUREE DU SOL .....   | 41 |
| FIGURE 29 : RESERVOIRS, VARIABLES ET PARAMETRES D'ENTREE DE WATBAL .....  | 42 |
| FIGURE 30 : AFFECTATION DES ATTRIBUTS INTERVENANT DANS LE BILAN HYDRIQUE AUX DIFFERENTES ENTITES<br>IMPLIQUEES .....                | 45 |
| FIGURE 31 : ETAPES DU BILAN HYDRIQUE.....   | 46 |
| FIGURE 32 : POSITIONNEMENT DES AXES, PARAMETRES ET VARIABLES INTERVENANT DANS LE CALCUL DE H .....                                  | 47 |
| FIGURE 33 : LES CELLULES FOYERS ESPACEES D'UNE LARGEUR L ET LE GRADIENT DE PROFONDEUR.....  | 48 |
| FIGURE 34 : DEFORMATION DU PLANCHER DES LENTILLES ET POSITIONNEMENT DES DIFFERENTES ZONES .....                                     | 49 |
| FIGURE 35 : INITIALISATION DES FOYERS.....  | 54 |
| FIGURE 36 : LES DIFFERENTES ENTITES, LEURS DYNAMIQUES, LEURS INTERACTIONS.....  | 55 |
| FIGURE 37 : COMPARAISON DES RECHARGES MENSUELLES CALCULEES SELON WATBAL ET ATOLLSCAPE .....   | 56 |
| FIGURE 38 : VARIATION DE LA PROFONDEUR MAXIMALE DE LA LENTILLE DE BONRIKI SUR 10 ANNEES DE<br>SIMULATION .....                      | 57 |
| FIGURE 39 : EVOLUTION DE LA PROFONDEUR SELON TROIS SCENARIOS DE SIMULATION.....   | 58 |
| <br>  |    |
| TABLEAU 1 : EVOLUTION DE LA POPULATION, DU NOMBRE DE FOYERS ET DU NOMBRE DE PERSONNES PAR FOYERS<br>ENTRE 1990 ET 2000 .....        | 20 |
| TABLEAU 2 : STRUCTURE PAR TRANCHES D' AGE DE LA POPULATION .....  | 22 |
| TABLEAU 3 : SCENARIOS DE CROISSANCE .....   | 22 |
| TABLEAU 4 : ANALYSE DES ERREURS DE SUPERFICIE PAR ILE.....  | 38 |

## INTRODUCTION

Les réserves d'eau douce constituent une **ressource limitée** dans la plupart des îles du Pacifique. Les nations concernées se heurtent à des pressions croissantes sur cette ressource en raison de l'augmentation de la population, principalement dans les zones urbaines, et de la superficie très limitée des îles. Les situations critiques concernent les **atolls** dont l'alimentation hydrique ne dépend que de leurs ressources en eaux souterraines dont la disponibilité et la qualité constituent désormais des entraves significatives à leur développement.

Face à ce constat alarmant, le **CIRAD** (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, France) en partenariat avec l'**ANU** (Australian National University, Australie) a démarré en avril 2002 un projet d'une durée de trois ans dont l'objectif est double. Il vise, dans un premier temps, à améliorer les **connaissances** des mécanismes hydrogéologiques et des composantes de l'exploitation des ressources en eau sur deux atolls coralliens, l'un en République Kiribati, l'autre aux Iles Tonga. Dans un deuxième temps, il souhaite amener les différents acteurs des systèmes étudiés (population locale, autorités coutumières, administration, recherche) à définir une **gestion consensuelle** des ressources en eau et les mécanismes de sa mise en œuvre sur le terrain, à l'aide d'un Support d'Aide à la Négociation, en intégrant les aspects biophysiques, économiques mais également socioculturels.

L'originalité de l'approche réside dans le choix de l'outil d'aide à la gestion: les **Systèmes Multi Agents** (SMA). Ces derniers permettent d'intégrer à la fois le savoir des chercheurs et celui des acteurs locaux, les points de vue des différents protagonistes pouvant coexister au sein du même outil de simulation. En modélisant simultanément, d'une part une multitude d'acteurs interagissant entre eux, capables d'évoluer et de faire des choix dans un environnement changeant; et d'autre part une dynamique biophysique des ressources en eaux douces, en interaction avec le comportement des agents; les SMA aident à appréhender la **complexité du système**. Cette démarche ne préjuge pas des objectifs des gestionnaires et ne vise pas non plus à déterminer une solution optimale « clé en mains », mais à apporter un **support de médiation** facilitant le dialogue entre acteurs du système.

Mon travail est circonscrit à la zone de South Tarawa en République Kiribati, l'un des deux sites « pilotes » du projet. La population de cet atoll corallien fortement urbanisé est principalement tributaire des ressources en eaux souterraines de la zone pour la satisfaction de ses besoins quotidiens. Les pressions sur la ressource s'expriment aussi bien en terme quantitatif (croissance démographique très élevée, augmentation de la demande en eau due à de nouveaux modes de vie, etc...) que qualitatif (augmentation des sources et des volumes de pollution). Ces ressources sont en outre fortement perturbées par les événements climatiques majeurs tels que les épisodes El Nino. Tous ces facteurs creusent l'écart entre offre et demande et viennent mettre en péril la durabilité du système, déjà fragilisé par ses caractéristiques naturelles.

Ce mémoire a pour objectif la mise en place d'un prototype de modélisation de la gestion des ressources en eau sur South Tarawa, à l'aide des systèmes multi-agents, grâce à l'identification préalable des processus hydrogéologiques majeurs et des interactions entre acteurs du milieu et environnement.

Une première partie destinée à la présentation de South Tarawa permettra de préciser le contexte de l'étude et la problématique ainsi que de justifier du choix de l'outil et de la démarche. Une deuxième partie s'intéressera aux problèmes posés par la représentation du système en phase de création du modèle. Enfin, cohérence et validation internes du modèle seront analysées.

# Premier Chapitre : Une gestion des ressources en eau sur South Tarawa rendue difficile par le milieu physique et humain

Cette première partie, fruit d'une synthèse bibliographique, entend apporter un éclairage sur le site d'étude, décliné en trois thèmes : situation géographique, structure de la population et gestion des ressources en eau. L'objectif est de discerner et mettre en exergue les principales caractéristiques du milieu et les processus responsables de sa dynamique biophysique dans une perspective de modélisation du système.

## 1 Le milieu physique

### 1.1 Situation géographique

Ancienne colonie anglaise, indépendante depuis 1979 et membre du Commonwealth, la République **Kiribati** (Figure 1), se compose de 33 atolls coralliens repartis en trois archipels (Figure 2), respectivement d'ouest en est : les îles Gilbert, les îles Phoenix et les îles de la Ligne. L'ensemble des terres émergées ne couvrent que 811 km<sup>2</sup> mais leur dispersion sur quelques 4 500 km le long de l'équateur octroie à Kiribati une Zone Economique Exclusive (Z.E.E) vaste comme la moitié des Etats-Unis avec une superficie atteignant 3 550 000 km<sup>2</sup>. La population totale a été estimée à 94 985 habitants en 2001, conférant au pays une densité de 116 hab/km<sup>2</sup>.



Figure 1 : Localisation de la République Kiribati (In APIA, 1993)

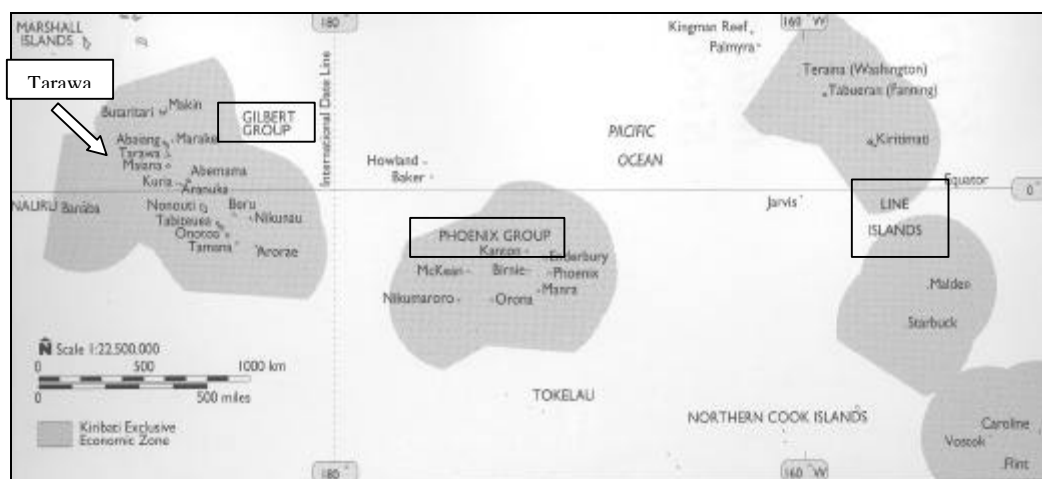
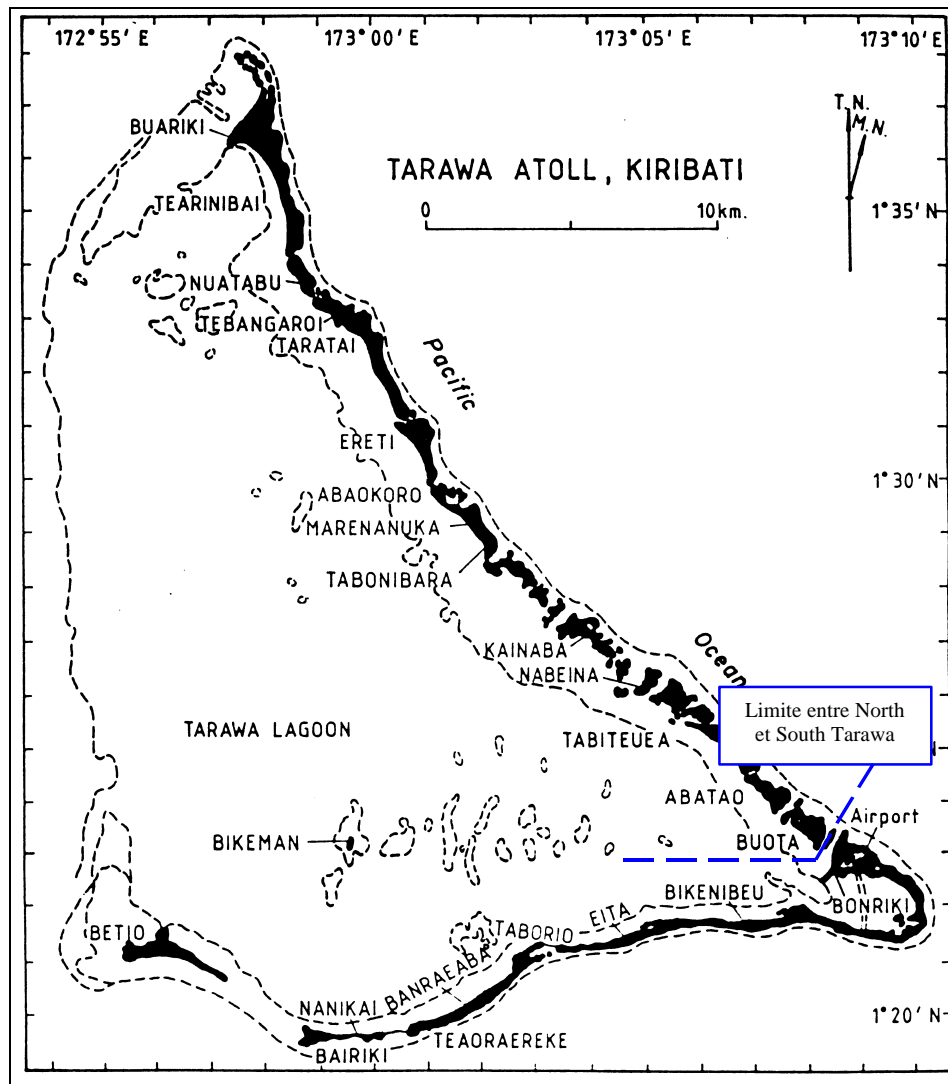


Figure 2 : Localisation des trois archipels de Kiribati et de l'atoll de Tarawa (In APIA, 1993)

L'atoll de **Tarawa** (1°30'N, 173°00'E), dans l'archipel des Gilbert, se présente sous la forme d'un triangle s'étendant sur 35 km du nord au sud et sur 28 km d'est en ouest. Les terres émergées d'une superficie de 31 km<sup>2</sup> entourent un lagon central (329 km<sup>2</sup>), configuration typique des récifs coralliens. L'atoll est communément divisé en deux zones : North Tarawa et South Tarawa. (Figure 3).

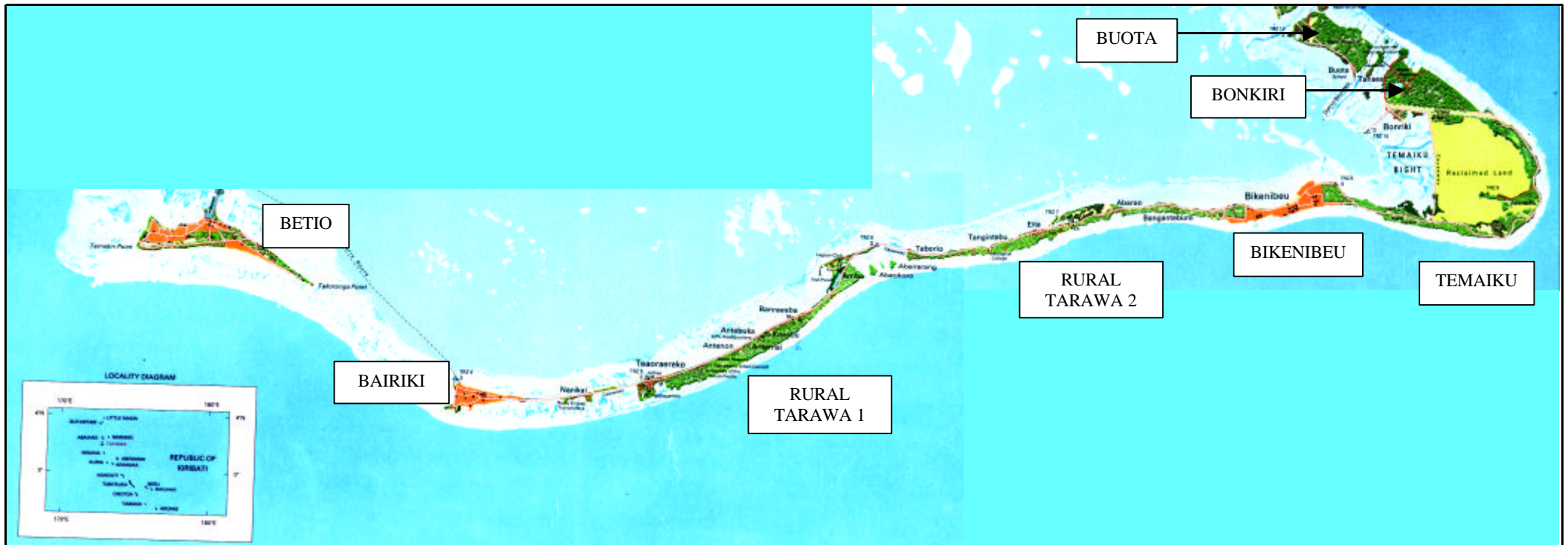


*Figure 3 : Atoll de Tarawa (In. White & al., 1999)*

**North Tarawa** s'étend de l'île de Buota au sud-est à Buariki à l'extrémité nord, sur une superficie de 15.3 km<sup>2</sup> et se compose de communautés villageoises traditionnelles.

**South Tarawa**, composée de sept îles, dont Bairiki, la capitale de Kiribati, couvre une superficie de 16 km<sup>2</sup>. Cette zone est bordée par l'île de Bonriki au sud-est de Tarawa et par Betio au sud-ouest. Assimilée au centre « urbain » de Tarawa, elle concentre la vie politique, administrative et commerciale. La Figure 4, agrandissement de South Tarawa, permet de localiser les principales zones dont il sera question tout au long de cette étude. Précisons que Buota, ordinairement rattachée à North Tarawa, a été intégrée à notre zone d'étude pour des raisons de cohérence du milieu, l'île servant à approvisionner en eau potable l'ensemble de SouthTarawa.





*Figure 4 : Localisation des unités géographiques de SouthTarawa (Carte Topographique 1 :50000, 1981)*

## 1.2 Climat

Sous influence des alizés du sud-est, le climat de South Tarawa, de type tropical humide, est fortement influencé par les épisodes El Niño. Les températures moyennes journalières varient entre 26 et 32 C tout au long de l'année.

### 1.2.1 Pluviométrie

Les données pluviométriques, relevées au pas de temps journalier à la station météorologique de Betio, sont disponibles sur la période 1947-2002.

#### a) Pluviométrie annuelle :

La pluviométrie moyenne annuelle (Figure 5) calculée sur la période 1947-1991 s'élève à 2024 mm. Les maximums et minimums, respectivement 3 843 mm (1987) et 398 mm (1950), témoignent de variations pluviométriques inter annuelles très élevées, le coefficient de variation étant de 0.45.

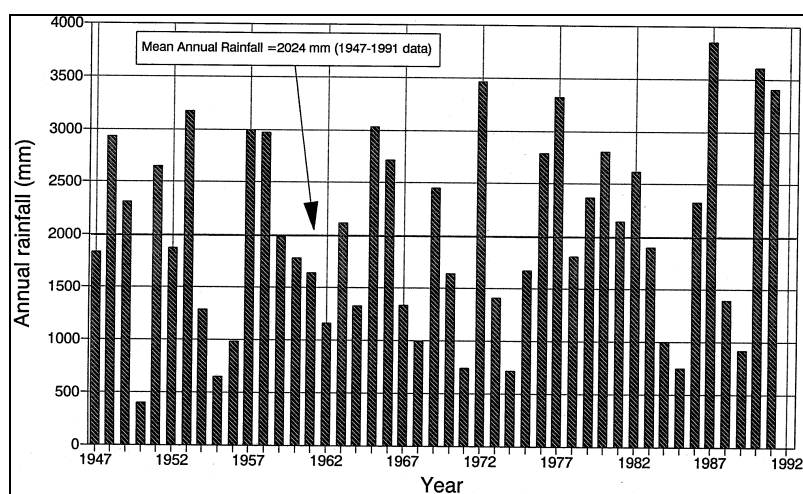


Figure 5 : Pluie annuelle (mm) 1947-1991 (In. Falkland, 1992)

#### b) Pluviométrie mensuelle :

Les précipitations maximales, minimales et moyennes mensuelles sur la période 1947-1992 sont représentées sur la Figure 6. En moyenne, janvier est le mois de l'année le plus humide et octobre le mois le plus sec. Le coefficient de variation mensuelle varie entre 0.68 (décembre) et 1.09 (octobre).

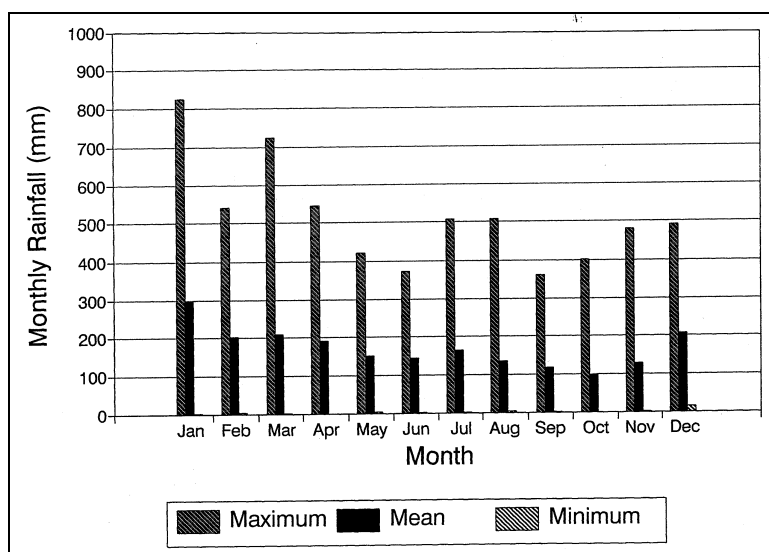


Figure 6 : Pluie mensuelle moy. (m) calculée sur la période 1947-1992 (In. Falkland, 1992)

### c) Hétérogénéité spatiale des précipitations

Les précipitations peuvent fluctuer sur de courts pas de temps (jour, semaine) le long de South Tarawa entre Betio et Bonriki, mais les variations s'avèrent faibles au pas de temps mensuel, le cumul des différences de pluviométrie relevé sur la période 1982-1991 étant de 101 mm entre les deux îles. Les données pluviométriques enregistrées sur Betio peuvent donc être considérées comme représentatives de l'ensemble de South Tarawa.

### d) Influence des épisodes El Niño:

Les précipitations sur Tarawa sont fortement corrélées aux épisodes El Niño. La Figure 7 représente simultanément les variations de pluviométrie annuelle (exprimée en pourcentage de pluviométrie annuelle moyenne) et le *Southern Oscillation Index (SOI)* qui traduit l'intensité du phénomène El Niño sur la période 1947-1991. Les valeurs négatives du SOI témoignent de périodes de fortes activités, les valeurs positives désignent au contraire l'absence du phénomène. La mise en parallèle des deux variables révèlent un coefficient de corrélation de 0.81. Ainsi, les fortes périodes de pluies sont associées aux épisodes El Niño, les sécheresses ayant lieu généralement dans les périodes d'intervalle. A titre d'exemple, deux des plus longues périodes de sécheresse ont eu lieu en 1973-1974 et 1988-89 avec respectivement 57 mm de pluie en 6 mois et 68 mm en 7 mois.

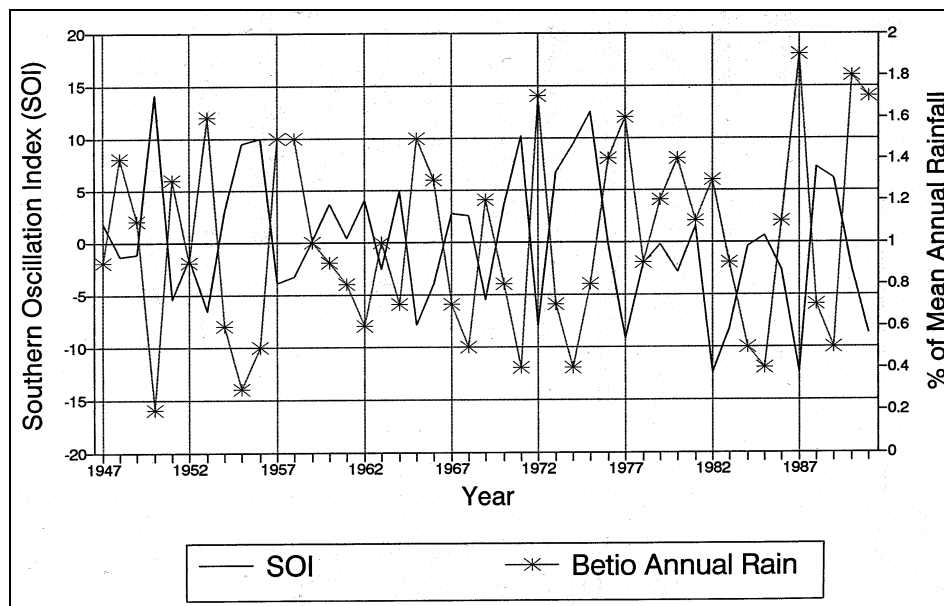


Figure 7 : Variation de la pluie annuelle et du SOI, 1947-1991 (In. Falkland, 1992)

### e) Influence des marées :

Tarawa subit l'influence de micro-marées à raison de deux hautes et deux basses toutes les 24 heures. Les variations restent inférieures à 2m au printemps. Il existe un fort cycle saisonnier durant lequel les fluctuations du niveau moyen mensuel de la mer sont de l'ordre de 0.1-0.2 m.

## 1.2.2 Evaporation

En milieu insulaire tropical de faible altitude tel que Tarawa, des estimations moyennes mensuelles de l'évaporation sont satisfaisantes pour des études de bilan hydrique, les variations d'évaporation sur une durée mensuelle étant généralement peu significatives. La Figure 8 illustre les valeurs d'évapotranspiration potentielle mensuelles maximales, minimales et moyennes sur la période 1981-1991. Le mois d'octobre affiche les valeurs d'évaporation les plus élevées et juin les valeurs les plus faibles.

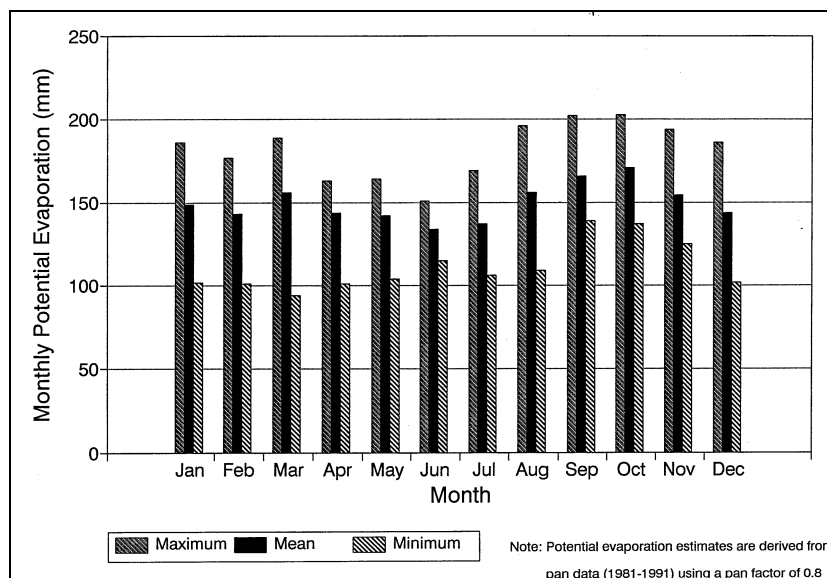


Figure 8 : *Evaporation potentielle moyenne mensuelle mm (In. Falkland, 1992)*

En résumé, l'étude du climat de Tarawa met en évidence de fortes variabilités inter mensuelles et inter annuelles, ainsi qu'une importante corrélation aux phénomènes El Niño, responsables d'une alternance de périodes humides et sèches. Les phases de sécheresses peuvent s'étendre sur plusieurs mois et avoir des répercussions catastrophiques sur le bilan hydrique. Intéressons nous à présent au milieu physique et plus spécifiquement aux caractéristiques géologiques.

### 1.3 Géologie, sols et occupation du sol

#### 1.3.1 Géologie

L'atoll de Tarawa, élevé à plus de 4 000m au dessus du plancher océanique, s'est développé à partir de la croissance de récifs coralliens sur un ancien volcan éteint au gré des périodes de fluctuations du niveau de la mer. La formation des récifs date d'il y a environ 3000 ou 4000 ans. Les îles correspondent à l'extrémité est du volcan, la bordure ouest étant submergée. Le lagon, d'une profondeur n'excédant pas 20m s'étend entre les deux extrémités, reflétant ainsi l'emplacement originel du cratère.

D'un point de vue géologique, l'atoll combine dans sa partie supérieure (les premiers 30 mètres) deux formations superposées. La plus jeune, datant de l'Holocène, est composée de sédiments coralliens non consolidés; elle coiffe une couche plus âgée du Pléistocène formée de calcaires coralliens de profondeur inconnue.

Une discontinuité dans les perméabilités entre les deux formations a été décelée à une profondeur variant entre 10 et 15m sous le niveau zéro. Les calcaires du Pléistocène sous la discontinuité présentent une perméabilité relativement élevée qui autorise le mélange entre eaux douces et eaux salées. A l'inverse, le mélange est moins susceptible de se produire dans les sédiments de l'Holocène aux perméabilités beaucoup plus faibles. Cette particularité, d'une importance majeure dans la formation des lentilles d'eau douce, sera approfondie au paragraphe suivant.

#### a) Types de sols

Résultant de la jeunesse de l'atoll, les sols sont très peu développés. Ils sont de type sableux corallien, profond, alcalin ( $8.2 < \text{pH} < 8.9$ ), de structure grossière et extrêmement perméable. Ces sols peu fertiles sont caractérisés par des carences en fer, manganèse, cuivre ou zinc. La quantité de matière organique est faible compte tenu de la texture des sols et de l'infiltration extrêmement rapide lors des pluies.

## b) Végétation

La végétation, qui comprend essentiellement cocotiers, bananiers, pandanus, arbres à pain, papayers, s'est donc développée sur un substrat nutritif très pauvre. En outre, les espèces endémiques ont subi de fortes modifications liées aux installations humaines et à l'introduction du cocotier pour l'industrie du copra dans les années 1900.

Nous retiendrons donc une zone géologique superficielle caractérisée par la présence de deux formations aux perméabilités bien distinctes qui conditionnent fortement le type de ressources en eau sur South Tarawa. Le substrat a donné naissance à des sols sableux très pauvres, très perméables et peu profonds qui offrent de très faibles possibilités de mise en valeur agricole.

## 1.4 Hydrologie et ressources en eau

Ce paragraphe s'intéresse dans un premier temps aux caractéristiques spécifiques des milieux insulaires conditionnant la formation et le maintien des ressources en eau, qu'elles soient superficielles et/ou souterraines. Les îles volcaniques, au relief marqué et aux altitudes « élevées », comprennent à la fois des eaux souterraines et des eaux de surface. A l'opposé, les îles coralliennes, aux altitudes très basses, sont généralement exclusivement dépendantes de leurs ressources en eaux souterraines. Ces dernières se présentent sous la forme de lentilles d'eau douce reposant sur de l'eau salée de plus forte densité.

### 1.4.1 Facteurs influençant la création et les caractéristiques des lentilles

Les deux facteurs primordiaux dans la **formation** et le **maintien** des lentilles sur South Tarawa sont:

- les conditions géologiques adaptées qui préviennent le mélange entre les deux fluides,
- le niveau de recharge adéquat permettant le maintien de la lentille.

Les **dimensions** et le **degré de salinité** des lentilles sont dépendants des facteurs suivants :

- perméabilité et porosité des formations géologiques,
- quantité de pluie et distribution,
- couverture végétale (répartition et densité) et distribution des types de sol : ces facteurs influencent principalement l'évapotranspiration,
- dimension de l'île,
- amplitude des marées,
- méthode d'extraction et quantité d'eau pompée.

### 1.4.2 Fonctionnement des lentilles d'eau douce

Le fonctionnement de ces lentilles obéit au principe général des aquifères côtiers. Ces derniers sont des systèmes hydrologiques complexes qui résultent de la mise en contact de la nappe d'eau douce avec l'eau de mer qui s'infiltré latéralement dans le sous-sol. Dans de tels systèmes, l'eau douce souterraine, en mouvement depuis l'amont (les points hauts de la surface piézométrique) vers l'aval (les points bas) des nappes, se dirige vers le rivage où elle va se décharger. Sa progression est limitée en profondeur par l'invasion, en direction inverse, de l'eau salée marine qui tend à pénétrer sous l'île. Compte tenu de leurs densités différentes, les deux types d'eau en présence dans la zone littorale ont tendance à ne pas se mélanger. Elles vont se superposer, l'eau douce, moins dense, "flottant" alors sur l'eau salée.

### a) Delimitations des lentilles

La limite supérieure de la lentille est matérialisée par le toit de la nappe. Dans le cas de South Tarawa, les lentilles sont de type « nappe libre » et le toit est à pression atmosphérique. La frontière inférieure, dont la caractérisation sera explicitée au paragraphe suivant, coïncide avec le début d'une couche plus ou moins épaisse, selon les configurations locales, nommée zone de transition (Figure 9). Cette interface marque le contact entre les deux types de fluides. Sa position est déterminée par la différence d'altitudes entre le niveau piézométrique de la nappe et le niveau zéro (niveau moyen des mers) de manière générale et plus spécifiquement par la géologie de l'atoll. Issue de la mixité partielle entre les deux fluides, cette zone est ainsi caractérisée par un gradient de salinité de l'eau, qui passe progressivement de celle de l'eau douce à celle de l'eau de mer.

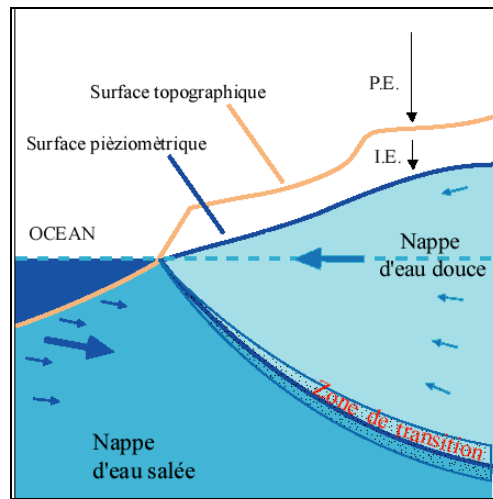


Figure 9 : Schéma du positionnement d'une lentille d'eau douce et sens de circulation (In : UNC-LATICAL, 1999)

### b) Importance de la géologie dans la délimitation de la profondeur d'extention des lentilles sur South Tarawa

Comme mentionné précédemment, la géologie de l'atoll de Tarawa joue un rôle majeur dans la formation des lentilles. Les lentilles, dont la profondeur peut atteindre 30m (ALAM *et al.*, 1997), se forment dans la zone de superposition des deux couches géologiques précédemment évoquées : l'Holocène et le Pléistocène. La discontinuité de perméabilités est une des caractéristiques prédominantes dans le contrôle et la régulation de la profondeur des lentilles d'eau douce et à fortiori dans le positionnement de la zone de transition.

### c) Localisation des lentilles sur South Tarawa.

Les îles de South Tarawa offrant les mêmes caractéristiques géologiques, pluviométriques et altimétriques, le facteur discriminant l'existence des lentilles d'eau douce est la largeur de l'île qui doit être supérieure à 300m (FALKLAND *et al.*, 1997). Sur notre zone d'étude, des formations lenticulaires apparaissent sur la plupart des îles, les deux principales étant celles de Bonriki et Buota (Figure 10).



*Figure 10 : Localisation des réserves de Bonriki et Buota (Carte Topographique 1 :50000, 1981)*



*Figure 11: Photographie aérienne de la réserve de Bonriki et de la piste d'atterrissage (Cliché I. White, 1999)*

#### **d) Etude de la forme de la lentille principale de South Tarawa : Bonriki**

La lentille d'eau douce la plus large sur South Tarawa est située sous Bonriki (Figure 11), la largeur maximale de l'île étant de 1000 mètres et la profondeur maximale pour la lentille relevée sur la période de mesures 1980-1992 étant d'environ 23 mètres.

Les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ont adopté en 1971 la valeur de  $600 \text{ mg.L}^{-1}$  comme limite maximale de concentration en ion chlorure tolérable pour l'eau potable qui sert à positionner la limite inférieure des lentilles. Cette valeur de salinité est équivalente à une conductivité hydraulique de  $2\,500 \text{ } \mu\text{hos.cm}^{-1}$ . En 1993, l'OMS a révisé à la baisse cette limite, la nouvelle directive suggérant alors une valeur de  $250 \text{ mg.L}^{-1} \text{Cl}^{-1}$  soit  $1\,500 \text{ } \mu\text{hos.cm}^{-1}$ . Cette révision étant fondée sur des critères « esthétiques » de goût et non sur la santé humaine, toutes les études sur les lentilles de South Tarawa ont continué d'adopter la première valeur comme limite inférieure des lentilles.

La Figure 12 analyse la distribution de la conductivité hydraulique en fonction de la profondeur sur un transect de Bonriki. Force est de constater la concordance entre la limite inférieure

de la lentille et l'interface entre l'Holocène et le Pléistocène. On retiendra également que la profondeur maximale de la lentille ne coïncide pas avec le centre de l'île mais est légèrement décalée cote du lagon en raison notamment de la profondeur des sols plus faibles aux capacités de stockage en eau plus limitée.

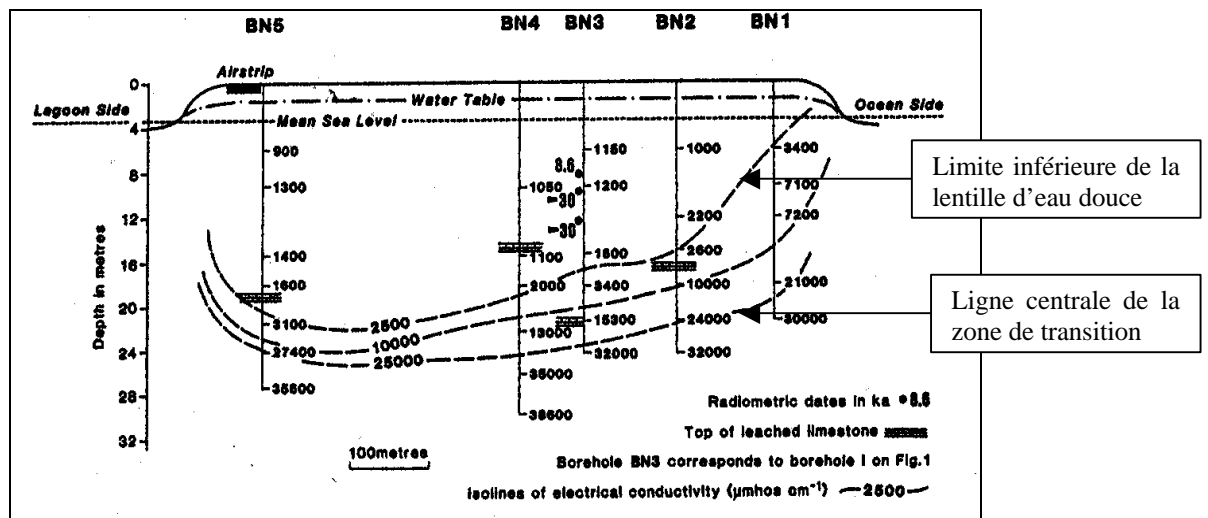


Figure 12: Transect sur Bonriki montrant la stratigraphie et la distribution de la salinité associée à la lentille (In FALKLAND, 1997)

Falkland *et al.* (1997) démontre l'absence de variations latérales de la conductivité hydraulique et conclue à l'influence prédominante des variations de la recharge, plutôt que des variations de conductivité hydraulique, sur la forme de la lentille.

La ligne médiane de la zone de transition est assimilée à la ligne de conductivité hydraulique égale à  $25\,000\ \mu\text{mhos}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La distance minimale entre la base de la lentille d'eau douce et la ligne centrale de la zone de transition est de 4 mètres à proximité de l'aéroport, zone où la lentille atteint sa profondeur maximale. L'épaisseur de la zone de transition ne varie pas significativement, même entre les périodes humides et sèches et la distance entre le plancher de la lentille et cette limite se maintient dans un intervalle de 3 à 10 mètres sur la période de mesures de 1980 à 1992.

### e) Recharge de la lentille de Bonriki

La recharge de la lentille de Bonriki a été estimée sur la période 1948-1991 à partir d'un modèle de bilan hydrique utilisant comme variable d'entrée la pluviométrie au pas de temps journalier (Falkland, 1992). Il est supposé dans le modèle que l'île est couverte à 80% par des cocotiers. La recharge moyenne sur la totalité de la période d'étude est estimée à 735 mm/an soit 34% de la pluie moyenne sur la période (2 029 mm/an).

Les années de fortes pluies sont associées aux années de fortes recharges, comme en témoigne la Figure 13, mais la relation n'est cependant pas évidente à établir car la recharge dépend non seulement de la pluviométrie totale mais aussi des séries chronologiques de pluie.



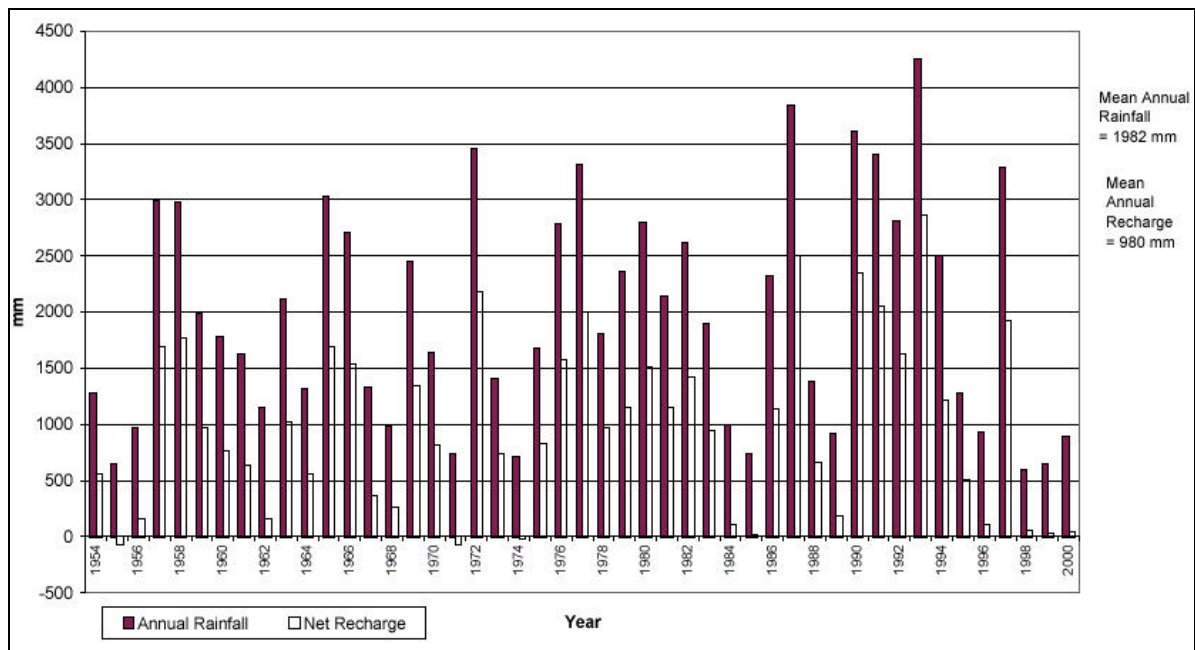


Figure 13: pluviométrie annuelle et recharge sur Tarawa 1954-2000 (In : FALKLAND, 1997)

La Figure 14 illustre les variations du plancher de la lentille d'eau douce et de la ligne médiane de la zone de transition en fonction des variations de recharge estimée à partir de valeurs mensuelles de pluie. L'élévation du plancher de la lentille est mise en évidence lors de périodes de sécheresse prolongée (1984-85 et 1988-89), à l'opposé ce dernier s'enfonce lors de périodes de forte recharge (1986-87). La ligne médiane de la zone de transition suit les mêmes variations que le plancher de la lentille.

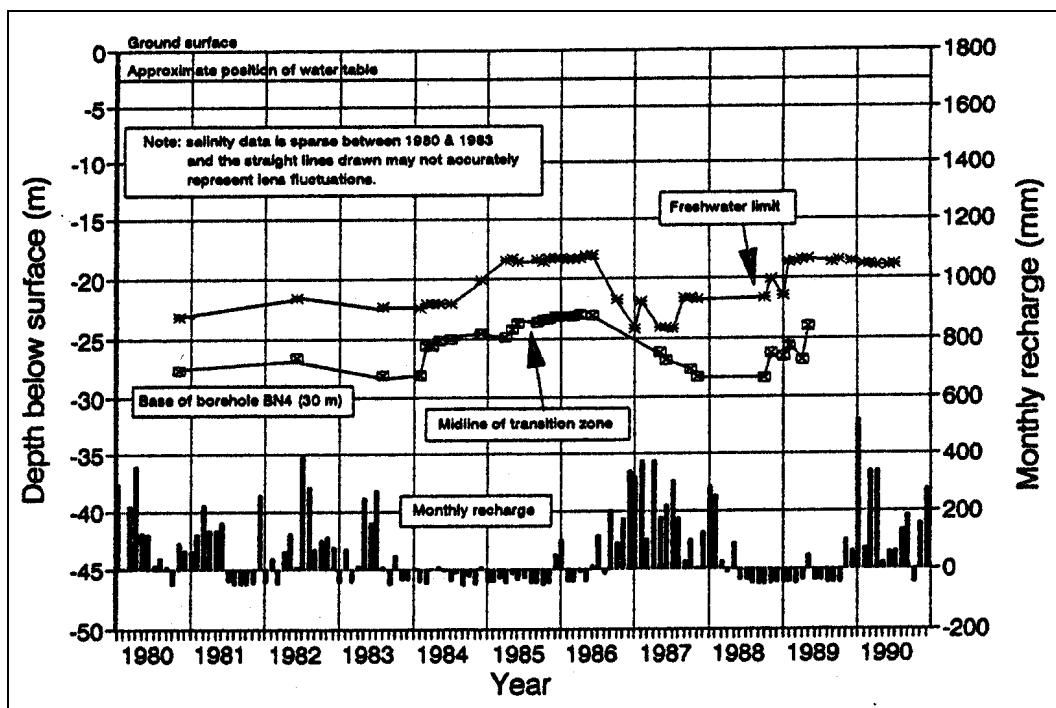


Figure 14 : Variation de la recharge mensuelle, de l'épaisseur de la lentille et de la profondeur de la zone de transition (In FALKLAND, 1997)

La description du milieu physique a permis de mettre en exergue les caractéristiques suivantes :

- ↳ un milieu insulaire divisé en un chapelet de 7 petites îles, sur une superficie extrêmement réduite ;
- ↳ un climat très variable, sous influence du phénomène El Niño, pouvant engendrer de longues périodes de sécheresse ;
- ↳ des sols très peu fertiles et extrêmement perméables ;
- ↳ l'absence de ressources en eau superficielles, ces dernières étant circonscrites à des lentilles d'eau douce « en flottaison » sur l'eau de mer sous-jacente.

*Comment s'organise sur ce territoire exigu de 16 km<sup>2</sup>, aux ressources naturelles très limitées, une population chiffrée officiellement à 36 722 habitants en 2000 (mais qui doit plus vraisemblablement avoir déjà dépassé les 45 000)?*

## **2 Le milieu humain**

Les grands traits de l'histoire de Tarawa, récapitulés ci-après, permettent d'apporter un éclairage sur la situation actuelle du pays. Les premières installations remontent à 2500-3500 ans, les migrants étant originaires d'Asie du sud-est et des Samoa. Les îles Gilbert, découvertes en 1606 par le navigateur espagnol Pedro Fernandez de Quiros, deviennent protectorat britannique en 1892. Trois ans plus tard, Tarawa est désignée comme la capitale administrative en raison de la relative entendue de son lagon, bien protégé, qui assure une excellente facilité d'ancrage. Durant la seconde guerre mondiale, Tarawa est envahie par les troupes japonaises en 1941 qui procèdent alors à d'importants massacres de la population. Repris par les alliés en 1943 au terme de sanglants combats sur l'île de Betio, la zone demeure sous contrôle britannique jusqu'à la déclaration d'indépendance en 1979. Kiribati doit alors faire face à un grave déséquilibre commercial et à un déficit budgétaire considérable. La principale source de revenu, l'extraction de phosphate de l'île de Banaba, qui représentait jusqu'à 80% des exportations et 50% des recettes dans le budget national, s'avère totalement épuisée au terme de la domination britannique, ce qui se traduit par une dégradation dramatique du niveau de vie de la population, et une diminution de moitié du PNB. L'époque coloniale aura ainsi entraîné l'émergence de South Tarawa en tant que centre politique et administratif, largement amorcé concentration de population et urbanisation de la zone, et entraîné le pays dans une dépendance économique vis à vis des aides extérieures qui persiste toujours.

L'analyse démographique qui suit a été largement inspirée du rapport d'enquête SAPHE (2001) qui analyse la population sur South Tarawa selon une typologie en quatre zones géographiques considérées comme homogènes:

- l'île de Betio, classée intégralement en "zone urbaine";
- l'île de Bairiki, classée également en "zone urbaine";
- Bikenibeu, classée en "zone urbaine avec extensions rurales" ;
- Rural Tarawa, constituée par l'ensemble des zones restantes, classée en "zone rurale".

Le terme de "rural" est à relativiser, la différence entre zones urbaines et rurales étant désormais factice sur South Tarawa, "peri-urbain" traduirait sans doute mieux la réalité.

### **2.1 Evolution de la population sur l'ensemble de South Tarawa:**

La population totale de South Tarawa s'élève à 36 722 habitants en 2000, date du dernier recensement officiel. Certains spécialistes de la zone mettent en doute la pertinence des chiffres du recensement, les statistiques ayant selon eux tendance à sous-estimer les données réelles. La population de South Tarawa semblerait totaliser plus probablement 45 000 habitants en 2000. La Figure 15 retrace l'évolution de la population entre 1930 et 2000. On notera la très forte augmentation qui débute après la seconde guerre mondiale et n'a de cesse de progresser jusqu'en 2000.

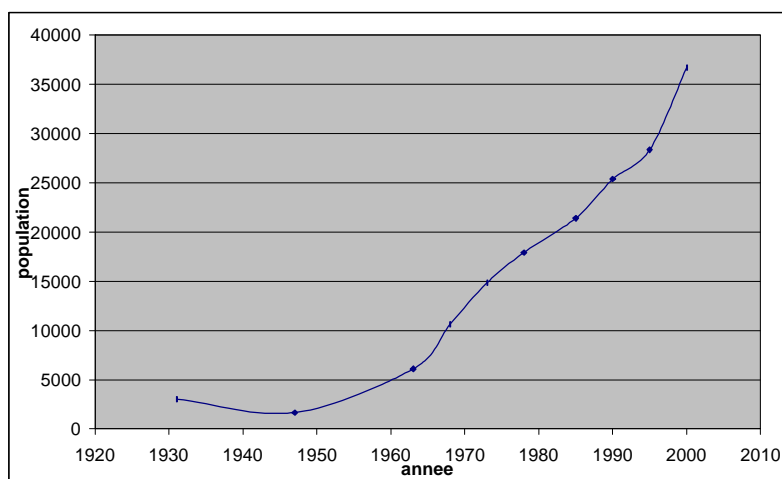


Figure 15 : Evolution de la population sur South Tarawa (In. SAPHE, 2001)

La densité est de 2330 hab/km<sup>2</sup>, par comparaison la moyenne sur Kiribati est de 116 hab/km<sup>2</sup>.

## 2.2 Analyse du taux de croissance sur South Tarawa

La figure 16 illustre l'évolution du taux de croissance de la population sur South Tarawa entre 1931 et 1995. Les plus forts taux correspondent à la période post seconde guerre mondiale qui avait fortement porté atteinte à la population. Entre 1990 et 1995, ce taux s'élevait à 2.4% pour South Tarawa alors qu'il n'était que de 1.6% pour l'ensemble de Kiribati.

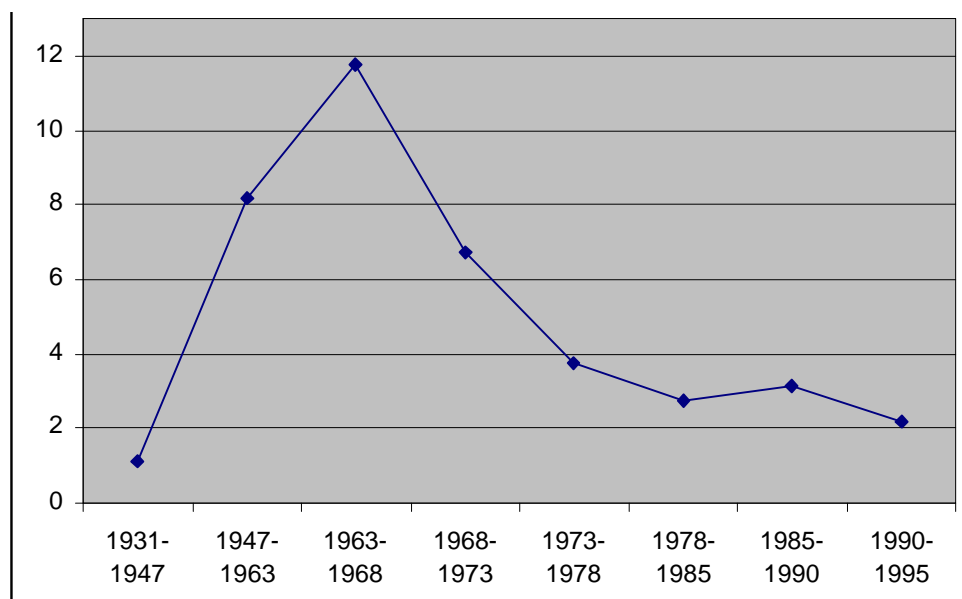


Figure 16 : évolution du taux de croissance entre 1931 et 1995

Le taux de croissance très élevé de la population de South Tarawa s'explique culturellement par:

- la tradition du maintien d'une grande famille, nécessaire pour faire face aux taux de mortalité infantile élevés,
- le besoin pour les parents d'une progéniture suffisamment nombreuse pour subvenir à leurs besoins à l'âge de la retraite.

Les progrès en matière de santé ont permis d'augmenter l'espérance de vie et de diminuer les taux de mortalité infantile, aujourd'hui réduit à 62 ‰; de fait ils ont aussi contribué à accroître la

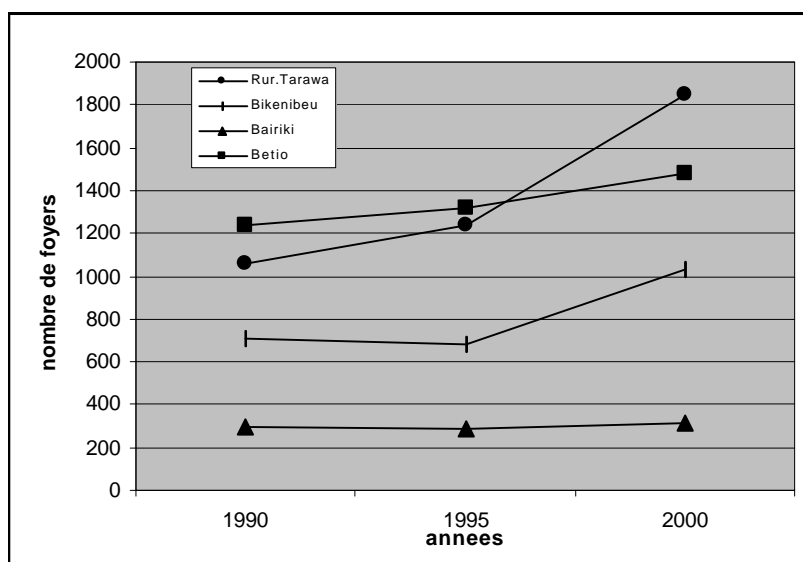
croissance de la population. En outre, l'arrivée de nombreux migrants venant des îles extérieures sur South Tarawa est un facteur contributif à l'augmentation du nombre de foyers. Enfin, et surtout, la population est à 90% de confession chrétienne et l'Eglise, extrêmement influente, s'oppose fermement à toute politique de régulation des naissances. L'espérance de vie est aujourd'hui de 57 ans pour les hommes et de 62 ans pour les femmes.

### 2.3 Répartition de la population et du nombre de foyers sur les quatre zones:

La répartition de la population de South Tarawa selon la distribution en quatre zones est présentée ci – après :

|                   | 1990  |       |           | 1995  |       |           | 2000  |       |           |
|-------------------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|
|                   | Pop.  | Foyer | Moy / foy | Pop.  | Foyer | Moy / foy | Pop.  | Foyer | Moy / foy |
| <b>Rur.Tarawa</b> | 7817  | 1056  | 7.4       | 9625  | 1239  | 7.8       | 14215 | 1846  | 7.7       |
| <b>Bikenibeu</b>  | 5894  | 708   | 8.3       | 6228  | 682   | 9.1       | 7584  | 1035  | 7.3       |
| <b>Bairiki</b>    | 2226  | 294   | 7.6       | 2153  | 284   | 7.6       | 2663  | 312   | 8.5       |
| <b>Betio</b>      | 9443  | 1239  | 7.6       | 10344 | 1315  | 7.7       | 12260 | 1479  | 8.3       |
| <b>TOTAL</b>      | 25380 | 3297  | 7.7       | 28350 | 3520  | 8.1       | 36722 | 4672  | 7.9       |

*Tableau 1 : évolution de la population, du nombre de foyers et du nombre de personnes par foyers entre 1990 et 2000 (in. SAPHE, 2001)*

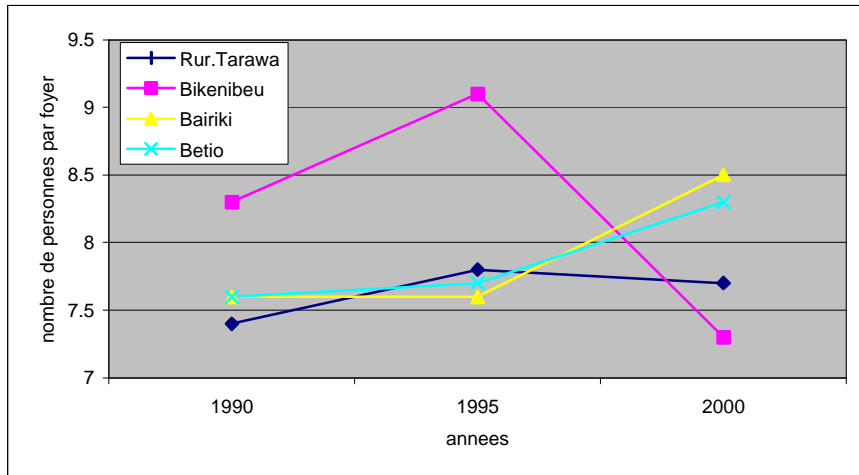


*Figure 17: Evolution du nombre de foyers sur South Tarawa entre 1990 et 2000*

En 10 ans, la population de South Tarawa a connu une augmentation supérieure à 10 000 habitants. La zone rurale est marquée par l'expansion la plus élevée, la population ayant doublé entre 1990 et 2000. La Figure 17 permet de souligner cette tendance qui débute dès 1990 sur Rural Tarawa alors qu'elle n'apparaît qu'après 1995 sur Bikenibeu. En milieu urbain, l'accroissement est lui aussi légèrement plus prononcé après 1995.

Concernant les densités de population sur chacune des zones, Betio totalise 9080 hab./km<sup>2</sup>, densité à peu près équivalente à celle de Hong Kong à titre comparatif. Sur Bairiki la densité est de 3804 hab./km<sup>2</sup>, sur Bikenibeu 4190 hab./km<sup>2</sup> et sur le reste de la zone 1194 hab./km<sup>2</sup>. D'après le rapport SAPHE, l'espace habitable sur les îles de Betio et Bairiki est entièrement saturé, l'urbanisation ayant atteint son développement maximal.

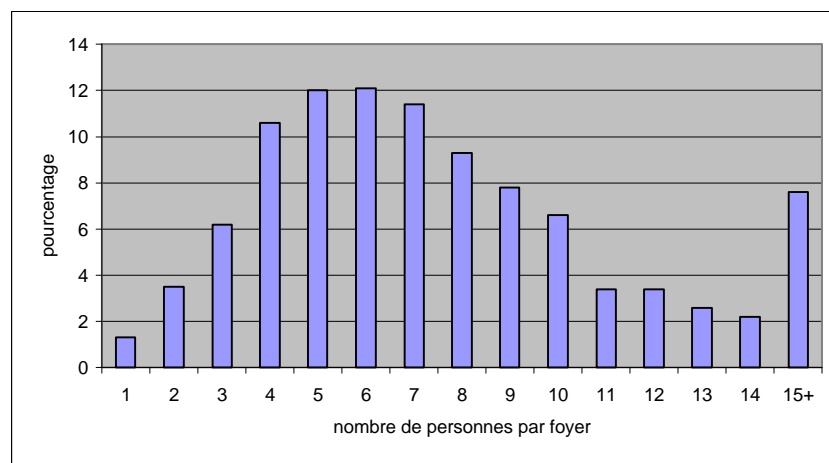
## 2.4 Analyse de la structure des foyers



*Figure 18: Evolution du nombre moyen de personnes par foyer*

L'analyse du nombre moyen de personnes par foyer (Figure 18) témoigne d'une tendance à la hausse en milieu urbain opposée à une stagnation voire une diminution en milieu rural. Bikenibeu compte une augmentation de 1356 habitants et de 353 foyers entre 1995 et 2000, soit une hausse de 23% de la population et de 50% du nombre de foyers. A titre comparatif, sur Rural Tarawa, l'accroissement de la population s'élève à 48% et celui des foyers à 49%. Ainsi, l'accroissement en milieu rural s'explique par une augmentation du nombre de foyers (+800 entre 1990 et 2000 sur Rural Tarawa) et non du nombre de personnes par foyer, laissant supposer que l'espace urbain était déjà saturé en 1990, les nouveaux migrants n'ayant pas d'autres alternatives que de s'installer en milieu rural.

La Figure 19 détaille la répartition du nombre de personnes par foyers calculé de manière globale sur South Tarawa. Les plus forts pourcentages correspondent à des tailles de foyer de 5 à 7 personnes et la catégorie +15, qui somme en réalité tous les extrêmes, qui peuvent monter jusqu'à une trentaine de personnes par foyer.



*Figure 19: Répartition du nombre de personnes par foyer*

## 2.5 Age de la population et scénarios de croissance

| Zone       | 0 – 14 ans |    | 15 – 49 ans |    | > 50 ans |    |        |
|------------|------------|----|-------------|----|----------|----|--------|
|            | total      | %  | total       | %  | total    | %  | total  |
| Rural Tar. | 3796       | 40 | 4849        | 50 | 980      | 10 | 9625   |
| Bikenibeu  | 2384       | 38 | 3246        | 52 | 598      | 10 | 6228   |
| Bairiki    | 824        | 38 | 1130        | 53 | 199      | 9  | 2153   |
| Betio      | 4042       | 39 | 5376        | 52 | 926      | 9  | 10 344 |

Tableau 2 : structure par tranches d'âge de la population (in. Statistics Office Ministry of Finance, Kiribati, 1995 Census of population)

L'analyse de la répartition de la population selon les classes d'âge souligne la forte proportion de la classe 0 - 14 ans, opposée à la classe >50 ans beaucoup plus restreinte. Globalement, 90% de la population à moins de 50 ans, stigmata des pays en développement.

| Scénario                          | 1995   | 2000   | 2005   | 2010   |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Population d'après le recensement | 28 350 | 36 722 | 47 566 | 61 613 |
| Taux de croissance                | 2.24%  | 5.31%  | 5.31%  | 5.31%  |
| Population à croissance moyenne   | 29 497 | 36 772 | 45 841 | 57 147 |
| Taux de croissance                | 3.05%  | 4.51%  | 4.51%  | 4.51%  |
| Population à croissance faible    | 30 524 | 36 722 | 44 164 | 53 116 |
| Taux de croissance                | 3.76%  | 3.76%  | 3.76%  | 3.76%  |

Tableau 3 : scénarios de croissance (in. SAPHE, 2001)

## 2.6 Population et secteurs d'activité économique

La population "active", à savoir les plus de 15 ans qui représente 17140 habitants en 1995, est composée à 24% d'actifs, à 66% de sans emplois et à 10% de non actif.

La catégorie "sans emploi" correspond aux personnes travaillant au village et ne contribuant pas réellement au produit intérieur du pays. Leurs activités consistent essentiellement en une agriculture et une pêche de subsistance pour alimenter le foyer. Ils ne travaillent pas pour vendre leurs productions contre de l'argent comptant. La catégorie "non actif" regroupe les étudiants (de plus de 15 ans), les personnes au foyer et les chômeurs (compris comme personne à la recherche d'un travail rémunéré).

Les secteurs d'activité économique sur South Tarawa comprennent un port maritime, un aéroport international, des bureaux de gouvernement, des activités financières, commerciales et navales. Bien que les ménages soient sensiblement plus riches que dans le reste du pays, beaucoup dépendent toujours de la pêche traditionnelle et des activités agricoles de subsistance.

De cette présentation de la population seront retenues les spécificités suivantes :

- une population très jeune, au taux de croissance élevé,
- l'absence de politique de régulation des naissances,
- l'arrivée de migrants en quête de nouveaux modes de vie et l'absence de contrôle de l'immigration,
- la saturation de l'espace sur les zones les plus urbanisées (Betio et Bairiki)

*« Territoire exigu - surpeuplé - dépourvu de réserves en eau de surface », cette inadéquation simple entre milieu physique, milieu humain et ressources naturelles synthétise toute la problématique de la zone d'étude. Comment s'organise dans ce contexte la gestion des ressources en eau pour satisfaire les besoins quotidiens de la population ?*

### **3 Gestion des ressources en eau**

#### *Préambule: difficultés de gestion des lentilles*

Afin de mieux appréhender la complexité liée à la gestion des ressources en eau sur South Tarawa, il semble intéressant de rappeler quelques difficultés de gestion inhérente aux lentilles d'eau douce en général. Il s'agit de ressources invisibles, dont la délimitation est complexe et la perception est souvent plus ponctuelle que globale. La double fonction conductrice et capacitive des lentilles permet le prélèvement de volumes d'eau supérieurs aux apports, ce qui entraîne généralement une surexploitation. La ressource est étendue spatialement et la plupart du temps les prélèvements sont atomisés, petits et dispersés, ils ne sont pas reliés par un réseau comme dans un périmètre irrigué ou une rivière. La géométrie et le fonctionnement du système aquifère sont inconnus des usagers et souvent mal connus des gestionnaires. Ainsi, les caractéristiques des lentilles suscitent des perceptions de la ressource et du bien qui peuvent être très différentes d'un usager à l'autre, entre usagers et gestionnaires, ou même entre chercheurs. Cet aspect qui peut sembler secondaire, revêt en réalité une importance majeure, la perception influençant les études menées sur la ressource, le choix des outils de gestion, leur acceptation par les usagers.

Sur South Tarawa, la demande en eau de la population, estimée à 100L/hab/j en 2000 (SAPHE Water Supply Project, 2001), peut être satisfaite via quatre modes d'approvisionnement: réserves en eau souterraine de Bonriki et Buota gérées par un organisme public; puits privés, collecteurs d'eau de pluie et usines de désalinisation. Ces différents systèmes, leur portée et les problèmes de gestion associés sont à présent détaillés.

#### **3.1 Exploitation des lentilles d'eau douce de Bonriki et Buota**

##### *↳ Fonctionnement:*

Des lentilles d'eau douce existent au niveau de Betio, Bairiki et Bikenibeu mais leur utilisation est désormais réservée à des usages secondaires en raison de leur contamination par des déchets d'origine humaine et animale. Seules les réserves d'eau souterraine de Bonriki et Buota sont exploitées pour la consommation humaine.

Ces lentilles ont fait l'objet de nombreuses investigations depuis le début des années soixante. Si les premières enquêtes ont uniquement porté sur le niveau du toit de la nappe et la chimie des eaux, une étude datant de 1973 sur leur résistivité a conduit à l'aménagement d'un réseau de galeries de pompage connectées à des conduites d'eau et destinées à approvisionner l'ensemble de South Tarawa. Jusqu'à cette date, la population était entièrement dépendante des puits construits manuellement et des collecteurs d'eau de pluie.

Les premières galeries reliées à une conduite de 32 km longeant South Tarawa jusqu'à Betio, ont permis de fournir à partir de 1977 un taux d'extraction total sur les deux réserves de 85 m<sup>3</sup>/j (FALKLAND, 1992). Le réseau fit ensuite l'objet d'un fort développement dans les années 80 avec la construction, à environ un mètre sous le toit de la nappe, de 17 nouvelles galeries horizontales d'infiltration de 300m de long chacune sur Bonriki. Toutes les anciennes galeries, à l'exception d'une, furent alors mises hors d'usage. Six galeries similaires furent construites sur Buota. Le nouveau réseau était à l'origine conçu pour satisfaire un taux d'extraction total de 750 m<sup>3</sup>/j à Bonriki et 250 m<sup>3</sup>/j à Buota mais compte tenu de l'augmentation de la demande, le taux a progressivement atteint 1300 m<sup>3</sup>/j au total pour les deux zones de pompage à partir de 1992 (FALKLAND, 1992) et 1500 m<sup>3</sup>/j aujourd'hui (1000 m<sup>3</sup>/j sur Bonriki et 500 m<sup>3</sup>/j sur Buota). L'île de Bonriki fournit 75% de l'eau approvisionnée par les infrastructures publiques à la population de South Tarawa, l'île est d'ailleurs principalement une réserve d'approvisionnement en eau, seule une bande de terre large de 50m côté océan est permise aux installations d'habitations.

Le volume total d'eau douce de la lentille de Bonriki est estimé à  $3.6 * 10^6 \text{ m}^3$ , et en période de sécheresse prolongée et en maintenant le niveau de pompage actuel, 10 années seraient nécessaires pour épuiser la lentille (WHITE *et al.*, 1999a).

Le Public Utilities Board (PUB) attaché au Ministère du Travail et de l'Energie est en charge, depuis octobre 1987, de la surveillance des taux d'extraction. La salinité est contrôlée par forages et jusqu'à présent, l'augmentation du taux d'extraction n'a pas eu d'incidence défavorable sur les lentilles. L'eau est distribuée de manière intermittente, quelques heures par jour uniquement. La surveillance du toit de la nappe pour la période post-1990 révèle que la profondeur de la lentille n'a pas diminué. Le facteur ayant une influence majeure sur la lentille est l'alternance de périodes sèches et humides associée aux cycles de El Niño et La Niña.

#### ↳ Accès au système:

En 2000, le PUB est une source d'approvisionnement en eau (tous usages confondus) pour 70% des foyers et une source d'eau potable pour 79% des foyers.

Les pourcentages de foyers connectés au réseau par zone sont :

|                |     |
|----------------|-----|
| Rural Tarawa : | 55% |
| Bikenibeu :    | 81% |
| Bairiki :      | 98% |
| Betio :        | 83% |

On notera la très forte proportion d'habitants des zones « urbaines », Betio et Bairiki, connectés à ce système, opposée à un pourcentage beaucoup plus faible pour les habitants des zones « rurales ». Ce système est utilisé en priorité pour l'approvisionnement d'eau de boisson sur les quatre zones ; en revanche pour l'eau à usage domestique il reste le système prioritaire sur Betio et Bairiki mais il passe en deuxième position derrière les puits sur Bikenibeu et Rural Tarawa.

#### ↳ Problèmes:

Le premier problème, relatif à l'ensemble du système PUB concerne les pertes considérables le long du réseau: plus 50% de l'eau pompée au niveau des réserves est perdue en raison de fuites dans les conduites, de connexions illégales, de pertes au niveau des robinets privés mal ou non fermés. Ces pertes combinées des réseaux et des systèmes domestiques engendrent une diminution significative de la ressource en eau douce disponible. S'écoulant souvent en zones côtières ou en zones urbaines polluées, elles sont définitivement perdues par le système.

L'eau distribuée par le PUB étant jusqu'à ce jour non taxée et aucune incitation économique en faveur d'une économie d'eau n'étant appliquée, le gaspillage et l'abus de consommation sont aussi problématiques. Le système opérant de manière intermittente, les robinets sont laissés ouverts pour maximiser le remplissage des réservoirs et autres récipients tandis que le système est en marche.

Enfin, un troisième problème, spécifique aux zones de Bonriki et Buota, vient lui aussi perturber le fonctionnement du système. Ces réserves, établies sur des terres en propriété privée, ont été instituées en 1977 en vertu des lois des îles Gilbert juste avant la fin de la période coloniale. A travers ces lois, des restrictions limitaient l'utilisation des terres dans la réserve afin de protéger la qualité des eaux souterraines. Or la propriété privée entraînait systématiquement la possession des eaux souterraines selon les droits coutumiers. Ceci a généré une source de conflits entre les propriétaires fonciers et le gouvernement depuis de longues années, menant à des actes de vandalisme du système de pompage et des forages de surveillance, une augmentation croissante des demandes de compensation, et l'installation illégale de maisons sur la réserve. Ce plan d'établissement de réserves d'eau n'a pas su apprécier les besoins de la communauté, la culture, les règles de propriété foncière et les nécessités d'utilisation de la terre. En outre, la législation révèle un manque de rôles identifiés et de responsabilités dû à l'absence de lois statuant le contrôle des ressources en eau (WHITE *et al.*, 1999b).



## 3.2 Les autres sources d'approvisionnement en eau

Comme mentionné précédemment, la demande en eau par habitant de 100L/j, ramenée à une population "officielle" de 36 722 habitants, nécessite une offre en eau totale d'environ 3700 m<sup>3</sup>/j. Le système du PUB, avec ses 1500 m<sup>3</sup>/j, est donc loin de satisfaire complètement la demande globale de la population qui doit donc jongler avec d'autres sources d'approvisionnement en eau :

### 3.2.1 Les puits

#### ↳ Fonctionnement:

Les puits, généralement creusés à la main à une profondeur de 2-3 mètres, demeurent une importante source en eau dont l'usage est destiné à l'hygiène, l'entretien des maisons, le nettoyage des vêtements, l'arrosage des jardins ou l'abreuvement des porcs, et dans certains cas la boisson après avoir ébouillantié l'eau.

#### ↳ Accès au système:

Les puits sont une source d'approvisionnement en eau pour 54 % des foyers, répartis comme suit :

|                |     |
|----------------|-----|
| Rural Tarawa : | 70% |
| Bikenibeu :    | 54% |
| Bairiki :      | 27% |
| Betio :        | 29% |

Les zones « urbaines » présentent les pourcentages les plus faibles en raison du degré de pollution des lentilles sur ces zones.

#### ↳ Problèmes:

Les puits sont de moins en moins utilisés pour l'approvisionnement en eau de boisson en raison de la dégradation croissante de la qualité des eaux souterraines. Il y a à peine dix ans de cela, les habitants de Betio et Bairiki utilisaient encore leur puits pour l'eau de boisson. Ces problèmes de qualité des eaux découlent de l'émergence des points suivants :

➤ Le premier problème est le déversement d'eaux usées non ou partiellement traitées directement dans les sols, phénomène rencontré à la fois en zones urbaines et rurales, l'impact étant plus important en zone urbaine en raison des densités de population et de la multiplication des systèmes sanitaires de types latrines ou fosses septiques. Les latrines sont directement responsables des pollutions des lentilles car leur profondeur atteint généralement le toit de la nappe. La situation est relativement meilleure en présence de fosses septiques si elles sont bien construites et bien entretenues, ce qui est rarement le cas.

➤ Les sols fortement perméables de South Tarawa et la position affleurante du toit de la nappe renforcent les risques de pollution. Les équipements sanitaires sont souvent implantés sans étude préalable liée à l'écoulement des eaux en direction de la nappe. Ces infrastructures doivent théoriquement se situer à une distance minimale de 15m de tout puits mais ceci est difficilement respecté compte tenu de la multiplication des foyers donc des systèmes sanitaires sur un espace au demeurant extrêmement limité.

➤ La contamination fécale directe des eaux souterraines par les animaux (porcs, bétail) et parfois par les humains est une troisième source de pollution non négligeable. Les animaux errent librement dans les villages, leur défécation se produisant au hasard et parfois à proximité des puits. La défécation humaine sur la plage est souvent la seule pratique possible dans les zones urbaines surpeuplées et/ou dans les zones où les systèmes sanitaires sont en nombre insuffisant. Des puits utilisés pour l'eau potable ne sont pas toujours couverts, et ont souvent des protections insatisfaisantes autour de leur base ; d'où l'intrusion de polluants après de fortes précipitations.

### 3.2.2 Les collecteurs d'eau de pluie

#### ↳ Fonctionnement:

Ce sont des systèmes de concentration des eaux de pluie sur les toits des bâtiments administratifs, gouvernementaux et sur la plupart des maisons les plus récentes ; connectés à des réservoirs d'une contenance moyenne de 4500 litres. Ils permettent d'amoinrir légèrement les pressions sur le système public d'approvisionnement en eau.

#### ↳ Accès au système:

Seuls 16% des foyers possèdent un collecteur d'eau de pluie répartis comme suit :

|                |     |
|----------------|-----|
| Rural Tarawa : | 15% |
| Bikenibeu :    | 9%  |
| Bairiki :      | 16% |
| Betio :        | 23% |

#### ↳ Problèmes:

Ce système nécessite un nettoyage régulier du toit et du réservoir pour un fonctionnement optimal et afin d'éviter la prolifération d'algues qui rendraient l'eau impropre à la consommation. Or des études datant de 1992 (SHALEV, 1992) révélaient la sous-utilisation des collecteurs due à l'absence de maintenance des systèmes tant sur les bâtiments privés que sur ceux du gouvernement.

### 3.2.3 La désalinisation

#### ↳ Fonctionnement:

Quatre sites de désalinisation d'eau de mer ont été installés au début des années 1990 au niveau: de Betio, Bairiki, de l'hôtel principal de la zone et de l'hôpital tous deux sur Bikenibeu. Aujourd'hui seule subsiste l'usine de Betio avec une production de 100 m<sup>3</sup>/j.

#### ↳ Problèmes:

Outre le coût élevé de production, ce procédé requiert du personnel compétent ainsi qu'une maintenance régulière des membranes de filtration et un approvisionnement constant en produits chimiques spécifiques. Cette technique n'est évidemment pas des plus adaptée au contexte biophysique et socio-économique de Tarawa.

Enfin notons qu'une autre méthode permettant de diminuer légèrement la demande sur le système d'approvisionnement du PUB est l'utilisation de l'eau de mer et/ou des eaux saumâtres pour des usages secondaires tels que la toilette et la vidange des sanitaires (ALAM *et al.*, 1997).

## 3.3 Bilan sur la gestion des ressources en eau sur South Tarawa

### 3.3.1 Une pression croissante sur la ressource

Nous retiendrons donc que les facteurs clés, responsables des pressions croissantes sur la demande en eau, sont:

➤ l'augmentation très rapide de la population associée à un fort taux d'urbanisation qui entraîne des concentrations de la demande en certaines zones préférentielles des îles alors que les systèmes d'approvisionnement en eau ne suivent pas la cadence de l'expansion ;

- l'augmentation de l'offre en eau qui provoque indéniablement une augmentation de la demande en eau par personne (les anciennes évaluations concluaient à une consommation de 40-50 L/j/hab, les plus récentes avancent une demande de 100L/j/hab);
- les fuites, gaspillage et autres pertes le long du système de distribution.

### **3.3.2 L'absence de gestion de la demande**

Sur toutes les zones de South Tarawa où les prélèvements se font à l'aide de puits privés, exempts de toute législation, les lentilles peuvent être considérées comme des ressources collectives en accès libre. Ces lentilles sont librement exploitées en raison des droits coutumiers qui associaient à la possession de la terre, la possession de l'eau sous-jacente. L'extraction de chaque usager et les pollutions ponctuelles qu'il peut générer provoquent un abaissement global du niveau des lentilles et une raréfaction de la ressource en eau potable. Personne n'assume entièrement le coût des externalités négatives des comportements individuels, ce qui encourage la course au pompage et donc la surexploitation, voire la destruction de la ressource. Il s'agit donc d'une gestion par l'offre, la disponibilité en eau étant uniquement dépendante des conditions naturelles de recharge et du niveau de pollution. Dans le cas des lentilles de Bonriki et Buota, on est en présence d'une esquisse de gestion des lentilles par la demande dans la mesure où les quantités prélevées sont contrôlées par le PUB. Il ne s'agit pas d'un réel instrument de gestion de la demande car l'eau est jusqu'à ce jour distribuée gratuitement à la population.

Rappelons qu'un instrument de gestion de la demande doit être susceptible de modifier la demande de manière directe (autoritaire ou consensuelle) ou indirecte (incitative), pour tendre vers un équilibre offre/demande, ou du moins maîtriser la demande. Les instruments de type technique sont des outils visant à une utilisation plus efficace de l'eau en encourageant l'économie d'eau : pose de compteurs, tracé du réseau, détection des fuites. La mise en place de ces divers équipements est souvent permise par des subventions accordés par le gestionnaire, ou par un système de normes doublées de moyens de contrôle. Dans les deux cas ils doivent nécessairement s'accompagner d'un effort de vulgarisation. Les instruments économiques sont de type indirect, il s'agit d'influencer le comportement des usagers par des incitations fondées sur les mécanismes de marché, comme une mesure de tarification, une redevance, une taxe, un droit d'accès payant, un marché de l'eau. Enfin, les instruments non économiques de gestion de la demande comprennent essentiellement l'éducation, les règles qui déterminent les droits d'accès, d'usage et de participation à la gestion.

## **4 Problématique**

Les deux principaux facteurs moteurs de la dégradation de l'environnement et plus spécifiquement, dans notre cas d'étude, des ressources en eau sur South Tarawa sont la croissance de la population et l'urbanisation, combinés à une prise de conscience insuffisante de l'impact du changement de mode de vie sur le milieu. En effet, la culture traditionnelle de Kiribati a véhiculé durant des siècles une éthique conservatrice en matière de gestion de l'environnement qui passait par la transmission des connaissances, des pratiques et de la gestion du foncier. L'avènement d'un nouveau style de vie influencé par des aspirations « occidentales » a désormais fortement compromis la pérennité de ce savoir. Les effets résultants se déclinent selon différentes problématiques qui incluent l'absence de gestion des déchets, la contamination des eaux souterraines et du lagon, l'émergence de zones de « bidonvilles », la diminution de la végétation, etc...

L'augmentation très rapide de la population a conduit à des situations de surpopulation, chômage et pénurie de logements qui se conjuguent avec le développement de problèmes sociaux tels que l'apparition de « bidonvilles » et de pressions continues sur les ressources naturelles. Ces phénomènes sont d'autant plus criants en certaines zones de très fortes concentrations, telles que Betio et Bairiki qu'ils ont conduit à une diminution générale de la qualité de vie. La croissance démographique s'avère, de plus, difficile à maîtriser compte tenu de l'absence de programmes de planning familial et du poids de l'église chrétienne ; de la très forte proportion des jeunes de moins de

15 ans dans la population ; de l'absence de contrôle de l'immigration, et du manque d'incitation à l'émigration ; ces deux derniers facteurs ne résolvant de toute façon pas les forts taux de natalité en place. L'urbanisation galopante et la pénurie de terrain permettant d'y faire face ont conduit à l'apparition d'installations illégales sur les réserves au risque de mettre en péril la qualité des eaux souterraines. Le manque de terrains disponibles est lié à l'offre inextensible, à la fragmentation du milieu et aux arrangements de la propriété foncière.

Tous ces facteurs viennent donc mettre en péril la durabilité des ressources en eau de la zone, déjà très fortement polluée dans les zones de plus fortes concentrations de population. La notion de durabilité se réfère à l'idée que le développement actuel de la société ne doit pas entraver les capacités de développement des générations futures. Appliqué à l'exploitation des lentilles d'eau douce, cela implique les considérations suivantes:

- à long terme, les lentilles ne devraient pas être exploitées au delà de leur taux de renouvellement, même si des surexploitations de court terme peuvent être acceptables sur des ressources renouvelables dans certaines conditions,
- la qualité de la lentille doit être gérée selon le principe de précaution,
- la gestion doit être intégrée en termes de qualité et de quantité,
- les usagers de la nappe doivent être informés et éduqués au sujet de l'utilisation de l'eau souterraine et de sa protection.

La problématique retenue dans le cadre de ce travail de recherche est donc:

**Comment représenter au mieux le système d'étude en intégrant les différents niveaux de complexité (espace géographique très limité, concentration de population et taux de croissance démesuré, urbanisation et dégradation constante de la qualité du milieu, offre en eau extrêmement limitée, dynamique biophysique des lentilles complexe, etc..) afin d'aider les acteurs locaux et institutionnels à gérer plus efficacement la ressource en eau dont la durabilité est aujourd'hui fortement menacée ?**

## **5 Quel outil, quelle démarche ?**

La description générale du système d'étude et de sa problématique nous conduisent à envisager différentes voies de modélisation dont la description fait l'objet de ce paragraphe. Ce chapitre a pour vocation de légitimer le choix de modélisation pour lequel nous avons finalement opté, en l'occurrence les systèmes multi-agents, qui apparaissent les mieux adaptés aux objectifs fixés et aux caractéristiques du système. Auparavant, il semble important de rappeler nos attentes vis à vis du type de modélisation que nous souhaitons implémenter.

### **5.1 Un modèle destiné à l'exploration du système**

Le choix de la modélisation dépend de l'instrument de gestion étudié, du contexte de l'étude, des données disponibles et de l'objectif du modélisateur et il doit être en outre guidé par le cahier des charges initial que nous nous fixons. Comme le soulignent COSTANZA *et al.* (1995), un modèle peut difficilement satisfaire simultanément les objectifs de réalisme (représenter les comportements du système fidèlement sur le plan qualitatif), de précision (sur le plan quantitatif), et de généralité (sur les processus généraux, aux dépens de la précision et du réalisme par rapport au cas étudié).

Il convient donc de préciser la marge de manœuvre que nous jugeons pertinente avant de parcourir les différents types de modèles pouvant répondre à nos attentes:

- ☞ le modèle doit permettre de représenter au mieux la géographie extrêmement limitée du système,

- il doit pouvoir reconstituer et guider la recherche des principaux facteurs influençant la dynamique biophysique des lentilles d'eau douce et leur potentiel d'offre en eau,
- il doit permettre d'intégrer une population extrêmement élevée en constante croissance,
- il doit permettre de simuler des interventions sur ces différents facteurs afin de comparer différentes alternatives, le but n'étant pas de fournir un modèle "clé en main" au gestionnaire mais plutôt différents scénarios de gestion,
- il doit être de type exploratoire, fournissant alors une analyse de sensibilité à différents paramètres, et si possible prospectif, permettant alors une comparaison qualitative de plusieurs scénarios de projection.

FEUILLETTE (2001) a répertorié certains types de modèles susceptibles d'être utilisés pour l'étude d'un système nappe/usages et nous nous proposons d'en exposer un résumé ci-après en soulignant leurs limites par rapport aux objectifs assignés à l'étude. Les modèles sont classés selon trois catégories: modèles réductionnistes, modèles intégrés et enfin modèles multi-agents.

## 5.2 Quel modèle pour étudier le système?

### 5.2.1 Les modèles réductionnistes ou disciplinaires

Ces modèles considèrent uniquement soit l'offre soit la demande, le complémentaire étant considéré comme un facteur exogène dont le fonctionnement interne est ignoré.

Les modèles hydrogéologiques, centrés sur l'offre, s'inscrivent dans cette catégorie. La démarche consiste à étudier précisément la structure et le fonctionnement d'une nappe grâce à un modèle numérique, dans le but de connaître l'offre disponible dans le présent et le futur, afin de contraindre la demande à l'offre par des moyens juridiques ou concertatifs (AKHY *et al.*, 1997. BESBES, 1975). La demande est alors modélisée sous forme d'un facteur exogène auquel on peut attribuer différentes valeurs. Les modèles numériques de nappe ne suffisent pas pour rendre compte des dynamiques de fonctionnement de la demande dont ils ignorent les déterminants.

Dans la catégorie de modèles réductionnistes centrés sur la demande, FEUILLETTE (2001) cite les modèles agronomiques, économiques et d'action. Il s'agit de modèles focalisés sur la représentation fonctionnelle de la demande, la question étant de savoir comment diminuer la demande pour atteindre un niveau d'offre donné. Pour les modèles agronomiques, les déterminants de la demande sont réduits aux caractéristiques des plantes, au climat, à l'assolement, à l'efficacité de la distribution...mais le comportement des acteurs est ignoré. Les modèles économiques permettent de traiter la question de l'exploitation des nappes et de l'impact de divers outils de gestion de la demande mais généralement le fonctionnement de la demande n'est décrit que par des équations mathématiques fondées sur des hypothèses économiques et la nappe n'est pas représentée explicitement. Ces modèles ne tiennent pas compte des interactions directes entre acteurs, hormis celles liées au marché.

Ces divers modèles paraissent insuffisants pour représenter et simuler la dynamique d'un système nappe/usages, essentiellement car ils ne permettent pas d'intégrer l'hétérogénéité spatiale et les changements d'échelle en fonction des phénomènes étudiés (locaux ou globaux). Ils sont inadaptes à des analyses à moyen et long terme car ils reposent sur la base d'une population aux caractéristiques figées.

La deuxième grande famille de modèles inventoriés par FEUILLETTE (2001) est celle des modèles mixtes ou intégrés qui permettent de porter la modélisation à la fois sur les fonctionnements de la nappe et sur les usages de manière interactive.

## 5.2.2 Les modèles intégrés

Ces modèles représentent simultanément l'offre et la demande et détaillent avec plus ou moins de précision les entités et les flux du système. Le choix de ce type de modèle implique nécessairement une approche de type systémique, contrairement aux modèles réductionnistes. L'approche systémique s'intéresse à l'étude des entités formées par "un ensemble d'éléments en interaction dynamique en fonction d'un but" (ROSNAY, 1975), le tout constituant un système.

Plutôt que d'étudier ces systèmes au moyen des sciences classiques, de manière tronquée, en avançant des hypothèses trop contraignantes et limitatives, l'approche systémique cherche à les aborder dans leur globalité; le système étant alors entendu comme un tout non réductible à ses parties et qui recèle des qualités que chaque partie ne possède pas obligatoirement. Notre démarche s'inscrit dans ce type d'approche car nous souhaitons aborder le système dans sa globalité et sa complexité, en tenant compte des interactions entre environnement physique et humain.

FEUILLETTE (2001) cite, dans cette catégorie, les modèles classiques des économistes qui représentent la nappe comme une baignoire et qui simulent les interactions globales entre baisse du niveau et comportement rationnel des usagers par un langage mathématique sans toutefois intégrer la composante spatiale (GISSER, 1983). D'autres modèles couplent une représentation maillée de nappe avec un modèle de demande (MANAS *et al.*, 1999. FAISAL *et al.*, 1997) permettant de représenter plus ou moins fidèlement les interactions entre le système physique et les usagers, en tenant compte ou non des dimensions spatiales de la ressource, de sa complexité, des rétroactions sur le milieu et sur les usages. Toutefois, ils négligent les interactions directes entre usagers dans leur environnement, hormis celles liées au marché et réduisent souvent le comportement des usagers à la maximisation d'un profit ou d'une utilité.

Ainsi, autant les modèles réductionnistes que les modèles intégrés présentent des limites d'utilisation et de fonctionnalité qui ne permettent pas de répondre à nos attentes vis à vis de la modélisation d'un système intégrant ressources et usagers au niveau local comme global. Or, les systèmes multi-agents, détaillés ci-après, permettent de faire interagir entre eux des agents informatiques autonomes, c'est-à-dire susceptibles de réagir à leur environnement et dotés de règles d'action qui leur sont propres, tout en respectant le caractère distribué du système.

## 5.2.3 Les Systèmes Multi-Agents

Les définitions des SMA sont nombreuses et varient suivant les champs d'applications. Afin d'introduire les SMA dans un cadre relativement général, Bousquet (BOUSQUET *et al.*, 1995) donne la description suivante :

*«Pour modéliser des phénomènes complexes, les systèmes multi-agents représentent les agents du monde observé et leurs comportements. Elaborer un système multi-agents revient à reproduire un monde artificiel ressemblant au monde observé en ce sens qu'il est composé de différents agents, de façon à y mener diverses expériences. Chaque agent est représenté comme une entité informatique dotée d'une autonomie, capable d'agir localement en réponse à des stimulations ou à des communications avec d'autres agents et de se représenter son environnement.»*

Par ailleurs, l'un des objectifs de la « kénétique », la science des organisations artificielles qui procède par construction de Systèmes Multi-Agents (FERBER, 1994), est de:

*«Définir une forme de systémique qui prenne en compte l'interaction entre agents agissant comme l'élément premier pour comprendre le fonctionnement et l'évolution des systèmes.»*

Ainsi, l'agent est placé au centre du système. De l'interaction entre les agents (communications, influences, négociations), et entre les agents et leur environnement, naît la complexité du système et son comportement global. C'est la notion d'émergence, qui est l'un des fondements de la modélisation individu-centré.

La construction d'un SMA passe par une phase de conceptualisation où les composantes du système sont formalisées par les éléments suivants (Figure 20) (FERBER, 1995) :

- *d'un ensemble d'Agents* : Un agent est une entité virtuelle dont le comportement est autonome, évoluant dans un environnement dont il a une perception partielle et sur lequel il peut agir et avec lequel il peut interagir. L'agent peut être purement réactif (il répond aux changements de son environnement) ou cognitif (il mémorise et analyse ses perceptions et mobilise ses objectifs et croyances). Il est susceptible de communiquer et d'interagir avec son environnement.
- *d'un environnement* : L'environnement est l'espace commun aux agents. Il est doté en outre d'objets situés passifs sur lesquels les agents peuvent agir : percevoir, détruire, modifier. L'environnement d'un agent correspond à l'environnement du SMA et à l'ensemble des agents y évoluant.
- *d'une organisation* : C'est l'agencement des relations, des hiérarchies entre les agents. Dans les systèmes multi-agents le but peut être de faire apparaître l'organisation.
- *d'un ensemble de points de vue* : Ce sont les descripteurs du système. Ils peuvent être omniscients ou montrer la perception qu'a chaque agent de son environnement.

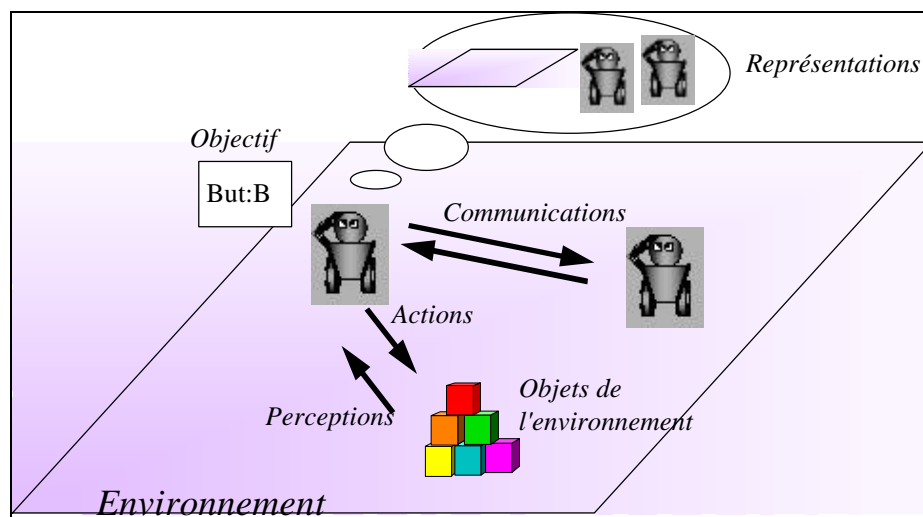


Figure 20 : Représentation imagée d'un système multi-agents (d'après Ferber, 1995)

Ainsi, la simulation multi-agents autorise la représentation des processus d'interactions entre agents autonomes et ressources dynamiques, tout en intégrant un certain nombre de contraintes (sociales, économiques, environnementales...). Considérons à présent les avantages des SMA dans la représentation des dynamiques ressources/usagers.

## 5.3 Intérêt des SMA

### 5.3.1 Intérêt des SMA dans un contexte d'étude de la dynamique des ressources naturelles

BOUSQUET (1996) souligne que “les recherches sur l’usage des ressources renouvelables posent les problèmes de l’accès à ces ressources, des modes d’appropriation et des processus de décision”. En modélisant des agents dotés justement d’un processus de prise de décision et d’une certaine vision de l’environnement, les SMA permettent d’apporter des solutions à ces interrogations.

De plus, les SMA offrent l’avantage de pouvoir réitérer des simulations sur un monde artificiel, construit à partir de données terrain et d’hypothèses. Grâce à ce laboratoire virtuel d’expérimentation, l’utilisateur peut ainsi explorer des systèmes existants sans que les expériences menées n’induisent d’externalités négatives sur le système (BARRETEAU, 1998). Cette possibilité intéresse particulièrement notre travail dans le cadre de l’étude des dynamiques entre lentilles d’eau douce et usagers, l’outil permettant d’intégrer les sphères physiques et humaines et de répéter les expériences de simulations.

Par ailleurs, les SMA permettent de reproduire la complexité des objets d’étude et notamment leur caractère distribué, tant sur le plan spatial, temporel que fonctionnel (FERBER, 1995). Les possibilités de distributions spatiales et temporelles, comme nous le verrons en deuxième partie, sont particulièrement intéressantes pour l’étude des lentilles. En effet, au niveau biophysique, les SMA permettent de jongler entre des modèles discrétisés spatialement et des modèles globaux, facilitant ainsi les aller-retour des unités individuelles aux agrégats. La distribution fonctionnelle facilite la modélisation simultanée de plusieurs tâches exécutées par différents agents. On peut là aussi zoomer sur les processus individuels sachant que leur localisation influe sur la ressource. Plusieurs objets spatiaux peuvent être superposés, et recoupés selon différents niveaux d’agrégation, et même constituer des objets actifs, automates cellulaires autonomes capables de percevoir leur environnement.

Enfin, il est fondamental de pouvoir créer une société hétérogène dont les agents se singularisent par leurs caractéristiques sociales, économiques et démographiques reproduisant la croissance de la population réelle sur un espace limité.

### 5.3.2 Intérêt des SMA pour appuyer des choix de gestion

BOUSQUET *et al.* (1999) montre que l’intérêt des modèles multi-agents dans les décisions portant sur le long terme réside dans la possibilité de modéliser la représentation commune que se font les différents acteurs d’un système et de simuler des scénarios compatibles avec leurs objectifs. Au lieu de prescrire la meilleure politique possible, les SMA explorent les conséquences de différentes alternatives, dont les hypothèses et les résultats de simulation peuvent donner lieu à débats entre acteurs (FEUILLETTE, 2001). L’approche ascendante, qui part des individus pour retrouver le phénomène global, est particulièrement adaptée aux problèmes de gestion de l’environnement, notamment en situation d’incertitude, d’hétérogénéité, de “non obéissance”, les individus ayant une connaissance partielle de leur environnement, des motivations particulières et une représentation subjective du monde (WEISBUCH, 2000). Cette approche “bottom-up” est particulièrement attrayante dans notre contexte: elle devrait permettre, à partir de la représentation des comportements individuels, de retrouver les phénomènes globaux d’inadéquation entre offre et demande autour de la ressource en eau puis d’étudier, via la simulation, l’impact d’intervention sur le système en intégrant la réaction des agents individuels aux outils de gestion testés.



Enfin, soulignons l'intérêt pratique des SMA en raison de la relative rapidité de construction et d'implémentation, une fois la centralisation des données réalisée et l'architecture du modèle codée en langage UML (Unified Modeling Language).

### 5.3.3 Faiblesses des SMA

Une des critiques souvent adressée aux SMA porte sur leur prétention à modéliser des comportements humains réels car la représentation des objets et des règles d'action relève parfois de la psychologie et ne peut évidemment pas saisir la complexité des comportements humains. Il en résulte que ces modèles doivent être utilisés avec précaution, et peuvent difficilement prétendre à des résultats quantitatifs précis, ni être validés selon les procédures classiques. Cette limite n'est cependant pas incompatible avec les objectifs de notre travail, puisqu'il s'agit de construire un modèle exploratoire, permettant notamment aux acteurs et aux gestionnaires d'accorder leur représentation du système et de réfléchir aux conséquences de scénarios de gestion.

De même, une autre faiblesse relative des SMA concerne la validation des modèles en raison des dangers de la modélisation intégrée. En effet, en cherchant à accroître la précision du modèle sous forme d'agents ou de méthodes, on multiplie le nombre de paramètres. Or plus il contient de paramètres, plus les possibilités de vérifier la cohérence de la structure deviennent difficiles voire impossibles. Le seul moyen permettant alors de s'affranchir ou du moins de limiter les problèmes liés à la validation est de concevoir un modèle le plus épuré et le plus simple possible selon le « dogme KISS », *Keep It Simple and Stupid* (ATTONATY *et al.*, 1990).

L'outil d'étude ainsi présenté doit donc nous permettre de répondre aux différents niveaux de complexité du système, d'intégrer diverses échelles de temps et d'espace, et surtout de représenter au mieux le milieu physique, hydrologique et humain.

Ainsi présentés, les SMA nous permettent de reformuler notre problématique comme suit :

**Comment représenter au mieux le système d'étude en intégrant les différents niveaux de complexité afin d'aider les acteurs locaux et institutionnels à gérer la ressource en eau dans un contexte de durabilité menacée et ce à l'aide d'une démarche fondée sur l'utilisation des SMA ?**

*Quelles sont les orientations et la méthodologie qui semblent les mieux adaptées à cette problématique ?*

## 6 Démarches et méthodes

### 6.1 Le cadre de la modélisation

En premier lieu, le cadre de la modélisation doit refléter une vision du système par les acteurs. Par « acteurs » nous entendons tous les habitants de la zone, impliqués à fortiori dans la gestion des ressources en eau dont ils représentent la demande. L'hypothèse émise ici est que le problème doit être traité, discuté et résolu à sa base et que c'est à eux du terrain d'en prendre la charge.

En deuxième lieu, elle doit s'inscrire dans une démarche dite concertation/négociation. Ayant supposé que les acteurs du terrain devaient résoudre le problème de gestion durable des ressources en eau par eux mêmes, une deuxième hypothèse s'impose : une démarche de concertation entre les acteurs, leur permettant de mieux se comprendre et de s'entendre sur les concessions à faire, pourra tendre vers une gestion et une utilisation durables des ressources. Ainsi, nous proposons de mettre en place un SMA conçu comme un objet de médiation permettant aux usagers de la ressource de se mettre d'accord sur une représentation commune du système ressource/usage, facilitant de ce fait la

communication autour de cette ressource. Le modèle devient alors un média, une clé d'entrée dans la négociation, un moyen de communication entre des acteurs n'ayant pas, à la base, la même vision de leur environnement. AtollScape, le prototype créé et utilisé au cours de ce mémoire, est ainsi appelé, dans une phase ultérieure du projet, à devenir un outil d'aide à la négociation.

## **6.2 Les démarches de modélisation**

Avant de pouvoir se focaliser sur le comportement des agents et leur dynamique, il convient d'avoir au préalable convenablement représenté le système d'étude et ses principaux processus biophysiques. Notre démarche se décline en trois étapes : nécessité de définir en premier lieu l'échelle spatiale de représentation du système et l'échelle temporelle des processus, mise en marche de la dynamique biophysique, et enfin définition des caractéristiques des agents et de leurs actions. Il s'agit d'une approche intégrée du système qui scinde la représentation globale en différents sous-ensembles plus ou moins complexes, en interaction les uns avec les autres.

*Comment représenter ces différentes composantes du systèmes à l'aide des Systèmes Multi-Agents, tel est l'objet de la deuxième partie de ce mémoire.*

# Deuxième Chapitre : Elaboration du modèle

## 1 La plate-forme de modélisation

Les travaux de l'équipe Espace et Ressource du CIRAD ont, entre autres, abouti à la création d'une plate-forme de simulation facilitant la mise en oeuvre des modèles de simulation (Bousquet et al., 1998). Cette plate-forme intitulée Cormas, est un logiciel de simulation multi-agents appliqué à la gestion des ressources renouvelables. Cormas a été créé sous l'environnement Visual Work et programmé en Smalltalk. Cette plate-forme assiste le modélisateur dans la programmation de son modèle à l'aide d'une architecture prédéfinie. La programmation des règles, des interactions et des dynamiques qui constituent le modèle est entièrement laissée au soin du modélisateur. L'interface de Cormas permet de structurer les modèles en trois modules (Figure 21) :

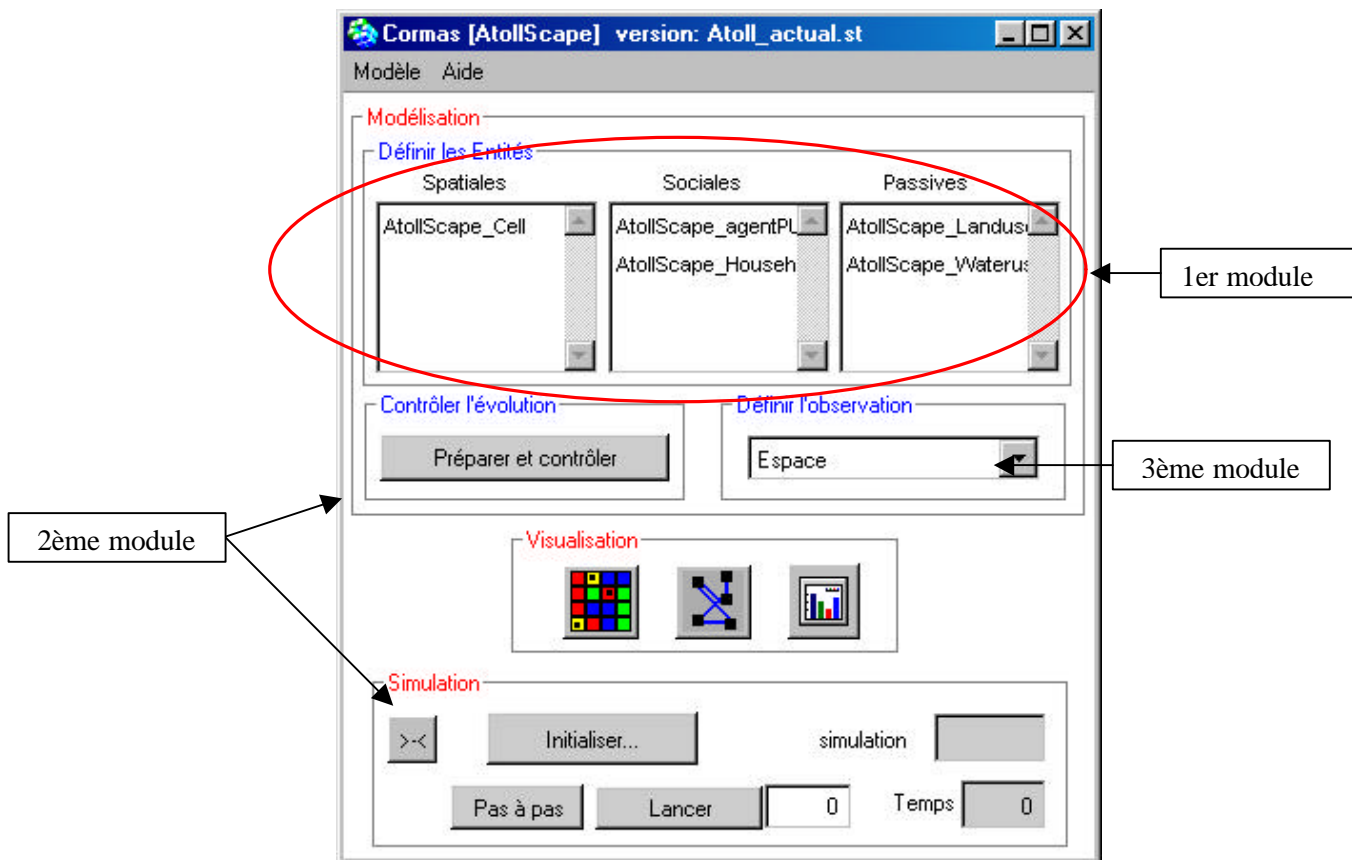


Figure 21 : Les trois modules de la plate-forme CORMAS

- Un premier module permet de définir les entités du système à modéliser (i.e. les agents informatiques), et leurs interactions. Ces interactions s'expriment par des procédures de partage de l'espace, d'exploitation de ressources communes ou de communication directe
- Le second module concerne le contrôle de la dynamique globale : étape d'initialisation puis d'ordonnement des différents événements d'un pas de temps du modèle.
- Un troisième module permet de définir une observation de la simulation selon des points de vue. Cette fonctionnalité autorise l'intégration, dans le processus de modélisation, des modes de représentation.

Le choix des entités est une étape déterminante dans la simulation des interactions à mettre en œuvre. AtollScape comporte trois types d'entités:

- des entités spatiales actives, support de l'environnement :  
les **cellules** (AtollScape\_Cell)
- deux types d'entités sociales :  
les **foyers** (AtollScape\_Household)  
l'**agent PUB** (AtollScape\_agentPUB)
- deux entités passives et situées :  
l'**occupation du sol** (AtollScape\_Landuse)  
les **équipements d'accès à l'eau** (AtollScape\_WaterUse).

Notons que ces différentes entités sont toutes dotées d'attributs et de méthodes spécifiques. Les attributs renvoient à un certain « état » de l'entité alors que les méthodes reflètent son « comportement » et décrivent la façon dont l'entité évolue dans l'environnement.

Le second module, celui relatif à la dynamique, suppose de définir le pas de temps du modèle. Nous décidons de travailler sur un pas de temps décadaire et de limiter les simulations à une période de 10 ans, soit 360 pas de temps.

## **2 Représentation de l'espace**

L'élaboration du modèle a débuté par l'étape de délimitation et de représentation de l'espace conduisant à la création d'un environnement, support des agents et de leurs dynamiques.

### **2.1 Délimitation du système d'étude**

L'environnement d'AtollScape, dans sa première version, se limite à South Tarawa, zone clairement circonscrite à l'ouest par Betio et à l'est par Buota. Nous aurions pu considérer Tarawa dans son intégralité, North Tarawa présentant de grands intérêts en termes de développement de nouvelles sources d'approvisionnement en eau. Cependant, nous avons préféré, dans un premier temps, restreindre l'étude à la zone alimentée en eau par les réserves de Bonriki et Buota, qui a en outre l'avantage d'être une zone relativement "homogène" en terme d'occupation et de dynamique de l'espace. Le milieu d'étude est donc de type urbain et périurbain.

#### **2.1.1 Intérêt d'une représentation schématique**

La représentation d'un système complexe donne lieu à deux types de démarche : le modélisateur peut opter pour la conception d'un archétype, en représentant les divers objets et processus en jeu, sans s'attacher à une adéquation poussée entre la représentation et la réalité ou, au contraire, il peut être tenté de reproduire l'espace le plus fidèlement possible, en s'appuyant notamment sur des cartes de la zone étudiée voire sur un Système d'Information Géographique.

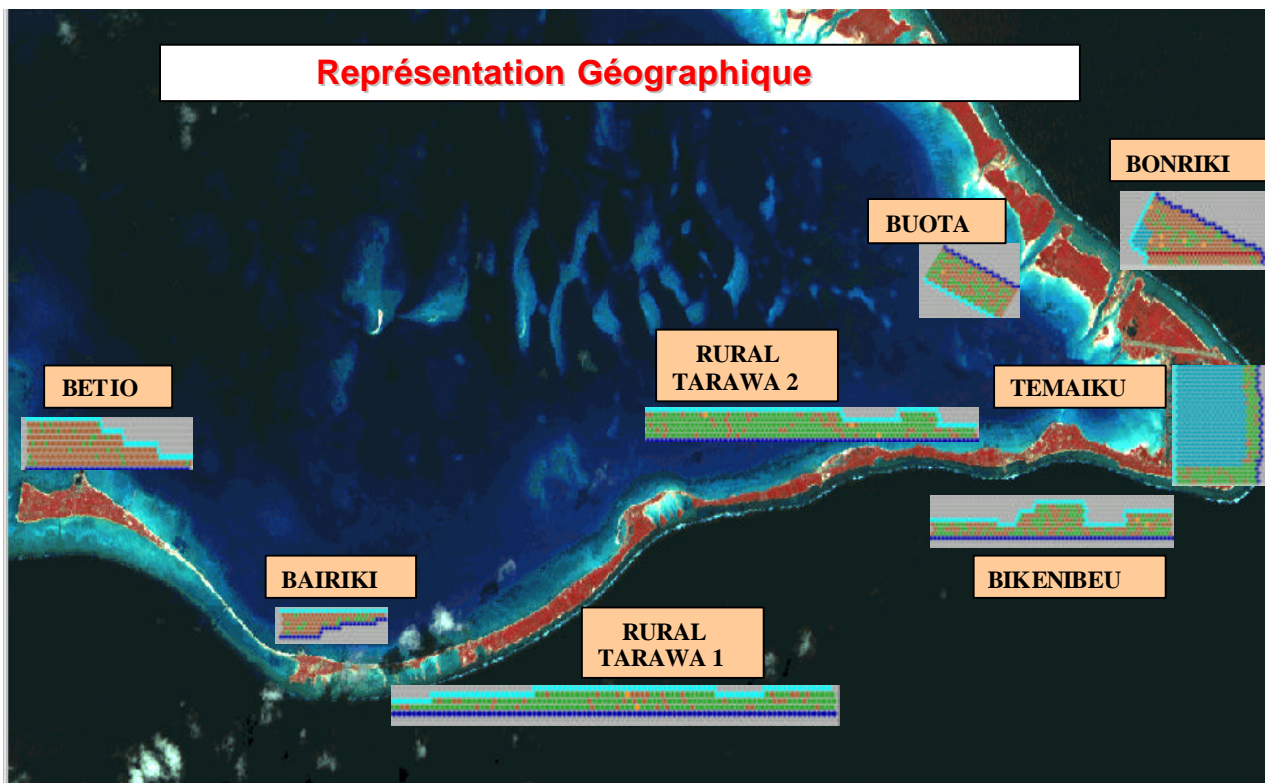
BONIN et LEPAGE (2000) définissent la représentation schématique d'un espace comme une abstraction traduisant les tendances et les propriétés de l'espace considéré, sans toutefois représenter les niveaux de détails les plus fins. Suivant cette définition, les formes, les dimensions et les contours des objets spatiaux n'ont pas besoin d'être respectés. Nous optons pour une simplification de la forme des îles, tout en respectant leur nombre et leur surface, en revanche nous nous affranchissons d'une représentation spatialisée qui respecterait la localisation géographique des îles et leurs positions relatives. L'intérêt de ce type de représentation réside dans sa capacité à représenter un environnement qui ne trompe pas ses utilisateurs, le modèle étant perçu comme une représentation de la réalité et non la réalité elle-même. A l'opposé, l'utilisation d'un SIG comme support de la représentation peut parfois induire un leurre et être interprété comme étant la réalité alors qu'il n'en est qu'une

représentation. En délimitant les îles de manière grossière et en “déstructurant” volontairement leur positionnement géographique, nous espérons rendre la représentation de l’environnement abstraite et atteindre ainsi l’objectif recherché.

### 2.1.2 Unité de surface et taille de la grille

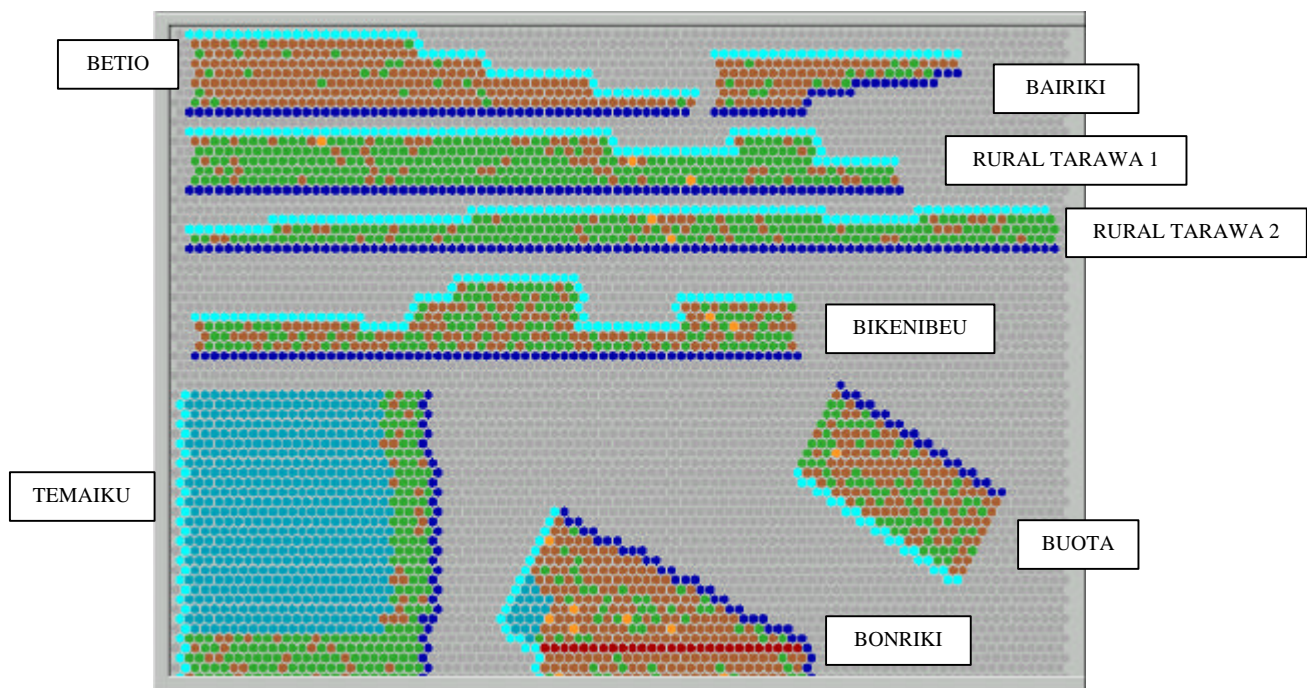
Les processus hydrologiques locaux sont liés aux caractéristiques spatiales des îles, à la répartition démographique et à la distribution des paramètres hydrogéologiques. Une reconstitution des interactions en jeu qui ne tiendrait pas compte des proportions entre ces différents facteurs pourrait induire des biais et une représentation faussée de l’importance relative des processus. Les caractéristiques fondamentales du système dont nous souhaitons conserver les proportions sont la population, la superficie et la géométrie et le volume des lentilles. Ces données étant de dimensions différentes, il s’avère impossible d’appliquer un même facteur de réduction conservatif. L’unique solution est donc de se conformer à une échelle 1:1 et de représenter le système dans son intégralité.

La figure ci-après (Figure 22) confronte une image satellite de la zone et notre propre représentation de l’espace qui tente de respecter « l’allure » générale de chacune des îles.



*Figure 22 : comparaison entre deux représentations de la zone, une image satellite et notre grille réalisée sous CORMAS*

L’estimation des dimensions des îles a été facilitée par l’utilisation d’une carte topographique de la zone, les superficies ont été obtenues auprès du « *Land Management Division, Ministry of Home Affairs* » de Tarawa. Nous optons donc pour une grille dont les îles sont représentées par un ensemble de 2157 cellules (Figure 23).



*Figure 23 : environnement d'AtollScape*

Chaque cellule, de forme hexagonale et d'une superficie de 7307 m<sup>2</sup> représente l'unité élémentaire. La forme alvéolaire a été préférée à la forme carrée pour sa propriété d'isotropie, toutes les cellules voisines étant à la distance 1 d'une cellule centrale au niveau de la grille, soit environ 75m dans la réalité. Le tableau ci-après retrace l'étape de calcul et de vérification du nombre de cellules représentant chacune des îles : la superficie réelle de chaque île divisée par la superficie d'une cellule indique le nombre, à arrondir, de cellules à affecter à chaque île. L'erreur globale sur la zone est de 687 m<sup>2</sup>, largement inférieure à 1% de la superficie totale.

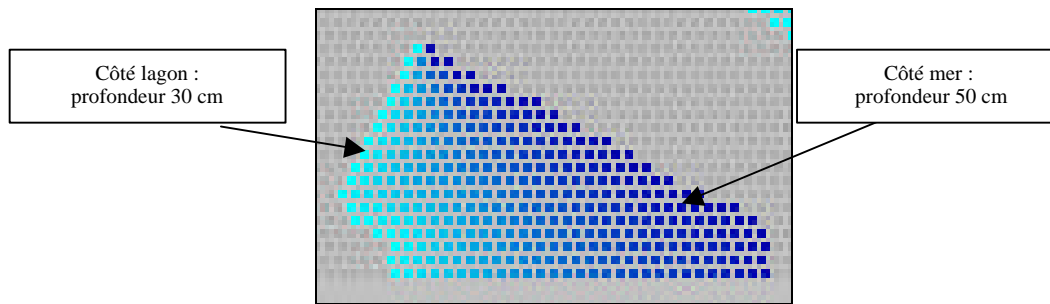
|                  | Superficie km <sup>2</sup> | Superficie/7307 | Nb cellules | Erreur m <sup>2</sup> |
|------------------|----------------------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| Betio            | 1.9                        | 260.8           | 261         | 7127                  |
| Bairiki          | 0.574                      | 78.6            | 79          | -3253                 |
| Rural Tarawa 1   | 2.27                       | 310.7           | 311         | -2477                 |
| Rural Tarawa 2   | 1.61                       | 220.3           | 220         | 2460                  |
| Bikenibeu        | 1.82                       | 249.1           | 249         | 557                   |
| Temaiku          | 5.38                       | 736.3           | 736         | 2048                  |
| Bonriki          | 2.2                        | 301.1           | 301         | 593                   |
| Buota            | 1.345                      | 184.1           | 184         | 512                   |
| Total S.Tarawa   | 15.76                      | 2156.8          | 2157        | -1199                 |
| Total zone étude | 17.105                     | 2340.9          | 2341        | -687                  |

*Tableau 4 : analyse des erreurs de superficie par île*

## 2.2 Un espace à plusieurs couches

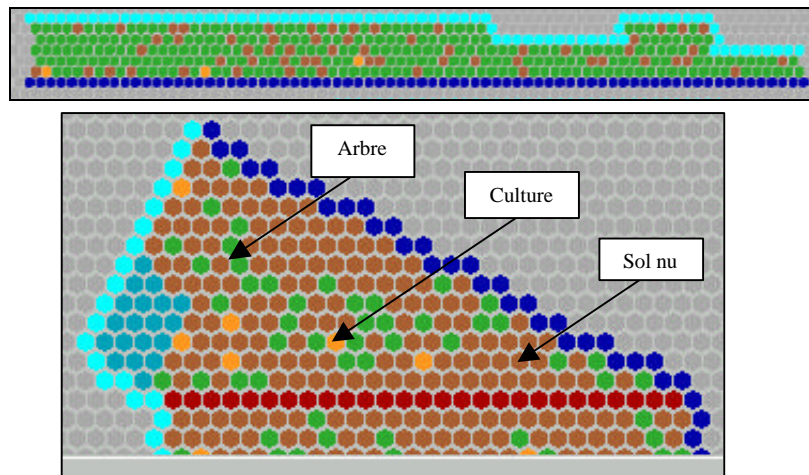
Les cellules, support de l'environnement du modèle, sont caractérisées par un certain nombre d'attributs qui donnent lieu à différentes représentations appelées « Points de vue », équivalentes aux couches d'un SIG classique. Les Points de vue peuvent évoluer au cours de la simulation en fonction des valeurs des paramètres. A tout moment de la simulation, le modélisateur peut accéder à ces points de vue.

Le point de vue « profondeur du sol » (Figure 24) permet de rendre compte du gradient de profondeur de sol existant sur chacune des îles ; les profondeurs les plus faibles (30 cm) étant localisées en bordure de lagon et les plus fortes (50cm) en bordure océanique. La profondeur du sol correspond à un attribut des cellules, chacune d'entre elles étant ainsi dotée d'une valeur spécifique. Il était important de tenir compte de la dissymétrie entre lagon et mer car la profondeur des sols, comme nous l'aborderons au paragraphe 2.1.2 influence le bilan hydrique.



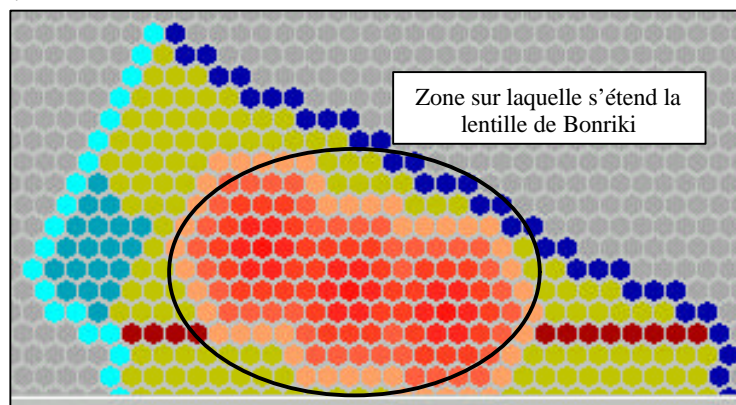
*Figure 24 : point de vue « profondeur des sols » sur Bonriki*

L'occupation du sol (Figure 25) correspond au niveau d'AtollScape à une entité de type « objet passif et situé » dont un des attributs correspond au « type » d'occupation du sol qui peut prendre trois valeurs différentes : arbre, culture ou sol nu. Chaque cellule se voit attribuer un unique objet « occupation du sol », et non une combinaison des trois dans diverses proportions. Cet objet permet de rendre compte de l'hétérogénéité d'occupation du sol entre îles de la zone : Betio et Bairiki sont principalement en sol nu compte tenu du fort taux d'urbanisation alors que Rural Tarawa 1 et 2 présentent encore de fortes proportions d'arbres. Cet attribut « occupation du sol » intervient lui aussi dans le calcul du bilan hydrique.



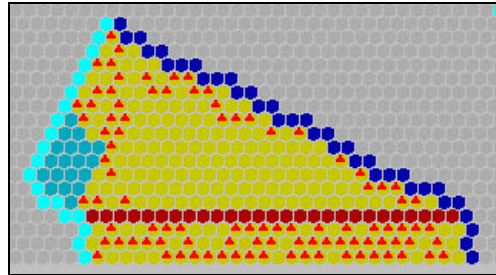
*Figure 25 : point de vue « occupation des sols » sur Rural Tarawa 1 (en haut) et Bonriki (en bas)*

Le point de vue « profondeur de lentille » (Figure 26) permet de suivre au cours d'une simulation les variations de la profondeur des différentes lentilles sur chacune des îles. Chaque lentille est représentée par un gradient de couleur qui renvoie à différentes izopièzes, dont le calcul sera étudié au paragraphe 2.2.1.



*Figure 26 : point de vue « profondeur des lentilles »*

Enfin le point de vue « foyer » permet de visualiser le positionnement des agents sur la grille. Chaque triangle (Figure 27) symbolise le fait qu'un ou plusieurs foyers sont présents sur la cellule, pour connaître le nombre exact de foyer il faut aller chercher l'information au niveau des attributs de la cellule. Par la suite, il serait souhaitable d'améliorer ce point de vue afin de faire apparaître, sous forme de gradient de couleurs par exemple, le nombre exact de foyers par cellule.



*Figure 27 : positionnement des foyers sur Bonriki*

Les fonctionnalités des systèmes multi-agents ont ainsi permis de pallier à la première complexité du système, sa représentation géographique, et de construire un environnement dont l'échelle conserve les proportions entre les différentes composantes fondamentales du système, et divers points de vue autorisant le suivi des variables concernées. Nous pouvons à présent nous orienter vers la deuxième complexité du système : la représentation des divers processus biophysiques aux échelles de temps et d'espace spécifiques.

### **3 Les modèles biophysiques**

L'objectif de la modélisation de la dynamique biophysique est triple :

- représenter au mieux la forme et la profondeur des lentilles, afin de démarrer les simulations sur des volumes en eau disponible réalistes,
- établir un modèle de bilan hydrique au niveau du réservoir sol,
- répercuter les effets du bilan hydrique sur le réservoir aquifère afin de faire évoluer la forme et la profondeur des lentilles.

La difficulté réside donc dans l'intégration de processus à des échelles spatiales et temporelles distinctes : les phénomènes relatifs au bilan hydrique de surface sont de l'ordre de la journée et peuvent être distribués sur chacune des cellules de l'environnement. Les phénomènes relatifs aux lentilles sont beaucoup plus lents et nécessitent de travailler sur des agrégats spatiaux dont l'équilibre peut être contrôlé annuellement.

#### **3.1 Modèle de bilan hydrique**

Le phénomène de recharge des lentilles est directement influencé par la pluviométrie et le bilan hydrique de surface. Il apparaît donc essentiel de pouvoir estimer la quantité d'eau qui percole à partir des couches superficielles. Le modèle de bilan hydrique élaboré par FALKLAND (1992) et retenu pour AtollScape, est fondé sur des équations de conservation de masse extrêmement simples. Ce modèle, nommé Watbal, est uniquement applicable à la zone non saturée du sol dans laquelle les flux sont essentiellement verticaux.



### 3.1.1 Le modèle Watbal

La figure 28 indique les principaux réservoirs du modèle ainsi que les différentes variables d'entrée.

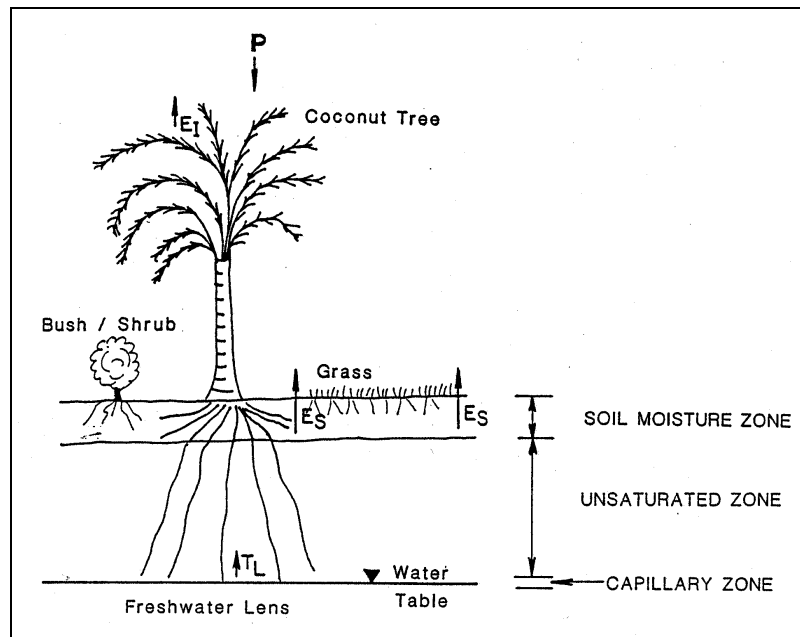


Figure 28 : structure du modèle de bilan hydrique dans la zone non saturée du sol

La variable d'entrée "pluie" est décomposée selon l'équation [1] suivante:

$$P = Ei + Es + R + \ddot{A}S \quad [1]$$

- Avec: **P**: pluie  
**Ei**: évaporation à partir des surfaces d'interception  
**Es**: évapotranspiration à partir du réservoir sol  
**R**: recharge brute de la lentille  
 **$\ddot{A}S$** : variation de la réserve en eau dans le réservoir sol

L'équation ne contient aucun terme de ruissellement. Cette composante est négligée compte tenu du très fort coefficient de perméabilité des sols coralliens.

En faisant intervenir l'évapotranspiration réelle totale E, l'équation [1] devient:

$$P = E - TL + R \pm \ddot{A}S \quad \text{avec} \quad E = Ei + Es + TL \quad [2]$$

Avec **TL**: évapotranspiration à partir de la lentille

La recharge brute est finalement obtenue par :

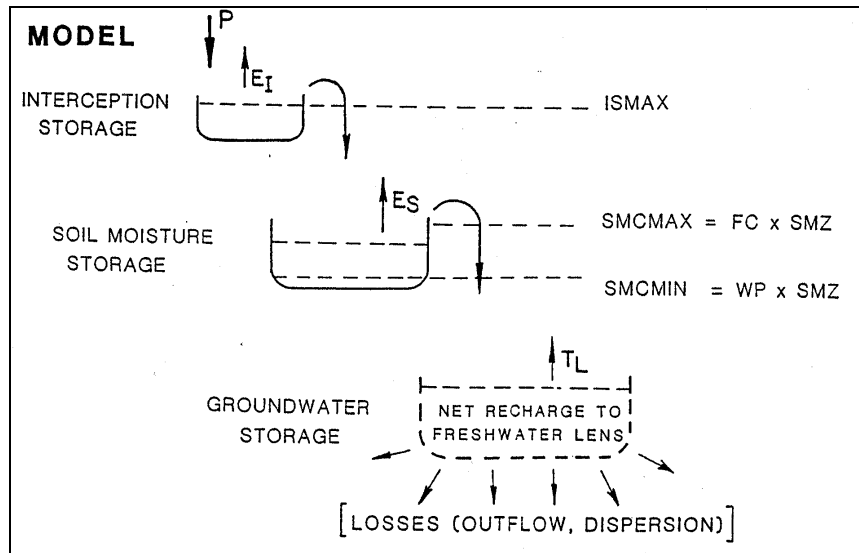
$$R = P - E + TL \pm \ddot{A}S \quad [3]$$

Le terme  $(R - TL)$  correspond à la recharge nette **Rn** de la lentille en l'absence de pompage, soit:

$$Rn = P - E \pm \ddot{A}S \quad [4]$$

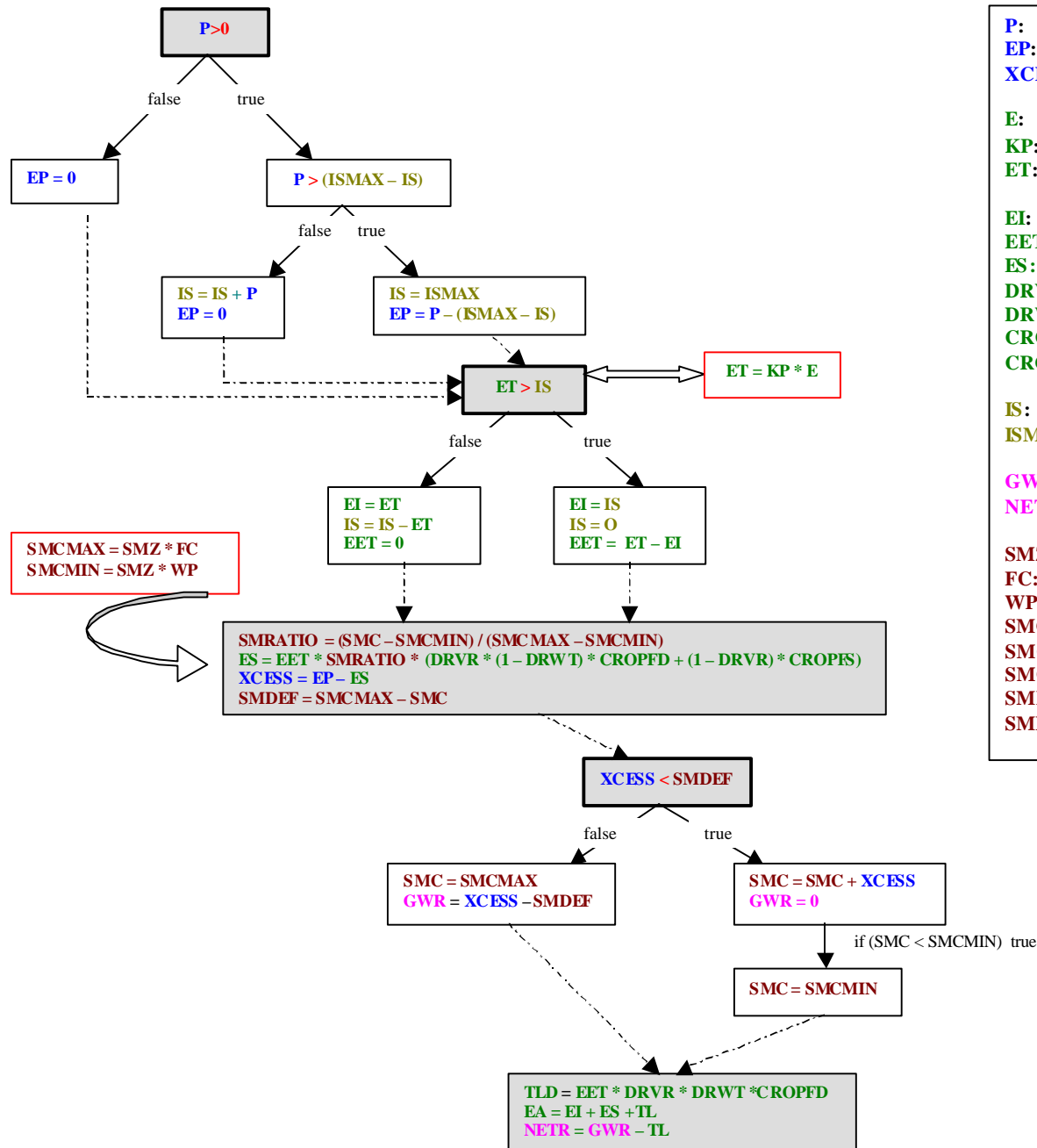
Ce modèle de bilan hydrique a été programmé sous Quick Basic par FALKLAND (1992), afin d'estimer la recharge sur Bonriki sur la période 1954-1991. Les deux variables d'entrée sont : la précipitation, relevée en continue au pas de temps journalier entre 1954 et 1991 et l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle estimée directement sur la période 1981-1991 à l'aide d'un bac d'évaporation. Pour des atolls de faible altitude tel que Tarawa, Falkland (1992) montre que l'on peut s'affranchir de données d'évaporation au pas de temps journalier, une estimation moyenne mensuelle étant suffisante pour des analyses de bilan hydrique d'un système aquifère. La justification réside dans les variations faibles, voire insignifiantes, de la demande évaporative sur une durée mensuelle.

La structure de WATBAL est présentée ci dessous (Figure 29) :



*Figure 29 : réservoirs, variables et paramètres d'entrée de WATBAL*

Et la séquence des diverses équations est schématisée ci après:



|                 |  |
|-----------------|--|
| <b>P:</b>       | rainfall input   |
| <b>EP:</b>      | effective rainfall   |
| <b>XCCESS:</b>  | rainfall excess  |
| <b>E:</b>       | input evaporation data (= pan evaporation data)            |
| <b>KP:</b>      | pan factor   |
| <b>ET:</b>      | potentiel evaporation (= max evaporation from a catchment) |
| <b>EI:</b>      | evaporation from interception storage                      |
| <b>EET:</b>     | remaining (effective) evaporation                          |
| <b>ES:</b>      | transpiration from shallow rooted vegetation               |
| <b>DRVR:</b>    | deep rooted vegetation ratio                               |
| <b>DRWT:</b>    | ratio of roots reaching water table                        |
| <b>CROPPFD:</b> | crop factor for deep rooted vegetation                     |
| <b>CROPFS:</b>  | crop factor for shallow rooted vegetation                  |
| <b>IS:</b>      | interception storage (timestep t)                          |
| <b>ISMAX:</b>   | interception storage max                                   |
| <b>GWR:</b>     | ground water recharge                                      |
| <b>NETR:</b>    | net recharge   |
| <b>SMZ:</b>     | soil moisture zone thickness                               |
| <b>FC:</b>      | field capacity   |
| <b>WP:</b>      | wilting point  |
| <b>SMC:</b>     | soil moisture content                                      |
| <b>SMCMIN:</b>  | soil moisture content min                                  |
| <b>SMCMAX:</b>  | soil moisture content max                                  |
| <b>SMRATIO:</b> | soil moisture ratio  |
| <b>SMDEF:</b>   | soil moisture deficit                                      |

Le modèle se décompose en trois réservoirs. La première interception de la pluie se situe au niveau de la végétation. Une valeur maximale d'interception (notée **ISMAX**) est définie et doit être atteinte pour que l'eau puisse ensuite accéder au second réservoir. ISMAX est estimée à 1 mm pour des couvertures végétales à dominante herbacée et à 3 mm pour des couvertures où prédominent les arbres de type cocotier.

Le second réservoir traduit la capacité en eau du sol et correspond à la zone dans laquelle puise la végétation herbacée ainsi que les racines superficielles des arbres. La demande en eau des plantes qui s'approvisionnent dans cette zone doit être satisfaite avant toute possibilité de drainage vers le toit de la nappe. Les deux paramètres caractéristiques de ce réservoir sont: la **capacité au champ (FC)** estimée à 0.15 et le **point de flétrissement permanent (WP)** 0.05. Au delà du premier paramètre, l'eau s'écoule vers le réservoir plus profond, en deçà du second aucune évaporation ne peut survenir. L'épaisseur de la zone (**SMZ**) est estimée à 500 mm selon des observations locales de profils de sol. La capacité en eau du sol (**SMC**) s'étalonne donc entre une valeur minimale, notée **SMCmin**, de 25 mm (= WP x SMC) et une valeur maximale, **SMCmax**, de 75 mm (= FC x SMC). La valeur de SMC à l'initialisation du modèle, notée **ISMC**, est fixée à 50 mm. La quantité d'eau évaporée (**ES**) depuis ce réservoir est fonction de SMC: au point de flétrissement permanent l'évaporation est nulle, à la capacité au champ elle est maximale et entre les deux limites s'établit une relation linéaire.

Deux autres paramètres interviennent dans le calcul de ES. Un coefficient cultural (crop factor) est affecté à chaque type de végétation: il est égal à **1** pour la végétation de South Tarawa à enracinement faible (**CROPFS**), c'est la valeur conventionnellement attribuée à tout couvert de types herbacé. Un coefficient égal à **0.8** est affecté aux cocotiers (**CROPFD**) qui correspondent à la végétation à enracinement profond. En outre, le modèle comprend aussi un paramètre relatif au taux de recouvrement du sol par les cocotiers (**DRVR**). Estimé initialement à 80% sur Bonriki, il est aujourd'hui plus proche de 60-70% suite à la création de la piste d'atterrissage et l'extension du réseau de pompage. En milieu urbain, ce coefficient avoisine plus vraisemblablement les 30%, et peut être nul en zones extrêmement urbanisées.

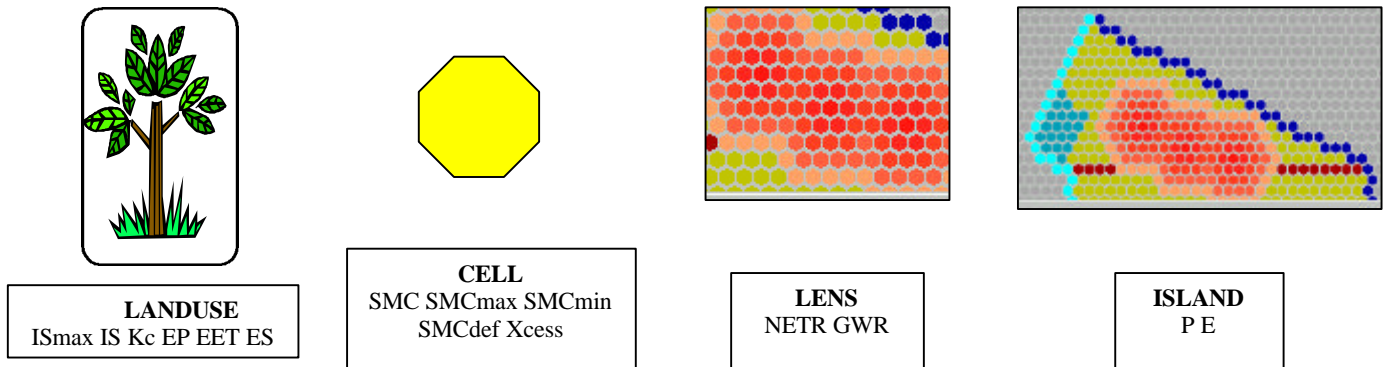
L'eau qui pénètre dans le dernier réservoir correspond à la recharge brute (cf équation [3]). Le modèle est conçu pour tenir compte de l'extraction de l'eau directement au niveau de la nappe par les racines des cocotiers situées à 2-3 m sous la surface, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle ces arbres peuvent endurer des périodes de sécheresses prolongées et permettre à la transpiration de se poursuivre même si la réserve en eau du sol a été épuisée. Un paramètre, noté **DRWT**, est introduit pour quantifier la proportion de racines des cocotiers qui atteint le toit de la nappe. Il est généralement estimé entre 25 et 50%. Le dernier réservoir permet donc le passage de la recharge brute à la recharge nette par soustraction de ce terme de transpiration (notée **TL**).

### 3.1.2 Adaptation de WATBAL

Le modèle de bilan hydrique est programmé au niveau de deux classes d'AtollScape : la classe « occupation du sol » (Landuse) et la classe « cellule » (Cells). Chacune des instances générées par ces classes peuvent ainsi effectuer leur propre partie du bilan hydrique à chaque pas de temps.

Cette décomposition permet d'intégrer l'hétérogénéité du système en terme d'occupation et de profondeur du sol, qui sont les deux facteurs conditionnant les résultats du bilan hydrique. Néanmoins, il n'est pas exact de parler d'un modèle véritablement « distribué » car les flux entre les mailles, tant en surface qu'en profondeur ne sont pas pris en compte. C'est pourquoi il est plus juste d'utiliser le terme de modèle semi-distribué. Une autre modification est introduite par rapport à WATBAL, elle concerne le ruissellement. Une loi de type "tout ou rien" est appliquée sur les cellules de type "route" qui correspondent à la piste d'atterrissage sur Bonriki. Dans ces cas là, toute la pluie qui tombe sur ces cellules est transférée aux cellules voisines.

Les différents paramètres de Watbal ont été repartis en attributs des objets CELL, LANDUSE, LENS et ISLAND (Figure 30) :



*Figure 30 : affectation des attributs intervenant dans le bilan hydrique aux différentes entités impliquées*

Chaque cellule étant affectée d'un unique objet « occupation du sol », le terme DRVR qui correspondait dans Watbal au taux de recouvrement par les arbres disparaît au niveau des équations du bilan hydrique d'AtollScape. Ce facteur est en fait pris en compte dans la répartition globale des objets « occupation du sol » sur chaque île.

La figure précédente permet aussi de mettre en exergue les trois niveaux d'agrégation :

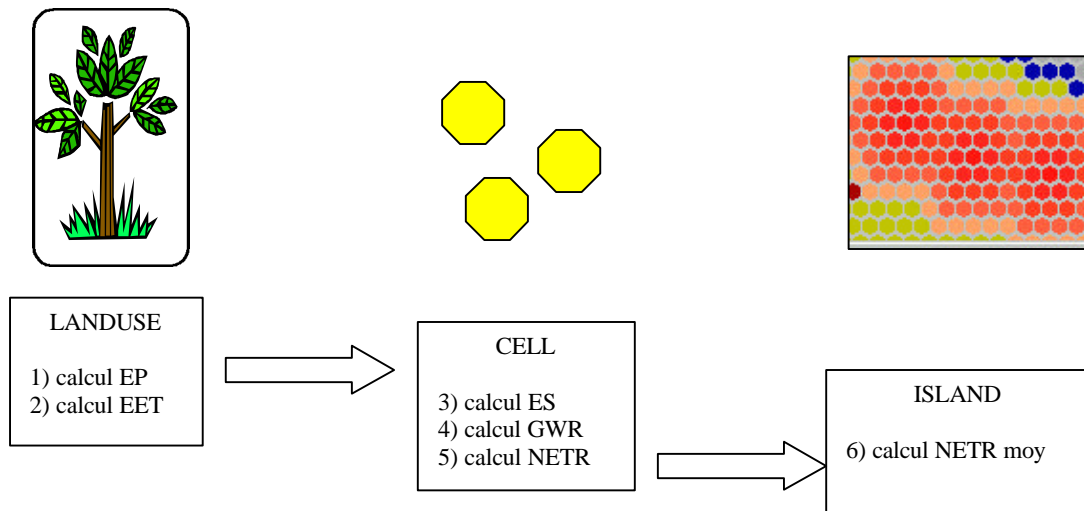
- le niveau élémentaire constitué par la cellule qui renferme un certain nombre de variables et qui connaît l'objet LANDUSE qu'elle porte;
- le niveau supérieur est celui de la lentille (LENS), formée par l'agrégation de cellules élémentaires, lui aussi porteur de variables spécifiques
- enfin le niveau de l'île (ISLAND), agrégat de lentilles et de cellules élémentaires. Cette structure en poupée russe facilite donc la gestion de l'information portée par les attributs des entités à différents niveaux.

Cet emboîtement permet d'explicitier la différence fondamentale entre Watbal et AtollScape concernant le calcul final de la recharge. Dans le cas de Watbal, le modèle calcule une unique valeur de recharge à chaque pas de temps en fonction des valeurs de la variable pluie et des paramètres d'entrée globaux. Dans le cas d'AtollScape, chaque cellule calcule sa propre recharge et transmet cette valeur à la lentille (niveau d'agrégation supérieure) à laquelle elle appartient. La lentille se charge ensuite de calculer une valeur de recharge moyenne à partir de la centralisation de valeurs de recharge élémentaires.

D'un point de vue dynamique, le bilan hydrique est décomposé en 7 étapes correspondant à 7 méthodes distinctes :

- 1) *calcul EP* : remplissage du premier réservoir d'interception, calcul de la pluie EP résultante,
- 2) *calcul EET*: calcul de l'évaporation résultante après satisfaction d'une partie au niveau du premier réservoir,
- 3) *calcul ES*: calcul de la demande évaporatoire, fonction de la teneur en eau du sol et du type d'occupation du sol,
- 4) *calcul GWR*: calcul de la recharge brute, au niveau de chaque cellule, qui arrive à la lentille après avoir satisfait le déficit en eau du sol,
- 5) *calcul NETR*: calcul de la recharge nette, après évaporation d'une partie par les arbres,
- 6) *calcul NETR moy*: calcul de la recharge nette moyenne pour chaque lentille.

Le schéma ci-après (Figure 31) présente la séquence du bilan hydrique en positionnant les différentes étapes au niveau des entités qui les exécutent :



*Figure 31 : étapes du bilan hydrique*

Ainsi, à l'issue de cette étape de bilan hydrique de surface, chacune des lentilles se voit affecter une valeur de recharge moyenne pour le pas de temps en cours. Cette valeur va permettre de réajuster sa forme générale et sa profondeur locale au niveau de chaque cellule.

### 3.2 Le modèle hydrogéologique

#### Préambule : rappel sur la classification des modèles de nappe

Un certain nombre de modèles de nappe sont disponibles pour étudier le comportement des lentilles d'eau douce. Ils sont généralement classés en deux sous-ensemble: modèles analytiques et modèles numériques. Avec la mise sur le marché d'ordinateurs de plus en plus puissants ayant la capacité de résoudre rapidement des équations complexes et multiples, les modèles numériques sont généralement préférés. Ils permettent de solutionner les équations appropriées de manière distribuée et peuvent fournir plus d'informations que les modèles analytiques.

La représentation de l'interface entre lentille et eau de mer donne lieu à deux catégories distinctes de modèles numériques: ceux à interface nette et ceux à dispersion. Dans le premier cas, la lentille est assimilée à un corps distinct flottant sur l'eau de mer, l'interface entre les deux fluides non miscibles étant réduite à une délimitation linéaire. Les modèles de dispersion tiennent compte du mélange entre les deux corps, l'interface s'apparentant plus à une zone de transition d'épaisseur variable. Ce type de modèle, représentant plus justement le comportement réel des lentilles d'eau douce en milieu insulaire corallien, a été retenu pour l'étude.

#### 3.2.1 **Le modèle de Volker**

Afin de déterminer la forme des lentilles, nous nous sommes appuyés sur les équations du modèle de VOLKER *et al.* (1985), inspiré des travaux de WOODING (1964). Il s'agit d'un modèle analytique permettant le calcul de la profondeur de la lentille (entendue comme distance entre le toit de la nappe et le milieu de la zone de transition) ainsi que le calcul de l'épaisseur de la zone de transition.

Des hypothèses fortes sont émises : les écoulements dans les lentilles sont bi-dimensionnels (les pertes par dispersion et diffusion sont négligées), la recharge est constante et la lentille est supposée dans un état d'équilibre stable. De plus, les effets de mélange en bordure de lentille induit par les marées sont ignorés. Volker justifie la première hypothèse compte tenu de la morphologie de l'atoll, allongé mais extrêmement étroit.

La valeur de la profondeur en un point à une distance  $x$  du centre de la lentille de largeur  $L$  est donnée par l'équation [1], fondée sur les hypothèses de Dupuit-Forchheimer (Figure 32):

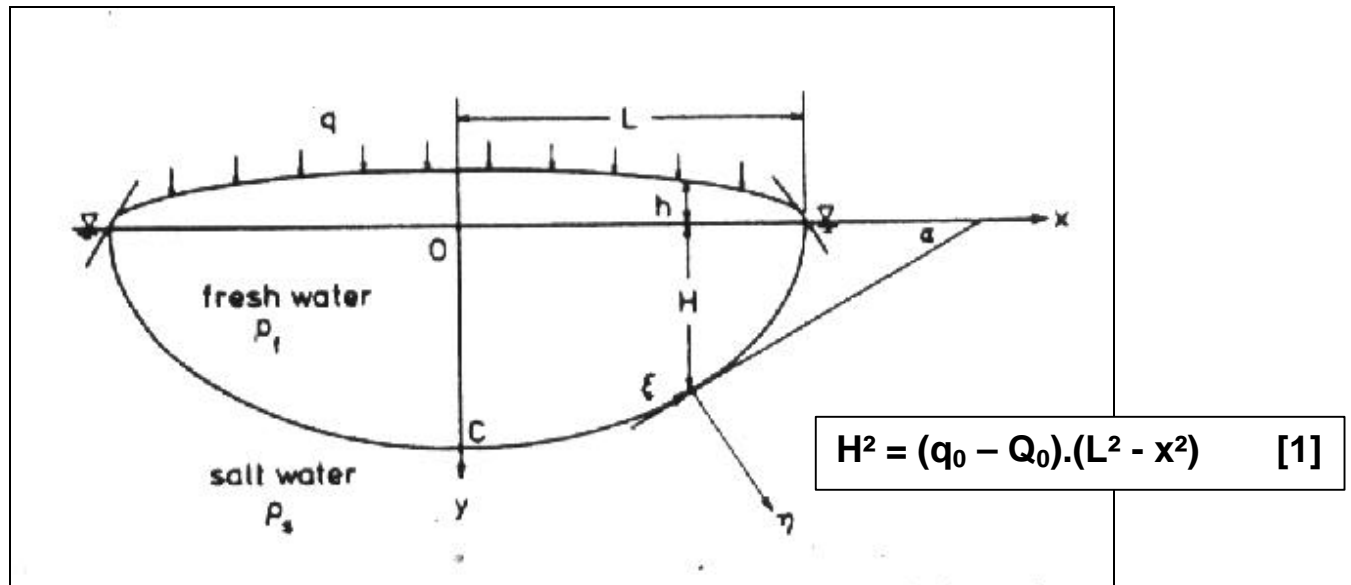


Figure 32 : positionnement des axes, paramètres et variables intervenant dans le calcul de  $H$

Avec:  $q_0 = f(q, K, \hat{a})$  et  $Q_0 = f(Q, K, \hat{a})$

$q_0$  et  $Q_0$  sont adimensionnels,

$q$  : recharge nette (après prélèvements par les végétaux),

$Q$  : pompage (via puits, galeries),

$K$  : conductivité hydraulique de l'aquifère,

$\hat{a}$  : coefficient fonction des densités d'eau de mer ( $\tilde{n}_s$ ) et d'eau douce ( $\tilde{n}_f$ )

$$\hat{a} = (\tilde{n}_s - \tilde{n}_f) / \tilde{n}_f,$$

$L$  : rayon de la lentille

$x$  : distance par rapport au centre de la lentille

La valeur de la hauteur du toit de la nappe par rapport au niveau zéro est donnée par l'équation [2], d'après le principe de continuité des pressions à l'interface entre eau douce et eau de mer:

$$h = \hat{a} \times H \quad [2]$$

Le calcul de l'épaisseur de la zone de transition est obtenue d'après l'équation [3] :

$$\Delta = [\lambda^{-1/2} \cdot (L \cdot (q_0 - Q_0)^{-1/2}) \cdot (L^2 - x^2)^{1/2} / x] \cdot [1 - (L^2 - x^2)^{1/2} / L]^{1/2} \quad [3]$$

Avec:  $\lambda$ : nombre de Rayleigh défini par Wooding (1964)

Les valeurs des paramètres retenues pour notre cas d'étude sont :

$$\lambda = 70840.2$$

$$K = 15 \text{ m/j}$$

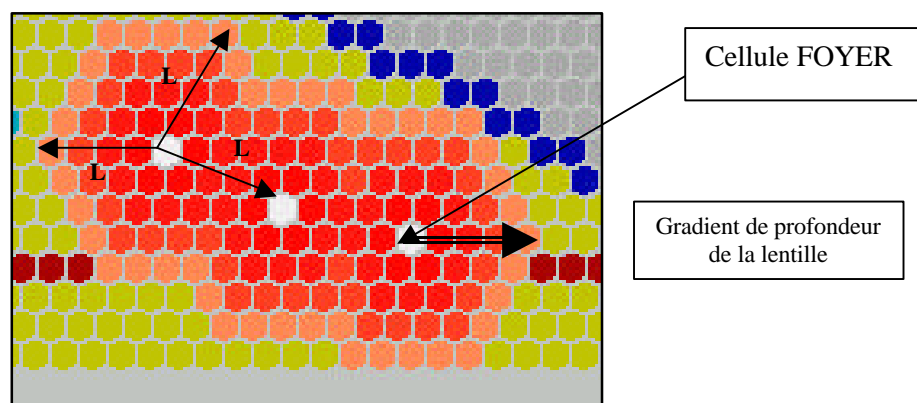
$$\hat{a} = 0.03$$

### 3.2.2 Adaptations du modèle de Volker

#### a) D'une représentation plane à une représentation spatiale

La représentation des lentilles selon le modèle de Wooding est bidimensionnelle et donne lieu à une schématisation plane sous forme de demi-cercle. Si l'on translate le centre O des axes (x,y) le long d'un axe de symétrie orienté selon la plus grande longueur des îles, et que l'on applique le modèle tout le long, on donne ainsi naissance à un demi-cylindre dont la profondeur est maximale au niveau de l'axe central et nulle au niveau du lagon et de la mer. Cette configuration ne nous satisfait pas entièrement car elle pose des problèmes de vraisemblance aux extrémités du cylindre qui coïncident avec les extrémités longitudinales de l'île. Il apparaît plus judicieux d'exploiter les potentialités de l'automate cellulaire pour générer des lentilles en trois dimensions.

L'isotropie des cellules hexagonales autorise la création d'une symétrie de type central à l'origine d'isopièzes concentriques. Certaines cellules sont donc prédéfinies comme axe de symétrie centrale et portent le nom de « foyer ». La juxtaposition sur toute la longueur des îles de foyers (figure 33), espacées d'une distance L, permet donc de respecter la forme hémisphérique des lentilles et de solutionner le problème de continuité aux extrémités des îles. La distance L entre deux foyers consécutifs engendre le chevauchement de certains isopièzes, les cellules correspondantes se retrouvant alors avec différentes valeurs possibles de profondeur. Dans ces cas là, AtollScape retient la valeur de profondeur la plus élevée.



*Figure 33 : les cellules foyers espacées d'une largeur L et le gradient de profondeur*

La figure 34 obtenue avec une valeur de L de 400m permet de positionner les différentes zones et donne une idée de la déformation du plancher des lentilles engendrée par deux foyers concomitants :



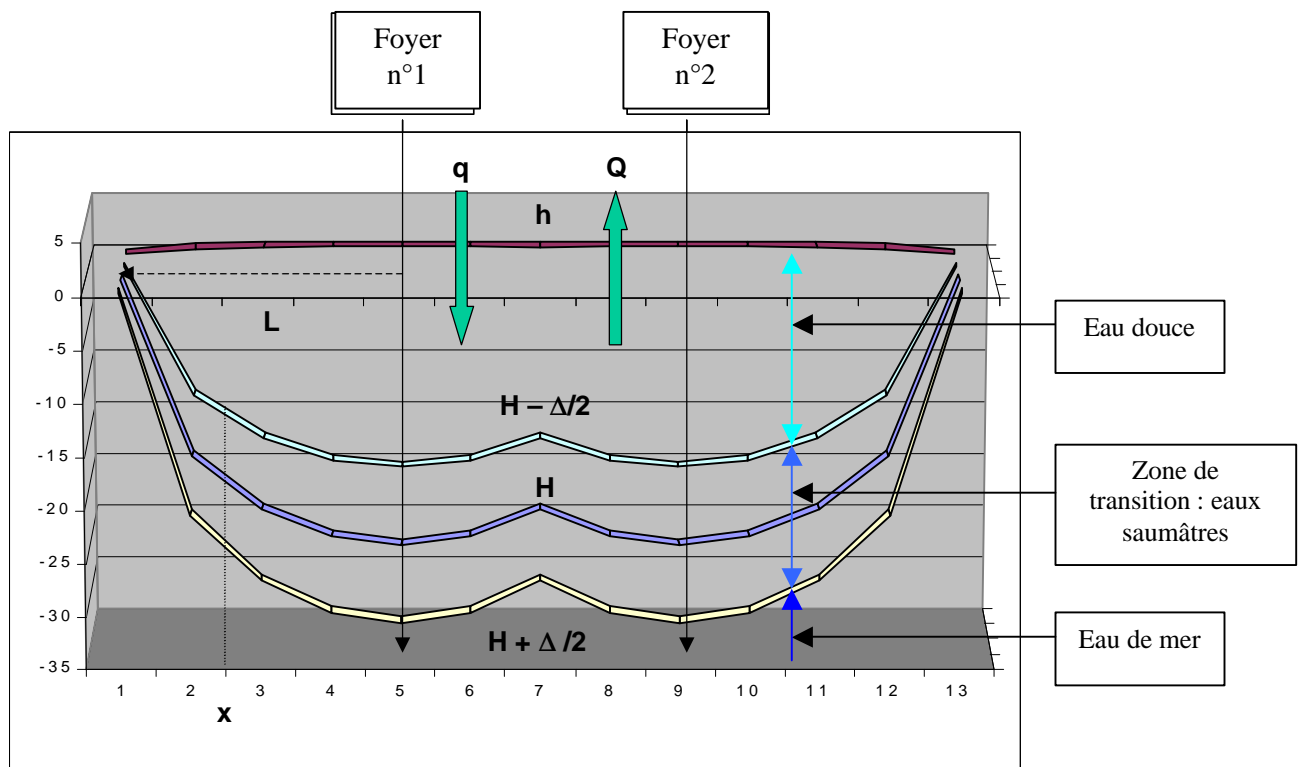


Figure 34 : déformation du plancher des lentilles et positionnement des différentes zones

## b) Application du modèle de Volker au pas de temps décadaire d'AtollScape

Le modèle de Volker considère la recharge comme un paramètre à valeur fixe compte tenu de l'hypothèse d'état d'équilibre. Or dans notre modèle, la recharge n'est pas un paramètre mais une variable calculée à chaque pas de temps (donc chaque décennie) à l'issue du bilan hydrique de surface. La démarche proposée pour faire évoluer les profondeurs des lentilles est la suivante :

1. A l'initialisation, la profondeur des lentilles est calculée sur chaque cellule à l'aide de la formule de Volker. La recharge ( $q_0 - Q_0$ ) utilisée dans le calcul correspond à la moyenne d'une série de 10 valeurs, toutes initialisées à 600mm/an.
2. Au cours d'un pas de temps, la recharge (en mm/déc) calculée au niveau de l'agrégat lentille est renvoyée à chacune des cellules constitutives qui mettent à jour leur attribut « profondeur de lentille » par un simple calcul d'ajustement :

$$\text{nouvelle profondeur} = \text{ancienne profondeur} + \text{recharge} - \text{facteur correctif.}$$

Le facteur correctif, estimé à 20mm, rend compte des pertes latérales qui se produisent à l'interface entre lentille et mer. Dans le cas où le résultat de ce calcul renvoie une valeur négative, la profondeur prend alors la valeur zéro.

3. A la fin de chaque année, soit à la fin de chaque 36<sup>ème</sup> pas de temps, AtollScape calcule la valeur de la recharge moyenne de l'année écoulée qui est alors ajoutée à la série des 10 valeurs pour calculer une nouvelle moyenne de recharge annuelle selon un principe de moyenne flottante. Le modèle de Volker est alors réutilisé avec cette nouvelle valeur pour redéfinir les profondeurs des lentilles.

*En guise d'exemple, supposons que la recharge annuelle moyenne à la fin de la première année soit de 800 mm.*

*La série de recharge qui était : {600 600 600 600 600 600 600 600 600 600}  
devient alors {600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 800}.*

*La valeur de recharge intégrée au modèle de Volker à la fin de la première année est alors de 620 mm. A la fin d'une simulation sur 10 ans, toutes les valeurs initiales à 600mm ont disparu et laissé place aux véritables valeurs de recharge annuelle.*

La possibilité de jongler entre différentes classes d'entités et la possibilité de créer des agrégats ont ainsi permis de solutionner le problème de la représentation simultanée de processus impliquant des échelles spatiales et temporelles distinctes. La dernière complexité réside désormais dans l'intégration de la dynamique démographique.

### **3 Les acteurs du systèmes : caractéristiques, dynamiques et décisions**

La dynamique sociale d'un système intègre un très grand nombre de relations plus ou moins complexes entre les diverses entités. La représentation de l'intégralité de ces relations étant impossible, une étape de simplification s'impose. La relation fondamentale qui sous-tend notre problématique est celle qui lie agents et ressources en eau. Faute de temps, nous nous sommes uniquement intéressés à cette relation du point de vue des différents équipements possédés par les agents, via lesquels ils tentent de satisfaire leurs besoin en eau. Nous aurions aussi pu intégrer par exemple le niveau de vie des foyers ou leurs activités économiques qui peuvent être des critères de modification de leurs équipements au cours du temps.

Deux classes d'agent ont été définies dans le modèle : une classe « foyer » qui représente l'ensemble de la population et une classe « agent PUB », réduite à un seul agent, symbole des autorités en charge du système public d'approvisionnement en eau.

#### **3.1 Les entités de la classe « foyer »**

##### **3.1.1 Les attributs**

Chaque entité créée à partir de la classe « foyer » (AtollScape\_Household) correspond à l'unité familiale de base et regroupe tous les membres de la famille. Cette option a été préférée à celle de considérer les habitants individuellement pour des raisons évidentes de nombre et d'implémentation mais aussi car le foyer représente l'unité de (re)production, de consommation, et aussi l'unité décisionnelle. C'est à ce niveau que sont prises la plupart des décisions importantes, notamment celles relatives à l'approvisionnement en eau du foyer.

Les principaux attributs des foyers sont:

- la taille du foyer
- les équipements d'approvisionnement en eau
- la demande en eau de boisson
- la demande en eau à usage domestique
- un indice de satisfaction

La taille du foyer correspond au nombre de personnes évoluant sous un même toit et partageant les mêmes ressources en eau. L'âge des membres de chacun des foyers n'est pas prise en considération dans cette première version d'AtollScape.

Les équipements correspondent à des objets situés qui peuvent être de trois types : connexion PUB, puits, collecteurs de pluie. Ils renvoient aux entités de la classe « équipement d’approvisionnement en eau » (AtollScape\_Wateruse). Profitons-en pour détailler les trois attributs de ces entités qui sont :

- le type,
- l’offre en eau (volume d’eau au pas de temps en cours qu’ils peuvent fournir)
- la demande en eau (correspond à la requête du foyer propriétaire de l’équipement).

Là encore, l’équipement de chacun des foyers est déterminé par un tirage aléatoire qui respecte la proportion de chacun des équipements par île. Il est impossible qu’un foyer ne possède aucun des trois équipements ou que sa collection soit réduite au seul élément « collecteur de pluie », ce cas étant rarissime sur South Tarawa.

L’indice de satisfaction est une variable de type binaire, qui reste à 0 si le foyer a reçu suffisamment d’eau pour satisfaire sa demande et qui passe à 1 dans le cas contraire.

Les demandes potentielles en eau de boisson et domestique sont calculées par rapport à la taille du foyer et à partir d’une estimation de besoin en eau de boisson de 30L/j/hab et de besoin en eau domestique de 70 L/j/hab. Ces deux besoins additionnés renvoient à l’estimation globale de 100L/j/hab. Ainsi, un foyer de 8 personnes se verra attribué une demande en eau de boisson de 2400L par décennie et une demande en eau domestique de 5600L/déc.

Les foyers sont donc réduits à des caractéristiques élémentaires, toutes en relation directe avec la ressource en eau. Aucune donnée économique n’a pour l’instant été introduite.

### **3.1.2 Les méthodes**

#### **a) Les méthodes liées aux ressources en eau**

La dynamique des agents n’a pas pu faire l’objet d’un développement poussé, notre priorité s’étant portée sur l’espace et la biophysique. A ce jour, les agents ne s’ont dotés que d’une méthode extrêmement simple de consommation d’eau.

Les équipements d’approvisionnement en eau ont été classés selon un ordre de priorité pour la consommation de l’eau de boisson et pour l’eau à usages domestiques :

- pour l’eau de boisson : priorité donnée au PUB, puis au collecteur d’eau de pluie, et enfin puits,
- pour l’eau à usages domestiques : priorité donnée au puits, puis au collecteur puis au PUB.

Chaque foyer choisit donc parmi son/ses équipements celui qui arrive en tête dans chacune des deux listes de priorité. Il regarde si l’équipement contient suffisamment d’eau pour répondre à sa demande spécifique, et consomme en fonction. Reprenons l’exemple du foyer dont la demande en eau de boisson s’élève à 2400 L et la demande en eau d’utilisation à 5600 et qui est équipé d’une connexion au PUB et d’un collecteur de puits. Dans ce cas là, le PUB sera sollicité pour répondre intégralement aux besoins en eau de boisson et le collecteur de pluie pour satisfaire les besoins d’eau domestique.

Ces méthodes de consommation ne mettent en jeu à chaque fois qu’un seul des équipements pour répondre à un besoin spécifique. Il serait intéressant d’envisager par la suite une méthode d’apprentissage permettant aux foyers de répartir au mieux leur demande sur leurs différents équipements en tenant compte des choix effectués aux pas de temps précédent et en jonglant avec les différentes offres des équipements.

Profitons-en pour détailler les méthodes de mise à jour de l’offre des équipements. Pour les foyers possédant une connexion au PUB, c’est l’agent PUB qui détermine les volumes en eau distribués à la population comme nous le verrons au paragraphe 3.2.2. Concernant les collecteurs

d'eau de pluie, leur volume est remis à jour en début de chaque pas de temps en fonction de la pluie et de l'évaporation.

Pour les puits, le calcul de l'offre s'est avéré plus complexe et a fait intervenir une formule de rabattement calculant un débit maximum d'extraction d'après la loi de Darcy. Nous avons supposé que par cellule le rabattement de la nappe, provoqué par l'extraction d'eau via les puits individuels, ne pouvait excéder 5 mm et ce quel que soit le nombre de puits se trouvant sur la cellule. La formule de rabattement permet alors de calculer un volume maximal d'extraction fonction de la profondeur de la lentille H et du coefficient de perméabilité hydraulique K:

$$Q = K\delta [(H - 0.005)^2 - (H - 2*0.005)^2] / (\ln 2)$$

Ce débit global, convertit en volume, est alors redistribué au niveau de l'attribut « offre en eau » des puits individuels selon une deuxième hypothèse : les puits par cellule sont classés selon la valeur de leur attribut « demande en eau » (qui correspond à la requête effectuée par le foyer propriétaire du puits) par ordre croissant. Le volume en eau global est affecté selon la règle suivante : on compare la demande exercée sur le premier puits à ce volume, si elle est inférieure, l'offre du puits prend alors la valeur de la demande et le volume global est diminué d'autant. Lorsque le volume global devient nul, tous les puits n'ayant pas encore été analysés voient leur offre mise à zéro. Nous avons préféré cette démarche à une méthode qui aurait répartie également le volume global par cellule sur les différents puits. Nous privilégions ainsi la satisfaction des foyers les moins demandeurs en eau sur leur puits.

## **b) Les méthodes de croissance de la population**

Ainsi qu'il a déjà été évoqué au premier chapitre, la croissance de la population est le principal fléau à la durabilité des ressources en eau. Il est donc essentiel de pouvoir l'intégrer au modèle afin de faire évoluer les pressions sur la ressource en amplifiant la demande. La méthode équivalente est pour l'instant extrêmement simpliste : la simulation débute avec les données démographiques de 1990. Connaissant le nombre de foyer en 2000, nous calculons l'augmentation du nombre de foyers entre ces deux années afin d'en déduire un nombre de foyers à introduire à chaque pas de temps. La valeur obtenue est de 3 foyers à créer par décennie afin d'obtenir des données démographiques en fin de simulation (i.e. fin d'année 1999) vraisemblables. La localisation de ces nouveaux foyers est complètement aléatoire.

Notons que cette méthode fait évoluer la population via l'augmentation du nombre de foyers et non l'augmentation du nombre de membres par foyer, l'attribut « taille » du foyer restant figé au cours des 10 années de simulation. Cette méthode traduit donc plus l'accroissement de la population induit par les flux migratoires plutôt que par les taux de natalité élevés. Là encore, le modèle n'en est qu'à ses débuts et cette dynamique de population devrait faire l'objet de plus amples approfondissements par la suite.

## **3.2 L'entité « agent PUB »**

### **3.2.1 Les attributs**

Cet agent est caractérisé par trois attributs :

- le volume d'eau pompée sur Buota
- le volume d'eau pompée sur Bonriki
- l'offre en eau du PUB.

Le volume d'eau pompée sur Buota est initialisé à 5000 m<sup>3</sup>/décade et celui sur Bonriki à 10 000 m<sup>3</sup>/décade. L'offre en eau du PUB correspond à la somme des deux volumes.

### 3.2.2 Les méthodes

L'agent PUB est chargé de répartir son offre globale auprès de tous les foyers ayant sollicité le PUB pour satisfaire leur besoins. L'offre initiale est donc « véhiculée » de foyer en foyer, selon une distribution par île d'est en ouest. Les foyers de Bonriki sont les premiers servis, ceux de Betio les derniers. L'agent PUB remet à jour son offre après avoir satisfait chaque nouveau foyer. Il peut arriver que l'offre devienne nulle avant d'avoir atteint le dernier foyer demandeur, auquel cas tous les foyers n'ayant pas été satisfaits ajournent leur indice de satisfaction à la valeur 1.

L'agent PUB peut aussi moduler les volumes pompés sur les deux réserves à la fin de chaque année en fonction de la recharge moyenne sur l'année. Nous émettons l'hypothèse que les gestionnaires du PUB ont une connaissance suffisante des phénomènes climatiques et biophysiques pour réguler ainsi les taux de pompage. Cette hypothèse demande bien entendu à être confirmée ou infirmée lors des futures enquêtes de terrain. En l'état, le modèle n'autorise pas encore de rétroaction depuis les foyers vers l'agent PUB. L'indice de satisfaction pourrait être utilisé pour permettre aux foyers insatisfaits de se plaindre auprès de l'agent PUB et de l'inciter à augmenter les volumes pompés. De même cet indice pourra être utilisé pour permettre à l'agent PUB de suivre l'évolution du nombre de mécontents au cours d'une simulation.

*Environnement, modélisation des dynamiques biophysiques, intégration d'une composante démographique, tous les éléments sont donc réunis pour étudier la gestion des ressources en eau de manière « intégrée ». Reste à définir le séquençage du modèle et l'organisation des différentes méthodes précédemment évoquée au cours d'un pas de temps.*

## 4 Architecture du modèle et déroulement d'une séquence

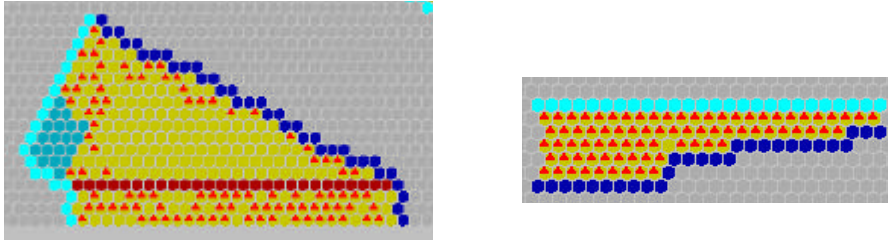
### 4.1 Initialisation et lancement du modèle

La plate-forme Cormas sur laquelle a été construit le modèle prévoit une phase d'initialisation et une phase de lancement de la simulation. Cette dernière fonctionne pas à pas : à chaque pas de temps les méthodes écrites dans le modèle sont exécutées. Seules varient les valeurs des attributs des entités telles que la profondeur de la nappe ou la contenance d'un collecteur d'eau de pluie. L'initialisation se déroule en

- 1) Initialisation des cellules : les attributs (tels que capacité en eau du sol ou profondeur de lentille) prennent des valeurs initiales fixées.
- 2) Initialisation de l'occupation du sol : chaque cellule se voit affecter un objet passif qui peut être de type arbre, culture ou sol nu.
- 3) Initialisation des agents : positionnement sur l'environnement, détermination de leur taille, calcul de leurs demandes en eau, affectation de leur(s) équipements d'approvisionnement en eau.

L'initialisation de l'occupation du sol respecte les proportions entre les trois types, arbres/sol nu/culture, donnée par la littérature. En revanche, la sélection des cellules sélectionnées pour recevoir tel ou tel type est aléatoire et change donc à chaque nouvelle initialisation.

Le choix de la cellule d'affectation d'un foyer est aléatoire. Une limite supérieure de 8 foyers par cellule pour les îles de Betio et Bairiki et entre 5 et 7 pour les autres a été instaurée pour éviter la saturation de certaines cellules et rester cohérent avec les ordres de grandeur des densités de population. Pour les îles de Bonriki et Buota une condition spéciale a été ajoutée : les foyers ne peuvent pas s'installer sur la zone de pompage (Figure 35). La taille des foyers est initialisée aléatoirement à partir d'une courbe de distribution donnée par la littérature, pour l'ensemble de Tarawa, la taille des foyer s'étalonnant entre 1 et >15.



*Figure 35 : initialisation des foyers, à gauche Bonriki à droite Bairiki*

Le pas de temps correspond à une décade et il a été choisi de définir 36 décades par année. Nous émettons l'hypothèse que le modèle reste valide sur une période de simulation de 10 ans s'étendant de 1990 à 1999. Le premier pas de temps correspond donc à la première décade de janvier 1990.

## **4.2 Organisation d'un pas de temps**

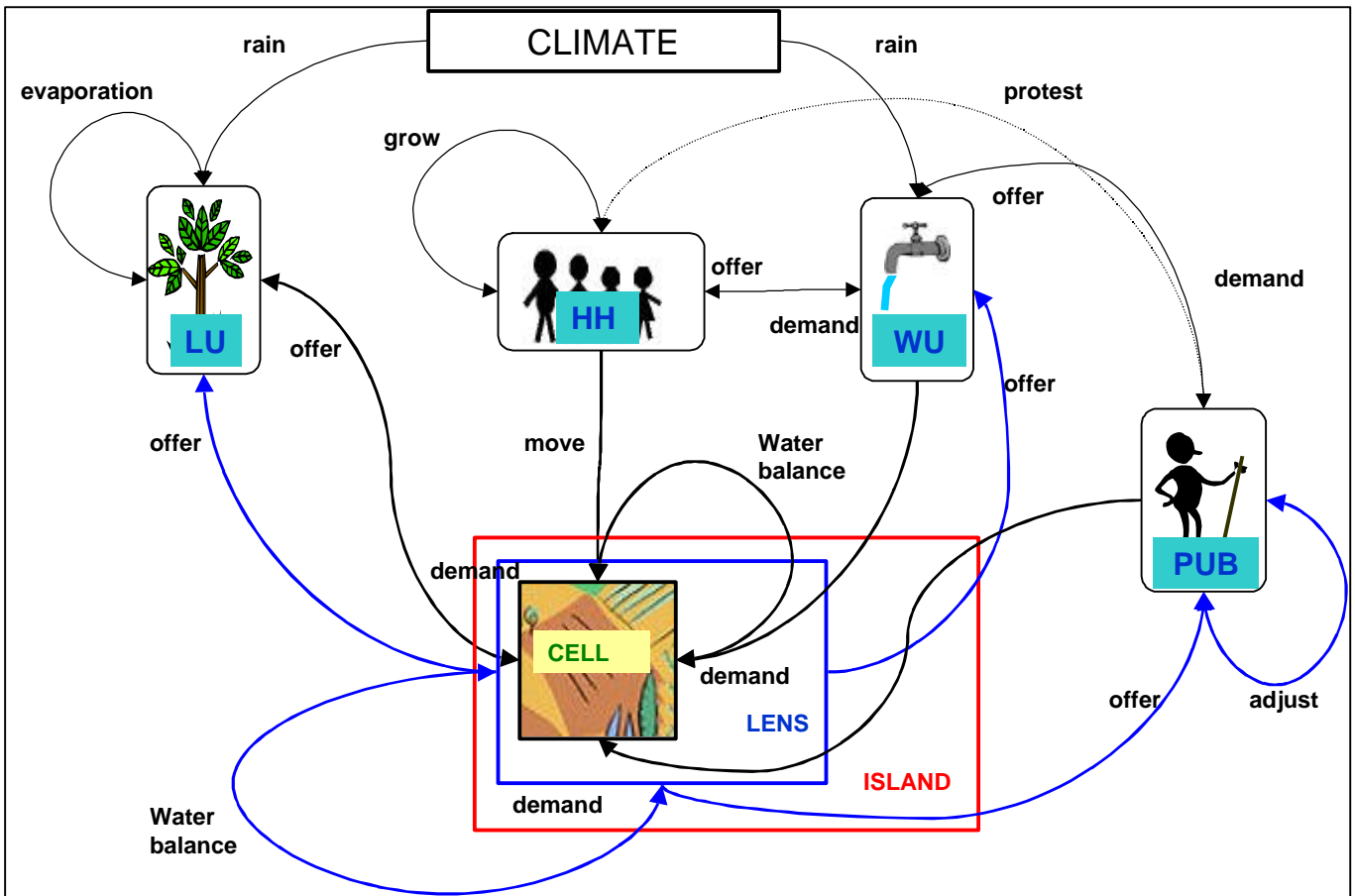
L'organisation générale d'un pas de temps se déroule selon une séquence en six étapes, chacune pouvant inclure plusieurs méthodes au niveaux de plusieurs classes :

1. bilan hydrique et hydrogéologique
2. calcul de la demande en eau des foyers
3. calcul de l'offre en eau des équipements
4. mise à jour de l'indice de satisfaction des foyers
5. mise à jour de l'offre en eau des équipements
6. apparition des nouveaux foyers

A la fin de chaque année, une septième étape intervient :

7. réajustement des lentilles

L'architecture du modèle n'est cependant pas qu'une simple succession de modules mais au contraire elle constitue un entrelacement des différentes dynamiques rendant compte des interactions existant entre la dynamique bio-physique et la dynamique sociale (Figure 36). Ce type de figure est donc une représentation intéressante pour percevoir et étudier la façon dont sont intégrées les différentes composantes.



*Figure 36 : les différentes entités, leurs dynamiques, leurs interactions*

*La représentation et l'intégration au modèle des trois complexités majeures du système (géographie, dynamique biophysique et dynamique démographique) ont ainsi été élaborées grâce aux fonctionnalités des systèmes multi-agents. Néanmoins, cette étape ne garantit en rien la cohérence du modèle qui reste désormais à valider*

# Troisième Chapitre : Validation et cohérences internes du modèles

Classiquement, la modélisation comporte toujours une étape de « vérification et validation », portant sur le modèle conceptuel et le modèle de simulation, par laquelle le modélisateur démontre que dans son domaine d'application, le modèle fournit des résultats avec une précision suffisante par rapport aux intentions d'utilisation. Nous entendons ici par validation, la validation interne du modèle et sa cohérence par rapport aux phénomènes observés, et non la démarche d'accréditation auprès des acteurs locaux. Cette validation peut prendre plusieurs formes allant du débogage du code du modèle au calage des sorties simulations par rapport à des années de références puis comparaison simulée/observée sur un deuxième jeu de données par une analyse de sensibilité. Notons que dans le cas des SMA, la question de la validation n'en est qu'à ses débuts et que le très grand nombre de paramètres que comportent généralement les modèles individu-centré complique cette étape.

La validation conceptuelle du modèle a été réalisée au cours de sa construction en fonction des tests qui étaient alors menés. Par ailleurs le débogage des procédures a également été effectué au cours de la programmation et il n'est pas nécessaire d'en décrire le contenu dans ce mémoire. Notre objectif, compte tenu des limitation de temps, était de vérifier en priorité la cohérence des processus biophysiques et plus spécifiquement des variables suivantes : la recharge, la profondeur et le volume des lentilles. Nous avons été contraints de limiter la vérification de ces variables à la zone de Bonriki, la seule pour laquelle nous disposions de données terrain.

## 1 Validation de la recharge sur Bonriki

La validation de notre modèle de bilan hydrique a été menée par comparaison entre les résultats de Watbal et d'AtollScape sur la période d'étude 1990-1999 (Figure 37) :

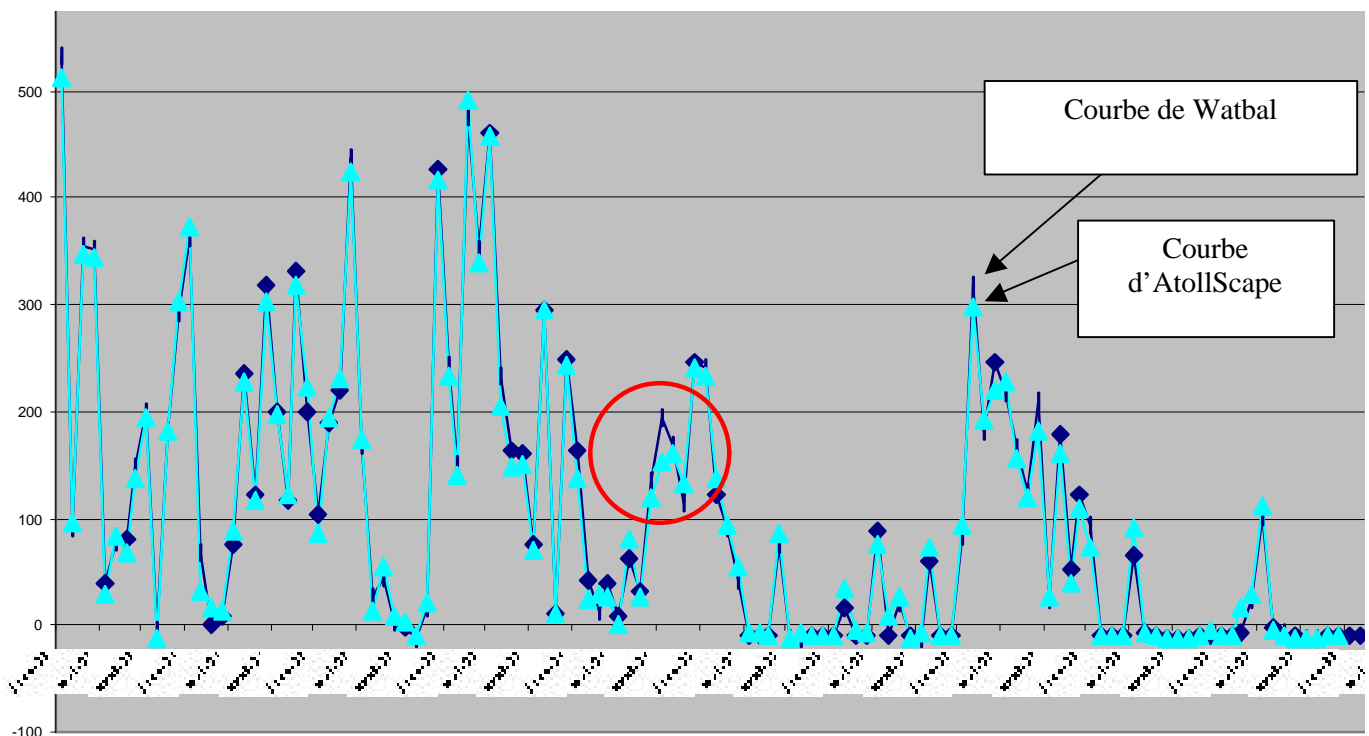


Figure 37 : comparaison des recharges mensuelles calculées selon Watbal et AtollScape



Les deux courbes sont extrêmement bien corrélées. La recharge estimée par AtollScape tend à très légèrement sous-estimer les valeurs obtenues par Watbal, mais les écarts sont très faibles : le cumul des écarts sur 360 simulations est de 1057 mm. Avec Watbal nous obtenons une recharge moyenne annuelle de 1273 mm, avec AtollScape elle s'élève à 1250 mm.

Il serait intéressant par la suite de tenter de comprendre la cause de ces écarts, notamment celui entouré d'un cercle rouge, la différence entre les deux courbes étant de 40mm.

La cohérence du modèle du point de vue de la recharge est donc satisfaisante. Au niveau d'AtollScape, la distribution des paramètres de Watbal et la prise en compte de l'hétérogénéité de l'occupation du sol et de leur profondeur permettent ainsi de restituer des valeurs de recharge en conformité avec les valeurs de référence.

Au cours de cette étude, nous avons choisi d'adapter le modèle de Watbal à AtollScape en respectant intégralement son architecture et ses différentes équations. Cependant, nous sommes conscients qu'il présente certaines imperfections qu'il serait souhaitable de rectifier. La mise à jour de la capacité en eau des sols est par exemple à revoir, notamment dans le cas où le calcul renvoie une valeur inférieure à la capacité au point de flétrissement permanent.

## 2 Validation de la profondeur de la lentille sur Bonriki

La deuxième variable dont le calcul et la mise à jour ont fait l'objet d'hypothèses fortes est la profondeur des lentilles, réajustée à la fin de chaque année selon le modèle de Volker. Le graphe ci-après représente l'évolution de la profondeur maximale de la lentille de Bonriki sur 10 années de simulation.

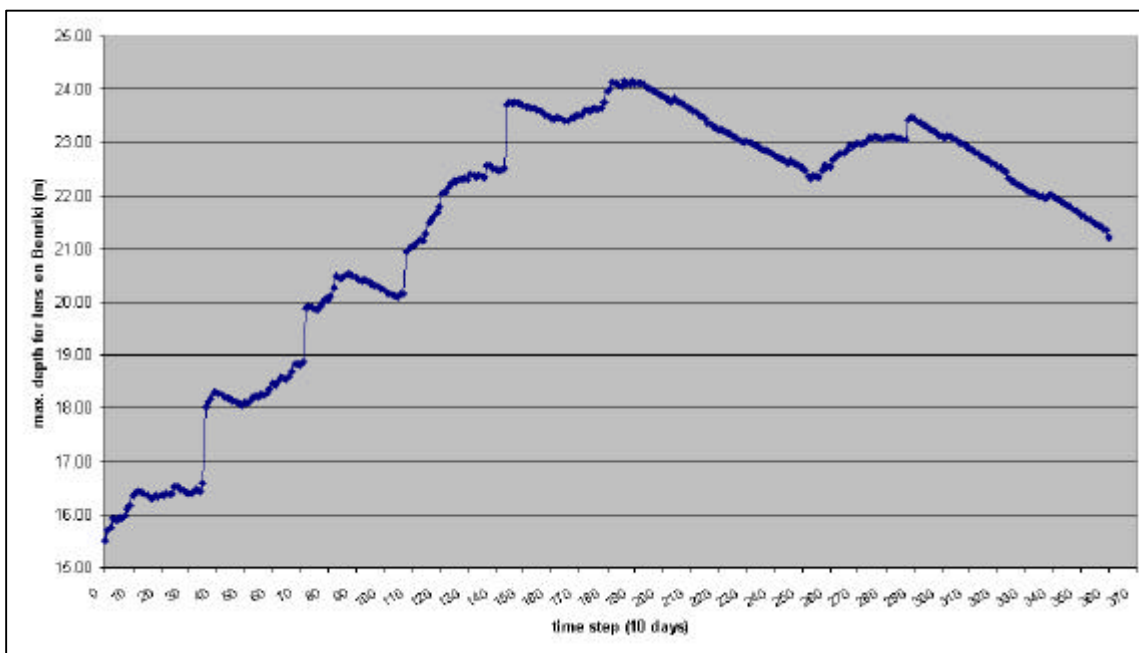
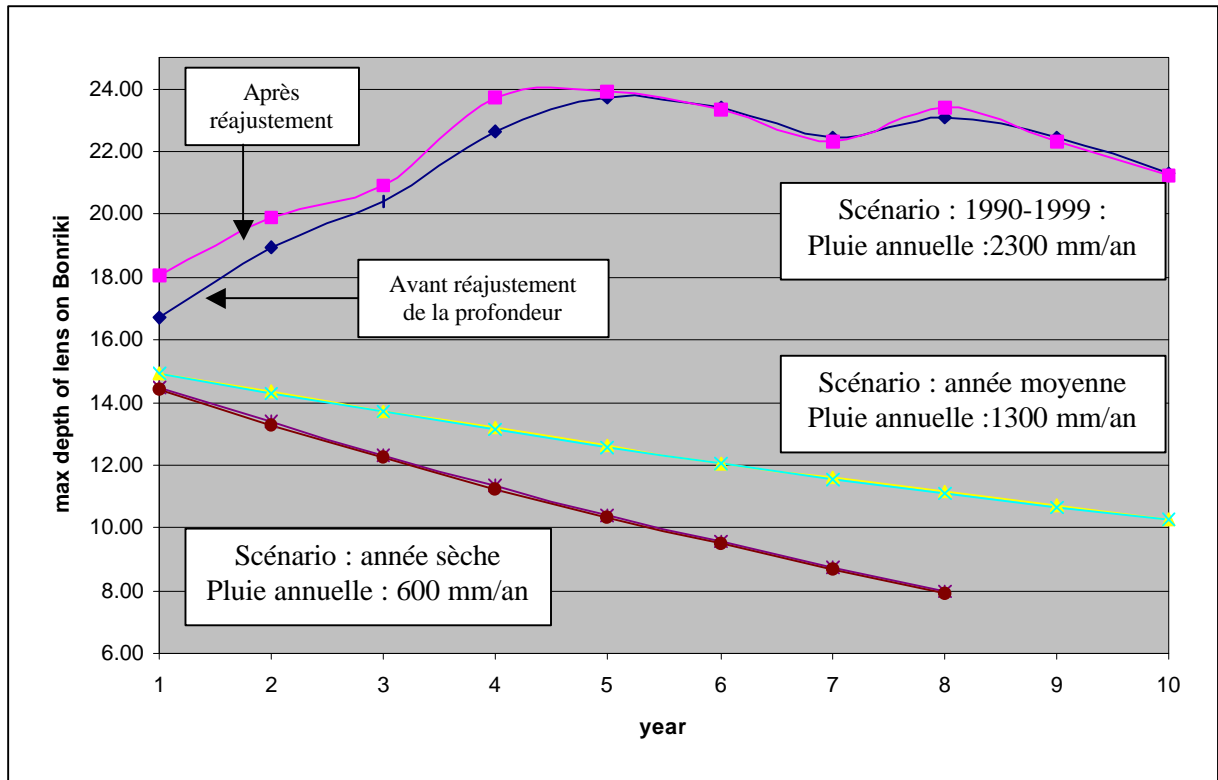


Figure 38 : variation de la profondeur maximale de la lentille de Bonriki sur 10 années de simulation

Notons tout d'abord que les valeurs des profondeurs s'étalonnent entre 15.5 et 24.2 m, gamme tout à fait en accord avec les données de la littérature (WHITE *et al.*, 1999a). Par ailleurs, le réajustement de la profondeur tous les 36<sup>ème</sup> pas de temps est marqué lors des 5 premières années de simulation puis tend à s'estomper par la suite. A la fin de la première année, l'écart des profondeurs calculées selon notre mise à jour décadaire et selon le modèle de Volker intégrant la recharge moyenne annuelle est de 1.50m. En fin de simulation, cet écart n'est plus que de l'ordre du centimètre.

Le modèle semble nécessiter 5 années d'adaptation avant de pouvoir correctement estimer les profondeurs des lentilles selon le réajustement décennal. Le graphe ci-dessous (Figure 39) permet d'approfondir la réflexion :



*Figure 39 : évolution de la profondeur selon trois scénarios de simulation*

Trois scénarios de simulation dont les variations portent sur les données pluviométriques d'entrée sont analysés :

- le premier scénario consiste à faire tourner le modèle sur le jeu de données pluviométrique de 1990 à 1999,
- le deuxième scénario étudie la réaction du modèle à une succession de dix années de pluviométrie moyenne,
- le troisième scénario étudie la réaction du modèle à une succession de dix années sèches.

L'analyse des courbes du premier scénario révèle la sensibilité du modèle aux données d'entrée, en l'occurrence la série des 10 valeurs de recharge initialisées à 600mm/an. Le modèle requiert cinq ans de simulation pour se stabiliser et minimiser les écarts entre les deux courbes. Il y a donc un phénomène d'amortissement par modification de la série initiale à laquelle sont progressivement intégrées les valeurs réelles de recharge annuelle. Notons que les deux courbes s'écartent légèrement à l'issue de la huitième année (1997) qui correspond à une année extrêmement humide.

Les courbes des deux autres scénarios sont en phase dès la première année de simulation car le jeu de données de pluie est répétée à l'identique tous les ans. De plus, la recharge moyenne annuelle est négative, on ne fait que retirer de l'eau au système.

Enfin, il est intéressant de remarquer que le scénario « année sèche » s'interrompt à l'issue de la huitième année, le modèle ne pouvant continuer au delà car la lentille de Bonriki est épuisée. Cette estimation de la durabilité de la lentille est plus pessimiste que celle de White (WHITE *et al.*, 1999a) qui fixe à 10 ans l'âge de vie de cette lentille en situation de sécheresse prolongée.

### **3 Validation du volume de la lentille de Bonriki**

Le calcul de la profondeur de la lentille étant vraisemblable, nous souhaitons vérifier la cohérence du volume de la lentille par comparaison avec les données de la littérature. White (WHITE *et al.*, 1999a) estime à  $3.6 * 10^6 \text{ m}^3$  l'offre en eau potable de la lentille en prenant pour le calcul une profondeur moyenne de 15m et un coefficient de porosité de 0.3. En intégrant le gradient de profondeur créé par AtollScape sur la lentille de Bonriki, nous estimons à  $3.19 * 10^6 \text{ m}^3$  le volume de la lentille. Ce résultat nous semble tout à fait acceptable compte tenu de l'ordre de grandeur des valeurs calculées.

## CONCLUSION

Ce mémoire, consacré à la présentation des étapes de création du modèle AtollScape, s'est attaché dans un premier, à mettre en exergue les composantes clés du système d'étude gravitant autour de la gestion des ressources en eau potable sur South Tarawa, et pouvant mettre en péril leur durabilité. Les principaux fléaux sont : la densité de population, le taux d'urbanisation, la pollution, les problèmes fonciers. La complexité liée à la représentation du système a ensuite été discutée et a abouti à une modélisation de la gestion des ressources en eau au travers des interactions entre dynamique biophysique et milieu humain à l'aide des Systèmes Multi-Agents. Enfin, la cohérence du modèle du point de vue de sa dynamique hydrogéologique a été vérifiée.

En l'état, le modèle n'est qu'un prototype voué à être enrichi dans la suite du projet, néanmoins les développements futurs pourront être facilement mis en œuvre compte tenu de la structure modulaire du modèle déjà en place. Notre priorité était de représenter au mieux la géographie et les processus hydrologiques en intégrant au sein d'un même support différentes échelles de temps et d'espace. La représentation sociale est pour l'instant extrêmement limitée, réduite simplement à une méthode de croissance démographique élémentaire et une détermination de l'offre et de la demande en qui demeurent figées au cours du temps.

Les premiers résultats relatifs à la dynamique biophysique sont satisfaisants : le modèle de bilan hydrique, la méthode d'ajustement de la profondeur des lentilles et le calcul du volume des lentilles cadrent avec la réalité terrain.

De nombreuses perspectives d'amélioration, mentionnées tout au long de ce mémoire s'ouvrent au modélisateur. Il serait envisageable d'approfondir la représentation du système en profitant des passerelles existant entre Systèmes Multi-Agents et Systèmes d'Information Géographique. Par ailleurs, le domaine de représentation pourrait être étendu à toute la zone de Tarawa ce qui permettrait de confronter communautés villageoises et population urbanisée et d'imaginer le développement de futures zones de réserve en eau potable. Par ailleurs, les efforts devraient se tourner vers le comportement des agents afin de les doter de méthodes d'apprentissage, liées notamment à une meilleure utilisation des divers équipements d'approvisionnement en eau et de faire évoluer le système en fonction de leur degré de satisfaction.

Une mission de terrain sur South Tarawa devrait faire suite à ce travail dans le courant de l'année prochaine. Elle sera l'occasion de rencontres auprès des acteurs locaux, politiques, institutionnels dont la connaissance du terrain devrait permettre de valider ou d'invalider les hypothèses du modèle, de recadrer ou modifier notre démarche et enfin de réfléchir à la forme sous laquelle divulguer le modèle (discussions, tableau noir, jeux de rôles, etc...) afin qu'il devienne un véritable outil de médiation entre les acteurs locaux.

## BIBLIOGRAPHIE

- Akhy R.B., Dhia H.B., Gamaoun A., Amri R. (1997).** Modélisation de l'impact des activités anthropiques sur les nappes phréatiques côtières. Cas de Chott Maria (Sahel Tunisien). La Houille Blanche 2: 58-65.
- Alam K. and Falkland A.C. (1997).** Vulnerability to Climate Change of the Bonriki Freshwater Lens, Tarawa. Report No HWR97/11, ECOWISE Environmental, ACTEW Corporation, prepared for Ministry of Environment and Social Development, Republic of Kiribati, April 1997.
- APIA (1993).** Kiribati: national environmental management strategy. South Pacific Regional Environment Programme. Western Samoa.
- ATTONATY J. M., CHATELIN M.H., POUSSIN J.C. (1990).** L'évolution des méthodes et langages de simulation. Modélisation systémique et système agraire. J. L. Lemoigne. Paris, INRA Editions.
- Barreteau O. (1998).** Un système multi-agents pour explorer la viabilité des systèmes irrigués: dynamique des interactions et mode d'organisation. Thèse de Doctorat, ENGREF, Montpellier.
- Becu N. (2001).** Modélisation de la gestio de l'eau d'irrigation à l'échelle d'un bassin versant et exploration du système via simulations. Une approche basée sur les Systèmes Multi-Agents. Le cas du bassin versant du Mae Uam – Nord Thaï lande. Mémoire de DEA, Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental ; Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts – Université Montpellier II.
- Besbes M. (1975).** Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur modèles mathématiques. DRE, Tunis.
- Bonin M., Le Page C. (2000).** SIG, SMA, connaissances et gestion de l'espace : le cas du Massif de Tanargue. Géomatique 10: 131-155.
- Bousquet F. (1996).** "Usage des ressources renouvelables et modélisation des représentations: Une approche par les systèmes Multi-Agents". *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, p. 187-193.
- Bousquet F., Barreteau O., Mullon C., Weber J. (1996).** Modélisation d'accompagnement: systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables. In: Colloque International : Quel environnement au XXIème siècle? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie, 8-11 sept. 1996, Abbaye de Fontevraud.
- Bousquet F., Bakam I., Proton H., Lepage C. (1998).** Cormas: common-pool resources and multi-agent systems. In: 11th conference on industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems. Lecture Notes in Artificial Intelligence (A.P.d. Pobil, J.Mira et M.Ali, eds), Vol 1416, pp.826-837. Springer-Verlag, 1-4 juin 1998, Barcelone.

- Bousquet F., Barreteau O., Lepage C., Mullon C., Weber J. (1999).** An environmental modelling approach. The use of multi-agent simulations. In: *Advances in environmental and ecological modelling* (F.B.a.A Weill, ed.), pp. 113-122. Elsevier.
- Costanza R., Wainger L., Bockstael M. (1995).** Integrated Ecological Economic System Modeling: Theoretical Issues and Practical Applications. In: *Integrated economic and ecological indicators: practical methods for environmental policy analysis* (J.W.M. a. J.F. Shogren , ed.), pp.45-66. Praeger Publishers, Westport.
- Faisal I.M., Young R.A., Warner J.W. (1997).** Integrated Economic – Hydrologic Modelling For Groundwater basin Management. *Water Resources Development* 13: 21-34.
- Falkland A.C. (1992).** Review of Tarawa freshwater lenses, Republic of Kiribati. Hydrology and Water Ressources Branch, ACT Electricity and Water, Rep 92/682, Canberra, Australia (unpublished report).
- Falkland A.C. (1997).** Appropriate water resources assessment, development and management on small islands. In: *Islands in the Pacific Century. Abstracts. VIII Pacific Science Inter-Congress*, 13-19 July 1997, The University of the South Pacific, Suva, Fiji Islands: S20.1: 221. Location: AP 106 PSI-C 1997 pp221
- Falkland A.C., Woodroffe C.D. (1997).** Geology and hydrogeology of Tarawa and Christmas Island, Kiribati. In *Geology and Hydrogeology of carbonate islands. Developments in sedimentology* n.54. Elsevier Science.
- Falkland T. (2001).** Synopsis on information on Freshwater and Watershed Management Issues in the Pacific Islands region. South Pacific Regional Environment Programme. Strategic Action Programme for International Waters. (non publie)
- Ferber J. (1994).** La kénétique: des systèmes multi-agents à une société de l'interaction. *Revue Internationale de la systémique* 8: 13-27.
- Ferber J. (1995).** Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. InterEditions, Paris.
- Feuillette S. (2001).** Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre: exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents, Application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Montpellier.
- Gisser M. (1983).** Groundwater : Focusing on the Real Issue. *Journal of Political Economy* 91: 1001-1027.
- Mañas F.M., Ramos A., Cortes C.F., Gonzalez D.F., Corcoles H.L. (1999).** Improvement of irrigation management towards the sustainable use of groundwater in Castilla-La Mancha, Spain. *Agricultural water Management* 40: 195-205.
- ROSNEY J. (1975).** Le microscope: vers une vision globale. Edition Seuil. Paris
- SAPHE (2001).** Household Survey (non publié).
- SAPHE Water Supply Project (2001).** Environmental Impact Assessment for the Sanitation, Public health and Environmental Improvement Project. ADB and Ministry of Finance and Economic Planning, Government of the Republic of Kiribati.
- Sebillote M., Soler L.-G. (1998).** Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *Comptes rendus de l'académie d'Agriculture de France* 74: 59-70.

- Shalev Z. (1992).** Ten year national water master plan. Water Engineering Section, Public Work Division, Ministry of Works and Energy. Betio, Tarawa, Kiribati.
- Statistics Office Ministry of Finance (1997).** Report of the 1995 census of population. Volume 1: basic information and tables. Bairiki, Tarawa, Republic of Kiribati.
- UNC-LATICAL (1999).** <http://www.espace.ird.nc/>
- Volker R.E., Marino M.A, Rolston D.E. (1985).** Transition zone width in ground water on ocean atolls. Am. Soc. Civil Eng. J. Hyd. Eng., 111: 659-676
- Weisbuch G. (2000).** Environment and institutions : a complex dynamical systems approach. Ecological Economics 34 : 381-391.
- White I., Falkland A., Etuati B., Metai E., Metutera T. (1999a).** Recharge of fresh groundwater lenses: field study, Tarawa Atoll, Kiribati. Second International Colloquium on Hydrology and Water Ressources Management in Humid Tropics, Panama, Mars 1999.
- White I, Falkland, A., Crennan, L., Jones, P., Metutera, T., Etuati, B. and Metai, E. (1999b).** Groundwater recharge in low coral islands Bonriki, South Tarawa, Kiribati. Issues, traditions and conflicts in groundwater use and management. UNESCO IHP-V, Technical Documents in Hydrology, No. 25, UNESCO, Paris, 37 pp.
- Wooding R.A., (1964).** Mixing-layer in a Saturated Porous Medium. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 19, part 1, pp. 103-112.



Département :

Spécialisation : PSNGH

Enseignant responsable : F.Monbureau

Cadre réservé à la Bibliothèque Centrale

Auteur(s) : DRAY Anne

Année de soutenance : 2002

Titre du mémoire :

Modélisation de la gestion des lentilles d'eau douce sur South Tarawa à l'aide des Systèmes Multi-Agents.

Organisme d'accueil : CIRAD CA

Adresse complète : CIRAD

**Département Cultures Annuelles**

Gestion des Ecosystèmes Cultivés

Avenue Agropolis, BP 5035

34398 Montpellier Cedex 05

Tél : 04 67 61 56 43

Fax : 04 67 61 71 60

Maître de stage : Dr Pascal Perez

#### Résumé :

Les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau potable sur l'atoll de Tarawa (République Kiribati) et font l'objet de pressions croissantes qui s'expriment aussi bien en terme quantitatif (problèmes liés à la démographie) que qualitatif (problèmes de pollution) et viennent mettre en péril la durabilité du système, déjà fragilisé par ses caractéristiques naturelles. Afin de mieux comprendre et explorer le système en vue de concevoir de futurs scénarios de gestion, un outil de modélisation centré sur la problématique de gestion des ressources en eau a été conçu à l'aide des Systèmes Multi-Agents. Ces derniers constituent un outil puissant pour étudier les interactions entre sociétés et environnement afin de fournir un support d'aide à la négociation. Les principales complexités rencontrées dans la mise en œuvre de la modélisation sont : la représentation de la morphologie du système, la modélisation de processus biophysiques aux échelles de temps et d'espace différentes, l'intégration de des dynamiques démographiques. Ces trois difficultés ont été surmontées à l'aide des propriétés des systèmes multi-agents. Le modèle fournit une représentation intégrée du système en modélisant les interactions majeurs liées aux ressources en eau entre acteurs et environnement. De plus la modélisation des processus hydrogéologiques est cohérente avec les données de terrain.

#### Abstract :

Groundwater lenses are the principal source of potable water on Tarawa atoll (Kiribati Republic). They suffer from increasing pressures which are related to quantitative (demography) as well as qualitative (pollution) problems that come to put in danger the sustainability of the system, already weakened by its inherent characteristics. In order to better understand and explore the system and to conceive future scenarios of management, a model was implemented using Multi-Agent System. (MAS) constitute powerful tools for studying interactions between societies and their environment, as Negotiation Support Systems. Major complexities we had to cope with for the modelling were: the representation of the morphology, the modelling of biophysical process with different time and space scales, the integration of demographical dynamic. These difficulties were overcome using the properties of MAS. The model provides an integrated representation of the system by modelling the major interactions between actors and environment related to water resources. Moreover the modelling of the hydrological process is coherent with given data.

Mots clés : Atoll, Lentilles d'eau douce, Système Multi-Agents, Programmation orienté-objet, Zone Pacifique



