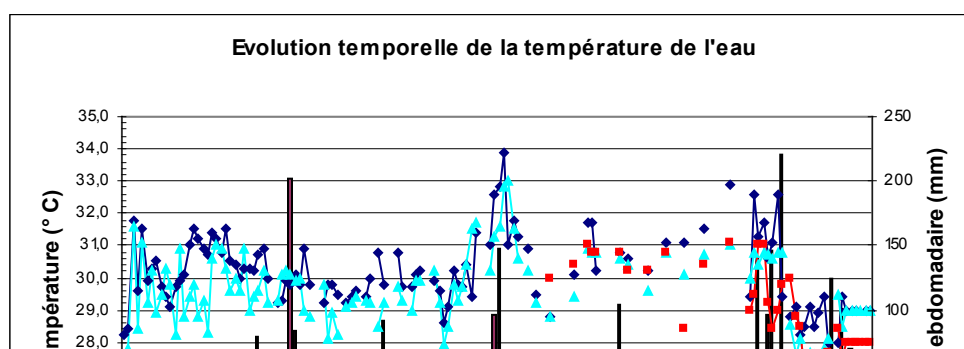


Fig.6 : Evolution temporelle de la conductivité des eaux des puits suivis

Températures

Les températures des eaux dans les ouvrages sont très fluctuantes d'une semaine à l'autre ou d'un mois à l'autre (Fig.7). Cette situation est liée au fait qu'elles sont sous l'influence de la température de l'air, donc dépendantes non seulement du mois de mesure dans l'année, mais aussi de l'heure de relevé dans la journée. Cependant, en dehors de ce phénomène qui peut être qualifié de bruit de fond, on note une tendance générale à la hausse durant les saisons sèches et à la baisse durant les saisons pluvieuses.



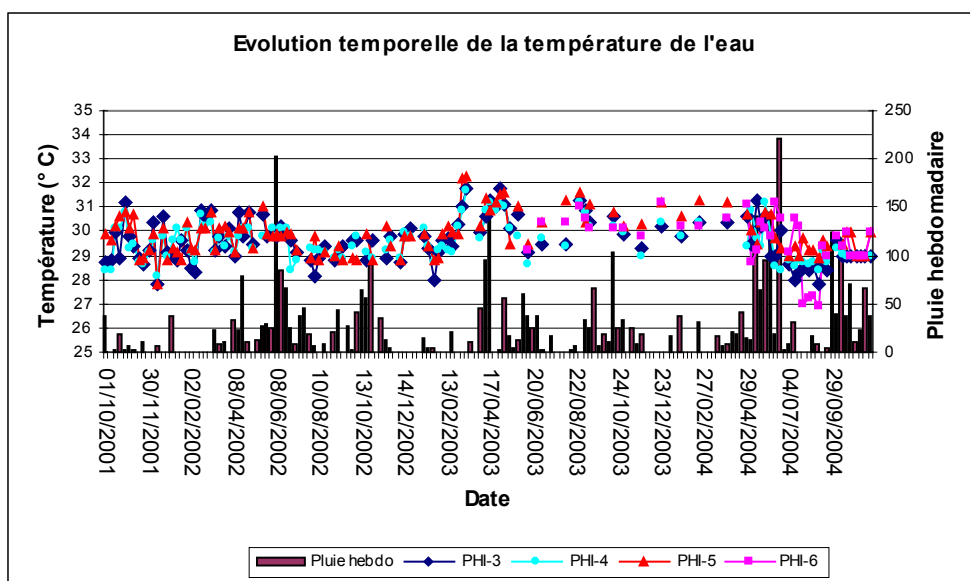


Fig.7 : Evolution temporelle de la température des eaux des puits suivis

pH

En dehors des grandes amplitudes de fluctuations enregistrées en 2002 sur le plateau, les valeurs de pH relativement stabilisés à partir de en 2003 pour osciller entre 4 et 5,5 (Fig.8). On note parfois des chutes de valeurs de pH consécutives aux débuts des épisodes pluvieux. Cette variation pourrait s'expliquer par des apports conséquents de CO₂ (CO₂ atmosphérique et de CO₂ lié à l'activité biologique dans les sols) par les premières eaux d'infiltration. Dans la plaine, on enregistre des valeurs comprises entre 5 et 7 à l'exception de celles relevées sur le PHI 1 qui varient entre 6 et 12 avec une moyenne de 8,6. L'élévation drastique du pH dans le puits PHI 1 intervenu en juin-juillet 2002 est également consécutive aux travaux de maçonnerie dans ce puits.

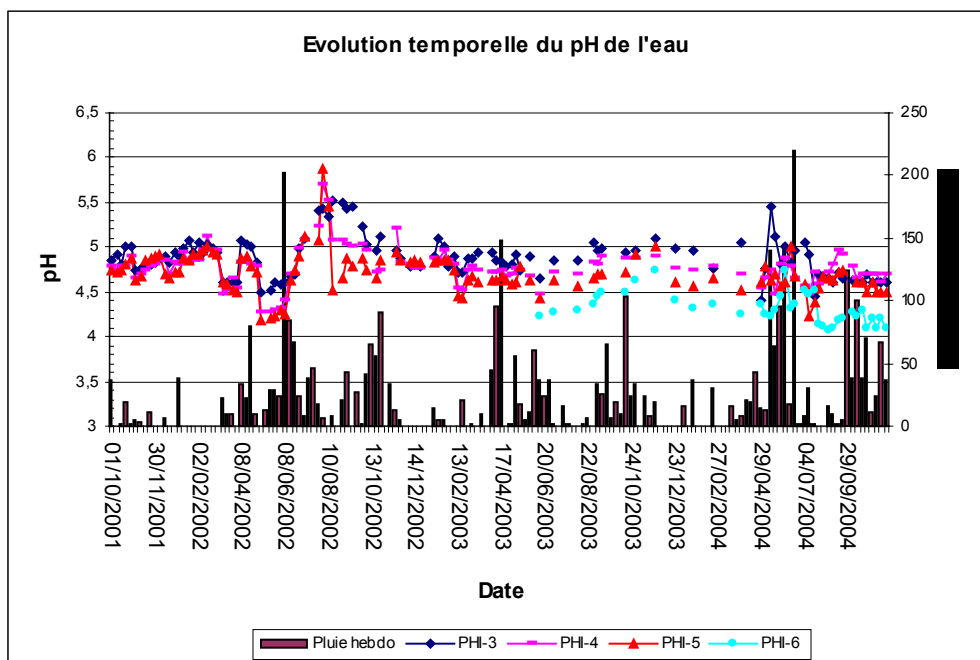
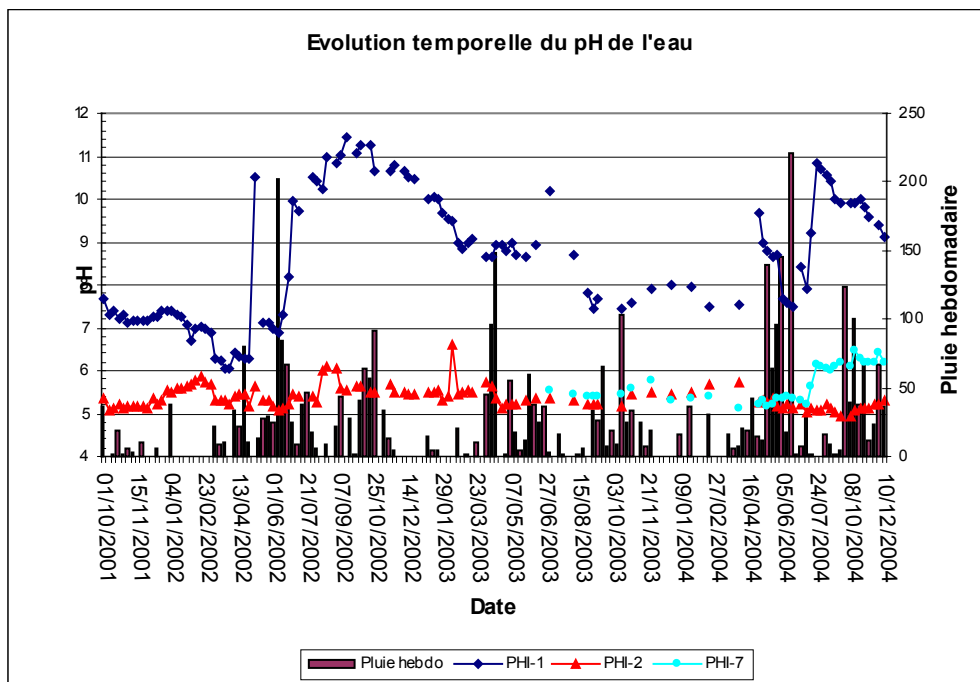


Fig.8 : Evolution temporelle du pH des eaux des puits suivis

4.3- Teneurs des eaux en éléments chimiques dissous et en germes bactériens

Les valeurs moyennes des résultats des analyses complètes d'échantillons d'eau sont présentées dans le tableau 2. De l'analyse de ce tableau, il ressort que globalement, les eaux du plateau sont moins minéralisées que celles de la plaine. La zone de basse terrasse entre le plateau et le lac affiche en fait des teneurs intermédiaires entre celles des eaux du plateau et de la plaine littorale proprement dite. Un examen plus approfondi de ces résultats fait ressortir ce qui suit:

a) Cations

En l'absence des ions (majeurs) sodium et potassium qui n'ont pas pu être dosés faute d'équipement adéquat (Spectrophotomètre d'absorption atomique ou photomètre à flamme), c'est l'ion calcium qui est dominant toute zone confondue, suivi de loin du magnésium. Les cations indicateurs de pollution organique (NH_4^+ , PO_4^{3+}) sont présents dans le même ordre de grandeur (0.043 à 0.48 mg/l) au niveau de tous les échantillons.

b) Anions

Mis à part l'anion nitrate révélateur comme les nitrites d'une pollution anthropique, ce sont les chlorures qui sont dominants parmi les anions suivis des bicarbonates, à l'exception de l'échantillon de la plaine littorale pour lequel c'est le bicarbonate qui domine suivi des chlorures. C'est le seul échantillon d'ailleurs qui renferme de l'ion carbonate, mais ce comportement n'est pas surprenant si on tient compte de son pH qui reste sensiblement et fréquemment élevé (compris entre 7 et 11.50) de même que de son alcalinité. C'est également le seul échantillon avec des teneurs hors norme OMS (≥ 50 mg/l) en nitrates et nitrites réunis. Sur le plateau, ces derniers éléments sont présents dans les eaux, mais avec des teneurs encore faibles. L'importance relative de l'épaisseur de la zone non saturée justifie aisément ce résultat. Ils sont en effet indicateurs de pollution organique, d'origine anthropique notamment.

Les concentrations des iodures et fluorures sont significatives mais pas alarmantes. Il en est de même pour les sulfates.

Tableau 2 : Valeurs moyennes des **paramètres** physico-chimiques indicateurs de pollution des eaux

Puits	N	pH(*)	Cond(*)	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅
				mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
PHI-1	9	8,62	563,31	46,14	2,38	80,87	0,63	0,10	0,27
PHI-2	9	5,36	371,29	47,71	2,00	26,07	0,05	0,24	0,26
PHI-3	9	4,88	84,99	18,07	2,97	9,07	0,04	0,12	0,48
PHI-4	9	4,78	69,67	19,48	1,59	5,71	0,02	0,04	0,24
PHI-5	9	4,71	76,52	20,97	2,01	3,74	0,02	0,09	0,35
PHI-6	3	4,56	207,81	56,83	7,93	0,83	0,05	0,55	0,09
PHI-7	3	5,69	408,95	88,48	2,00	27,86	0,14	0,04	0,01

(*) Valeurs des mesures in situ ; les autres proviennent des analyses au laboratoire
N = nombre d'analyses

Du point de vue de la composition bactériologique, la plupart des puits comportent des germes en quantité innombrable (Tableau 3.), ce qui n'est pas surprenant quant on sait qu'on a à faire à des point d'eau largement ouvert et pour lesquels les matériels d'exhaure sont loin d'être indemnes de contamination bactérienne.

Tableau 3 : Composition bactériologique des eaux des puits suivis

Date	Colif. Totaux Nbre/100 ml	Colif. Fécaux Nbre/100 ml	Strept. Fécaux Nbre/100 ml	PHI				
				Germes banals Nbre/ ml	Staphylocoques	Clostridium perfringens		
02/11/01	4	0	nd	nd	nd	nd	nd	
06/11/01	5	2	nd	nd	nd	nd	nd	
06/11/01	4	2	nd	nd	nd	nd	nd	
08/05/02	innombrables	innombrables	innombrables	10 colonies	nd	nd	nd	
20/11/02	0	130	innombrables	10 + champions	150	0	0	
15/01/03	innombrables	innombrables	innombrables	10 colonies	120	nd	nd	
Date	PHI 2				PHI 3			
Date	Colif. Totaux Nbre/100 ml	Colif. Fécaux Nbre/100 ml	Strept. Fécaux Nbre/100 ml	Germes banals Nbre/ ml	Colif. Totaux Nbre/100 ml	Colif. Fécaux Nbre/100 ml	Strept. Fécaux Nbre/100 ml	Germes banals Nbre/ ml
02/11/01	15	4	nd	nd	12	2	nd	nd
06/11/01	12	5	nd	nd	8	1	nd	nd
06/11/01	12	4	nd	nd	7	1	nd	nd
08/05/02	15	4	innombrables	Chp + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables
20/11/02	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables
15/01/03	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables
Date	PHI 4				PHI 5			
Date	Colif. Totaux Nbre/100 ml	Colif. Fécaux Nbre/100 ml	Strept. Fécaux Nbre/100 ml	Germes banals Nbre/ ml	Colif. Totaux Nbre/100 ml	Colif. Fécaux Nbre/100 ml	Strept. Fécaux Nbre/100 ml	Germes banals Nbre/ ml
02/11/01	2	0	nd		7	1	nd	nd
06/11/01	1	1	nd		6	1	nd	nd
06/11/01	1	1	nd		6	1	nd	nd
08/05/02	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables
20/11/02	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables
15/01/03	innombrables	innombrables	innombrables	Champions + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables
Date	PHI 6				PHI 7			
Date	Colif. Totaux Nbre/100 ml	Colif. Fécaux Nbre/100 ml	Strept. Fécaux Nbre/100 ml	Germes banals Nbre/ ml	Colif. Totaux Nbre/100 ml	Colif. Fécaux Nbre/100 ml	Strept. Fécaux Nbre/100 ml	Germes banals Nbre/ ml
09/10/03	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables
29/04/04	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables
22/09/04	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables	innombrables	innombrables	innombrables	Chp + colonies innombrables

Métaux lourds

Le site de Godomey connaît depuis quelques années une colonisation sans précédent avec des installations de petits ateliers de mécanique auxquelles s'est ajoutée la vente informelle de produits pétroliers. Au regard de cette situation et des faibles valeurs de pH enregistrées, la réunion d'évaluation à mi-parcours de mai 2004 a recommandé de doser les métaux lourds. Cette analyse qui a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre à absorption atomique de marque UNICAM par le laboratoire de l'Ecole Polytechnique Universitaire d'Abomey-Calavi (Bénin) a porté sur le Zinc, le Cadmium, le Plomb et le Mercure. Pour tous ces éléments, les concentrations sont encore nulles ou en dessous des limites détectables par les équipements et les méthodes utilisés (0,0001 mg/L) exceptées pour le cadmium dont les concentrations dosées sont comprises entre 0,003 mg/L (PHI 4) et 0,027 mg/L (PHI 7). En ce qui concerne le PHI 2 et le PHI 3, les valeurs restent nulles ou non détectables pour ce métal. On en déduit que même si la pollution en ces éléments a affecté le secteur, elle n'a pas encore atteint le seuil de détectabilité ou n'a pas encore traversé la zone non saturée pour atteindre la nappe phréatique.

Tableau 4 : Résultats des analyses des métaux lourds

Echantillons	Teneurs en métaux lourds (mg/L)			
	Zinc (Zn)	Cadmium (Cd)	Plomb (Pb)	Mercure (Hg)
PHI1	< 0,0001	0,010	< 0,0001	< 0,0001
PHI2	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
PHI3	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
PHI4	< 0,0001	0,003	< 0,0001	< 0,0001
PHI5	< 0,0001	0,008	< 0,0001	< 0,0001
PHI6	< 0,0001	0,014	< 0,0001	< 0,0001
PHI7	< 0,0001	0,027	< 0,0001	< 0,0001

Limite de détection (LD) : 0,0001 mg/L

4.4- Vulnérabilité et pollution des aquifères

La détermination dans le temps et dans l'espace des niveaux statiques, donc de l'épaisseur de la zone non saturée de l'aquifère superficiel du site de Godomey a constitué une étape importante pour la caractérisation de sa vulnérabilité. D'autres facteurs comme la pente, l'occupation du sol, la nature géologique du sol du sous-sol etc., ont été également pris en compte dans cette caractérisation. La pondération et l'intégration de cet ensemble de facteurs suivant la « méthode drastique » a permis de dresser une carte de risque ou de potentiel de pollution du site (Fig.9) selon quatre classes de vulnérabilité: forte, moyenne, faible et très faible.

Nouvelle Carte suivra avec les commentaires appropriés

Fig.9 : Carte de vulnérabilité du secteur de Godomey et ses environs

4.5- Evolution des ressources en eaux souterraines exploitées

Les schémas synthétiques des figures 10 et 11 résument l'évolution spatiale et temporelle des ressources en eaux souterraines sur le site de Godomey. Du démarrage de l'exploitation du site en 1956 jusqu'en 1970 au moins, aucun signe de pollution n'a été observé dans le périmètre de captage. Les premiers signes de pollution ont été relevés au début de la décennie 1990-2000. Deux sources de pollution menacent et/ou affectent déjà le champ de captage, celle liée à la colonisation du site d'une part et celle liée aux pompages intensifs d'autre part. La première induit une pollution chimique organique et bactériologique, la seconde est à l'origine d'une pollution saline chlorurée (intrusion saline).

Les deux types de pollution ne cessent de croître, parallèlement à l'extension et à la densification de l'occupation du sol ainsi qu'à l'intensification des pompages. L'intérêt de ce travail réside justement dans la contribution qu'il peut apporter à l'optimisation des prélèvements et à la réglementation de l'occupation du sol en vue d'une pérennisation des ressources en eaux souterraines exploitables disponibles sur le plateau d'Allada en général et sur le site de Godomey en particulier.

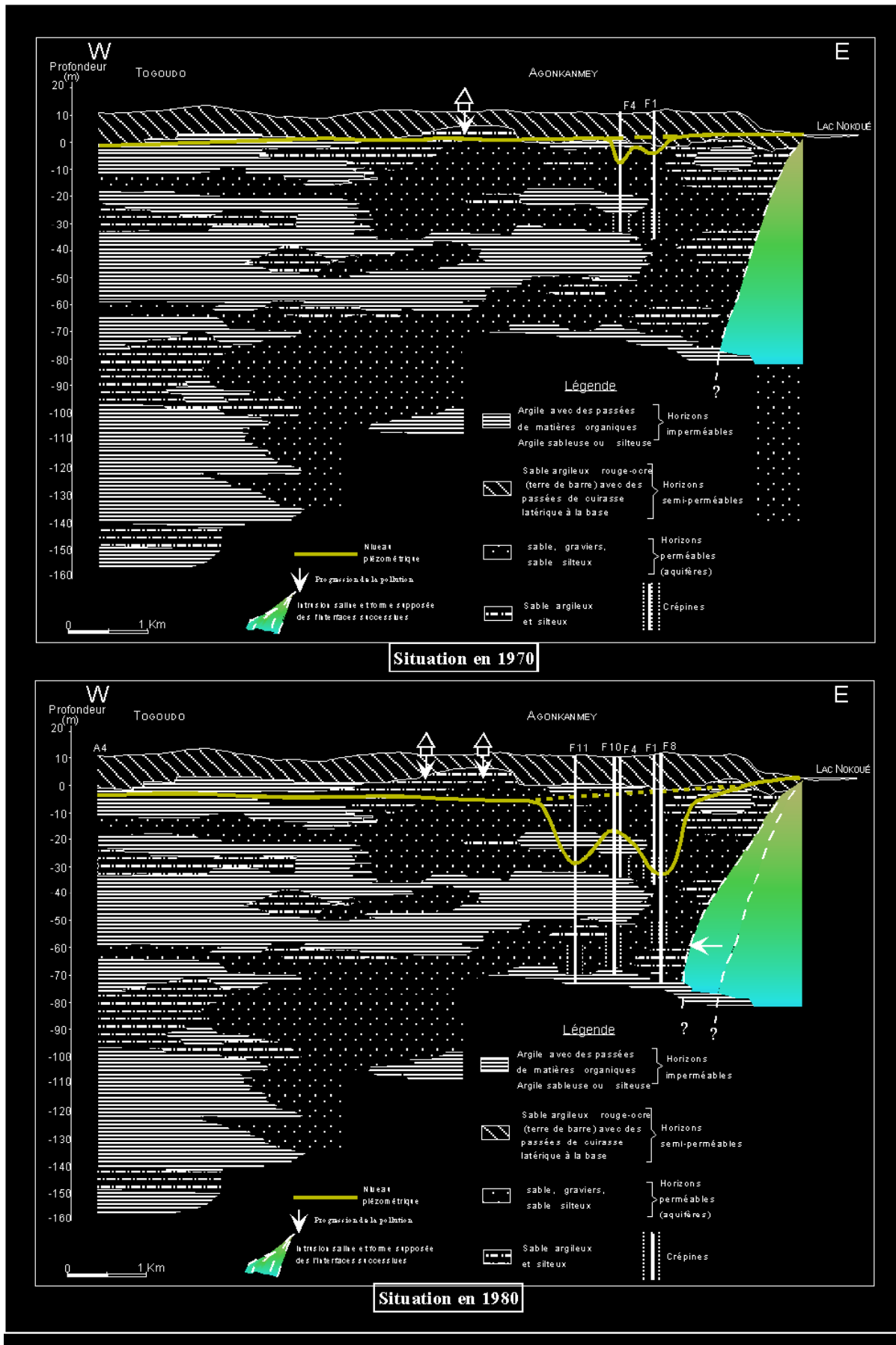
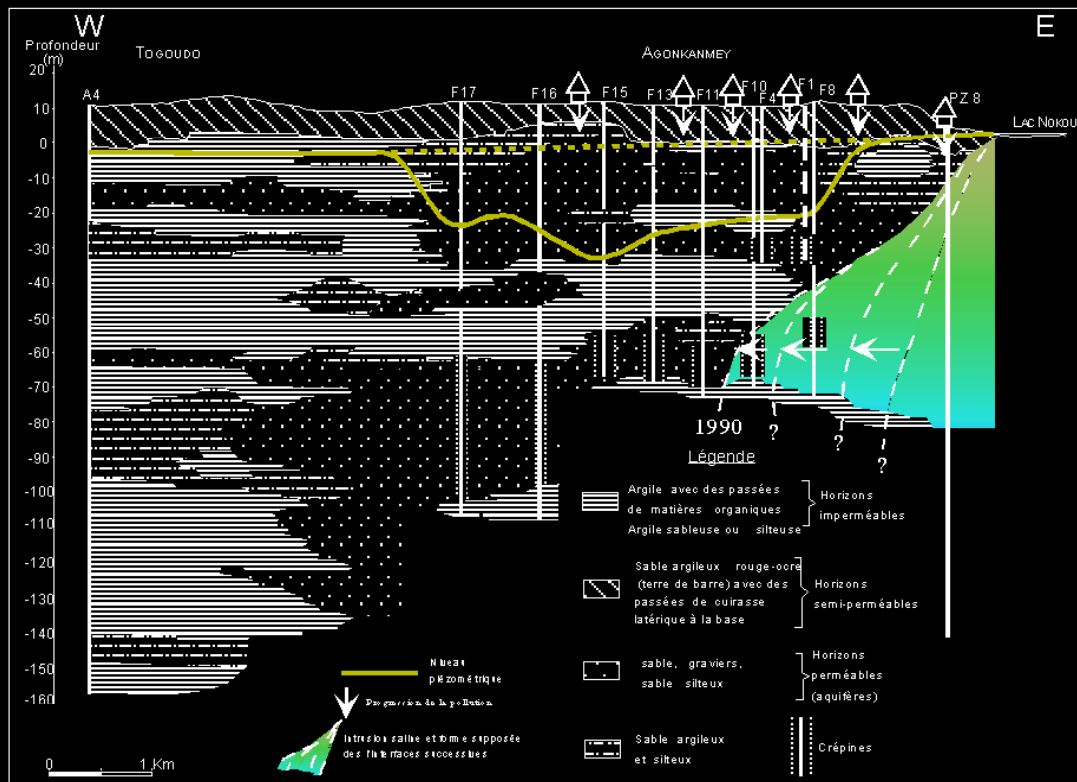
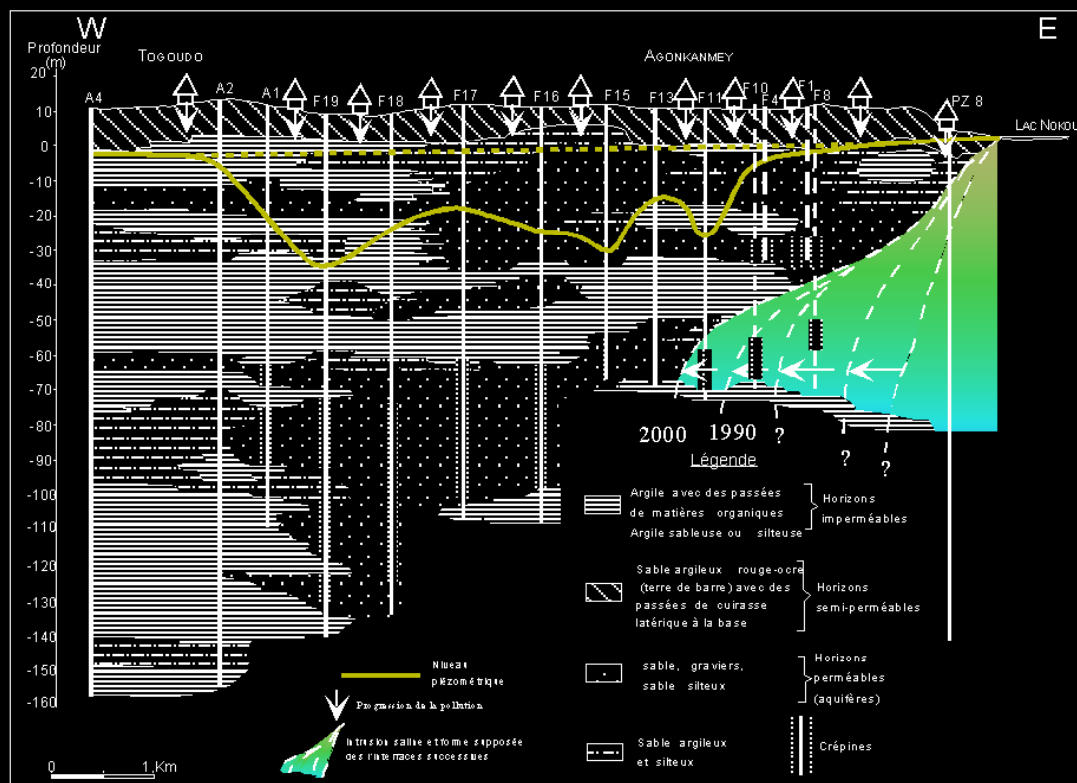


Fig.10- Evolution spatiale et temporelle des captages, de l'intrusion saline et de l'occupation du sol sur le site de Godomey selon une coupe E-W (Situations de 1970 et 1980)



Situation en 1990



Situation en 2000

Fig.11 Evolution spatiale et temporelle des captages, de l'intrusion saline et de l'occupation du sol sur le site de Godomey selon une coupe E-W (Situations de 1990 et 2000)

4.6- Bulletin d'alerte

La production de bulletin d'alerte fait partie des obligations de notre étude. Mais à voir le faible niveau de notre zone d'étude et leur relation avec la variation de la pluviométrie, il serait préférable d'établir des bulletins annuels ou semestriels afin de mieux rendre compte du phénomène pernicieux de la pollution qui se développe sur le champ de captage de Godomey.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Depuis l'année 2003 à ce jour, il n'a pas été noté de modifications spectaculaires dans le comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe phréatique des environs de Godomey. On note toutefois, un relèvement général des niveaux piézométriques. Ce relèvement amorcé depuis 2002 et consécutif à un étiage 2001 et 2002 très sévère se poursuivra certainement avec l'excédent pluviométrique de 1591 mm enregistré en 2004. Après les fluctuations de conductivité très prononcées de mars-avril 2002 (PHI 3, PHI 4 et PHI 5) et les perturbations de juin 2002 à mars 2003 (PHI 1), tout semble être revenu à la normale sur le plan hydrochimique. Tout au plus remarque-t-on une tendance générale à la hausse des conductivités malgré l'augmentation de la recharge. Serait-elle une répercussion de l'intrusion saline déjà perceptible au niveau du champ captant de Godomey? Seuls les résultats du suivi des années ultérieures peuvent nous apporter des éléments pour une meilleure appréciation et explication de cette évolution.

C'est donc dire qu'il est souhaitable pour l'équipe du Bénin que ce travail se poursuive pour une continuation du suivi de l'évolution quantitative et qualitative des ressources en eaux du secteur de Godomey. Il y va de l'exploitation durable de ces ressources qui sont garantes de la bonne santé de plus d'un millions de Béninois, c'est-à-dire le 1/6^{ème} de la population totale du pays.

C'est au vu de l'importance de ce problème et dans le souci d'atteindre les objectifs du millénaire que la Direction Générale de l'Hydraulique (DGH), en collaboration avec l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) et DHI (Danish Hydraulic Institute du Danemark) ont réalisé un projet de modélisation du système aquifère du Continental Terminal du plateau d'Allada (incluant la nappe de Godomey), en vue d'un meilleur suivi de son fonctionnement et de son exploitation. Compte tenu des résultats obtenus, l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (AIEA) a accepté de financer des investigations isotopiques qui compléteront les données issues de la modélisation afin de mieux comprendre le fonctionnement du système aquifère exploité à Godomey.

Et comme ce système aquifère s'intègre dans un vaste bassin hydrogéologique que se partagent le Ghana, le Togo et le Nigeria notamment, il serait encore plus indiqué de concevoir pour les phases à venir, une approche intégrée dans la conception et la mise en œuvre des projets en l'occurrence celui

intitulé : Gestion conjointe des Ressources Aquifères partagés à la zone côtière Ouest-Africaine
soumis au financement de GEF (Global Environment Facility).

REFERENCES

- Boukari M., Alidou S., Oyédé L. M., Gaye C. B. et Maliki R., 1995-** *Identification des aquifères de la zone littorale du Bénin (Afrique de l'Ouest) : hydrodynamique, hydrochimie et problèmes d'alimentation en eau de la ville de Cotonou.* African Geoscience Review, Paris France. Vol.2, 1, 139-157.
- Boukari M., Gaye C. B. Faye A. et Faye S., 1996-** *The impact of urban development on coastal aquifers near Cotonou, Bénin.* Journal of African Earth Sciences special issue, volume 22, issue 4.
- Boukari M., 1998-** *Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources.* Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Univ. C.A. Diop, Dakar Sénégal
- Boukari M., 2002-** *Réactualisation des connaissances hydrogéologiques relatives au bassin sédimentaire côtier du Bénin.* Rap. DH. Appui à la Gestion des Ressources en Eau (AGRE). Cotonou Bénin
- BRGM, 1978-** *Carte géologique au 1/200 000 du Bénin et du Togo entre les 9ème et le 10ème parallèle.* OBEMINES. Cotonou, Bénin.
- Direction de l'Hydraulique (DH), 1998-** *Actes du séminaire d'internationalisation des conclusions de l'étude de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin.* Cotonou, Bénin
- Direction de l'Hydraulique, 2000-** *Vision Eau 2025 Bénin.* Cotonou Bénin
- Direction de la Météorologie, 1990-** *Bref aperçu sur le climat du Bénin.*
- Géohydraulique, 1985-** *Note explicative de la carte hydrogéologique à 1/200 000 du bassin sédimentaire côtier du Bénin.* MET. DH. FED 23 p + 1 carte hors texte.
- GIP-GKW-GRAS ou GIGG, 1983-** *Plan Directeur Alimentation en eau potable ville de Cotonou. Les ressources en eau. Ministère de l'Industrie des Mines et de l'Energie -SBEE. 2 Vol.*
- Global Water Partnership (GWP), 2000-** *L'eau pour le 21ème siècle : de la vision à l'action pour l'Afrique de l'Ouest.* la Hayes, Pays-Bas
- Gnaha E. F. C. & Adjadji Ch. A., 2001-** *Evolution quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines captées dans le périmètre de pompage intensif de Godomey: impact sur l'approvisionnement en eau potable de l'agglomération de Cotonou.* Mém. de Maîtrise de Geol. Appl. Univ. Abomey-Calavi, Bénin.
- IGIP-GKW-GRAS ou GIGG, 1989-** *Plans Directeurs et Etudes d'Ingénierie pour l'alimentation en eau potable et l'évacuation des eaux pluviales, des eaux usées et déchets solides. Ville de Cotonou.* 90 p. SBEE. Cotonou. Bénin.

- INSAE, 1994-** *Deuxième recensement général de la population et de l'habitation*. février 1992. Projections démographiques 1992-2027.
- Intituto Recherche Breda ou IRB, 1987-** *Etude de cartographie géologique et prospection minière de reconnaissance au Sud du 9ème parallèle*. Rap. FED-OBEMINES. 80 p. + Annexes.
- Le Barbe L., Ale G. , Millet B., Borel Y., Gualde R., 1993,** *Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin*. Orstom éditions, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, Paris, Direction de l'Hydraulique du Bénin, Cotonou.
- Maliki R., 1993-** *Etude hydrogéologique du littoral béninois dans la région de Cotonou (A.O.)*. Thèse de Doctorat du 3ème cycle. Version provisoire. UCAD ; Dakar, Sénégal. 162 p. + Annexes.
- MECCAG- PDPE, 2000-** *La population au Bénin: évolution et impact sur le Développement, Policy Project/USAID*. Ministère d'Etat Chargé de la Coordination de l'Action Gouvernementale, du Plan, du Développement et de la Promotion de l'Emploi. Cotonou, Bénin.
- MECCAG- PDPE, 2000-** *Etudes nationales de perspectives à long terme NLTPS-Bénin 2025 :*
- Ministère de l'Energie, des Mines et de l'Hydraulique-** *Règlement général de la distribution d'eau urbaine*.
- Ministère du Plan/Direction du Plan et de la Prospective-** *Commission Nationale des Sciences Humaines et de la Population*. 2 mai 1996.- Déclaration de Politique de Population de la République du Bénin.
- Nations Unies-** *Plan directeur des ressources en eau. Conclusions et recommandations du projet DP/UN/BEN- 83-009/1*.
- Nations Unies-** *Assistance à la Direction de l'Hydraulique pour la préparation d'un Plan Directeur des ressources en eau. Conclusions et recommandations du projet DP/UN/BEN-84-004/1*.
- Nissaku Co. LTD, 1994.-** *Projet pour l'exploitation des eaux souterraines du Bénin, phase III*. Rapport final. 204 p. + photos + 3 vol. annexes.
- Pallas P., 1988-** *Contribution à l'étude des ressources en eau souterraines du Bassin côtier du Bénin. Confrontation ressources-besoins*. 29 p. + annexes A, B, C, et D. Ministère de l'Equipement et des Transports -PNUD.
- PNUD, 1987-** *Plan directeur d'utilisation des ressources en eau du Bénin*. Projet UN/OICO BEN 85/004. DH. Cotonou. Bénin.
- PNUD-Banque Mondiale-Groupe Régional de l'Eau et de l'Assainissement Afrique de l'Ouest, Janvier 1994-** *Développement du secteur de l'assainissement*. Document de politique nationale (version provisoire).
- P.N.U.D.- Fonds pour l'Environnement Mondial-ONUDI-** *Projet de lutte contre la pollution de l'eau et conservation de la diversité biologique dans le grand écosystème marin du golfe de Guinée*.

- SEREAU/BURGEAP, 1987-** *Expérimentation sur l'assainissement à Cotonou: potentialités d'infiltration dans le sol.* Rapport de synthèse. 16 p. + annexes. Cotonou. Bénin.
- SERVICE MÉTÉOROLOGIQUE NATIONAL, Octobre 1990-** *Cartes de normales pluviométriques du Bénin.* Cotonou.
- Slansky M., 1959-** *Contribution à l'étude géologique du Bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo.* Thèse. Univ. Nancy, série 59, n° 165 et 1962, Mém. BRGM n° 11, 170 p.
- Société Béninoise d'Electricité et d'Eau (SBEE), 2002-** *Plan Directeur AEP en milieu urbain au Bénin.* Cotonou, Bénin.
- Société Générale pour l'Industrie ou (S.G.I.), 1981-** *Etude de la nappe aquifère de Godomey.* Banque Africaine de Développement -SBEE. Cotonou
- Société Générale pour l'Industrie ou (S.G.I.), 1983-** *Etude de la nappe aquifère de Godomey.* Rapport complémentaire sur les piézomètres. Banque Africaine de Développement, Abidjan, Côte d'Ivoire. SBEE. Cotonou. Genève, Suisse.
- SOGREAH/SCET Tunisie, 1997-** Rapport sur "*Etude de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin: assistance à la définition de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin*". 7 vol. DH. Cotonou, Bénin.
- Turkpak International-SCET-Tunisie, 1991-** *Inventaire des ressources en eaux souterraines au Bénin.* Rapport final. V.1 284 p.+ annexes.