

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES
(CIEH)

DOCUMENT-GUIDE
POUR LA CONCEPTION ET L'INSTALLATION
DE SYSTEMES D'OBSERVATION
DES EAUX SOUTERRAINES
DANS LES PAYS MEMBRES DU CIEH



BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES

212.1-88DO-690

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES
(C.I.E.H.)
BP 369 OUAGADOUGOU BURKINA FASO

**DOCUMENT - GUIDE
POUR LA CONCEPTION ET L'INSTALLATION
DE SYSTEMES D'OBSERVATION
DES EAUX SOUTERRAINES
DANS LES PAYS MEMBRES DU CIEH**

**Financement
Fonds d'aide et de Coopération
de la République Française**

**88 AFO 228 3E
Décembre 1988**

BRGM
BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
BP 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 02 - FRANCE

LIBRARY, WATER AND POWER SUPPLY
C.I.E.H. (C.I.E.H.)
BP 369, OUAGADOUGOU, BURKINA FASO
Tel. (070) 21 141/142 ext. 141/142
RN: ISN 6790
LO: 212.1 88 DO

A V A N T P R O P O S

Par la Convention d'Etudes FAC 90/C/DAG/87-160 en date du 13 février 1988, le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) a confié au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) "l'élaboration d'un document guide sur les principes généraux de mise en place et suivi d'un réseau piézométrique national".

Le contenu à donner à cette étude a été défini au cours de réunions de concertation CIEH/BRGM, tenues à Ouagadougou du 7 au 9 juillet 1988.

Parallèlement à l'élaboration de ce document, il a paru intéressant de faire le point sur la situation actuelle des réseaux piézométriques des pays membres du CIEH. Le résultat des enquêtes menées auprès des Directions en charge de l'Hydraulique est présenté dans l'annexe 1.

La présente étude est financée par le Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française.

R E S U M E

1 - NECESSITE DES SYSTEMES D'OBSERVATION DES EAUX SOUTERRAINES

Dans les vingt prochaines années, les pays membres du CIEH verront le chiffre de leur population multiplié par 1,8. Cette croissance démographique s'accompagnera d'une migration des populations rurales vers les petites villes et les capitales. Le taux d'urbanisation qui est aujourd'hui de 41 % atteindra 63 % en l'an 2010. Augmentation de la population et amélioration du niveau de vie auront pour effet de multiplier par 4 les volumes d'eau à usage domestique. Comme aujourd'hui, la majeure partie de l'eau potable sera prélevée sur les ressources en eau souterraine.

L'agriculture irriguée est actuellement une activité marginale dans les pays du CIEH. Les cultures pluviales extensives à faible rendement et soumises aux aléas climatiques ne peuvent plus satisfaire la demande en produits vivriers de première nécessité. Le développement de l'irrigation paraît inévitable ; on note aujourd'hui une volonté politique des Etats de la zone soudano-sahélienne de mettre en oeuvre les moyens nécessaires au démarrage de petits périmètres alimentés à partir des eaux souterraines.

La faisabilité des projets d'alimentation en eau potable et d'irrigation suppose que l'on soit capable d'évaluer les ressources en eau disponibles et les conditions de leur exploitation. A cet effet, la plupart des pays membres du CIEH vont mettre en place des systèmes d'observation des eaux souterraines ou rationaliser les réseaux existants.

2 - CONCEPTION DES SYSTEMES D'OBSERVATION

Suivant leur finalité, on distingue 2 types de systèmes d'observation des eaux souterraines : les systèmes primaires conçus pour l'évaluation, le suivi et la gestion des ressources et les systèmes secondaires mis en place pour le suivi localisé des perturbations provoquées dans un aquifère par sa mise en exploitation ou par les modifications apportées aux conditions naturelles d'écoulement et d'alimentation (barrage, irrigation, urbanisation...).

2.1. - Les systèmes primaires

L'implantation des systèmes primaires ne doit pas être guidée par le souci de "couvrir le pays" mais par l'identification préalable des aquifères sur lesquels on prévoit une augmentation sensible de l'exploitation par rapport aux ressources présumées. Cela revient à replacer les distributions géographiques de densités de population dans les différents contextes hydrogéologiques et climatiques. Cette démarche appliquée aux pays membres du CIEH aboutit à limiter la mise en place des systèmes primaires aux bassins sédimentaires côtiers, aux nappes alluviales lorsqu'un développement de l'irrigation est prévisible et aux régions de socle en zone soudano-sahélienne.

L'évaluation des ressources exploitables est effectuée au moyen de modèles mathématiques de nappe. On demande au système primaire de fournir aux modèles les données variables dans le temps : niveaux piézométriques, flux entrants et sortants. Le poids de ces différents paramètres sur la fiabilité de l'estimation des ressources varie suivant le type d'aquifère. Dans les aquifères continus étendus captifs (grands bassins sédimentaires) où l'importance des réserves permet d'envisager une exploitation minière (épuisement) la priorité est donnée au suivi de la baisse des niveaux dans les régions de la nappe non influencées par les prélèvements et au contrôle du débit des exutoires naturels. Dans les nappes alluviales, le système d'observation mis en place doit permettre d'étudier les relations nappe/rivière et de connaître le régime hydrologique, en particulier la probabilité d'occurrence des crues des cours d'eau temporaires en zones désertique et sahélienne. Les régions de socle, par le caractère discontinu et les faibles capacités d'emmagasinement de leurs aquifères voient leurs ressources limitées à la recharge annuelle par les pluies. Les systèmes primaires doivent fournir, pour les différents contextes hydrogéologiques et climatiques représentés dans le pays, les données nécessaires au calcul de la recharge au moyen d'un modèle global (piézométrie, évapotranspiration potentielle).

Quelque soit le type d'aquifère, l'implantation du réseau piézométrique doit permettre d'obtenir une représentation satisfaisante des variations de niveau de la nappe, à partir d'un nombre minimum de piézomètres. A cet effet, on délimite les domaines dans lesquels les facteurs qui régissent l'écoulement sont supposés identiques. Il suffit alors d'un seul piézomètre pour rendre compte de l'évolution des niveaux sur toute l'étendue de la zone considérée comme homogène.

2.2. - Les systèmes secondaires

Dans le cas des champs de captage, l'objectif des systèmes secondaires est de guider le Maître d'Ouvrage dans la conduite de l'exploitation et de lui permettre de prévoir les moyens à mettre en oeuvre pour suivre l'évolution de la demande.

Les différents scénarios de développement d'un champ de captage sont élaborés au moyen d'un sous modèle intégré au modèle général de la nappe. Les données nécessaires à l'élaboration du sous modèle sont fournies par le système d'observation secondaire : niveaux piézométriques dans les ouvrages exploités et dans la zone influencée par les captages, volumes exhaurés. Lorsqu'il existe un risque de contamination de l'aquifère exploité (invasion marine des aquifères côtiers), le réseau secondaire est renforcé par un dispositif d'alerte constitué par des piézomètres installés entre la source de pollution et le champ de captage ; des mesures de conductivité in situ y sont effectuées périodiquement.

3 - INSTALLATION ET SUIVI DES SYSTEMES D'OBSERVATION

Pour réduire le coût du réseau, il est tentant d'utiliser les points d'eau existants : forages ou puits exploités, forages insuffisamment productifs abandonnés. Ces ouvrages ne permettent en général pas de reconstituer, avec une précision suffisante, les variations piézométriques naturelles représentatives de l'ensemble de la zone homogène. Il est donc nécessaire de réaliser des forages spécialement réservés à l'observation piézométrique.

Le matériel de mesure sera choisi en fonction de la fréquence d'acquisition des données et de l'éloignement des sites d'observation. Pour les mesures fréquentes ou éloignées on utilisera les systèmes à stockage sur mémoire électronique (2 visites par an). La télétransmission des données par satellites, déjà bien utilisée dans certains pays membres du CIEH pour l'annonce des crues et le traitement des rivières infestées par l'onchocercose ne semble pas, pour les systèmes d'observation des eaux souterraines, apporter d'avantages décisifs par rapport au stockage sur mémoire.

L'installation et le suivi des systèmes d'observation primaires sont du ressort de l'Administration. Le financement et l'exploitation des systèmes secondaires sont assurés par le Maître d'Ouvrage.

Toutes les données issues des réseaux primaire et secondaire doivent être collectées par un Service ayant autorité sur la gestion des eaux à l'échelon national. Les mesures sont stockées dans une base de données centrale soit par transfert direct à l'aide de programmes spécifiques (mémoires), soit par saisie au clavier (relevés manuels). Des logiciels de traitement permettent une présentation ordonnée des mesures sous forme de tableaux et graphiques. La diffusion des données auprès des utilisateurs est assurée à la demande par interrogation directe et par la publication d'annuaires. Il serait souhaitable que les annuaires publiés par les différents pays membres du CIEH servent de base à l'élaboration de synthèses régionales annuelles ou pluriannuelles ; ce travail devrait être confié au CIEH.

4 - APPLICATION : CONCEPTION D'UN SYSTEME D'OBSERVATION DES EAUX SOUTERRAINES AU BURKINA FASO

A titre d'exemple, on a défini les grandes lignes de ce que pourrait être le système d'observation à mettre en place au Burkina Faso, pays où l'existence d'une population dense vivant dans des régions de socle à ressources en eau limitées va poser aux responsables de la gestion des eaux des problèmes particulièrement difficiles.

L'analyse des différents facteurs à prendre en compte pour l'installation du réseau (zone climatique, contexte hydrogéologique, localisation de la demande) conduit à sélectionner 18 ensembles jugés représentatifs d'une portion du territoire suffisamment étendue. A l'intérieur de chacun de ces ensembles est choisi un site d'observation équipé de 2 ou 3 piézomètres et d'une station de mesures climatiques. Ce réseau est complété par 2 stations de jaugeage sur les exutoires naturels du bassin gréseux (sources de Bobo-Dioulasso et Volta noire).

L'utilisation des piézomètres existants et l'emploi d'appareils de mesure à stockage sur mémoire électronique permet de réduire le coût annuel du réseau à 14,7 MFCFA.

S O M M A I R E

1 - INTRODUCTION.....	1
2 - CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE - LOCALISATION ET EVOLUTION DE LA DEMANDE.....	2
2.1. - LES DIFFERENTS TYPES D'AQUIFERES.....	2
2.2. - LES ZONES CLIMATIQUES.....	6
2.3. - LOCALISATION ET EVOLUTION DE LA DEMANDE.....	8
2.4. - CONCLUSIONS.....	10
3 - CONCEPTION DES SYSTEMES D'OBSERVATION.....	11
3.1. - CONCEPTION DES SYSTEMES PRIMAIRES.....	12
3.1.1. - Cas des aquifères continus étendus.....	12
3.1.2. - Cas des aquifères continus peu étendus.....	15
3.1.3. - Cas des aquifères discontinus.....	17
3.2. - CONCEPTION DES SYSTEMES SECONDAIRES.....	19
3.2.1. - Cas des champs de captage.....	19
3.2.2. - Autres cas.....	20
4 - INSTALLATION ET SUIVI DES SYSTEMES D'OBSERVATION.....	21
4.1. - LES PIEZOMETRES.....	21
4.2. - FREQUENCE DES MESURES.....	22
4.3. - MATERIEL DE MESURE.....	23
4.3.1. - Mesures de niveaux.....	23
4.3.2. - Mesures climatologiques.....	24
4.3.3. - Mesures de débits et des volumes exhaurés.....	24
4.3.4. - Mesures de conductivité.....	24
4.4. - SUIVI DES RESEAUX.....	25
4.4.1. - Suivi des réseaux primaires.....	25
4.4.2. - Suivi des réseaux secondaires.....	25
4.4.3. - Télétransmission des données.....	25
4.5. - STOCKAGE ET DIFFUSION DES DONNEES.....	27

.../...

5 - ELEMENTS POUR LE CALCUL DU COUT D'INSTALLATION ET DE SUIVI	
DES SYSTEMES D'OBSERVATION.....	28
6 - APPLICATION : CONCEPTION D'UN SYSTEME D'OBSERVATION DES EAUX	
EAUX SOUTERRAINES AU BURKINA FASO.....	28
6.1. - CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HUMAIN.....	28
6.1.1. - Hydrogéologie.....	28
6.1.2. - Climatologie.....	33
6.1.3. - Population.....	33
6.2. - EVOLUTION ET LOCALISATION DE L'EXPLOITATION DES	
RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE.....	35
6.3. - LE SYSTEME D'OBSERVATION PRIMAIRE.....	36
6.3.1. - Délimitation des zones homogènes.....	36
6.3.2. - Choix des sites.....	36
6.3.3. - Matériel de mesure.....	39
6.3.4. - Réseau d'observation hydrologique.....	39
6.4. - LE SYSTEME D'OBSERVATION SECONDAIRE.....	39
6.5. - ESTIMATION DU COUT DU SYSTEME D'OBSERVATION DES EAUX	
SOUTERRAINES.....	40
SELECTION DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	43
ANNEXE 1 : Etat actuel des réseaux piézométriques des pays	
membres du CIEH.....	45
ANNEXE 2 : Notes techniques.....	60
ANNEXE 3 : Matériels de mesures, de télétransmission et	
traitement des données.....	75

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Contexte hydrogéologique et climatologique

Carte 2 : Délimitation des régions dans lesquelles un accroissement des prélèvements en eau souterraine est prévisible

Carte 3 : Système d'observation des eaux souterraines

Carte 4 : Les zones climatologiques

Carte 5 : Densité de population

1 - INTRODUCTION

La nécessité d'évaluer et gérer les ressources en eau souterraine est apparue dans les pays sahéliens de l'Afrique de l'Ouest à la fin des années 50 lorsqu'il a fallu répondre à l'accroissement de la demande en eau potable des grands centres urbains. A Dakar, des réseaux d'observation des niveaux piézométriques et de la salinité de la nappe des sables de Thiaroye puis de la nappe des calcaires paléocènes de Sebikotane sont mis en place à partir de 1958. Le suivi des fluctuations piézométriques et de l'évolution de la salinité permet de fixer, à la fin de la saison des pluies, les volumes à prélever l'année suivante. En Mauritanie, des systèmes d'observation sont installés sur les champs de captage d'Idini et Boulanouar en 1962, les données recueillies permettent de proposer des solutions aux problèmes de l'évolution de la demande en eau potable de Nouakchott et Nouadhibou.

Plus récemment, une succession d'années à pluviométrie déficitaire a mis en évidence, de façon dramatique, la précarité de l'approvisionnement en eau des populations rurales et de leur bétail, à partir des points d'eau traditionnels. Les Gouvernements des Etats situés dans la zone climatique soudano-sahélienne ont réalisé, avec l'appui de l'aide internationale, plusieurs dizaines de milliers de forages pour l'alimentation en eau potable des villages. Ces programmes d'hydraulique villageoise ont pu être réalisés sans connaissance préalable de la ressource en eau car les prélèvements ponctuels effectués au moyen de pompe à main, sont limités (10 m³/j) et très dispersés. Par contre, le développement prévisible de l'alimentation en eau potable des villes et de l'agriculture irriguée à partir de l'eau souterraine, nécessitera des prélèvements plus importants et plus concentrés ; il faudra alors être en mesure d'évaluer la ressource disponible et les contraintes de son exploitation.

Pour obtenir les données nécessaires à la quantification de la ressource à l'échelle du pays, la plupart des Etats membres du CIEH ont décidé de mettre en place des systèmes d'observation des eaux souterraines ou d'étendre les réseaux existants. Au vu des résultats de l'enquête effectuée auprès des Directions chargées de l'hydraulique, il apparaît que les responsables éprouvent des difficultés à identifier les objectifs pratiques prioritaires et à définir les moyens à mettre en oeuvre compatibles avec les ressources financières disponibles.

Préalablement à l'installation des réseaux d'observation trois questions doivent être posées ; quels sont les problèmes relatifs à la gestion des ressources en eau qui vont se poser dans les vingt années à venir ? Quelles sont les données nécessaires et suffisantes à la résolution de ces problèmes ? Comment obtenir ces données au moindre coût ?

L'objet du présent document est de fournir des éléments de réponse à ces questions pour les différents contextes hydrogéologiques, climatiques et humains dans lesquels sont placés les pays membres du CIEH.

2 - CONTEXTE HYDROCLIMATIQUE - LOCALISATION ET EVOLUTION DE LA DEMANDE

Les systèmes d'observation des eaux souterraines doivent être adaptés au type d'aquifère étudié, à l'environnement climatologique, à la localisation et l'évolution de la demande qui sont directement liées à la densité de population. Ces données de base sont représentées, pour les 13 pays membres du CIEH, sur les cartes 1 et 2 ci-après.

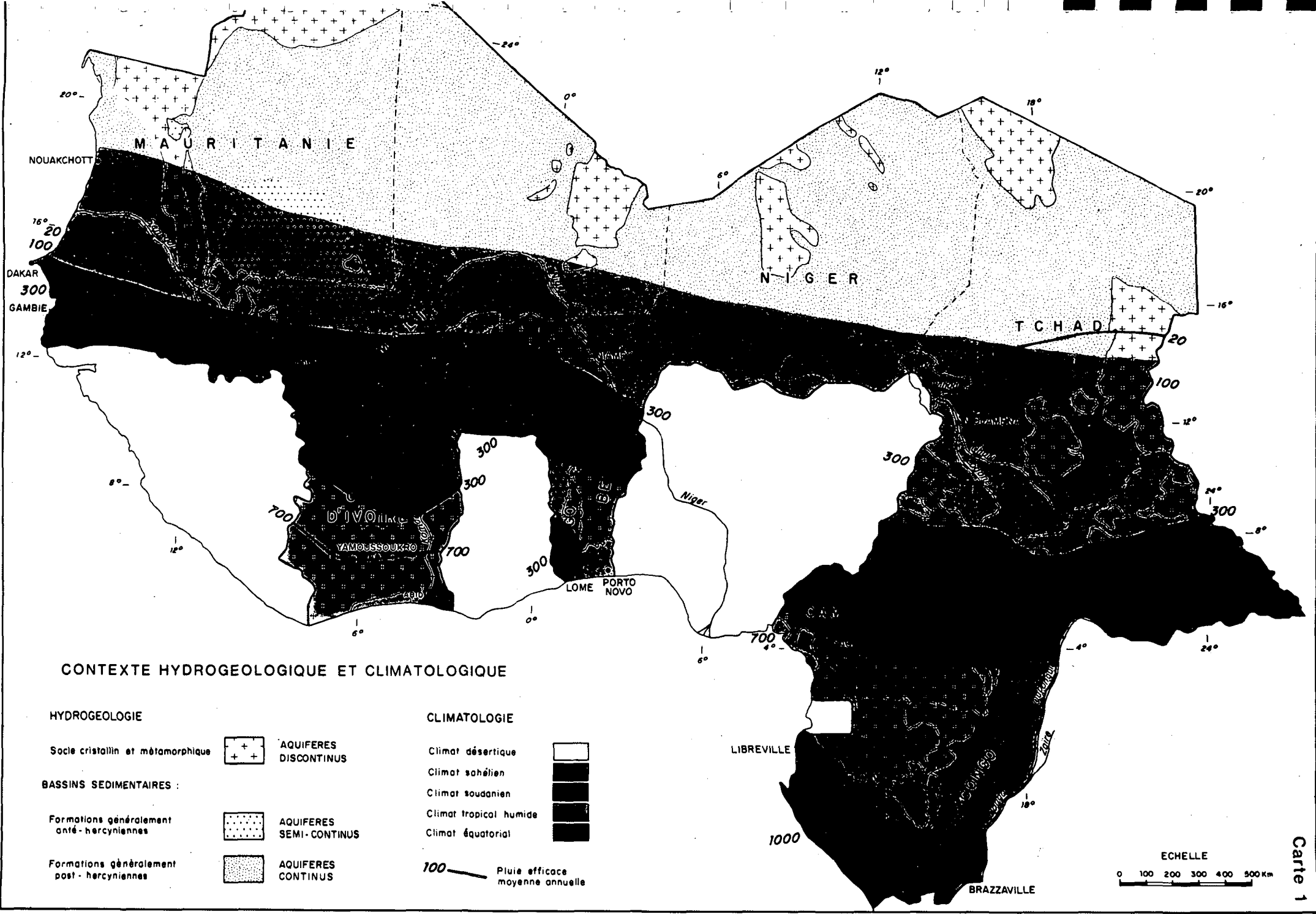
2.1 - LES DIFFERENTS TYPES D'AQUIFERES

On classe habituellement les formations aquifères en 3 groupes différenciés par la structure de la roche réservoir.

- Les aquifères discontinus

Ce sont les aquifères constitués par les réseaux de fractures ouvertes d'origine tectonique qui se développent dans les formations compactes à porosité intersticielle négligeable. Les aquifères discontinus sont caractérisés par une faible productivité ponctuelle (le débit des forages productifs n'exède pas quelques m³/h) et une porosité efficace régionale très réduite, comprise entre 10⁻³ et 10⁻⁵.

Ce type d'aquifère est représenté par les formations éruptives ou volcanosédimentaires du socle précambrien. Le socle est en général recouvert de produits d'altération meubles à prédominance argileuse. En zones soudanienne, tropicale humide et équatoriale ces altérations sont le plus souvent épaisses et saturées ; elles constituent alors un aquifère peu perméable mais fortement



CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET CLIMATOLOGIQUE

HYDROGEOLOGIE

Socle cristallin et métamorphique



AQUIFERES DISCONTINUS

BASSINS SEDIMENTAIRES :

Formations généralement anté-hercyniennes



AQUIFERES SEMI-CONTINUS

Formations généralement post-hercyniennes



AQUIFERES CONTINUS

CLIMATOLOGIE

Climat désertique



Climat sahélien



Climat soudanien



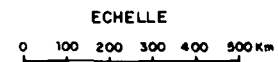
Climat tropical humide



Climat équatorial



100 — Pluie efficace moyenne annuelle



capacitif. Dans ces régions, les aquifères de socle peuvent être représentés schématiquement par deux réservoirs communiquants superposés : un réservoir supérieur qui assure par sa forte porosité la fonction stockage et un réservoir inférieur transmissif. C'est par l'intermédiaire du réseau de fractures qu'il est possible de mobiliser les ressources contenues dans les altérations.

Le degré de discontinuité d'un aquifère de socle pour une échelle d'observation donnée est évidemment fonction de la densité de fractures. Les granites antébirrimiens fortement tectonisés, les roches vertes et schistes birrimiens, présentent à l'échelle d'un bassin versant le même comportement hydraulique que les milieux continus ; il est possible dans ces cas de tracer des cartes piézométriques semblables à celles que l'on obtient dans les aquifères continus (régions de Ouagadougou et Niamey). Par contre les aquifères liés aux fractures isolées des massifs granitiques régénérés ou aux filons de dolérites conservent leur discontinuité quelle que soit l'échelle d'observation.

Compte tenu de leur extension réduite et de leur faible capacité de stockage, les aquifères de socle voient leurs ressources exploitables limitées aux seules ressources renouvelables, c'est à dire à la fraction de la pluie qui chaque année les alimente. La connaissance de la recharge est donc indispensable pour évaluer la ressource.

- Les aquifères continus

Ces sont les aquifères constitués par les formations meubles, peu consolidées ou fortement altérées des grands bassins sédimentaires (bassins sénégalo-mauritanien, de Taoudenni, du Tchad, du delta du Niger, de l'Dubangui-Sangha, de RCA) ou des vallées alluviales.

Dans les bassins, l'empilement de puissantes séries poreuses et perméables donne naissance à des systèmes aquifères multicouches qui renferment des réserves en eau considérables. Contrairement aux aquifères discontinus, la recharge annuelle des nappes captives ne représente qu'une fraction insignifiante des volumes stockés. L'exploitation de ces aquifères est de type minier; l'évaluation de la ressource exploitable est plus fondée sur les dimensions et les paramètres hydrodynamiques des réservoirs que sur leur alimentation. A l'inverse, la recharge par les pluies devient prépondérante dans le cas des nappes libres situées dans des régions fortement arrosées (Plateaux batekés, bassins gréseux de RCA).

En nappe alluviale, les ressources sont dépendantes du réseau hydrographique ; leur estimation demande une bonne connaissance du régime des cours d'eau et des relations nappes-rivières.

- Les aquifères semi-continus

On regroupe dans cette catégorie les aquifères qui présentent un comportement hydraulique mixte (juxtaposition d'une perméabilité d'interstices et d'une perméabilité liée à la fracturation ou fracturation et altération très développées) . Les aquifères semi-continus correspondent aux formations sédimentaires gréseuses ou calcaires anté-hercyniennes de la bordure sud du bassin de Taoudenni, de l'Atacora, et du synclinal de la Nyanga. Compte tenu de leur grande extension et de leur continuité à l'échelle régionale, l'évaluation des ressources de ces aquifères est comparable à celle des aquifères continus.

2.2 - LES ZONES CLIMATIQUES

- La zone équatoriale

La zone équatoriale s'étend sur le Sud du Cameroun, l'Ouest du Gabon et le Nord du Congo. Elle est caractérisée par une température moyenne constante supérieure ou égale à 25°C et des précipitations abondantes comprises entre 1 800 et 3 500 mm, régulièrement réparties sur l'année.

Les nappes sont alimentées directement par la pluie et de façon continue. Les cours d'eau sont pérennes.

- La zone tropicale humide

Le climat tropical humide est proche du climat équatorial par l'abondance des précipitations (1 200-2 200 mm) mais en diffère par l'apparition de deux saisons sèches (août et décembre à mars). Les températures sont comparables à celles de la zone équatoriale avec cependant des amplitudes plus marquées.

Du fait de la brièveté des saisons sèches, la recharge des aquifères peut être considérée comme permanente. Les cours d'eau sont pérennes.

- La zone soudanienne

La zone soudanienne est caractérisée par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison pluvieuse bien marquées. Du Sud vers le Nord, la durée de la saison des pluies passe de 6 à 4 mois et la hauteur des précipitations décroît de 1 200 à 400 mm.

L'alimentation des nappes en zone soudanienne est cyclique. Au Burkina Faso où la saison des pluies intervient de la mi-juin à la mi-octobre, le minimum des niveaux piézométriques se situe en juillet et le maximum à la mi-septembre. Les écoulements de surface ne se produisent qu'en période de pluie à l'exception des cours d'eau drainant de grands bassins sédimentaires où les apports des aquifères permettent de soutenir le débit en saison sèche.

- La zone sahélienne

Le climat sahélien marque la transition entre les climats soudanien et désertique. La saison des pluies se réduit de 3 mois à quelques semaines et les précipitations deviennent très irrégulières et peu abondantes (100 à 400 mm).

L'alimentation directe des nappes par les pluies est encore possible mais devient marginale par rapport à la recharge issue des ruissellements concentrés. Les cours d'eau sont tous temporaires et ne sont actifs que quelques jours par an.

- La zone désertique

Cette zone qui couvre la moitié nord de la Mauritanie, du Mali, du Niger et du Tchad est caractérisée par une pluviométrie inférieure à 100 mm à variabilité interannuelle très prononcée, des températures élevées et une extrême sécheresse de l'air.

Les très faibles précipitations jointes à une forte évaporation interdisent toute alimentation directe des nappes par les pluies. La recharge, localisée au lit des cours d'eau, n'intervient que quelques heures par an.

2.3 - LOCALISATION ET EVOLUTION DE LA DEMANDE

Les consommations d'eau sont évidemment liées à l'activité humaine, c'est à dire à la densité de population. Le tableau 1 donne les prévisions de population pour les 13 pays membres du CIEH en 1990 et 2010. On constate que dans les 20 prochaines années, ces pays vont voir leur chiffre de population multiplié par 1,8. Cette pression démographique importante va s'accompagner d'une concentration dans les petites villes et les capitales, le taux d'urbanisation passant de 41 % à 63 %.

L'alimentation en eau des populations et du bétail est, et restera, l'utilisation la plus importante d'eau souterraine. Du fait de l'accroissement de la population et de l'amélioration du niveau de vie qui se traduit par une augmentation des besoins, les volumes d'eau potable pour l'alimentation humaine seront multipliés par 4,2 de 1990 à 2010. Les problèmes posés aux gestionnaires de la ressource viendront moins de l'ampleur des prélèvements que de leur concentration liée à l'accroissement du taux d'urbanisation.

L'agriculture irriguée à partir de l'eau souterraine est aujourd'hui une activité marginale dans les pays du CIEH. Bien qu'un développement intensif de l'irrigation tel que l'a connu l'Inde (*) dans les 15 dernières années, soit peu probable en Afrique, on note cependant une volonté politique des Etats de la zone soudano-sahélienne de mettre en oeuvre les moyens nécessaires au démarrage de l'agriculture irriguée. Une augmentation sensible des superficies irriguées dans les 20 prochaines années peut donc être raisonnablement envisagée. Les besoins de l'irrigation sont importants : en zone soudanienne un hectare de cultures demande 12 000 m³ par an ; 80 000 ha nouveaux consommeraient autant d'eau que la population des 13 pays en 1990. Les régions dans lesquelles les facteurs climatiques sont favorables à un développement généralisé de l'agriculture irriguée sont limitées à une bande de terrain de 600 km de largeur, centrée sur le 12^e parallèle, à cheval sur les zones climatiques sahélienne et soudanienne (cf. carte n°2).

(*) En Inde, les superficies irriguées à partir de l'eau souterraine sont passées de 13 millions à 28 millions d'hectares dans l'intervalle 1970-1985. L'ordre de grandeur du volume d'eau prélevé annuellement sur les nappes à partir de 12 millions de puits et forages est de 300 milliards de m³, chiffre supérieur au volume des précipitations annuelles sur le Burkina Faso.

**Tableau 1 - Evolution de la population et consommation d'eau potable prévisionnelle
dans les pays membres du CIEH**

	Bénin	Burkina Faso	Cameroun	Congo	Côte d'Ivoire	Gabon	Mali	Mauritanie	Niger	R.C.A.	Sénégal	Tchad	Togo	Total
POPULATION (10⁶ hab.)														
1990 totale	4,38	7,4	11,70	2,17	12,50	1,20	9	1,88	7,10	3,10	7,55	5,53	3,45	76,96
urbaine	2,43	2	5,70	1,37	6,50	0,62	2,40	0,83	1,30	1,45	4,15	1,48	1,30	31,53
rurale	1,95	5,4	6	0,80	6	0,58	6,60	1,05	5,80	1,65	3,40	4,05	2,15	45,43
2010 totale	8,00	11	23,70	4,70	27	1,60	14	2,80	11	6	14	8	6	137,8
urbaine	6,20	4,8	16,80	3,80	20	1,36	6	1,90	4	4	10,50	3,50	3,60	86,46
rurale	1,80	6,2	6,90	0,90	7	0,24	8	0,90	7	2	3,50	4,50	2,40	51,34
CONSOMMATION EAU POTABLE														
Besoins (objectifs l/j/h)														
1990 urbains	40	40	50	40	60	40	40	40	40	40	60	40	40	
ruraux	20	20	25	25	25	25	40	40	25	25	40	20	20	
2010 urbains	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
ruraux	50	50	75	50	80	50	50	50	50	50	80	50	50	
Volumes (10⁶ m³/an)														
1990 urbains	35,5	29,2	104	20	142,3	9	35,1	12,2	19	21,2	90,8	21,6	19	558,9
ruraux	14,2	39,4	54,7	7,3	54,7	5,3	96,3	15,3	52,9	15,1	49,7	29,4	15,7	450
totaux	49,7	68,6	158,7	27,3	197	14,3	131,4	27,5	71,9	36,3	140,5	51	34,7	1 008,9
2010 urbains	226,3	175,2	613,2	138,7	730	49,7	219	69,3	146	146	383,2	127,7	131,4	3 155,7
ruraux	32,8	113,1	188,9	16,4	204,4	4,4	146	16,4	127,7	36,5	102,2	82,1	43,8	1 114,7
totaux	259,1	288,3	802,1	155,1	934,4	54,1	365	85,7	273,7	182,5	485,4	209,8	175,2	4 270,4

2.4 - CONCLUSIONS

En replaçant les différentes grandes unités hydrogéologiques dans leur contexte climatique et humain, il est possible de différencier les régions dans lesquelles la mise en place de systèmes d'observation adaptés à l'évaluation de la ressource est indispensable, de celles où de tels systèmes seraient sans objet.

Les grands bassins sédimentaires continentaux de Taoudenni, du Niger, du Tchad, de République Centrafricaine et du Congo renferment des ressources en eau considérables où les prélèvements sont et resteront négligeables par rapport aux ressources disponibles. Une évaluation globale du potentiel aquifère de ces régions est par conséquent inutile. Les réseaux d'observation devront être limités aux points de prélèvements intensifs liés à l'alimentation en eau des grandes villes ou d'exploitations minières.

Les bassins sédimentaires côtiers. (sénégal-mauritanien, delta du Niger, Douala, Libreville). D'extension plus réduite, ces bassins voient leur ressource en eau fragilisée par la proximité de la mer. L'évaluation et le suivi de la ressource est indispensable pour les petits bassins fortement peuplés (bassins d'Abidjan, Lomé, Cotonou, du Sénégal). Dans le bassin mauritanien très faiblement peuplé et les bassins de Libreville et Douala qui disposent d'importantes ressources en eau de surface et souterraine, l'observation sera limitée aux champs de captage.

Les plaines alluviales constituent des aquifères peu épais dont l'alimentation dépend du régime des cours d'eau qui les parcourent. En zones désertiques sahélienne et soudanienne l'étude de la recharge annuelle par les crues est nécessaire dans les régions où les conditions pédologiques et climatiques sont favorables au développement de l'agriculture irriguée et disposant de ressources humaines suffisantes (vallée du Bani, Dallols, Vallées de l'Aïr, etc.).

Les régions de socle, par le caractère discontinu et les faibles capacités d'emmagasinement des aquifères voient leurs ressources limitées à la recharge annuelle par les pluies. Fortement peuplées dans les zones soudanienne et tropicales humides de l'Afrique de l'Ouest, ces régions poseront aux responsables de la gestion des eaux les problèmes les plus difficiles à résoudre.

Une alimentation en eau potable satisfaisante des populations et de leur cheptel ainsi que le développement de l'agriculture irriguée passent obligatoirement par une connaissance suffisante des ressources en eau souterraine exploitables ; l'installation de systèmes d'observation pour l'évaluation et le suivi de cette ressource est ici une nécessité absolue.

3 - CONCEPTION DES SYSTEMES D'OBSERVATION

Suivant leur finalité, on est conduit à distinguer trois types de systèmes d'observation des eaux souterraines.

Les systèmes primaires conçus pour l'évaluation, le suivi et la gestion des ressources en eau souterraine. Ces systèmes sont installés de façon permanente, comme les réseaux d'observation météorologique. Leur mise en place et leur exploitation relèvent du service public.

Les systèmes secondaires sont conçus pour le suivi localisé des perturbations provoquées dans un aquifère par sa mise en exploitation ou par les modifications apportées aux conditions naturelles d'écoulement et d'alimentation. Dans le cas de champs de captage, l'objectif est l'optimisation des prélèvements ; dans les autres cas (barrages, irrigation, urbanisation) l'objectif est de prévoir les conséquences des variations de niveaux ou de qualité des eaux de façon à prendre en temps utile les mesures nécessaires à la conservation de l'état initial. Les systèmes secondaires sont financés, mis en place et exploités pour une durée déterminée par le Maître d'Ouvrage.

Les systèmes tertiaires, limités généralement aux seuls réseaux piézométriques, visent essentiellement des objectifs d'étude : construction de cartes piézométriques, calcul des paramètres hydrodynamiques, acquisition de courbes historiques des pressions. Les systèmes tertiaires sont financés, installés et suivis dans le cadre d'un projet et leur exploitation se termine avec le projet. Bien que les ouvrages réalisés puissent être intégrés dans les systèmes primaires ou secondaires, la conception des réseaux piézométriques tertiaires est du domaine de l'étude hydrogéologique ; elle ne sera pas abordée ici.

3.1 - CONCEPTION DES SYSTEMES PRIMAIRES

La conception et le suivi d'un système primaire supposent une connaissance préalable minimum des réservoirs : extension, comportement hydraulique des limites, identification des zones d'alimentation et des exutoires naturels (une piézométrie détaillée et la connaissance des transmissivités et coefficients d'emmagasinement n'est pas indispensable à ce stade). Les systèmes d'observation devront fournir les données variables dans le temps : variations des niveaux piézométriques et des flux entrants et sortants. Ces historiques de pressions et de débits permettront dans un premier temps, d'apprécier la variation de réserve, c'est à dire la capacité régulatrice des réservoirs puis de calculer, au moyen d'un modèle mathématique de nappe ou d'un modèle global, l'alimentation de l'aquifère et enfin, de vérifier la représentativité de ce modèle par comparaison des rabattements calculés et observés sur de longues périodes.

La nature, la localisation et la fréquence des mesures à effectuer dépend du type d'aquifère. On distinguera trois cas : les aquifères continus étendus, les aquifères continus peu étendus et les aquifères discontinus.

3.1.1 - Cas des aquifères continus étendus (bassins sédimentaires)

Ils constituent généralement des systèmes aquifères multicouches comportant une première nappe libre et des nappes inférieures captives. Les données à recueillir sur chaque aquifère sont les suivantes :

- fluctuations naturelles des niveaux piézométriques,
- variations des débits des exutoires naturels,
- pluviométrie, température et durée d'insolation sur les zones de recharge.

Les variations de niveaux et de débits sont utilisées pour le calage en régime transitoire des modèles mathématiques. Les données climatologiques associées aux fluctuations piézométriques permettent de calculer ponctuellement la recharge annuelle des aquifères.

3.1.1.1 - Implantation du réseau piézométrique

Le réseau piézométrique à mettre en place doit permettre, avec un nombre minimum de piézomètres, d'estimer l'évolution probable des niveaux en tout point de la nappe avec une approximation jugée suffisante. A cet effet, on délimitera, à l'intérieur de l'aquifère, des domaines dans lesquels les facteurs qui régissent l'écoulement de la nappe sont supposés identiques (*). Il suffira alors d'un piézomètre pour rendre compte de l'évolution des niveaux sur toute l'étendue de la zone considérée comme homogène.

Dans les zones de recharge, on prendra en compte 3 facteurs : la lithologie des terrains de surface, la profondeur du niveau statique sous le sol et la pluie efficace moyenne annuelle. On délimitera les secteurs dans lesquels chacun de ces 3 facteurs présentent le même ordre de grandeur. A l'intérieur d'un secteur ainsi défini, on implantera le piézomètre sur un point où l'infiltration est possible et se traduit par une variation de niveau mesurable. En régions désertique ou sahélienne, l'infiltration efficace est limitée à la proximité immédiate des cours d'eau temporaires ; c'est donc dans les fonds de vallée, à l'abri des crues, que seront implantés préférentiellement les piézomètres. Ailleurs, les piézomètres seront placés dans le contexte morphologique le plus représentatif de la zone. On sait que l'amplitude de variations des niveaux décroît, lorsque la profondeur du niveau augmente, jusqu'à devenir nulle, lorsque les profondeurs débassent 50 m environ. Il est donc indispensable de positionner les piézomètres dans un secteur où la nappe est suffisamment proche du sol (10-30 m).

Les zones d'écoulement seront contrôlées par un nombre restreint de piézomètres placés en dehors des influences des captages. Si l'on dispose d'une carte des transmissivités (T) et des coefficients d'emménagement (S) les piézomètres seront implantés en fonction de la diffusivité (T/S) de l'aquifère. Seules les plages de diffusivité bien marquées (variation de T/S supérieure à une puissance de 10) et très étendues par rapport à la surface totale de la zone d'écoulement seront contrôlées. Dans le cas d'aquifères superposés on essaiera de regrouper les piézomètres installés dans des aquifères

(*) Les conditions et facteurs régissant la variation des niveaux piézométriques sont rappelés dans l'annexe 2.

différents de façon à suivre les variations de différences de pression qui régissent les transferts entre nappes.

Dans les zones d'exutoire qui constituent le niveau de base des aquifères, les variations piézométriques sont faibles. Il est cependant intéressant de les contrôler par un piézomètre situé à proximité des émergences ou sur les zones d'évaporation de façon à établir une relation entre les variations de niveaux et les variations des débits sortants mesurés (émergences) ou estimés (évaporation). Cette relation sera utilisée par le modèle pour prévoir le tarissement des sources consécutif à une mise en exploitation ou la réduction du débit des sorties occultes.

Le découpage de l'aquifère en zones homogènes en fonction des facteurs qui régissent les variations de niveaux ne doit pas aboutir à un trop grand nombre de zones à contrôler (donc de piézomètres à installer). On s'efforcera de définir des ensembles étendus dans lesquels les conditions hydrogéologiques sont comparables. A titre indicatif, le réseau primaire de la nappe maestrichtienne du Sénégal qui s'étend sur 200 000 km² pourrait être limité à une dizaine de piézomètres. Comme dans toutes les grandes nappes captives, la recharge annuelle représente une part négligeable de la ressource et les flux sortants sont limités aux prélèvements et aux transferts vers les aquifères sus-jacents. Dans ce cas, l'objectif du réseau primaire est de suivre la baisse de niveau provoquée par l'exploitation "minière" de la ressource.

3.1.1.2 - Implantation du réseau hydrométrique

Les variations de débit des exutoires des nappes rendent bien mieux compte de l'évolution de la ressource que les fluctuations piézométriques car elles intègrent tous les paramètres dynamiques sur l'ensemble de la nappe ; leur connaissance est donc essentielle.

Dans un premier temps, on fera l'inventaire des sources et rivières drainantes pérennes issues de l'aquifère à contrôler. Seules les émergences présentant un débit significatif par rapport aux ressources présumées de l'aquifère feront l'objet de mesures de débit. A titre indicatif, le réseau hydrométrique à installer sur le bassin gréseux de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso) devrait se limiter au jaugeage des sources de Bobo-Dioulasso (0,5 m³/s) et de la Volta noire à la sortie du bassin (7 m³/s à l'étiage). Lorsque les sources et cours

d'eau ne sont pas suivis en permanence par le Service Hydrologique national, on effectuera quelques jaugeages ponctuels en période de basses eaux de façon à obtenir la partie finale de la courbe de tarissement qui représente le débit de base de la nappe.

3.1.1.3 - Implantation du réseau de mesures climatologiques

Pour calculer la recharge ponctuelle au moyen d'un modèle global, il faut connaître les valeurs des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle dans la zone d'influence du piézomètre. Les paramètres à mesurer au pas de temps journalier sont : les hauteurs des précipitations, les températures maxima et minima et les durées d'insolation.

Dans le cas des aquifères continus étendus situés en zones climatiques où la répartition des pluies est suffisamment homogène, on pourra utiliser les mesures fournies par le réseau météorologique national. En zone désertique ou sahélienne, on installera un pluviographe à proximité du piézomètre ; les températures et durées d'insolation seront relevées à la station météorologique synoptique la plus proche.

L'acquisition des données climatologiques sera limitée aux points jugés représentatifs des zones de recharge de l'aquifère. Elle sera également limitée dans le temps ; le relevé des mesures sera arrêté lorsque l'on disposera de chroniques qui rendent compte à la fois des conditions climatiques moyennes et exceptionnelles (sécheresse).

3.1.2 - Cas des aquifères continus peu étendus (nappes alluviales)

Les nappes alluviales se distinguent des bassins sédimentaires par un réservoir de faible capacité, peu épais, à surface libre et alimenté principalement par les cours d'eau. Les ressources exploitables sont donc limitées à la fois par des possibilités de stockage réduites et la faiblesse des rabattements disponibles dans les ouvrages de captage. A ces contraintes s'ajoutent en zone désertique et sahélo-soudanienne l'irrégularité et le caractère aléatoire des apports à la nappe issus des cours d'eau temporaires.

Le système d'observation à mettre en place dans le cas des nappes alluviales devra permettre d'assurer un suivi piézométrique plus serré dans l'espace et dans le temps, de quantifier les échanges nappes-rivières et de connaître le régime hydrologique des cours d'eau en particulier la probabilité d'occurrence de crues des cours d'eau temporaires.

3.1.2.1 - Implantation du réseau piézométrique

Le positionnement des piézomètres en nappe alluviale demande une meilleure connaissance de l'aquifère que dans le cas des grands bassins sédimentaires. Il est utile de disposer d'une carte piézométrique et d'une délimitation, même approximative, des plages d'égale diffusivité. C'est à partir de ces données que seront définies les relations quantitatives nappes-rivières (alimentation, drainage).

Comme dans les aquifères continus étendus, on découpera l'aquifère en zones homogènes. Les facteurs à prendre en compte sont la diffusivité, la distance au cours d'eau et aux limites de la nappe, l'existence d'une relation hydraulique entre la nappe et la rivière (alimentation ou drainage) ou l'absence de relation. Chaque portion de nappe dans laquelle ces facteurs sont jugés comparables sera contrôlée par un piézomètre.

Le nombre de piézomètres à installer dépend évidemment de la superficie de l'aquifère et du degré de complexité de l'ensemble nappe-rivière. On ne peut donc, même à titre indicatif, proposer un maillage type.

3.1.2.2 - Implantation du réseau hydrométrique

Les mesures hydrométriques devront permettre le calcul de la probabilité d'occurrence des crues des cours d'eau temporaires et leur durée, de corrélérer les variations de niveaux piézométriques avec les variations du niveau du plan d'eau et dans la mesure du possible de quantifier directement les échanges nappe-rivière.

La fréquence, la durée et les niveaux des crues des cours d'eau temporaires peuvent être obtenus par la lecture directe des échelles limnimétriques. Sur les rivières permanentes, on installera des limnigraphes. Ces appareils seront

placés sur les secteurs où l'existence d'une relation hydraulique entre la nappe et la rivière est démontrée par la piézométrie.

Le calcul des volumes échangés entre l'aquifère et les cours d'eau peut être tenté par comparaison des hydrogrammes obtenus à l'entrée et à la sortie de la nappe. Cette méthode suppose l'installation de stations de jaugeage précises. Les moyens à mettre en oeuvre sont généralement disproportionnés avec les résultats obtenus, les volumes échangés étant souvent inférieurs à la précision des mesures de débit. L'application de cette méthode sera réservée aux cas particulièrement favorables : débit d'entrée nul (le débit de sortie provient uniquement de la nappe) ou débit de sortie nul (*) (le débit de la rivière est entièrement infiltré dans la nappe).

3.1.3 - Cas des aquifères discontinus (aquifères de socle)

Par leur caractère discontinu qui freine la propagation des variations de charge, leur très faible capacité de stockage et leur puissance réduite à la seule frange fissurée ou fracturée (0 à 50 m), les aquifères de socle voient leurs ressources limitées à la recharge locale par les pluies. L'évaluation des ressources en eau d'une région de socle consiste donc à estimer, pour les principaux contextes hydrogéologiques et climatiques représentés dans le pays, la fraction de la pluie annuelle qui atteint les nappes.

Pour délimiter les zones homogènes dans lesquelles les conditions hydrogéologiques et climatiques sont comparables, on prendra en compte les facteurs suivants : lithologie du substratum, présence ou absence d'un aquifère sus-jacent, morphologie, pluie efficace. Dans le facteur lithologie, on distinguera les socles granitiques et l'ensemble schistes-roches vertes, ces lithologies présentant un comportement hydraulique différent (type de fracturation et nature des altérations). On admettra qu'il existe un aquifère sus-jacent

(*) l'exemple type d'application de cette méthode est l'étude de la vallée de Téloua - Aïr). Des jaugeages échelonnés sur les 40 km de cours ont permis de calculer les volumes infiltrés dans les différents biefs, le débit de sortie étant nul (infiltration totale des crues). Le réseau piézométrique est limité à 4 piézomètres installés dans chacun des 4 biefs principaux. La comparaison des volumes infiltrés et des fluctuations piézométriques correspondantes aboutit à une estimation satisfaisante de la porosité efficace.

lorsque l'épaisseur d'altération saturée est supérieure ou égale à 10 m en basses eaux. Pour le facteur morphologie, on se limitera à deux cas : les interfluves et plateaux et les bas fonds. Enfin les classes de pluie efficace seront définies par les intervalles 0-100, 100-300, 300-700, 700-1 200. La combinaison des différents cas aboutit théoriquement à la définition de 32 zones homogènes. En pratique, si l'on sélectionne les zones qui occupent une superficie significative, le nombre de zones dans un pays d'exécède pas 20.

3.1.3.1 - Implantation des réseaux piézométriques et climatologiques

Comme dans le cas des aquifères continus, l'évaluation ponctuelle de la recharge annuelle par les pluies est effectuée au moyen d'un modèle global (1). Cependant, la représentation des échanges entre la nappe et l'atmosphère est compliquée par la taille réduite et la complexité du réservoir ; il est donc indispensable de mesurer les paramètres climatiques à proximité immédiate du piézomètre et de disposer des données nécessaires à l'élaboration d'un schéma hydraulique du site (géométrie du réservoir et coefficient d'emménagement).

Pour l'installation de chacune des stations de mesures piézométriques et climatologiques on propose la méthodologie suivante (2) :

1. Etude de la fracturation par photo-interprétation et prospection électrique ou électromagnétique (VLF) sur une zone de 5 km² environ : choix du site le plus favorable à la réalisation de forages productifs.
2. Réalisation de 3 ou 2 forages suivant que le socle est ou n'est pas recouvert d'altérations saturées. Dans le premier cas l'un des forages est arrêté à la base des altérations. Les forages sont situés dans un cercle de 100 m et positionnés en fonction de la direction de fracturation principale.
3. Essai de pompage de longue durée (72 heures minimum) sur le forage le plus productif avec observation des niveaux sur le ou les piézomètres : estimation du degré d'hétérogénéité du réservoir et du coefficient d'emménagement.

(1) Le principe du modèle global est exposé dans l'annexe 2.

(2) Cette méthodologie a été appliquée au Burkina Faso pour la création des 10 stations d'observation du Projet "Milieux fissurés" (cf. bibliographie).

4. Installation d'un limnigraphe sur le forage pompé et éventuellement sur le forage arrêté dans les altérations.
5. Installation d'une station climatique à proximité immédiate des piézomètres. Cette station comprend 1 pluviographe, 1 thermographe à maxima et minima et 1 héliographe (durée d'insolation).

Une première estimation de la recharge pourra être effectuée après l'observation de deux cycles hydrologiques. La comparaison des résultats obtenus dans les différents contextes hydrogéologiques et climatiques observés permettra de juger de la représentativité des stations. Le relevé des mesures climatiques sera arrêté lorsque l'on aura établi la relation entre la pluie et la recharge ; les mesures seront alors limitées aux fluctuations piézométriques.

3.2 - CONCEPTIONS DES SYSTEMES SECONDAIRES

3.2.1 - Cas des champs de captage

L'objectif des systèmes d'observation secondaires associés aux champs de captage est de guider le Maître d'Ouvrage dans la conduite de l'exploitation et de lui fournir les données nécessaires à la programmation des prélèvements futurs en fonction de l'évolution de la demande. Dans le domaine de la conduite de l'exploitation, le suivi permet de déceler les causes d'une baisse de productivité des captages (baisse imprévue de la nappe, colmatage des crépines, défaillance des moyens d'exhaure) donc de prendre les mesures nécessaires au rétablissement du débit initial. Dans le domaine de la gestion à long terme, la connaissance de l'évolution des rabattements et de la qualité des eaux en fonction des prélèvements est indispensable à l'élaboration de scénarios d'exploitation au moyen de sous-modèles intégrés dans le modèle général de l'aquifère.

On demandera au système d'observation secondaire de fournir les données suivantes : variations des niveaux piézométriques dans les ouvrages exploités et dans la zone d'influence du captage, volumes exhaurés et qualité chimique des eaux.

Le réseau piézométrique comprendra un piézomètre placé au centre de gravité du champ et 3 piézomètres échelonnés dans différentes directions entre le centre de gravité et les limites de la zone influencée. Pour positionner le piézomètre le plus éloigné, on tracera en coordonnées semi-logarithmiques les droites rabattement/distance pour différentes durées d'exploitation (par exemple 1 an, 5 ans et 10 ans) ; le piézomètre sera placé à une distance telle que les variations de niveaux soient suffisamment sensibles pour être mesurées. Le réseau sera complété par l'installation de systèmes de mesure des niveaux sur les ouvrages d'exploitation (tube guide de mesure).

Les volumes exhaurés seront contrôlés par l'installation sur chaque ouvrage de production d'un compteur d'eau permettant la mesure du débit instantané et la totalisation des volumes exhaurés.

Le contrôle de la qualité chimique des eaux sera limité en général au suivi de la conductivité électrique de l'eau. Lorsque des sources de contamination de l'aquifère exploité sont identifiées (invasion marine des aquifères côtiers par exemple) le contrôle sera renforcé par un dispositif d'alerte constitué par des piézomètres installés entre la source de pollution et le champ. Des mesures de conductivité in situ seront effectuées périodiquement.

3.2.2 - Autres cas

Tout ouvrage ou activité qui a pour effet la modification de l'alimentation ou de l'écoulement naturel d'une nappe devrait être contrôlé par un système d'observation secondaire. Les barrages provoquent en général une remontée des niveaux des aquifères à l'amont (inondations des bas fonds, asphyxie des végétaux) et une baisse à l'aval (assèchement des puits, abais-sement de la frange capillaire). L'irrigation intensive entraîne des remontées de niveau au droit des périmètres qui sont à l'origine de la salinisation des sols (*). L'urbanisation rapide, qui se traduit généralement par une augmentation des débits de fuites des adductions d'eau potable et des rejets non collectés, a

(*) En Inde, 10 % des surfaces irriguées sont aujourd'hui rendues inutilisables par salinisation excessive des sols.

souvent pour effet de gonfler la nappe phréatique sous les villes provoquant des dommages aux fondations et l'engorgement des réseaux d'assainissement (1).

Pour régler les contentieux et remédier aux effets néfastes des variations piézométriques il est indispensable de connaître l'état initial et de suivre les fluctuations de niveau. Le réseau d'observation sera donc installé avant la réalisation des ouvrages ou la mise en eau des périmètres et maintenu jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint. En cas de contentieux, la poursuite des mesures permettra de juger de l'efficacité des mesures prises pour retrouver l'état initial.

4 - INSTALLATION ET SUIVI DES SYSTEMES D'OBSERVATION

4.1 - LES PIEZOMETRES

Tout regard sur la nappe permet d'effectuer une mesure de niveau ou de pression. Cependant, les mesures piézométriques doivent permettre de reconstituer les variations naturelles de la nappe dans un secteur représentatif de la zone homogène contrôlée ; cela limite les possibilités d'utilisation des points d'eau existants.

Dans les forages ou puits exploités, le rabattement provoqué par l'exhaure se superpose aux variations naturelles. Dans les régions de socle de la zone soudano-sahélienne où les points d'eau sont à la fois peu productifs et très sollicités, l'exploitation masque totalement les évolutions naturelles du niveau d'eau. Préconiser une mesure de niveau "au repos" serait illusoire (2). Les forages abandonnés parce que peu productifs captent une fraction de l'aquifère à transmissivité anormalement faible ou présentent un défaut de

(1) Sous la ville de Ryadh (Arabie Saoudite) le niveau de la nappe phréatique est remonté de 40 m en 10 ans. Le surcoût des constructions d'immeubles et de l'installation du réseau d'assainissement dû à la remontée imprévue de la nappe est considérable.

(2) En zone de socle soudano-sahélienne les puits traditionnels et forages équipés de pompe à main sont exploités de 16 à 20 heures par jour en saison sèche.

captage (colmatage) ; des mesures effectuées dans ces forages ne rendraient pas compte des variations de niveau dans la zone homogène que l'on se propose d'étudier ou seraient décalées dans le temps du fait de la mauvaise connexion hydraulique entre le captage et l'aquifère. En définitive, à l'exception des forages exécutés pour la reconnaissance hydrogéologique, on sera dans l'obligation de réaliser des ouvrages spécialement réservés à l'observation piézométrique.

Pour la conception et l'exécution du piézomètre on retiendra les points essentiels suivants :

L'ouvrage ne doit capter que la nappe étudiée : le captage sera isolé d'éventuels aquifères sus ou sous jacents par cimentation de l'annulaire. Dans le cas de systèmes multicouches ou fortement stratifiés on réalisera des piézomètres séparés pour chaque aquifère (multicouches) ou pour chaque fraction d'aquifère à l'intérieur de laquelle on admet qu'il n'y a pas de variation significative de potentiel en fonction de la profondeur.

L'ouvrage doit permettre une mesure fidèle. Le niveau mesuré dans le piézomètre doit être à tout moment en équilibre avec le niveau de la nappe ; l'ouvrage sera testé par pompage pour d'une part s'assurer que la transmissivité autour du captage est comparable à la transmissivité régionale et d'autre part pour vérifier l'absence de colmatage de la partie filtrante.

L'origine des mesures de niveau ou de pression doit être matérialisée par un repère fixe.

4.2 - FREQUENCE DES MESURES

La fréquence des mesures doit être adaptée à la variabilité dans le temps du phénomène observé et au degré de précision que l'on estime suffisant pour représenter ce phénomène. A titre indicatif, on donne dans le tableau ci-dessous la fréquence des mesures à effectuer sur les systèmes d'observation selon le type d'aquifère. Ces fréquences peuvent être modifiées en fonction de conditions naturelles ou d'objectifs particuliers.

Systèmes primaires

Mesures	Aquifères continus étendus			Aquifères continus peu étendus	Aquifères discontinus
	Zone de recharge	Zone d'écoulement	Zone d'exutoire		
piézométriques	mens.	semestr.	semestr.	journal. (crues) mens. (hors crues)	journal. (s. pluies) mens. (s. sèche)
pluviométriques	journal.				journal.
thermométriques	journal.*				journal.
durée insolation	journal.*				journal.
hydrologiques			mens. (étiage)	horaires** mens.**	

* mesures relevées à la station météorologique synoptique la plus proche

** mesures horaires des niveaux dans le cas de jaugeages différentiels, mensuelles lorsque le débit d'entrée est nul

Systèmes secondaires

- Mesures piézométriques
 - . dans les forages exploités : hebdomadaire
 - . dans le piézomètre à l'intérieur du champ : hebdomadaire
 - . dans les piézomètres extérieurs : mensuelle
- Mesures des volumes exhaurés : hebdomadaire
- Mesure de la conductivité sur les forages exploités et sur les piézomètres du réseau d'alerte : mensuelle

4.3 - MATERIEL DE MESURE

4.3.1 - Mesures de niveaux

Pour les mesures de niveau superficielles et les mesures mensuelles peu éloignées (systèmes secondaires) à effectuer sur des forages non équipés de pompe, on utilisera une sonde mécanique simple et robuste : la sonde à sifflot OTT24150 répond parfaitement à ces conditions.

Les mesures sur les forages exploités seront obtenues au moyen d'une sonde électrique descendue dans un tube guide de mesure. L'installation de prises de

pression pneumatique (ligne d'air) peu précises et fragiles n'est pas recommandée.

Pour les observations plus fréquentes ou éloignées on installera sur les piézomètres ou les stations de jaugeage des capteurs de pressions à enregistrement et stockage sur mémoire électronique. Le système MADD (Module d'acquisition de données) permet de stocker 16 000 mesures, la fréquence d'interrogation du capteur, programmable, varie de 5 secondes à 1 jour. Pour des mesures journalières la fréquence de visite de l'appareil est imposée uniquement par la nécessité de remplacer les piles tous les 6 mois.

4.3.2 - Mesures climatologiques

Les mesures climatologiques à recueillir sur les sites où l'on se propose de calculer la recharge seront obtenues au moyen de stations automatiques à stockage sur mémoire. La station SATURNE CAA est conçue pour la saisie, le stockage, le traitement et la transmission des données climatologiques. Pour une fréquence de mesure journalière de 3 paramètres (pluie, température, durée d'insolation) une visite semestrielle est suffisante.

4.3.3 - Mesures de débits et des volumes exhaurés

Les débits instantanés et les volumes exhaurés seront mesurés au moyen de compteurs d'eau installés sur le tube de refoulement de la pompe de chaque forage de production. Dans la mesure du possible, on vérifiera périodiquement (2 fois par an) par jaugeage direct, la fidélité des appareils.

4.3.4 - Mesures de conductivité

Elles sont effectuées sur les forages exploités à l'aide d'un conductivimètre portatif à affichage digital avec compensation automatique de température.

Dans les piézomètres du réseau d'alerte la conductivité est mesurée in situ au moyen d'une sonde contenant une cellule de résistivité et une thermosonde.

Les notices descriptives des appareils proposés ci-dessus sont reproduits dans l'annexe 3.

4.4 - SUIVI DES RESEAUX

4.4.1 - Suivi des réseaux primaires

Le suivi des réseaux primaires est assuré par l'Administration. Les mesures périodiques manuelles sont relevées par un observateur local rémunéré auquel est confié un matériel simple et robuste (sonde à sifflet, échelles limnimétriques) ainsi que des enveloppes timbrées pour l'expédition des résultats.

Le relevé et la maintenance des appareils à stockage sur mémoire électronique est confié à un technicien confirmé possédant des notions d'informatique. Ce technicien dispose d'un véhicule tout terrain et d'un chauffeur. Au cours de ses tournées, il contrôle la qualité du travail fourni par les observateurs.

4.4.2 - Suivi des réseaux secondaires

Les réseaux secondaires sont installés et suivis par le Maître d'Ouvrage. Les mesures effectuées dans le mois sont consignées sur une fiche qui est adressée à l'Administration (un exemple de fiche est donné ci-après).

4.4.3 - Télétransmission des données

Les appareils de mesure à enregistrement numérique (MADO, SATURNE CAA) peuvent être couplés à une balise qui transmet directement les données à une station de réception située dans les locaux de l'Administration, par l'intermédiaire de satellites (ARGOS, METEOSAT, GOES, GMS) (Cf. annexe 3). L'intérêt du système est triple : dans le cas de mesures fréquentes, les tournées sur le terrain sont limitées aux visites de maintenance (4 par an) ; le mauvais fonctionnement d'un appareil est décelé dans un laps de temps très bref (1 journée) ; la collecte et le traitement des données sont effectués en temps quasi réel.

Des réseaux de télétransmission utilisant les systèmes ARGOS et METEOSAT ont été installés dans les pays membres du CIEH dans le cadre des projets HYDRONIGER, ONCHOCERCOSE et SANAGA. Au total 134 plates-formes d'émission et 12 stations de réception fonctionnent aujourd'hui dans les pays situés sur le bassin du Niger, au Togo et au Cameroun. Ils permettent une meilleure surveillance hydro pluviométrique du Niger et de la Sanaga (annonce des crues)

Exemple de fiche récapitulative
des mesures effectuées sur un champ de captage

CHAMP :
ANNEE :
MOIS :

Jours	Volumes exhaurés (m ³)		Profondeur des niveaux (m)					Conductivité à 20°C (µs.cm)		
	Lecture compteur	Production	F1	F2	F3	P1	P2	F1	F2	F3
1	123 500	3 700	35,03	24,33	47,17	10,25	8,45	210	235	270
2		3 500								
3										
4	127 000	3 500	36,20	24,55	47,83	10,30	8,48	210	235	275
5										
6										
7	130 000	3 000	35,30	24,93	50,09	10,18	8,43	215	235	275
8		4 500								
9										
10	134 500	4 500	37,12	25,17	14,18*	10,22	8,45	210	235	270
11										
12										
13	138 100	3 600	36,95	13,02**	49,60	10,03	8,40	210	235	270
14										
15										
16	138 100	3 600	36,95	13,02**	49,60	10,03	8,40	210	235	270
17										
18										
19	138 100	3 600	36,95	13,02**	49,60	10,03	8,40	210	235	270
20										
21										
22	138 100	3 600	36,95	13,02**	49,60	10,03	8,40	210	235	270
23										
24										
25	138 100	3 600	36,95	13,02**	49,60	10,03	8,40	210	235	270
26										
27										
28	138 100	3 600	36,95	13,02**	49,60	10,03	8,40	210	235	270
29										
30										
31	138 100	3 600	36,95	13,02**	49,60	10,03	8,40	210	235	270
30										
31										

Remarques : * après 8,30 heures d'arrêt
** après 6 heures d'arrêt

et le déclenchement au meilleur moment des campagnes de pulvérisation d'insecticides sur les rivières infestées par l'onchocercose.

Compte tenu du coût et des problèmes de maintenance de ces appareils de technologie avancée, l'utilisation de télétransmissions pour le suivi des réseaux d'observation des eaux souterraines ne semble pas, sauf cas particuliers, apporter d'avantages décisifs par rapport au stockage sur mémoire électronique. Les visites sur les appareils de transmission sont plus fréquentes que les visites sur les appareils à mémoire. Les défaillances des systèmes tels que MADO ou CAA sont exceptionnelles. Enfin l'acquisition en temps quasi réel des données ne présente que peu d'intérêt pratique dans le cas d'un suivi de nappe.

4.5 - STOCKAGE ET DIFFUSION DES DONNEES

Toutes les données issues des réseaux primaires et secondaires doivent être centralisées par un service ayant autorité sur la gestion des ressources en eau souterraine et superficielle à l'échelon national. La dispersion des données entre plusieurs administrations (Eau, Hydraulique, Agriculture, Mines) est à éviter.

Les mesures sont stockées dans une base de données centrale soit par saisie au clavier (relevés manuels) soit par transfert direct à l'aide de programmes spécifiques (mémoires). Des logiciels de traitement permettent une présentation ordonnée des mesures sous forme de tableaux ou de graphiques (cf. annexe 3).

La diffusion des résultats auprès des utilisateurs peut être obtenue à la demande par interrogation de la base de donnée et/ou la publication d'annuaires contenant sous forme de tableaux la totalité des mesures classées par station et des graphiques représentant l'évolution des niveaux observés sur des points jugés représentatifs d'une tendance générale.

Les annuaires publiés par les différents pays pourraient servir de base à l'élaboration de synthèses régionales annuelles et pluriannuelles. Par ses attributions et sa grande expérience de l'hydrogéologie africaine, le CIEH devrait se voir confier cette tâche.

5 - ELEMENTS POUR LE CALCUL DU COUT D'INSTALLATION ET DE SUIVI DES SYSTEMES D'OBSERVATION

Dans le tableau ci-après sont récapitulés les éléments à prendre en compte pour l'estimation du coût d'installation et de suivi d'un système d'observation national.

Les investissements à consentir sont estimés à partir des prix hors taxes couramment pratiqués en 1988. Les prix des appareils de mesures ne comprennent pas les frais d'expédition. Pour le fonctionnement, on s'est limité à fournir en aide mémoire, la liste des postes budgétaires à considérer, les coûts de la main d'oeuvre et des consommables étant très variables d'un pays à l'autre.

6 - APPLICATION : CONCEPTION D'UN SYSTEME D'OBSERVATION DES EAUX SOUTERRAINES AU BURKINA FASO

Le Burkina Faso, situé entre les zones désertique et tropicale humide, constitué de terrains cristallins et sédimentaires est le pays le plus représentatif des contextes climatiques et hydrogéologiques fréquemment rencontrés en Afrique de l'Ouest. De plus, les fortes densités de population localisées dans des régions à ressources en eau limitées vont poser les problèmes que rencontreront la plupart des responsables de la gestion des eaux souterraines dans les pays membres du CIEH. On se propose donc, à titre d'exemple, de définir les grandes lignes de ce que pourrait être le système d'observation à mettre en place dans ce pays.

6.1 - CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HUMAIN

6.1.1 - Hydrogéologie

Le pays est occupé par un bâti cristallin et métamorphique recouvert à l'Ouest et au Sud par des formations grésos-schisteuses infracambriennes. A l'extrémité nord, des dépôts continentaux attribués au Continental Terminal reposent en discordance sur les séries pré et infracambriennes (cf. carte 3).

Le socle cristallin qui représente 85 % de la superficie du territoire burkinabé est constitué de deux unités bien différenciées par leurs caractères

ELEMENTS POUR LE CALCUL DU COUT ANNUEL D'UN SYSTEME

D'OBSERVATION DES EAUX SOUTERRAINES

A. INVESTISSEMENTS

Désignation	Prix unitaire (FCFA)	Durée amortissement (années)	Prix unitaire annuel (FCFA)
A1 Piézomètres			
1. Etude des sites, contrôle des travaux			
2. Forage en terrain dur (socle) profondeur 60 m - tubage PVC 4"1/2 y compris essais de débit (6h)	1 750 000	50	35 000
3. Forage en terrain tendre profondeur 150 m tube en toile 2" y compris essais de débit (6h)	3 625 000	50	73 000
4. Forage en terrain tendre profondeur 250 m tube en toile 4" y compris essais de débit	8 120 000	25	325 000
A2 Appareils de mesure			
1. Manomètre M6 63 type D	7 000	3	
2. Sonde à sifflet marque OTT référence 24150 (50m)	143 000	5	29 000
3. Sonde électrique SEBA type KLL (100m)	115 000	2	58 000
4. Module d'acquisition de données (MADO) comprenant 3 sorties, 1 capteur (0-1bar), 1 logiciel de communication MADO/EPSON HX20 ou MADO/compatible PC	1 100 000	10	110 000
5. Station climatologique CAA avec capteurs pluies, température, insolation, alimentation photovoltaïque, imprimante, valise d'acquisition et de transfert des données	6 200 000	10	620 000
6. Compteurs d'eau petits débits	35 000	3	12 100
Compteurs d'eau gros débits	750 000	3	250 000
7. Conductivimètre portatif à affichage digital et correction automatique de température MERCK CM 85	155 000	3	52 000
8. Sonde pour la mesure de la résistivité et de la température profondeur 100 m avec treuil léger	1 050 000	5	210 000

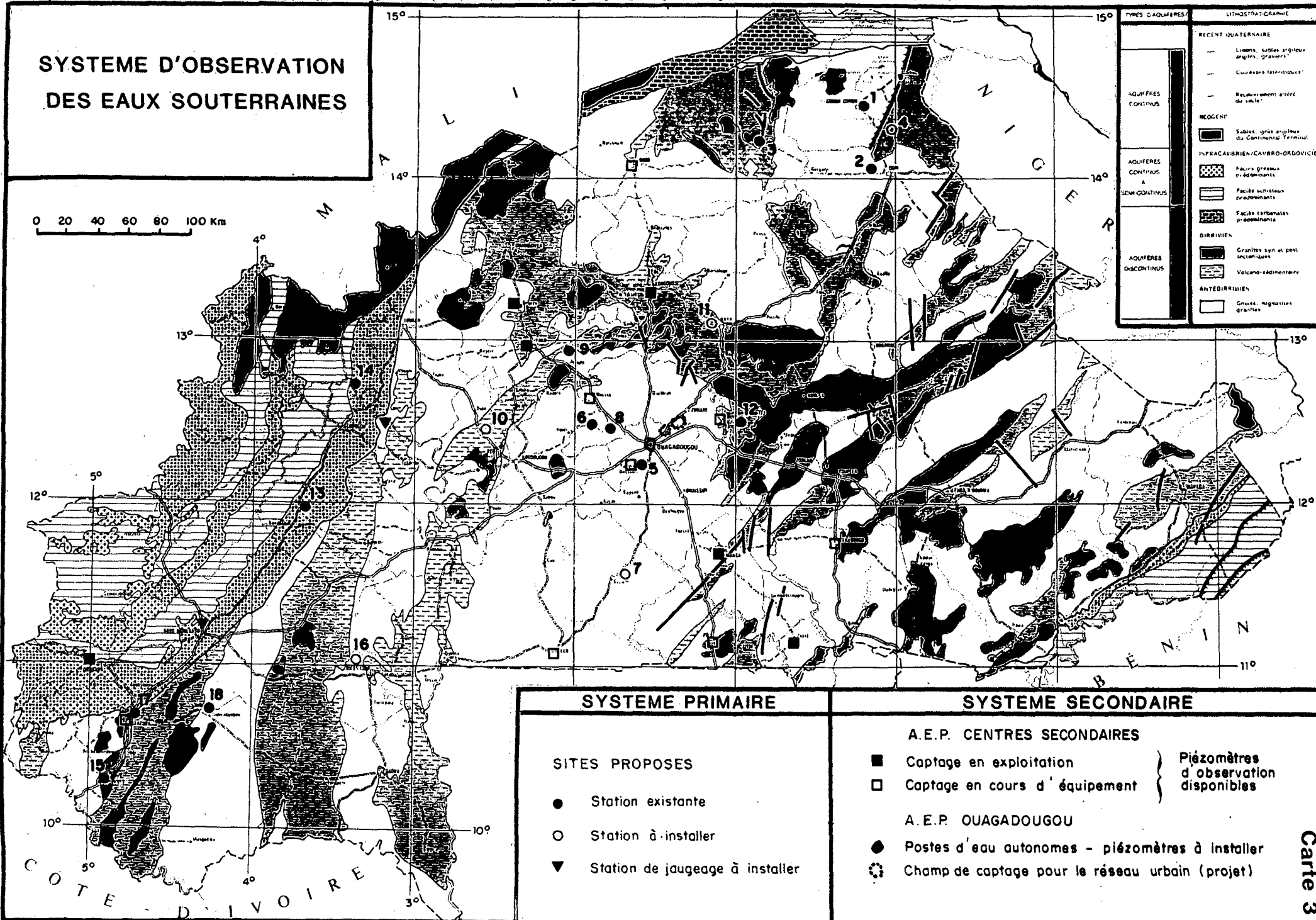
Désignation	Prix unitaire (FCFA)	Durée amortissement (années)	Prix unitaire annuel (FCFA)
A3 Logistique			
1. Véhicule tout terrain TOYOTA Hilux double cabine diesel	4 500 000	5	900 000
2. Matériel de campement comprenant 1 tente, 1 lit, caisse popote, réchaud à gaz, draps, couverture et petit matériel divers	575 000	3	192 000

B. FONCTIONNEMENT

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaires (FCFA)	Prix total annuel (FCFA)
B1 Personnel				
1. Technicien de l'Administration (relevé des mesures)				
- charges salariales	J			
- indemnités de déplacement	J			
2. Technicien de l'Administration Saisie informatique et gestion des fichiers				
- charges salariales	J			
3. Chauffeur de l'Administration				
- charges salariales	J			
- indemnités de déplacement	J			
4. Observateur local forfait annuel	an			
B2 Consommables				
1. Véhicules				
- carburants	an			
- lubrifiants	an			
- entretien, réparations	an			
2. Matériel de mesures				
- petit matériel	an			
- entretien, réparations	an			
3. Informatique				
- fournitures	an			
- entretien	an			

SYSTEME D'OBSERVATION DES EAUX SOUTERRAINES

0 20 40 60 80 100 Km



TYPES D'AQUIFERES	LITHOSTRATIGRAPHIE
AQUIFERES CONTINUS	RECENT QUATERNAIRE
	<ul style="list-style-type: none"> — Limons, sables argileux, graviers — Cauxsais ferrugineux — Relevement atérié du sol
AQUIFERES CONTINUS A SEMI CONTINUS	NEOGENE
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sables, grès argileux du Continental Terminal
	INFRACALIBRIEN/CAMBRO-ORDOVICIEN
AQUIFERES DISCONTINUS	<ul style="list-style-type: none"> ▨ Facies gréseux prédominants ▤ Facies schisteux prédominants ▧ Facies carbonates prédominants
	DIRIRIVBIEN
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grès, sables et argiles indurifiés ▨ Volcano-sédimentaire
	ANTEDIRIRIVBIEN
	<ul style="list-style-type: none"> □ Grès, argillites grésilles

SYSTEME PRIMAIRE	
SITES PROPOSES	
●	Station existante
○	Station à installer
▼	Station de jaugeage à installer

SYSTEME SECONDAIRE	
A.E.P. CENTRES SECONDAIRES	
■	Captage en exploitation
□	Captage en cours d'équipement
} Piézomètres d'observation disponibles	
A.E.P. OUAGADOUGOU	
●	Postes d'eau autonomes - piézomètres à installer
⊗	Champ de captage pour le réseau urbain (projet)

lithologiques et structuraux : l'Antébirrimien, noyau ancien du socle représenté par des granitoïdes (granites, gneiss, migmatites) et le Birrimien constitué de séries volcano-sédimentaires métamorphisées, disposées en étroits sillons à l'intérieur de l'Antébirrimien.

Les régions de socle renferment deux types d'aquifères : les aquifères discontinus liés aux réseaux de fractures qui affectent les roches cristallines compactes imperméables et les aquifères continus constitués par les altérations lorsqu'elles sont saturées. Les forages qui captent le socle fournissent des débits compris entre 0 et 20 m³/h. Le recouvrement altéré, peu perméable, est exploité par des puits dont le débit n'excède pas quelques m³/j.

L'Infracambrien de l'Ouest du pays appartient à l'extrémité sud du bassin de Taoudeni. Il est représenté par une puissante série gréseuse dans laquelle s'intercalent deux niveaux schisteux et/ou schisto-dolomitiques. La puissance totale de cette formation serait supérieure à 1 500 m. L'Infracambrien affleurant au Sud-Est du pays constitue la bordure septentrionale du bassin des Voltas ; il est représenté par des grès fins à rares intercalations dolomitiques.

Le bassin de Bobo Dioulasso, par son extension (35 000 km²) et la puissance des formations perméables accumulées, est le réservoir le plus intéressant du pays. L'aquifère superficiel a été reconnu par 200 forages d'hydraulique villageoise dont la profondeur n'excède pas 120 m. Tous les forages ont recoupé un plan d'eau. On note cependant que les débits, compris entre 2 et 20 m³/h, sont plus élevés à proximité des fractures que dans les zones non tectonisées ; il s'agit donc d'un aquifère semi-continu. L'empilement de strates de perméabilités différentes doit constituer un système aquifère multicouche. Des forages de reconnaissance profonde, implantés au centre du bassin, devraient rencontrer des horizons plus productifs que l'aquifère superficiel actuellement exploité. Il n'est pas exclu que des captages situés dans les zones basses (vallée de la Volta noire) soient jaillissants.

Le Continental Terminal, constitué par des sables et sables argileux, occupe une superficie d'environ 8 000 km² en territoire burkinabé (plaine de Gondo). Seule, l'extrémité orientale au Nord de Djibo a été reconnue par 11 forages d'hydraulique villageoise. Les débits obtenus varient entre 1 et 10 m³/h. Ces résultats ne sont pas représentatifs des possibilités réelles de la nappe. Des

forages plus profonds implantés au Nord des grès infracambriens, région où l'aquifère est plus épais et plus sableux, devraient permettre d'obtenir des débits compris entre 10 et 50 m³/h. La profondeur du niveau statique sous le sol généralement supérieure à 40 m est un facteur limitant l'exploitation de cette ressource.

6.1.2 - Climatologie

On distingue 3 zones climatiques délimitées par les isohyètes moyennes annuelles et caractérisées par la répartition des précipitations ainsi que par les différences journalières et annuelles des températures et de l'humidité (cf. carte 4). Le tableau ci-dessous donne les valeurs des principaux paramètres climatiques des 3 zones.

Zones climatiques	Précipitations		Températures		Evapotranspiration potentielle (mm)
	Hauteur (mm)	Durée (mois)	Moyenne (°C)	Maxima (°C)	
Sahélienne	350-650	2-3	28	41,2	3 000
Nord-soudanienne	650-1 000	3-4	26	40,5	2 650
Sud-soudanienne	1 000-1 300	5-6	24	37	1 950-2 350

6.1.3 - Population

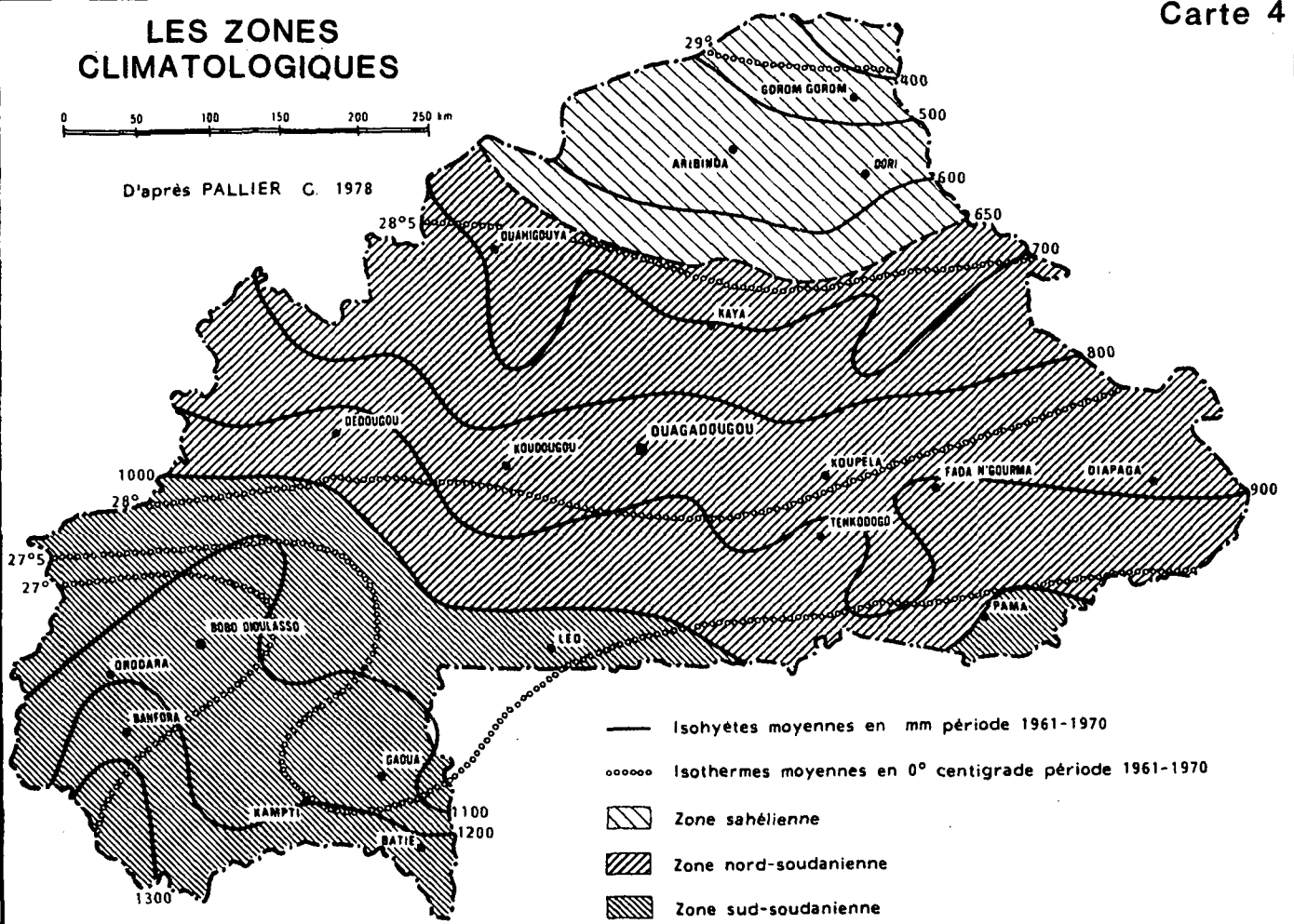
Le dernier recensement établi au 31 décembre 1985 estime à 7 millions le nombre d'habitants résidant au Burkina Faso. La carte n°4 montre l'inégalité de la répartition géographique de la population ; au surpeuplement de la partie centrale (50 hab/km² en moyenne avec des zones à plus de 80 hab/km²) s'oppose le vide des régions périphériques à moins de 10 hab/km².

La majeure partie de la population (près de 90 %) est rurale et pratique une agriculture pluviale extensive orientée essentiellement vers les cultures vivrières de première nécessité (mil, sorgho). En zones soudanienne sèche et sahélienne la production agricole est soumise à la grande variabilité interannuelle des précipitations. Le recours à l'irrigation à partir des eaux de surface ne peut être envisagé à grande échelle compte tenu de l'intermittence des écoulements et d'une morphologie très plate, peu favorable à

LES ZONES CLIMATOLOGIQUES



D'après PALLIER G. 1978

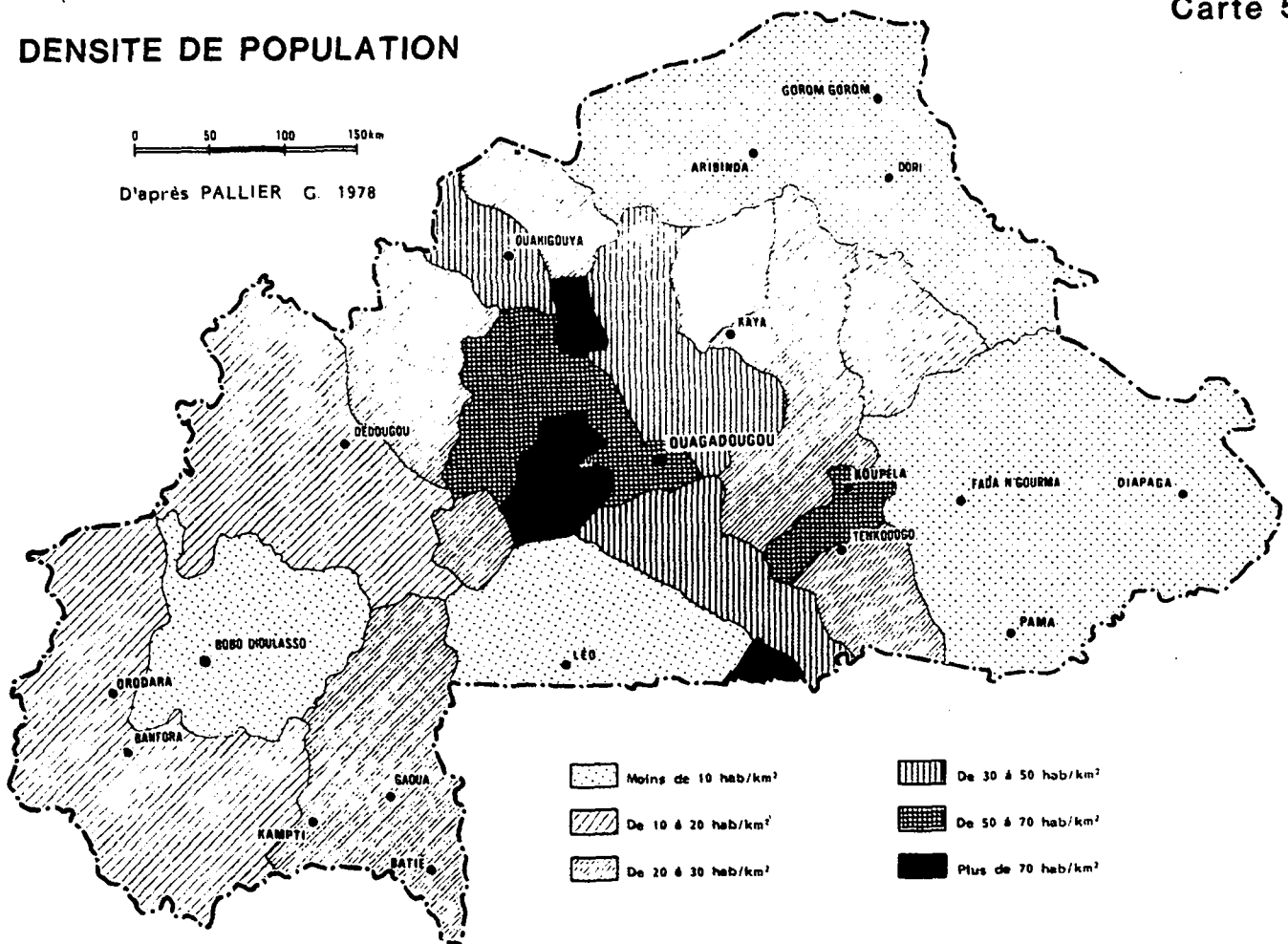


- Isohyètes moyennes en mm période 1961-1970
- Isothermes moyennes en ° centigrade période 1961-1970
- Zone sahélienne
- Zone nord-soudanienne
- Zone sud-soudanienne

DENSITE DE POPULATION



D'après PALLIER G. 1978



- Moins de 10 hab/km²
- De 10 à 20 hab/km²
- De 20 à 30 hab/km²
- De 30 à 50 hab/km²
- De 50 à 70 hab/km²
- Plus de 70 hab/km²

l'installation de barrages ; les superficies irriguées ne représentent aujourd'hui que 13 000 ha. Les autorités burkinabé semblent s'orienter vers le développement de petits périmètres irrigués à partir de l'eau souterraine.

6.2 - EVOLUTION ET LOCALISATION DE L'EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

L'alimentation en eau potable est, et restera, dans les 20 années à venir le principal problème posé aux responsables de l'évaluation et de la gestion des eaux souterraines. En l'an 2010 le Burkina Faso comptera 11 millions d'habitants et le taux d'urbanisation atteindra 44 %. Les prélèvements pour l'eau potable seront multipliés par 4, l'alimentation des centres urbains représentant à elle seule 61 % des prélèvements totaux. Les pompes à motricité humaine qui équipent actuellement les zones rurales ne seront plus en mesure de satisfaire une demande concentrée ; elles devront être remplacées progressivement par des moyens d'exhaure motorisés installés sur des forages capables de fournir un débit pérenne unitaire minimum de 100 m³/j. L'alimentation d'une petite ville de 5 000 habitants nécessitera le prélèvement par champ de captage de 500 m³/j (50 fois le débit maximum d'une pompe à main). Enfin le développement de l'irrigation à partir de l'eau souterraine, limité à la zone soudanienne sèche à forte densité de population, sera un facteur supplémentaire de consommation d'eau (12 000 m³/an/ha). En résumé, l'exploitation des ressources en eau sera concentrée dans la partie centrale du pays, en zone de socle.

La faisabilité des projets de distribution d'eau potable et d'irrigation suppose une connaissance préalable aussi précise que possible des ressources disponibles dans les aquifères discontinus. L'objectif prioritaire du système d'observation à installer dans le pays sera de fournir les données nécessaires au calcul de la recharge annuelle (système primaire) et au dimensionnement des champs de captage (système secondaire) en zone de socle. Le système d'observation pourra éventuellement être complété par la mise en place d'un réseau d'observation primaire sur le bassin gréseux le Bobo Dioulasso. Bien que les ressources en eau soient probablement très supérieures aux ressources humaines capables de les mettre en valeur, une estimation de l'ordre de grandeur de l'alimentation du bassin serait utile dans l'hypothèse d'un développement des grands périmètres irrigués à partir de forages à débit ponctuel élevé.

6.3 - LE SYSTEME D'OBSERVATION PRIMAIRE

6.3.1 - Délimitation des zones homogènes

Pour délimiter les zones à l'intérieur desquelles les fluctuations des niveaux piézométriques sont supposés comparables on prendra en compte 4 facteurs : la zone climatique, la lithologie du substratum, la présence d'une nappe dans le recouvrement, le contexte morphologique. La combinaison de ces facteurs aboutit à l'identification de 32 ensembles de facteurs homogènes parmi lesquels on sélectionne 18 ensembles jugés représentatifs d'une fraction du territoire suffisamment étendue, en mettant l'accent sur la partie centrale du pays (tableau 2).

6.3.2 - Choix des sites

Il existe actuellement au Burkina Faso 26 forages ou groupes de forages réalisés spécialement pour l'observation piézométrique : 11 stations comportant chacune 2 ou 3 piézomètres ont été installées dans le cadre du projet "Etude des ressources en eau des milieux fissurés" ; ces stations ont été implantées après étude détaillée du réservoir par photo-interprétation, géophysique électrique et essai de débit de longue durée (*). Le projet "Volta noire" a réalisé 15 piézomètres dans le socle et le bassin gréseux de Bobo Dioulasso. L'environnement hydrogéologique de ces ouvrages n'est pas connu (1 seul piézomètre par site). En conséquence, seuls les piézomètres implantés dans les grès pourront être intégrés dans le réseau national, la connaissance précise du réservoir dans un aquifère semi-continu étant moins impérative que dans les aquifères discontinus. En définitive, 13 piézomètres ou groupes de piézomètres, représentant chacun un contexte hydroclimatique différent, sont utilisables (cf. tableau 3 et carte n°3).

Pour implanter les 5 stations manquantes, on repèrera à partir de la documentation existante, en particulier les coupes de forages (7 000 coupes

(*) La description des stations d'observation piézométrique et climatique ainsi que les premières estimations de recharge annuelle sur les sites sont données dans le rapport "La recharge naturelle des aquifères de socle sous climats sahélien et soudanien" BRGM 86 BFA 177 EAU - 1986.

TABLEAU 2 - DEFINITION DES CONTEXTES HYDROGEOLOGIQUES ET

CLIMATIQUES REPRESENTATIFS

Zones climatiques	Lithologie substratum	Nappe dans le recouvrement	Morphologie	Représentativité et utilité	N° sites retenus cf. carte localisation	
zone sahélienne	granites	oui	plateau bas fond	non non		
		non	plateau bas fond	oui oui	1 2	
	schistes + roches vertes	oui	plateau bas fond	non non		
		non	plateau bas fond	oui oui	3 4	
	grès (non représentés)					
	granites	oui	plateau bas fond	oui oui	5 6	
		non	plateau bas fond	oui oui	7 8	
Zone soudanienne sèche	schistes + roches vertes	oui	plateau bas fond	oui oui	9 10	
		non	plateau bas fond	oui oui	11 12	
	grès	oui	plateau bas fond	non non		
		non	plateau bas fond	oui oui	13 14	
	granites	oui	plateau bas fond	oui oui	15 16	
		non	plateau bas fond	non non		
	Zone soudanienne humide	schistes + roches vertes	oui	plateau bas fond	oui oui	17 18
			non	plateau bas fond	non non	
grès		oui	plateau bas fond	non non		
		non	plateau bas fond	non non		

Tableau 3 - Sites proposés pour l'installation des stations
d'observation piézométrique et climatique du réseau primaire

N°	Site	Zone climatique	Lithologie substratum	Nappe recouvrement	Morphologie	Nb piézo-mètres	Station climato	Remarques
1	Gorom	sahélienne	granites	non	plateau	2	en place	MF1 (1)
2	Katchari	sahélienne	granites	non	bas fond	2	en place	MF1
3	Aribinda	sahélienne	sch. + RV	non	plateau	3	en place	MF1
4	(Gorovol)	sahélienne	sch. + RV	non	bas fond	(2)	à installer	
5	Silmissin	soudan. sec	granites	oui	plateau	3	en place	MF1
6	Sanon	soudan. sec	granites	oui	bas fond	8	en place	MF2
7	(Sapouy)	soudan. sec	granites	non	plateau	(2)	à installer	
8	Basseko	soudan. sec	granites	non	bas fond	2	en place	MF1
9	Tibou	soudan. sec	RV	oui	plateau	2	en place	MF1
10	(Didyr)	soudan. sec	sch. + RV	oui	bas fond	(3)	à installer	
11	(Kaya)	soudan. sec	sch. + RV	non	plateau	(2)	à installer	
12	Barogo	soudan. sec	sch. + RV	non	bas fond	2	en place	MF1
13	Bondokuy	soudan. sec	grès	non	plateau	1	-	VN (2)
14	Leny	soudan. sec	grès	non	bas fond	1	-	VN
15	Niangoloko	soudan. hum	granites	oui	plateau	3	en place	MF1
16	(Diébougou)	soudan. hum	granites	oui	bas fond	(3)	à installer	
17	Nafona	soudan. hum	sch. + RV	oui	plateau	2	en place	MF1
18	Sidéradougou	soudan. hum	sch. + RV	oui	bas fond	2	en place	

(1) Milieux Fissurés ; (2) Volta Noire

disponibles) les secteurs qui réunissent les facteurs recherchés. Parmi les nombreuses possibilités on sélectionnera celles qui sont d'un accès facile. Une visite sur le terrain permettra de délimiter des secteurs de 1 km de diamètre environ sur lesquels seront réalisées les études détaillées (cf. paragraphe 3.1.3.1). Sur la carte n°3 la localisation des 5 secteurs à prospecter est proposée.

6.3.3 - Matériel de mesure

Les stations "milieux fissurés" sont équipées de limnigraphes, thermographes et pluviographes. Cet appareillage devra être progressivement remplacé par des systèmes de mesure à enregistrement sur mémoire magnétique.

6.3.4 - Réseau d'observation hydrologique

Le système primaire sera complété par l'installation d'une station de jaugeage sur le Mouhoun (ex Volta noire) à la sortie du bassin gréseux et par des jaugeages mensuels sur les sources de Bobo Dioulasso.

6.4 - LE SYSTEME D'OBSERVATION SECONDAIRE

L'Office National des Eaux et de l'Assainissement (ONEA) a réalisé une vingtaine de captages pour alimenter en eau potable des centres secondaires du pays (cf. carte n°3). Ces ouvrages équipés de compteurs d'eau sont généralement accompagnés de un ou plusieurs forages réalisés spécialement pour l'observation des niveaux. Bien que les volumes journaliers exhaurés par les stations de pompage soient actuellement modestes, il est indispensable d'assurer dès maintenant un suivi régulier des fluctuations piézométriques ; l'acquisition d'historiques de débit et de pression permettra d'une part de faire face à l'accroissement de la demande et d'autre part apportera des données précieuses sur les conditions d'exploitation des aquifères de socle.

Les quartiers périphériques de Ouagadougou sont desservis en eau potable par des postes d'eau autonomes dont le débit en saison sèche peut être supérieur à 100 m³/j. Il est indispensable de placer à proximité de chacun des 14 ouvrages de production un piézomètre double pour l'observation simultanée des niveaux dans le socle et dans les altérations.

Enfin l'ONEA projette de fournir un complément de débit au réseau urbain à partir de champs de captage situés sur le socle à proximité de Ouagadougou. Les volumes à prélever sont très importants par rapport aux ressources présumées de l'aquifère. Un suivi strict des niveaux sur les 20 piézomètres mis en place dans les 3 champs de captage est nécessaire pour valider les hypothèses qui ont été retenues lors de l'évaluation des ressources disponibles.

6.5 - ESTIMATION DU COUT DU SYSTEME D'OBSERVATION DES EAUX SOUTERRAINES

Dans les tableaux ci-après sont détaillés les investissements à consentir pour compléter le réseau primaire existant et le coût du suivi de l'ensemble du réseau.

Les investissements comprennent la réalisation de 12 piézomètres sur les 5 nouveaux sites aménagés, l'installation de 19 limnigraphes type MADO (18 piézomètres contrôlés + station de pompage sur la Volta noire) et de 16 stations climatiques type CAA sur les sites en zone de socle uniquement, l'achat d'un véhicule tout terrain et de matériel de campement.

Pour le calcul du coût de fonctionnement on a admis que le relevé des mesures serait effectué par un seul technicien de l'Administration centrale. Cette option se justifie par la faible fréquence des tournées (2 par an) et la nécessité d'affecter à ce poste un agent possédant une bonne formation en informatique.

L'utilisation d'appareils de mesure à mémoire permet de réduire le coût annuel du fonctionnement à 3,5 MFCFA. En contrepartie, les investissements à consentir pour l'achat de ce matériel, le plus souvent acquis dans le cadre de projets financés par l'Aide étrangère, sont assez lourds (95 MFCFA). En admettant que l'Administration prenne en charge le renouvellement des installations, le coût annuel total du système primaire à imputer au budget de l'Etat s'élève à 14,7 MFCFA.

L'estimation du coût du réseau secondaire à la charge de l'ONEA ne présente pas d'intérêt : la réalisation des piézomètres est intégrée dans l'étude hydrogéologique préalable et la mesure des niveaux et des débits est assurée par le technicien chargé du fonctionnement de la station de pompage. A titre indicatif l'amortissement annuel d'un piézomètre représente moins de 2 % du coût de l'eau produite par un forage fournissant 100 m³/j.

ESTIMATION DU COUT DU SYSTEME D'OBSERVATION
DES EAUX SOUTERRAINES

Désignation	Quantité	Prix unitaires (FCFA)	Prix totaux (FCFA)	Durée amortissement (années)	Coût annuel (FCFA)
A. INVESTISSEMENTS					
A1 Piézomètres					
1. Etude hydrogéologique des sites et contrôle des travaux de forage	5	800 000	4 000 000	50	80 000
2. Forage dans le socle prof. 60 m tube PVC 4"1/2 y compris essais de débit	12	1 750 000	21 000 000	50	420 000
A2 Appareils de mesure					
1. Sonde à sifflet	2	143 000	286 000	5	57 000
2. Limnigraphe à stockage sur mémoire magnétique (type MADD)	19	1 100 000	20 900 000	10	2 090 000
3. Station climatique à stockage sur mémoire magnétique (type CAA)	16	6 200 000	74 400 000	10	7 440 000
A3 Logistique					
1. Véhicule tout terrain TOYOTA Hilux	1	4 500 000	4 500 000	5	900 000
2. Matériel de campement	1	575 000	575 000	3	192 000
TOTAL INVESTISSEMENTS			125 661 000		11 179 000

Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaires (FCFA)	Prix total annuel (FCFA)
B. FONCTIONNEMENT				
B1 Personnel				
1. Technicien de l'Administration centrale (relevé des mesures)				
- charges salariales	mois	1,5	100 000	150 000
- indemnités déplacements	J	30	5 000	150 000
2. Technicien de l'Administration centrale (service informatique et gestion des fichiers)				
- charges salariales	mois	12	100 000	1 200 000
3. Chauffeur				
- charges salariales	mois	1,5	50 000	75 000
- indemnités déplacements	J	30	2 000	60 000
B2 Consommables				
1. Véhicule				
- carburants, lubrifiants	km	10 000	55	550 000
- entretien, réparations	an	F	100 000	100 000
2. Matériel de mesures				
- entretien, réparations	an	F	950 000	950 000
3. Informatique				
- fournitures, entretien	an	F	250 000	250 000
TOTAL FONCTIONNEMENT				3 485 000

SELECTION DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

EVALUATION DE LA RECHARGE

- BRGM (1986) - La recharge naturelle des aquifères de socle sous climats sahélien et soudanien. Rapport BRGM 86 BFA 177 EAU.
- ROCHE P.A., THIERY D. (1984) - Simulation globale des bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDENIA. Rapport BRGM 84 SGN 337 EAU.
- THIERY D. (1986) - Analyse d'une longue série piézométrique au Burkina Faso. BRGM note technique n°86/14.
- THIERY D. (1988) - Forecast of changes in piezometric levels by a lumped hydrological model. Journal of Hydrology 97 : 129-148.
- THIERY D. (1988) - Calculation of natural aquifer recharge from rainfall with a unsaturated zone model solving Richard's equation.
- THIERY D. (1988) - Modélisation hydrologique semi-globale par simulation couplée des variations de stock en eau dans la zone non saturée et de l'évolution des niveaux piézométriques. Communication 4è symposium international sur l'application des systèmes à la gestion des ressources en eau. Rabat. Maroc.

CONCEPTION INSTALLATION DES RESEAUX

- FORKASIEWICZ J., MARGAT J. (1967) - Création d'un réseau général de piézomètres permanents en France. Note préliminaire BRGM DS 67 A 145.
- MARGAT J. (1972) - Evaluation des ressources hydrauliques. Méthodes d'implantation d'un réseau piézométrique national. Rapport BRGM 2 SG 126 AME.
- MARGAT J. (1986) - Suivi des niveaux piézométriques. Session de formation internationale : évaluation, aménagement et gestion des ressources en eau. CEFIGRE 86/ER 08.

RESEAUX PIEZOMETRIQUES NATIONAUX

BURKINA FASO

- IWACO (1988) - Création d'un réseau piézométrique national. Rapport n°60.235/7.

MALI

- MILCENT A. (1987) - Etude et suivi des nappes d'eau souterraine du Mali dans la zone du delta intérieur du Niger. Rapport BRGM 87 MLI 090 EAU.

NIGER

BRGM-CIEH (1986) - Création d'un réseau piézométrique national au Niger.
Rapport BRGM.

TCHAD

BRGM (1987) - Etude des nappes d'eau souterraine au Tchad. Rapport final.
Rapport BRGM 87 TCD 156 EAU.

TOGO

BRGM (1982) - Surveillance piézométrique et chimique des nappes du bassin sédimentaire côtier du Togo. Synthèse des connaissances hydrogéologiques. Rapport BRGM 82 AGE 036.

Nations Unies (1984) - Stratégie d'aménagement des eaux. Rapport technique d'ensemble. Reconnaissance hydrogéologique entre 7° et 9° de latitude nord. DP/LIN/TOG 75 008/2. Togo.

A N N E X E 1

ETAT ACTUEL DES RESEAUX

PIEZOMETRIQUES

DES PAYS MEMBRES DU CIEH

Parallèlement à l'élaboration d'un document-guide sur la conception et l'installation des systèmes d'observation des eaux souterraines, il a paru intéressant de faire le point sur les réseaux d'observation mis en place ou prévus dans les pays membres du CIEH. A cet effet, un questionnaire a été envoyé par le CIEH aux Directions en charge de l'Hydraulique des 13 pays membres. Sept pays ont fourni des réponses, en général incomplètes, aux questions posées. Ces informations ont été dans la mesure du possible complétées par une étude de la documentation existant sur le sujet au BRGM (cf. tableaux ci-après).

L'analyse des informations recueillies appelle les remarques suivantes :

- Aucun pays ne dispose actuellement d'un système centralisé de collecte et de diffusion des données issues des réseaux d'observation : le relevé et l'archivage des mesures est assuré en général par des services relevant de différents Ministères (Hydraulique, Agriculture, Mines, Sociétés de distribution d'eau).
- Cinq pays (Burkina, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal) ont répertoriés les points d'eau à utiliser comme piézomètre. Les réseaux ainsi définis sont en général surabondants et leur conception semble plus guidée par le souci de "couvrir le pays" que par l'identification préalable des problèmes pratiques que devront résoudre les responsables de la gestion des eaux.
- Trois pays (Burkina, Niger, Sénégal) ont conçu une base de données informatisée qui permettra le stockage et le traitement des mesures piézométriques et climatologiques.
- Les piézomètres sont en général réalisés dans le cadre de projet sur financement étranger (PNUD, FAC, BID, Pays Bas). A la fin du projet, les ouvrages et les appareils de mesure sont remis à l'Administration. Les Services nationaux manquent souvent de moyens logistiques pour assurer un relevé régulier des mesures.
- Seuls les réseaux piézométriques secondaires installés sur les champs de captage alimentant en eau potable des grandes villes de la côte (Nouadhibou, Nouakchott, Dakar, Abidjan, Lomé, Douala) ou les exploitations minières (ARLIT) sont suivis régulièrement.

PAYS : CAMEROUN

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION	PROJETS DE RESEAUX
<ul style="list-style-type: none"> • <u>SOCLE PRECAMBRIEN</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>SOCLE PRECAMBRIEN</u> - ZONE DE MAROUA 	?	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>CRETACE SUPERIEUR</u> - GAROUA - MANFE - BANUSSO - DJEREM - NBERE, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>CRETACE SUPERIEUR</u> - BASSIN DE GAROUA 	?	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>PALEOCENE</u> - BASSIN DE DOUALA 			
<ul style="list-style-type: none"> • <u>PLIOCENE INFERIEUR</u> - BASSIN DU TCHAD - BASSIN DE DOUALA 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>PLIOCENE INF. ET SUP.</u> - BASSIN DE DOUALA 	?	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>PLIOCENE SUPERIEUR</u> - BASSIN DE DOUALA 	(BRGM puis SNEC)		
<ul style="list-style-type: none"> • <u>ALLUVIONS QUATERNAIRES</u> - BASSIN DU TCHAD - BASSIN DE GAROUA - BASSIN DE DOUALA 			
		TOTAL : ?	

PAYS : CONGO

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	PROJETS DE RESEAUX
<ul style="list-style-type: none">• <u>PRECAMBRIEN</u><ul style="list-style-type: none">- SOCLE CRISTALLIN- SERIES SCHISTO-CALCAIRE- SERIES GRESEUSES • <u>CRETACE SUPERIEUR</u><ul style="list-style-type: none">- VALLEE DU CONGO (Nord de Brazzaville)- NORD DU CONGO- BASSIN COTIER • <u>MIOCENE A PLIOCENE</u><ul style="list-style-type: none">- POINTE NOIRE • <u>GRES DES PLATEAUX BATEKES</u> • <u>QUATERNAIRE</u><ul style="list-style-type: none">- CORDONS LITTORAUX SABLEUX (POINTE NOIRE)- ALLUVIONS CUVETTE CONGOLAISE	<p>PAS D'INFORMATIONS</p>	

PAYS : TCHAD

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION				PROJETS DE RESEAUX
		Piézo	Forages non expl	Forages expl.	Puits	
<ul style="list-style-type: none"> . <u>SOCLE PRECAMBRIEN</u> . <u>PRIMAIRE</u> <ul style="list-style-type: none"> - CAMBRIEN - CARBONIFERE . <u>CRETACE</u> <ul style="list-style-type: none"> - GRES DE NUBIE . <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> (OLIGOCENE-MIOCENE ?) . <u>PLIOCENE INFERIEUR</u> <ul style="list-style-type: none"> - BASSIN DU LAC TCHAD - NAPPE CAPTIVE . <u>PLIOCENE SUPERIEUR</u> <ul style="list-style-type: none"> - BASSIN DU LAC TCHAD - NAPPE LIBRE . <u>ALLUVIONS QUATERNAIRES</u> <ul style="list-style-type: none"> - BASSIN DU LAC TCHAD 	<p>Le projet BID 1986 (PIEZOMETRIE DU SALANAT KANEM ET BATHA A PARTIR DE 1960 avec interruptions) comprend 68 points d'observations répartis dans les 3 aquifères ci-dessous</p> <ul style="list-style-type: none"> . <u>SOCLE PRECAMBRIEN</u> . <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> . <u>ALLUVIONS QUATERNAIRES</u> 					
		14	7		47	
		TOTAL : 68				

PAYS : BURKINA FASO

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION				PROJETS DE RESEAUX	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION			
		Piézo	Forages non expl	Forages expl.	Puits		Piézo	Forages non expl	Forages expl.	Puits
<ul style="list-style-type: none"> . <u>PRECAMBRIEN</u> - SOCLE CRISTALLIN - GRES DU BASSIN DE BOBO DILOULASSO - FACIES CARBONATES DE L'ODALAN - <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> . GONDO 	<ul style="list-style-type: none"> . <u>PRECAMBRIEN</u> - SOCLE CRISTALLIN . Ouagadougou (CIEH et IWACO depuis 1978) . Projet MILIEU FISSURE (ONPF depuis 1985) . Projet YATENGA (ONPF) . Projet PEDI (Depuis 1983) . Projet FADA (KFW) . Projet BILAN D'EAU (AEP CENTRES SECONDAIRES) - GRES DU BASSIN DE BOBO-DILOULASSO . Projet VOLTA NOIRE depuis 1984 	1		?		Le projet IWACO de réseau national comprend 172 points : . <u>PRECAMBRIEN</u> - SOCLE CRISTALLIN - GRES DE BOBO - FACIES CARBONATES DE L'ODALAN . <u>CONTINENTAL TERMINAL</u>	27	30	99	16
		30		?						
		9		?						
				80						
		TOTAL : > 120								

PAYS : GABON

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION			PROJETS DE RESEAUX
		Piézo	Forages	Puits	
<ul style="list-style-type: none"> . <u>PRECAMBRIEN</u> - SOCLE CRISTALLIN - SERIE SCHISTO-CALCAIRE - SERIE GRESEUSE . <u>JURASSIQUE A PERMIEN</u> . <u>NEOCONIEN A APTIEN</u> . <u>APTIEN A CRETACE SUPERIEUR</u> - LIBREVILLE . <u>PALEOCENE A MIOCENE</u> . <u>MIOCENE SUPERIEUR A PLIOCENE</u> - MAYUNBA . <u>GRES DES PLATEAUX BATEKES</u> . <u>QUATERNAIRE</u> - CORDONS LITTORAUX SABLEUX PORT GENTIL MAYUNBA 	<p>Le projet CIEH 1975 (puis DGE à partir de 1986) comprend 4 piézomètres dont 1 équipé d'un limnigraphe dans le :</p> <p>. <u>CRETACE SUPERIEUR</u></p> <p>- POINTE DENIS (LIBREVILLE)</p>	4			
		TOTAL : 4 POINTS			

PAYS : SENEGAL

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION				PROJETS DE RESEAUX
		PIEZO.	Forages non expl.	Forages expl.	Puits	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>PRECAMBRIEN</u> - SOCLE CRISTALLIN Région de KEDOUGOU - GRES DE BASSARI • <u>ROCHES VOLCANIQUES</u> Basalte de la presqu'île du Cap Vert • <u>CRETACE SUPERIEUR</u> HORST DE NDIAS • <u>PALEOCENE-EOCENE</u> CAYOR • <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> - FERLO - CASAMANCE • <u>OLIGO-MIOCENE</u> - CASAMANCE • <u>ALLUVIONS QUATERNAIRES</u> - SAINT LOUIS - CAP VERT - SALOUM - BASSE CASAMANCE - VALLEE DU SENEGAL 	<p>Le réseau du projet PNUD comprend 333 points répartis comme suit :</p> <p>Le réseau du projet BID comprend 21 points répartis comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>MAPPE INFRA-BASALTIQUE</u> du Cap Vert (AEP Dakar) • <u>CRETACE SUPERIEUR</u> • <u>PALEOCENE</u> NBOUR POUT SEBIKOTANE • <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> - CASAMANCE • <u>OLIGO-MIOCENE</u> - CASAMANCE • <u>ALLUVIONS QUATERNAIRES</u> - SAINT LOUIS - CAP VERT <p>Le réseau du projet USAID/OMVS comprend 200 à 300 points répartis dans la :</p> <ul style="list-style-type: none"> - VALLEE DU SENEGAL 	6	1	8	4	RESEAU NATIONAL BID
4	3	6	1	57	21	
		35	28		40	
		13	4			
		7	2			
		58	35			
		35	10			
		TOTAL : 530 à 630 points				

PAYS : TOGO

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION				PROJETS DE RESEAUX
		PIEZO.	Forages non expl.	Forages expl.	Puits	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>SOCLE ANTECAMBRIEN</u> Nappes captives 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>SOCLE ANTECAMBRIEN</u> jusqu'en 1985 par le BNRM <p>Projet FAC (1980 à 1986) de 27 piézomètres (avec 6 limnigraphes) dans les</p>	?				
<ul style="list-style-type: none"> • <u>NAPPES DU BASSIN COTIER</u> <ul style="list-style-type: none"> - Sables du CRETACE SUPERIEUR - Calcaires du PALEOCENE - CONTINENTAL TERMINAL - Sables littoraux 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>NAPPES DU BASSIN COTIER</u> <ul style="list-style-type: none"> - Sables du CRETACE SUPERIEUR - Calcaires du PALEOCENE - CONTINENTAL TERMINAL - Sables littoraux Biseau salé 	7				
		5				
		12				
		1				
		2				
		TOTAL : > 27				

PAYS : MALI

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION				PROJETS DE RESEAUX
		PIEZO.	Forages non expl.	Forages expl.	Puits	
<ul style="list-style-type: none"> • <u>PRECAMBRIEN</u> - SOCLE CRISTALLIN - ADRAR DES IFOGHAS - SOCLE LIBERO-IVOIRIEN - GRES DE BAMAKO, KOUTIAL, BANDIAGARA • <u>CAMBRIEN</u> - SCHISTES DU KAARTA • <u>CAMBRIEN A CARBONIFERE</u> - BASSIN DE TAOUDENI • <u>CONTINENTAL INTERCALAIRE</u> - FOSSE DE NARA - AZAQUAD • <u>Eocene inferieur-Cretace</u> • <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> - GONDO - DELTA INTERIEUR - BASSIN DE TAOUDENI • <u>QUATERNAIRE</u> - DELTA INTERIEUR - ERG DE TOMBOUCTOU - SABLES DE NARA - VALLEE DU SENEGAL 	<p>Le réseau du projet PNUD (1981 à 1989) comprend 200 points d'observations (dont 18 limnigraphes) répartis sur tous les aquifères répertoriés.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>PRECAMBRIEN</u> - GRES DE KOUTIALA - GRES DE BANDIAGARA • <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> - DELTA INTERIEUR • <u>QUATERNAIRE</u> - ALLUVIONS DE LA VALLEE DU SENEGAL 	<p>4</p> <p>?</p> <p>10</p> <p>?</p>	<p>(Projet MALI AQUA VIVA)</p> <p>(Projet CARITAS)</p> <p>avec limnigraphes (projet BID/BRGM 1986-1987)</p> <p>(Projet USAID/OMVS)</p>			
		TOTAL : > 225				

PAYS : NIGER

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	Nbre DE POINTS			PROJETS DE RESEAUX	Nbre DE POINTS			
		Piézo	Forages	Puits		Piézo	Forages	Puits	
					Le projet de réseau national BID/BRGM comprend 477 points (coût 200 à 250 M FCFA avec 10 stations automatiques)				
<ul style="list-style-type: none"> . <u>SOCLE PRECAMBRIEN</u> - LIPTAKO GOURMA - DAMAGARAM MOUNIO - AIR 	<ul style="list-style-type: none"> . <u>SOCLE</u> - NIAMEY (depuis 1986) 			10	<ul style="list-style-type: none"> . <u>SOCLE</u> - LIPTAKO NIAMEY - DAMAGARAM 		30		
<ul style="list-style-type: none"> . <u>NAPPES DES FORMATIONS PRIMAIRES</u> - OUEST DE L'AIR - BASSIN DU DJADO . <u>CRETACE SUPERIEUR</u> 	<ul style="list-style-type: none"> . <u>NAPPES DES FORMATIONS PRIMAIRES</u> - OUEST DE L'AIR (SONICHAR depuis 1981) 			100	<ul style="list-style-type: none"> . <u>NAPPES DES FORMATIONS PRIMAIRES</u> - OUEST DE L'AIR (ARLIT) . <u>CRETACE SUPERIEUR</u> - SENONIEN (SE TAHOUA) . <u>CONTINENTAL INTERCALAIRE</u> - GRES D'AGADEZ - GRES DU TEGAMA 		115	5	
<ul style="list-style-type: none"> . <u>CONTINENTAL INTERCALAIRE</u> - NAPPE DES GRES D'AGADEZ - NAPPE DES GRES DU TEGAMA 	<ul style="list-style-type: none"> . <u>CONTINENTAL INTERCALAIRE</u> - NAPPE DES GRES D'AGADEZ (BRGM - DH AG) 			8			65	1	
<ul style="list-style-type: none"> . <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> 	<ul style="list-style-type: none"> . <u>CONTINENTAL TERMINAL (MRAH)</u> 			57	<ul style="list-style-type: none"> . <u>CONTINENTAL TERMINAL</u> 		54	8	
<ul style="list-style-type: none"> . <u>QUATERNAIRE</u> - DALLOL MAOURI - DALLOL BOSSO - GOULBI MARADI - TARKA - KORAMAS - GOGO - TELOUA - NAPPE DE BILMA - NAPPES DU MANGA 	<ul style="list-style-type: none"> . <u>QUATERNAIRE</u> - GOULBI MARADI - TELOUA 			11	<ul style="list-style-type: none"> . <u>QUATERNAIRE</u> - DALLOL MAOURI - DALLOL BOSSO 		17	38	79
				7	<ul style="list-style-type: none"> - NAPPES DU MANGA 		27	38	
		TOTAL : 193			TOTAL	71	275	131	

PAYS : BENIN

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION	PROJETS DE RESEAUX
<ul style="list-style-type: none"> . <u>SOCLE PRECAMBRIEN</u> - NAPPES CAPTIVES . <u>BASSIN DE KANDI</u> - CONTINENTAL INTERCALAIRE . <u>BASSIN COTIER</u> - CRETACE - PALEOCENE - CONTINENTAL TERMINAL - SABLES LITTORAUX 	<p>Installation d'un réseau piézométrique dans le bassin côtier. En cours (PNUD)</p>	<p align="center">?</p>	
		<p align="center">TOTAL : ?</p>	

PAYS : REPUBLIQUE CENTRE-AFICAINE

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	PROJETS DE RESEAUX	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION			
			Piézo	Forages non expl	Forages expl.	Puits
<p>• <u>PRECAMBRIEN</u></p> <p>- SOCLE CRISTALLIN ET CRISTALLOPHYLLIEN</p> <p>- FORMATIONS SCHISTO-GRESEUSES (M'BAIKI, BAKOUMA, VALLEES DU KOTTO, MBATI)</p> <p>- FORMATIONS CARBONATEES (BANGUI, BAKOUMA, KEMBE, VALLEES DE L'OUBANGUI, DU CHINKO, BAKALE...)</p> <p>• <u>SECONDAIRE</u></p> <p>- GRES DU BASSIN DE CARNOT</p> <p>- GRES DU BASSIN DE QUADA</p> <p>• <u>CONTINENTAL: TERMINAL</u></p> <p>• <u>ALLUVIONS OU DEPOTS QUATERNAIRES</u></p>		REGION DE L'OMBELLA ET DU MPOKO		10 3 à 6 limnigraphes		
			TOTAL : 10			

PAYS : COTE D'IVOIRE

AQUIFERES REPERTORIES	RESEAUX EXISTANTS	NOMBRE DE POINTS D'OBSERVATION	PROJETS DE RESEAUX
<u>NAPPES CAPTIVES DU SOCLE PRECAMBRIEN</u> <u>NAPPES DU BASSIN COTIER</u> - BAS PLATEAUX ET CORDONS SABLEUX - CONTINENTAL TERMINAL	- NAPPE D'ABIDJAN	?	
		TOTAL : ?	

A N N E X E 2

NOTES TECHNIQUES

1. Rappel des conditions et facteurs régissant la variation des niveaux piézométriques
2. Evaluation de la recharge par le modèle global GARDENIA

1 - RAPPEL DES CONDITIONS ET FACTEURS REGISSANT LA VARIATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES (1)

La variation du niveau piézométrique, ou régime des fluctuations d'une nappe en un point donné, est déterminée à la fois :

- par des conditions "passives" généralement permanentes, liées aux caractéristiques physiques du milieu aquifère et à la position du point considéré dans le système aquifère, donc par rapport aux limites,
- et par des facteurs actifs ou dynamiques constitués par les variations des conditions aux limites, c'est-à-dire en pratique par les variations des flux entrant et sortant aux limites du système aquifère, et par les variations des niveaux (ou leur stabilité) à ces limites, en y comprenant la surface libre.

Ces conditions et ces facteurs peuvent être, dans diverses mesures, modifiés et perturbés par l'action humaine.

1.1. - Conditions passives naturelles

Ce sont tous les caractères physiques -hydrogéologiques- essentiellement- qui déterminent la sensibilité aux propagations d'influence :

1.1.1. - Les unes sont relatives à l'ensemble du système aquifère :

- Sa dimension et sa configuration qui, toutes choses égales d'ailleurs, déterminent sa plus ou moins grande "inertie", c'est-à-dire sa réactivité globale aux propagations d'influence.
- La diffusivité moyenne du milieu aquifère, liée essentiellement à sa constitution lithologique et à l'épaisseur du réservoir. Une influence se propage plus rapidement (plus exactement une différence de niveau donnée se propage plus loin, en un temps donné) à partir d'une limite, dans un aquifère de forte diffusivité que dans un aquifère de faible diffusivité.
- Son degré de réceptivité des influences aux limites, c'est-à-dire la proportion des limites "ouvertes", la qualité de la liaison hydraulique éventuelle avec des cours ou plans d'eau de surface et surtout la mesure dans laquelle la nappe est libre ou plus ou moins captive.

(1) Extrait de "Evaluation des ressources hydrauliques. Méthode d'implantation d'un réseau piézométrique national". J. Margat, 1972. Rapport BRGM n° 72 SGN 126 AME.

On sait qu'à transmissivité de l'aquifère égale la diffusivité est beaucoup plus faible dans le cas d'une nappe libre que si la nappe est captive, puisque l'emmagasinement est d'un ordre de grandeur très supérieur (10 à 100 fois). Les réservoirs à nappe captive sont donc beaucoup plus "réactifs" aux transmissions d'influence. Mais inversement ils sont peu ouverts à l'action des facteurs actifs et variables externes, alors que les réservoirs à nappe libre sont "découverts" et réceptifs par toute leur surface aux facteurs dynamiques externes.

1.1.2. - Les autres sont les caractères locaux du réservoir particulier au site d'implantation du piézomètre :

- La position (localisation) du piézomètre dans le système aquifère, donc sa distance par rapport aux limites. S'agissant de nappes libres, la distance aux limites à potentiel imposé est notamment un critère essentiel conditionnant localement le régime de variations de niveau : toutes choses égales, l'amplitude des fluctuations piézométriques sera toujours plus faible au voisinage de ces limites (par exemple à proximité d'un cours d'eau soutenant une nappe libre étendue) et elle s'accroîtra en s'éloignant (domaines d'interfluves).
- Le degré d'homogénéité de la couche aquifère, et dans le cas d'un système multicouche -au moins localement- la position de la partie "captante" du piézomètre par rapport à la coupe lithologique. Dans une couche hétérogène à strates plus conductrices comme il s'en présente souvent, un piézomètre ouvert seulement dans une zone de faible diffusivité sera moins sensible que s'il est ouvert dans une strate conductrice.
- Le coefficient d'emmagasinement local de l'aquifère, dans le cas des nappes libres (paramètre assimilable alors à la porosité efficace). En règle générale, à conditions d'alimentation (infiltration efficace) égales, les amplitudes de variations de niveau sont en fonction inverse de l'emmagasinement.
- La diffusivité locale de l'aquifère, qui peut s'écarter plus ou moins de la diffusivité moyenne d'ensemble ; en particulier la diffusivité au voisinage de limites "ouvertes", par exemple de berges de cours d'eau (problème du colmatage).
- La profondeur (moyenne) du niveau piézométrique, dans le cas d'une nappe libre, c'est-à-dire la hauteur moyenne de la zone non saturée, milieu conducteur de l'infiltration.
- Enfin les paramètres du milieu non saturé qui régissent les transferts d'eau dans cette zone, donc conditionnent le flux d'eau qui, depuis la surface du sol, parvient à la surface libre et la traverse (ce qui s'exprime à petite échelle et plus statistiquement par la transformation de la "pluie utile" en "infiltration efficace").

Ces paramètres sont des variables, et plutôt que la perméabilité verticale, variant selon la teneur en eau, c'est la relation entre la succion et la teneur en eau qui, on le sait, caractériserait mieux la "capacité d'infiltration" d'un sol.

Ces paramètres, de même que la formulation analytique de la dynamique des transferts d'eau en milieu non saturé, sur laquelle on reviendra plus loin, n'ont cependant de sens qu'à grande échelle (ordre métrique). Aussi devra-t-on se contenter pour répondre à l'objectif pratique limité considéré ici -définir des zonalités de facteurs du régime- d'établir empiriquement un classification qualitative des sols, basée dans la mesure du possible sur des données descriptives, complétant l'évaluation de la hauteur moyenne de la zone non saturée (de constitution lithologique semblable à celle de la zone saturée).

1.2. - Facteurs actifs naturels

Par définition, les niveaux piézométriques fluctuent parce que la dynamique d'une nappe souterraine est commandée par des facteurs variables : variation des flux entrant et sortant, variation des potentiels aux limites liée -mais sans proportionnalité- à la précédente. En outre, une nappe souterraine peut être sensible à des influences de transmission de pression pure (c'est-à-dire sans transfert d'eau appréciable) : c'est surtout le cas des nappes captives sujettes aux effets des variations barométriques (pression atmosphérique), des fluctuations de plan d'eau superficiel (marées), ou d'ondes de pression d'origine tectonique (séismes) ; ces phénomènes sont toutefois secondaires du point de vue des buts d'un réseau piézométrique général et constituent plutôt des effets "parasites", qu'il faut déceler surtout pour procéder à des corrections.

L'agent le plus variable, donc le facteur dynamique prépondérant du régime naturel de fluctuation des niveaux, est l'alimentation des nappes souterraines libres (1). On sait que les sorties d'eau d'un réservoir aquifère s'effectuent surtout à travers des limites à charge (potentiel) peu variable, parfois quasi constante, qu'il s'agisse d'émergences à flux concentré (sources, drainage par des cours d'eau) ou d'émission d'eau à travers des épontes semi-perméables) ou d'ascension capillaire au profit de la zone non saturée soumise à l'évaporation (on reviendra plus loin sur ce dernier facteur).

Les fluctuations de niveau d'une nappe résultent précisément du rôle amortisseur du réservoir entre les flux entrant discontinus et irréguliers (à charge variable) et les flux sortant continus et plus réguliers (à charge peu variable).

(1) L'alimentation des nappes captives, lorsqu'elle n'est pas négligeable, provient essentiellement de transferts d'eau des nappes libres (soit des parties libres, le plus souvent périphériques, des réservoirs monocouches, soit des couches supérieures des réservoirs multicouches), et elle est quasi permanente, de sorte qu'elle n'est généralement pas génératrice de fluctuations de charge bien sensibles.

En d'autres termes, les facteurs de recharge des nappes souterraines libres sont le moteur essentiel des fluctuations piézométriques alors que les facteurs de décharge ont plutôt dans l'ensemble un effet stabilisateur, ou ne constituent qu'un moteur accessoire et de portée locale.

1.2.1. - Facteurs de recharge

L'alimentation des nappes libres -ou "infiltration efficace"- dépend elle-même des précipitations et des variables physiques qui régissent d'une part le ruissellement, d'autre part l'évapotranspiration à la surface du sol et dans la partie supérieure de la zone non saturée. On sait que la zone non saturée assure le transfert de l'eau de pluie qu'elle reçoit jusqu'à la surface libre d'une nappe en amortissant plus ou moins (étalement et retard) la variation, aléatoire à l'échelle journalière, du flux entrant. L'alimentation d'une nappe libre et la recharge qu'elle détermine sont donc relativement plus régulières et continues que les précipitations. Mais ces dernières sont seules directement et facilement observables.

L'établissement d'une relation analytique entre les précipitations et l'infiltration efficace, tenant compte des variables météorologiques commandant l'évaporation des conditions de surface et des diverses variables physiques régissant le transfert d'eau en milieu non saturé, est théoriquement concevable. Les recherches à ce sujet ont déjà apporté des résultats positifs. Mais les relations qu'il serait possible de formuler conserveraient une portée très locale, sinon ponctuelle, tout en exigeant la mesure (encore difficile) de nombreux paramètres, selon des pas de temps courts (nécessité d'enregistrement). Il ne peut donc être question d'envisager en pratique d'établir par cette voie une zonalité des facteurs de transfert d'eau entre les précipitations et l'infiltration efficace.

De toute manière une telle zonalité n'aura d'utilité qu'à une échelle compatible avec celle à laquelle on peut établir la zonalité significative des précipitations, qui constituent le facteur primordial, et qui doivent être décrites pour ce faire suivant des pas de temps assez grand (annuels et mensuels). La carte pluviométrique, construite à une échelle nécessairement assez petite, complétée par la zonalité des régimes annuels moyens des précipitations mensuelles, constitue donc les points de départ indispensables de l'établissement d'une zonalité du régime des nappes.

L'étape suivante, généralement possible, consiste à passer de la zonalité et du régime moyen des précipitations totales à ceux des "précipitations utiles", c'est-à-dire de la fraction des précipitations disponibles pour l'écoulement total (ruissellement + infiltration) définie, pour différents pas de temps (mois, décade, journée) comme l'excédent des précipitations sur l'évapotranspiration potentielle, et évalué par diverses méthodes classiques semi-empiriques (Thorntwaite, Turc, etc...) qui indexent principalement l'évapotranspiration potentielle sur la température et équivalent à établir des "modèles globaux de bassin" très simplifiés.

Une relation assez nette apparaît généralement entre les variations piézométriques des nappes libres et le régime des précipitations utiles calculées dans les domaines où le ruissellement est négligeable ou faible, et en l'absence d'autres facteurs de recharge.

Une carte des précipitations utiles moyennes annuelles (calculée de préférence sur une série pluriannuelle au moins décennale) peut donc être établie ainsi que la zonalité des régimes moyens annuels des précipitations utiles mensuelles, c'est-à-dire des "excédents moyens mensuels" (assortis éventuellement d'indice de variabilité).

N.B. : Au lieu de cartes des "précipitations utiles" construites par les procédures indiquées, exclusivement à partir de données météorologiques, on peut aussi établir et utiliser des "cartes d'écoulement" (cartes de modules spécifiques d'écoulement total moyen interannuel) construites également en exploitant les mêmes données, mais en calant les déficits d'écoulement sur les données hydrologiques mesurées.

Ceci ne vaut évidemment que pour la zonalité des valeurs moyennes interannuelles, à petite échelle.

Les précipitations utiles moyennes annuelles ne constituent naturellement un index relatif de la grandeur de l'alimentation moyenne des nappes libres, que toutes autres conditions égales, notamment les conditions régissant l'infiltration efficace indexables elles-mêmes sur des caractères hydrogéologiques. La zonalité de ces caractères, exprimables ensemble plus ou moins grossièrement par un "coefficient moyen d'écoulement souterrain" (1) de valeur statistique, important plus que celle des hauteurs de pluie utile moyenne, il paraît superflu de représenter cette dernière par des classes étroites et nombreuses.

Dans la mesure où l'on peut présumer que, toutes choses égales, les hauteurs d'infiltration efficace ne croissent pas linéairement avec les hauteurs de pluie utile (pour les hauteurs moyennes annuelles, et a fortiori pour des hauteurs rapportées à des pas de temps plus courts), il paraît préférable et suffisant de définir des classes "géométriques" des précipitations efficaces (par exemple < 100, 100-200, 200-400, 400-800 mm) plutôt qu'arithmétiques.

L'intérêt du régime moyen annuel des précipitations utiles mensuelles est plus direct.

En l'absence d'autres données, on peut admettre comme hypothèse simplificatrice que les pas de temps comportant un excédent (précipitations utiles) sont ceux où se produit une infiltration efficace, ce qui est d'autant plus admissible pour un pas de temps assez long, mensuel, plutôt que journalier.

La zonalité des régimes annuels des précipitations utiles, établie le cas échéant en se basant sur des classes de % saisonnier de la hauteur moyenne annuelle, ou sur toute autre convention, pourra donc servir utilement de but poursuivi.

(1) Proportion des "précipitations utiles" ou de l'écoulement total (moyennes interannuelles) correspondant à l'infiltration, donc au débit des nappes ou "écoulement souterrain" ; à ne pas confondre avec le concept de "coefficient d'infiltration" appliqué aux précipitations totales.

L'infiltration efficace a un caractère extensif dans l'espace ; sans être rigoureusement continue elle peut, généralement, être considérée comme telle à l'échelle où la répartition spatiale des facteurs climatiques qui la déterminent, peut elle-même être décrite. Il y a toutefois des exceptions dans les domaines où une part notable, voire prépondérante, des infiltrations provient de cours d'eau temporaires, c'est-à-dire qu'une infiltration efficace ne se produit qu'à partir d'une certaine concentration du ruissellement et dans des sites privilégiés, assez localisés : pertes de cours d'eau en domaine karstique, infiltration des eaux de crues en zone aride.

1.2.2. - Facteurs de décharge

Le seul "facteur" de décharge général des nappes libres est leur vidange par différents exutoires à niveau peu variable, régie par des lois de tarissement plus ou moins complexes et assez rarement observable à l'état pur (en régime non influencé, c'est-à-dire en l'absence de toute alimentation).

Ce facteur de décharge exerce un effet continu sur toute l'étendue d'un réservoir. En raison du caractère exponentiel des lois de tarissement, cet effet est d'autant plus accentué lorsque le niveau de la nappe est plus haut (fin de "remontée"), son amplitude saisonnière est plus grande là où les limites d'émergence sont plus lointaines.

Masqué en période d'alimentation, cet effet est de plus en plus isolé en période de tarissement prolongé (été et début de l'automne, assez généralement en France, et hiver en domaine montagneux pendant les précipitations neigeuses).

On notera à nouveau que la zonalité des distances aux limites ouvertes dans un réservoir aquifère a une influence déterminante sur la distribution des régimes de fluctuation (notamment des amplitudes). Elle a donc une importance primordiale.

L'effet de l'évapotranspiration réelle contribue surtout dans le cas général à restreindre le ruissellement et l'infiltration, donc l'alimentation naturelle des nappes libres et cet effet est intégré dans la notion "d'infiltration efficace", mentionnée plus haut. Mais dans certaines conditions l'évapotranspiration réelle peut constituer en outre un facteur de décharge des nappes en provoquant et entretenant un déficit hydrique de la zone saturée, compensé par une ascension d'eau provenant d'une nappe libre peu profonde (ordre de quelques mètres au maximum en France). Les régimes saisonniers et journaliers de l'évapotranspiration peuvent dans ce cas se répercuter sur celui des niveaux piézométriques.

1.2.3. - Facteurs de variations de charge alternatives

Les variations de niveau aux limites des réservoirs aquifères à potentiel imposé constituent un facteur du régime des fluctuations piézométriques qui est secondaire par rapport à l'alimentation des nappes libres étendues, car leur effet est localisé à proximité de ces limites ; mais dans une marge d'influence restreinte, ce facteur peut être prépondérant : voisinage de cours d'eau ou de plans d'eau fluctuant, bien liés hydrauliquement à la nappe (peu ou non colmatés). C'est le cas fréquent des nappes alluviales riveraines de cours d'eau, ou des nappes littorales, soumises aux effets des crues ou de fluctuations cycliques (marée).

Ces variations de niveau de plan d'eau libre aux limites de nappes se caractérisent par des périodicités, régulières ou non, très diverses : hautes eaux annuelles ou bi-annuelles de cours d'eau séparées par des étiages, marées bi-mensuelles et bi-journalières ou journalières, crues journalières des cours d'eau (niveaux en période de fusion).

A amplitude égale, une variation à courte période (crue-décrue élémentaire, marée journalière) détermine une "onde" moins pénétrante -c'est-à-dire que son effet se propage moins loin dans la nappe- qu'une variation de plus longue période.

En pratique, dans les nappes riveraines de cours d'eau ou littorales du territoire français, les effets de ces variations de niveau périodiques aux limites sont peu sensibles au-delà de 500 à 1 000 m dans la plupart des cas. On peut donc les assimiler à des effets parasites locaux par rapport aux facteurs généraux du régime naturel des nappes libres.

Le régime de variation de niveau des cours d'eau est généralement commandé par les précipitations, comme l'infiltration efficace, il est donc plus ou moins lié aux variations de celles-ci, surtout s'il s'agit de cours d'eau locaux, à bassin versant de petite dimension, compris dans le domaine du réservoir aquifère. Ce régime peut, par contre, être plus ou moins indépendant s'il s'agit de cours d'eau plus importants, de caractère "azonaux" commandés davantage par les variables climatiques de l'ensemble du bassin versant que par les facteurs locaux. Des régimes de fluctuation de niveau d'un fleuve et de variation de l'alimentation directe des nappes libres, peuvent donc être tout à fait déphasés.

Remarque

Le régime des variables climatiques qui conditionnent principalement celui des fluctuations de niveau des nappes peut être considéré selon diverses périodicités ou échelles de temps : intersaisonnier et annuel, interannuel, pluridécennal voire séculaire (lorsque les données sont disponibles), ou même à une échelle "géologique" (en se basant sur des déductions et des supputations).

En pratique, il n'y a lieu d'envisager pour les buts assignés à un réseau général que les échelles annuelle et pluriannuelle. Compte tenu du caractère principalement aléatoire de la distribution des précipitations dans le temps, une connaissance assez précise de leur régime et de la fréquence des diverses séquences possibles, nécessite des durées d'observation assez longues (d'ordre trentenaire ou météorologie).

Pour la définition des zonalités envisagées ici, basées principalement sur des moyennes -à défaut de médianes trop rarement calculables- des séries au moins décennales sont nécessaires.

1.3. - Actions humaines influençant le régime des nappes

Diverses activités humaines peuvent influencer directement ou indirectement, temporairement ou définitivement, le régime de fluctuation de niveau des nappes souterraines, soit en modifiant certaines des conditions passives, soit en perturbant certains facteurs actifs naturels ou en ajoutant des facteurs artificiels. Ces modes d'action sont bien connus aussi ne les mentionnera-t-on ici que pour mémoire, sous forme d'un tableau récapitulatif (tableau 1).

TABLEAU 1 : FACTEURS HUMAINS DU REGIME DES NAPPES

	INFLUENCE DIRECTE	INFLUENCE INDIRECTE
action sur les facteurs actifs naturels	<ul style="list-style-type: none"> - action sur le régime des cours d'eau pouvant modifier les échanges d'eau nappe/rivière, surtout dans le sens de l'alimentation des nappes : par exemple crues artificielles (en zone aride), lachures de barrage, réduction des crues. - pluie artificielle (?) <p style="text-align: center;">(influences transitoire)</p>	<p>toute action pouvant modifier l'alimentation naturelle des nappes, notamment les conditions d'infiltration des précipitations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - modification du sol et de son bilan hydrique par l'agriculture, la forestation ou la déforestation - lutte contre l'érosion - urbanisation <p style="text-align: center;">(influence définitives)</p>
actions de facteurs artificiels	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Exploitation des eaux souterraines</u> (variation journalière, annuelle, inter-annuelle) en régime d'équilibre ou de déséquilibre ("surexploitation"). - rabattement de nappe temporaire (fondation, travaux souterrains) - alimentation artificielle <p style="text-align: center;">(influence transitoires)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - irrigation, épandages - variation de niveau de cours d'eau artificiels (canaux ou de réservoirs) <p style="text-align: center;">(influences transitoires)</p>
modification des conditions naturelles permanentes	<p>Modification des conditions aux limites, notamment des niveaux moyens et des berges de cours d'eau ou plans d'eau, création de nouvelles limites à potentiel imposé : canaux, drainage agricole, tunnels et galeries drainants, travaux portuaires, réservoirs et lacs artificiels, création de limites étanches : barrage souterrain, rideaux d'injection, canalisation de cours d'eau.</p> <p style="text-align: center;">(influences définitives)</p>	

N.B. : L'objectif primordial du contrôle de l'évolution des niveaux des nappes par les réseaux de piézomètres est précisément de détecter ces influences et de prévoir les répercussions de diverses actions projetées (pour pallier ou minimiser celles qui seraient préjudiciables). Aussi doit-on à la fois, dans l'implantation des réseaux, tenir compte des facteurs humains actuels du régime, et s'efforcer d'observer des variations non perturbées.

1.4. - Hiérarchie et échelles de signification de ces conditions et facteurs

Les conditions passives et les facteurs actifs du régime de variations de niveau des nappes que l'on vient de passer en revue, ont des portées significatives à des échelles différentes. Aussi leur prise en compte pour définir des groupements homogènes impose-t-elle au préalable leur classement par échelle et conduira ensuite à hiérarchiser les zonalités établies à des échelles différentes.

Dans tous les cas, le principe directeur consistera à distinguer parmi les zonalités celles pouvant servir à subdiviser un système aquifère de celles qui sont significatives à une échelle trop petite pour le permettre et fournissent seulement un index global caractérisant ce système. Cette distinction sera donc essentiellement relative aux dimensions des systèmes aquifères.

L'échelle de temps significative de l'effet des différents facteurs du régime est naturellement très liée à l'échelle spatiale : en général plus la variabilité de ces facteurs est à courte période -ou plus la durée d'impulsions isolées est brève- plus leur portée dans l'espace est locale (sauf s'il s'agit d'impulsions brèves mais extensives, par exemple les perturbations barométriques, synchrones sur des aires étendues). La classification des facteurs en vue de l'établissement de zonalités conduit à considérer en priorité l'échelle spatiale de l'influence des facteurs ; mais cela entraînera implicitement un classement approximatif selon les "pas de temps" significatifs.

Le classement des conditions et facteurs du régime de variations de niveau des nappes en fonction de l'échelle à laquelle ils donnent lieu à des zonalités significatives, est présenté sous forme de tableaux (tableaux 2 et 3).

TABLEAU 2 : ECHELLES DE ZONALITE SIGNIFICATIVE

	PETITE ECHELLE (PAYS, GRAND TERRITOIRE)	ECHELLE MOYENNE (REGIONALE)	GRANDE ECHELLE (LOCALE)
	Classification hydrogéologique et délimitation des réservoirs ou systèmes aquifères		
Conditions passives		<ul style="list-style-type: none"> - diffusivité moyenne de l'aquifère (lithologie) - réceptivité du réservoir aquifère aux influences (nappe libre ou captive) et mode d'alimentation - densité du drainage (réseau hydrographique) 	<ul style="list-style-type: none"> - diffusivité locale de l'aquifère: lithologie, épaisseur, homogénéité, hauteur de la zone non saturée (profondeur moyenne de la surface libre) - perméabilité verticale de la zone non saturée et relation succion/teneur en eau - distance entre piézomètre et limites - ouvrages, actions humaines modifiant ces conditions
Facteurs actifs	<p>Climat : hauteur moyenne annuelle et régime moyen annuel des précipitations totales et efficaces (intégrant le régime annuel de l'évapotranspiration potentielle)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - variétés climatiques régionales - variabilité des hauteurs annuelles et mensuelles des précipitations (totales et efficaces) - régime annuel de l'évapotranspiration (agissant sur des nappes de faible profondeur, par l'intermédiaire de la zone non saturée) - variation de potentiel aux limites "ouvertes", à périodicité saisonnière (régime annuel des cours d'eau, azonaux notamment : marées mensuelles et annuelles) - perturbation barométrique (effet sur les nappes captives) - exploitation intensive des eaux souterraines - grands périmètres d'irrigation - grands réservoirs 	<p>Micro-climat</p> <ul style="list-style-type: none"> - variabilité des hauteurs de pluie journalières - variables régissant les transferts d'eau dans la zone non saturée : distribution verticale des teneurs en eau et des tensions - évapotranspiration journalière (agissant sur des nappes de très faible profondeur) - variation de potentiel aux limites "ouvertes", à périodicité courte (marée, cours d'eau nivo-glaciaire) ou de brève durée (crue) - captages, exploitations d'eau souterraine, ouvrages et aménagements accroissant ou réduisant localement l'alimentation des nappes

TABLEAU 3 : FACTEURS DU REGIME DE FLUCTUATION DES NAPPES : CLASSEMENT PAR "PAS DE TEMPS" SIGNIFICATIF

FACTEURS	FACTEURS INTERANNUELS A SECULAIRES	FACTEURS ANNUELS (SAISONNIERS)	FACTEURS MENSUELS	FACTEURS HEBDOMADAIRES, JOURNALIERS A HORAIRES
Climatiques	variations climatiques de longue période régime interannuel des précipitations	régime annuel des précipitations et de l'évapotranspiration (indexé sur la température) cycle végétatif		précipitations journalières régime journalier de l'évapotranspiration (diurne/nocturne) variation barométrique
Hydrologiques superficiels	Régime interannuel des cours d'eau	Régime annuel des cours d'eau marées d'équinoxe	marées mensuelles et bi-mensuelles	Crues brèves régime journalier des cours d'eau nivoglaciaux (période de fusion) marée (journée ou demi-journée) onde de marée dans les estuaires
Géologiques	Evolution karstique érosion colmatage de cours d'eau			Séismes, volcanisme marées terrestres glissements de terrain
Humains	évolution interannuelle de l'exploitation intensive des eaux souterraines évolution de l'agriculture urbanisation	exploitation des eaux souterraines alimentation artificielle irrigation variation de niveau de réservoirs (barrages)		exploitation des eaux souterraines irrigation (tour d'eau) laches de barrage éclusées

2 - EVALUATION DE LA RECHARGE PAR LE MODELE GLOBAL GARDENIA (1)

2.1. - Principe du fonctionnement

GARDENIA est un modèle hydrologique global à réservoirs qui permet de faire un bilan local en particulier au pas journalier et de calculer l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement, l'infiltration et le niveau ponctuel à la nappe. Ce modèle est décrit en détail par Roche et Thiery (1984) et nous en rappelons ici brièvement le principe.

Le modèle est composé de 3 réservoirs superposés. Le premier réservoir RU est caractérisé par sa capacité de rétention maximale (RUMAX). Il représente l'effet de rétention des premiers mètres du sol. Ce réservoir est alimenté par les précipitations et vidangé par l'évapotranspiration potentielle. On ne peut observer de ruissellement, ni d'infiltration avant qu'il soit saturé. Il prend en compte à la fois l'effet d'interception dans les dépressions du sol et schématise "l'effet de clapet" du sol non saturé selon son état d'humidité.

Le deuxième réservoir H est caractérisé par deux paramètres :

- un temps de demi-percolation THG,
- une hauteur d'équi-ruissellement RUIPER.

Il assure le transfert à la nappe à travers la zone non saturée et la répartition entre ruissellement et infiltration : plus le niveau dans ce réservoir est élevé -à la suite de fortes précipitations-, plus la proportion de ruissellement sera grande. Quand le niveau du réservoir est égal à la hauteur d'équi-ruissellement, il y a autant d'infiltration que de ruissellement ; quand il est inférieur il produit une plus grande proportion d'infiltration.

Le troisième réservoir G est uniquement caractérisé par son temps de demi-tarissement. Il représente le tarissement exponentiel de la nappe. Thiery (1985) a montré que ce schéma correspond pratiquement à un aquifère bordé d'un côté par une limite imperméable rectiligne et de l'autre par une limite rectiligne à niveau imposé. Si le piézomètre n'est pas situé trop près de la limite à niveau imposé le niveau piézométrique NI se déduit du niveau G dans le réservoir G par :

$$NI = G / EMM + NB$$

avec NI niveau piézométrique

G niveau dans le réservoir

EMM coefficient d'emménagement libre ou porosité efficace équivalente

NB niveau de base

(1) D'après "Analyse d'une longue série piézométrique au Burkina Faso".
D. Thiery - Note technique BRGM n° 86/14 - Juillet 1986

Les paramètres à déterminer sont donc au nombre de 4 :

- la capacité de rétention RUMAX qui contrôle à elle seule la valeur de l'évapotranspiration potentielle ETR,
- le temps de demi-percolation THG et la hauteur d'équi-ruissellement RUIPER qui contrôlent la proportion de ruissellement et le retard entre excédent au sol et remontée de la nappe,
- le temps de demi-tarissement TG qui règle la rapidité de tarissement de la nappe, ainsi que les deux paramètres d'amplitude :
- le niveau de base NB,
- le coefficient d'emmagasinement (ou la porosité efficace) EMM.

2.2. - Principe du calage du modèle

Pour effectuer un bilan dans de bonnes conditions, il faut idéalement disposer de données (pas forcément simultanées) de séries :

- de ruissellement,
- et d'infiltration ou de niveau piézométrique et du coefficient d'emmagasinement de la zone de fluctuation de la surface libre.

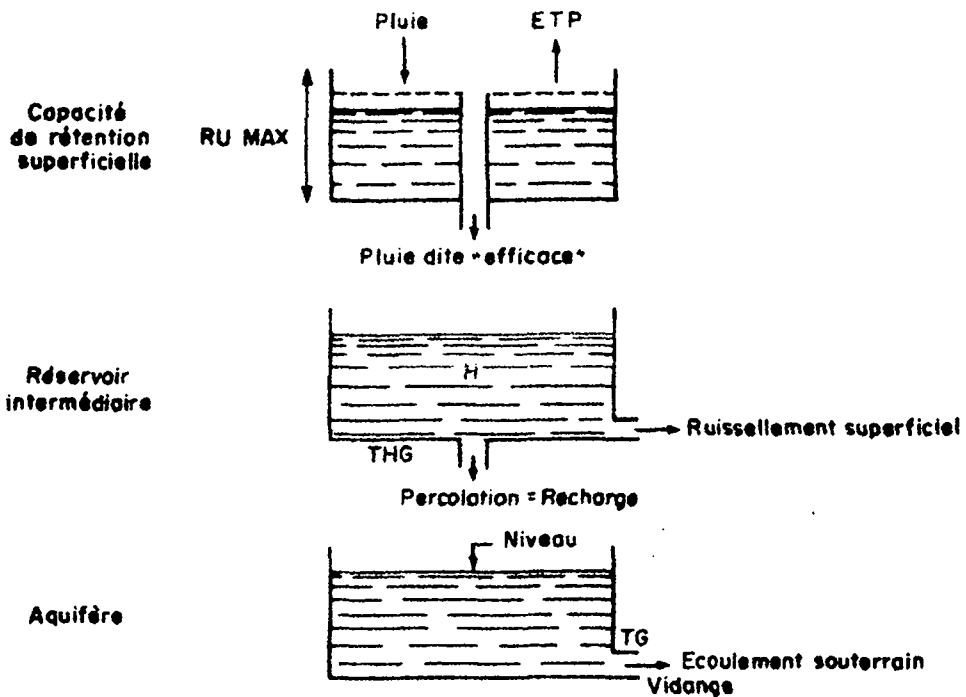
Les paramètres du modèle sont alors ajustés pour reproduire au mieux les 2 séries. En pratique, on ne dispose pas de données de ruissellement (sauf quand on peut supposer qu'il est nul ou négligeable).

On peut penser cependant a priori que les données de niveau piézométrique permettent à elles seules de déterminer la capacité de rétention RUMAX : si la valeur du modèle est trop faible, les niveaux calculés réagissent trop souvent et trop tôt à des séquences de précipitation ; si elle est trop forte, ils réagissent trop tard et parfois ne réagissent pas.

La répartition en ruissellement et infiltration de la "pluie efficace" calculée se fait alors de manière unique par le schéma non linéaire du réservoir H qui ne donne pas un pourcentage fixe d'infiltration, mais écrête surtout les fortes pluies efficaces. Le réglage de l'écrêtement des fortes pluies efficaces (par le paramètre RUIPER) règle alors le partage entre infiltration et ruissellement.

L'infiltration est transformée en variation de niveau piézométrique par le temps de demi-tarissement TG, l'amplitude étant inversement proportionnelle au coefficient d'emmagasinement.

Un tel calage ne poserait pas de difficulté si les niveaux piézométriques variaient rapidement en réaction à des séquences de précipitations isolées et non périodiques. En pratique, les niveaux piézométriques sont souvent très amortis et ne réagissent pas à une grande séquence de précipitations, mais plutôt à une "saison des pluies". La série des niveaux est donc une pseudo-sinusoïde en réponse à la pseudo-sinusoïde des pluies lissées. Le calage consiste à reproduire la pseudo-sinusoïde des niveaux qui est décalée par rapport à celle des pluies.



**PRINCIPE DU MODELE GARDENIA
 POUR LA SIMULATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES**

A N N E X E 3

MATERIELS DE MESURE, DE TELETRANSMISSION ET TRAITEMENT DES DONNEES

- Sonde à sifflet OTT
- Sonde électrique SEBBA
- Sonde pour la mesure de la résistivité et de la température
SOCOSOR
- Conductivimètre MERCK
- Module d'Acquisition des Données (MADO)
- Station d'observation climatique CAA SATURNE
- Système de télétransmission ARGOS
- Logiciel de restitution graphique de données GRETA

Sondes à sifflet OTT 24.150

La sonde à sifflet sert à la mesure du niveau de la surface de l'eau dans les puits, les réservoirs ou autres endroits calmes. Lorsque la sonde proprement dite suspendue au ruban de mesure s'enfonce dans l'eau, elle émet un signal sonore et les rainures qui l'entourent s'emplissent d'eau. La distance entre le lieu de mesure et la surface de l'eau s'obtient en additionnant la longueur lue sur le ruban de mesure et le nombre de rainures sèches. Si on laisse descendre la sonde, on ne lit donc qu'une valeur digitale approximative. La sonde est en laiton nickelé. La distance entre les rainures est de 1 cm. Le ruban de mesure, de largeur 13 mm, comporte une division en cm; gravée, et dont le zéro correspond à la marque zéro du sifflet. Les sondes sont livrées sur un cadre en laiton, avec manivelle et poignée.

Sondes à sifflet

Numéro de code	22	24
Ø ext. mm	27	15
Longueur m	-	-
Poids kg	0,67	0,27

Ruban de mesure

-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
10	15	20	25	30
1,5	1,5	2,0	2,0	2,5

DISTRIBUTEUR :



USINE : B.P. N° 96
59393 WATTRELOS CEDEX (FRANCE)
TÉL. : (20) 26-24-32 - TÉLEX : 160620 F

DÉPÔT RHÔNE-ALPES :
CHEMIN DE BOIS-ROND
69720 SAINT BONNET DE MURE
TÉL. : (78) 40-92-64

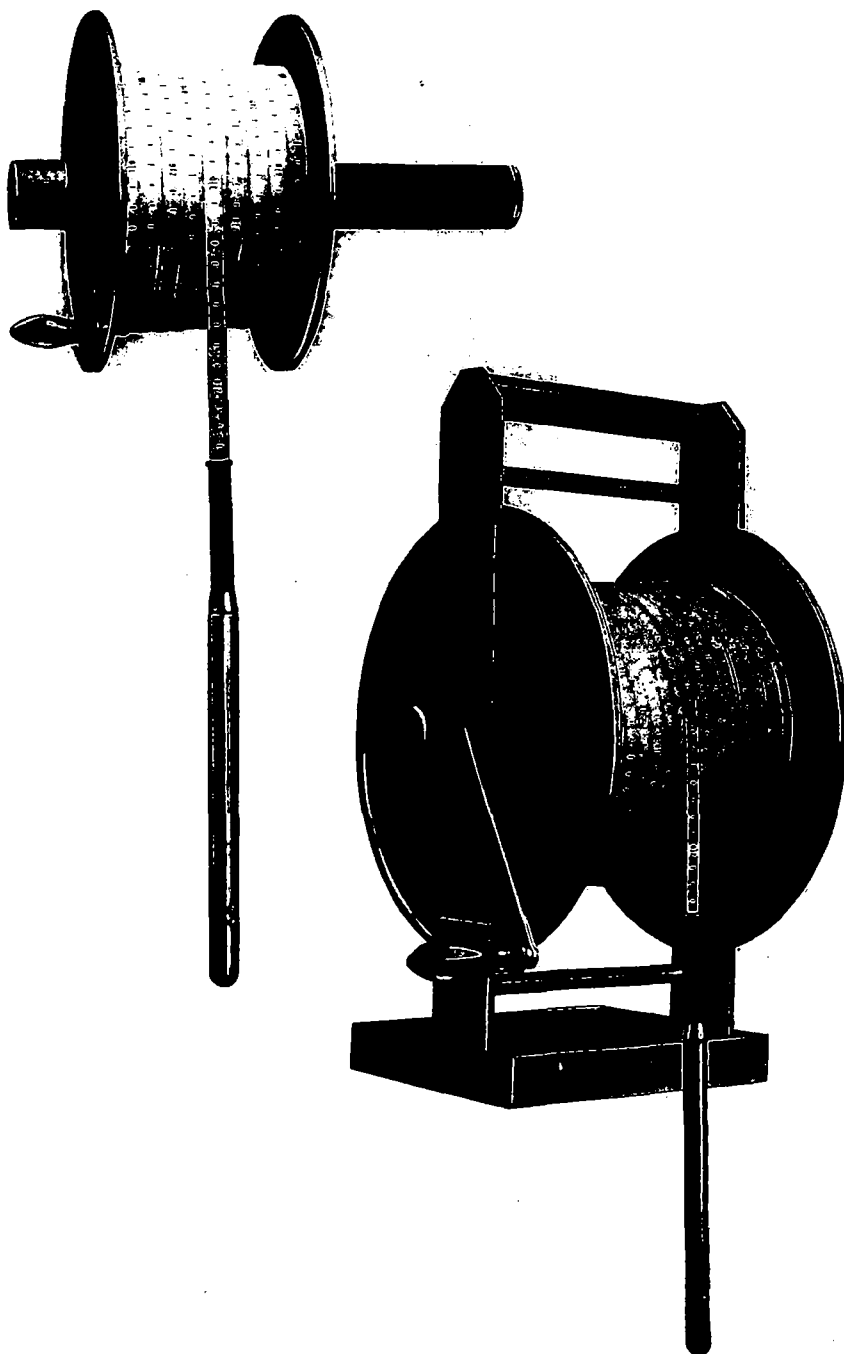
SEBA

HYDROMETRIE

K 702

Sonde lumineuse transistorisée

La sonde lumineuse est un instrument de mesure électrique très sensible et d'une très bonne fiabilité. Cet appareil sert à mesurer le niveau d'eau des puits, sondages, réservoirs, piézomètres. Il est aussi indiqué pour mesurer les variations d'eau lors des essais de pompage.



Sonde à tambour avec poignée.
Prévue pour câble longueur
15 m, 30 m, 50 m

Sonde à tambour sur support
pour câble longueur
50 m jusqu'à 1000 m



SONDE POUR LA MESURE DE LA RESISTIVITE ET DE LA TEMPERATURE

La mesure de la résistivité permet de déterminer la minéralisation de l'eau, ce qui fournit de précieux renseignements sur la nature du terrain. De plus, si dans un forage il y a plusieurs nappes en communication, les mesures effectuées permettent de déterminer les différents horizons d'arrivée d'eau, par là d'identifier les nappes.

Il est indispensable que les deux mesures s'effectuent simultanément, car la résistivité varie en fonction de la température, et si l'on réalise les mesures séparément, on modifie soit l'équilibre thermique ou alors on mélange par pistonnage les endroits où il y a séparation de nappe, rendant impossible la connaissance exacte de ces horizons perméables.

La sonde est équipée d'une cellule de résistivité à électrodes de platine recouvertes de mousse de platine.

La sonde de température est constituée par une thermosonde en fil de platine de 100 ohms.

Ces deux capteurs sont positionnés pratiquement au même niveau. Cette particularité, liée à la faible inertie des cellules, confère à cet appareil une excellente précision.

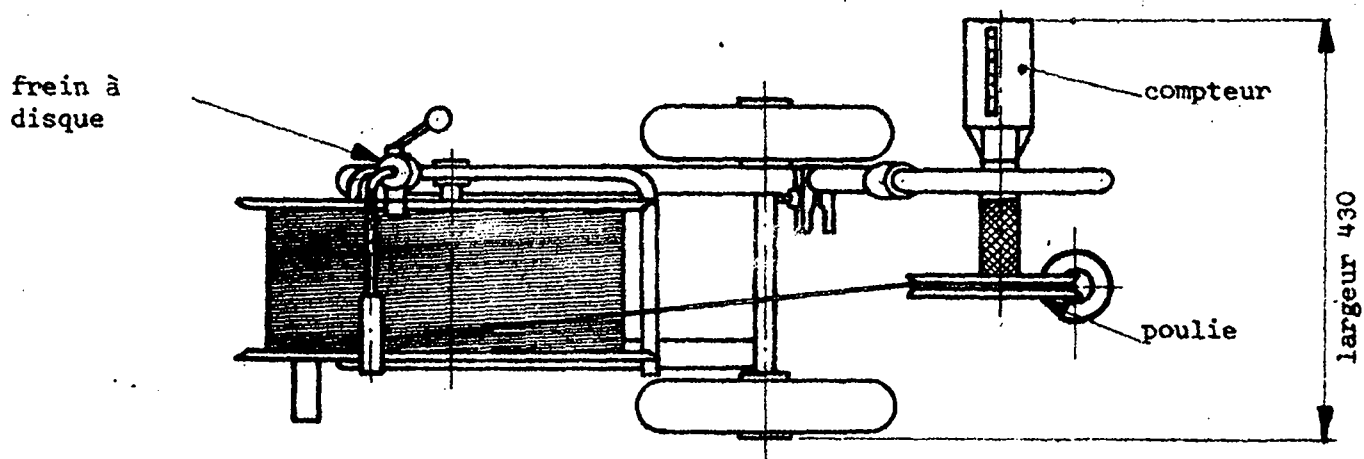
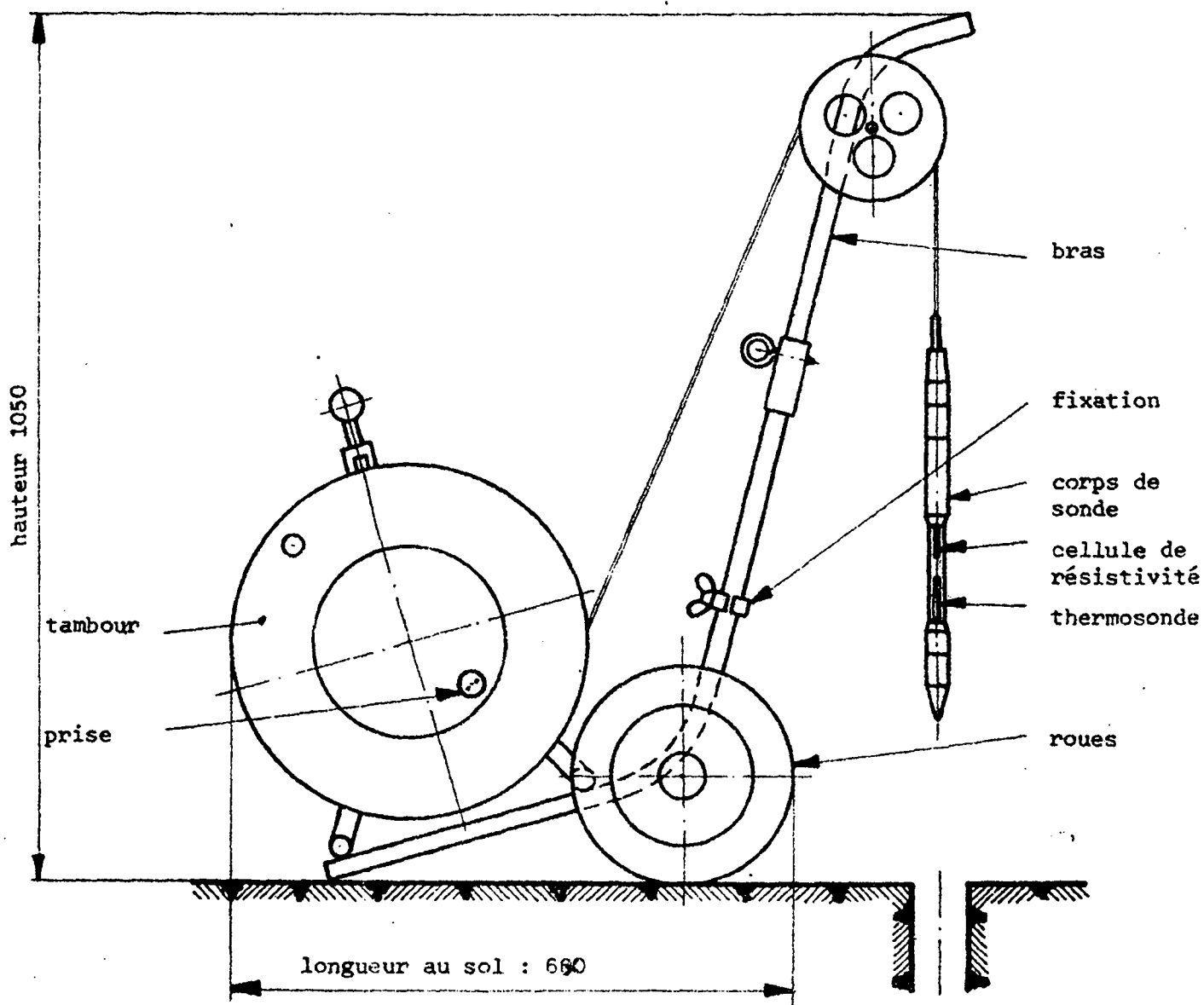
CARACTERISTIQUES

Résistivité.....	1 à 5000.000 Ω cm
Température.....	0 - 90°
Diamètre sonde.....	24 mm
Longueur.....	300 mm
Profondeur standard.....	100 m
Profondeur maximale.....	300 m

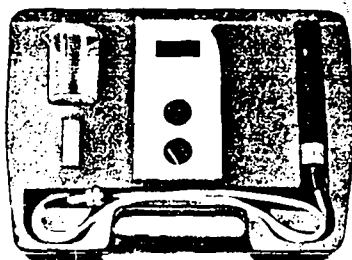
INDICATIONS

- reconnaissances hydrologiques
- origine des eaux
- captages
- contrôle de la pollution des nappes phréatiques
- corrélation
- caractéristiques des effluents, etc...





Poids: 22 Kgs



Coffret CM 85 T
Art. 220 855

Coffret CM 85
Art. 220 857

CM 85 T

Art. 220 855



CM 85

Art. 220 857



Affichage
Paramètres

Conductivité, température

Conductivité

Mesure de conductivité
Plage de mesure
Précision
Fréquence
Compensation de température

0 . . . 199 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 4 échelles
suivant commutation $\pm 0,5 \%$
jusqu'à $\pm 1,5 \%$ ± 2 digit
env. 1000 Hz
automatique avec $2,2 \%$ $^{\circ}\text{C}$, intégré dans
la cellule de mesure CMP 1/T dans la fourchette
de température $5-40^{\circ}\text{C}$ à $1,5 \%$ Température
de référence 25°C (à la demande 20°C)

0 . . . 19 990 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 3 échelles
suivant commutation $\pm 0,5 \%$
jusqu'à $\pm 1,5 \%$ ± 2 digit
env. 1000 Hz
manuelle de 0 à 50°C , précision $\pm 1,5 \%$
coefficient de température $2,2 \%$ $^{\circ}\text{C}$, tempé-
rature de référence 25°C (à la demande 20°C)

Mesure de température
Plage de mesure
Précision

palpeur de température intégré dans la
cellule de mesure
 $5-40^{\circ}\text{C}$
meilleur $0,1^{\circ}\text{C}$ (résolution $0,1^{\circ}\text{C}$)

rien

Température d'utilisation
Alimentation
Prise
Sortie analogique
Dimensions/Poids

-5°C $+50^{\circ}\text{C}$
1 pile de 9 V (IEC 6 F 22), suffisante pour 200
heures de fonctionnement, indicateur de
sous-voltage
prise 5 pôles
à la demande
(L) 171 x (l) 87 x (h max.) 55 mm/0,36 kg

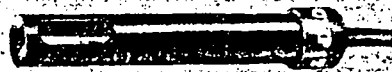
-5°C $+50^{\circ}\text{C}$
1 pile de 9 V (IEC 6 F 22), suffisante pour 200
heures de fonctionnement, indicateur de
sous-voltage
prise 5 pôles
—
(L) 171 x (l) 87 x (h max.) 55 mm/0,36 kg

Cellules standard:

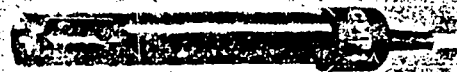
CMP 1/T Art. 220 856 avec palpeur de
température intégré $K=10 \text{ cm} \pm 1,5 \%$
la CMP 1/T convient pour une mesure de $0,1$
à $199 900 \mu\text{S}/\text{cm}$, diamètre max. 21 mm , lon-
gueur 145 mm , câble de 1 m avec prise mâle
5 pôles, immersion minimum 45 mm , fixation
câble/cellule, étanche jusqu'à 1 m , boîtier
cellule en Epoxy, fourchette d'emploi de
(l'électrode de -5 à $+60^{\circ}\text{C}$) (autres cellules à
la demande).

CMP 1 Art. 220 854 $K=10 \text{ cm} \pm 1,5 \%$ la
CMP 1 convient pour une mesure de $0,1$ à
 $19 990 \mu\text{S}/\text{cm}$, diamètre max. 21 mm , lon-
gueur 145 mm , câble de 1 m avec prise mâle
5 pôles, immersion minimum 45 mm , fixation
câble/cellule étanche jusqu'à 1 m , boîtier
cellule en Epoxy, fourchette d'emploi de
(l'électrode de -5 à $+60^{\circ}\text{C}$) (autres cellules à
la demande).

CMP 1/T et CMP 1



CMP 1/T: avec palpeur de température
intégré



CMP 1: sans palpeur de température

Présentation (standard)

coffret contenant: Appareil de mesure, pile,
cellule CMP 1/T, béccher 100 ml , mode
d'emploi. Dimensions du coffret: $338 \times 248 \times$
 80 mm /poids env. $1,3 \text{ kg}$.

coffret contenant: Appareil de mesure, pile,
cellule CMP 1, béccher 100 ml , mode
d'emploi. Dimensions du coffret: $338 \times 248 \times$
 80 mm /poids env. $1,3 \text{ kg}$.

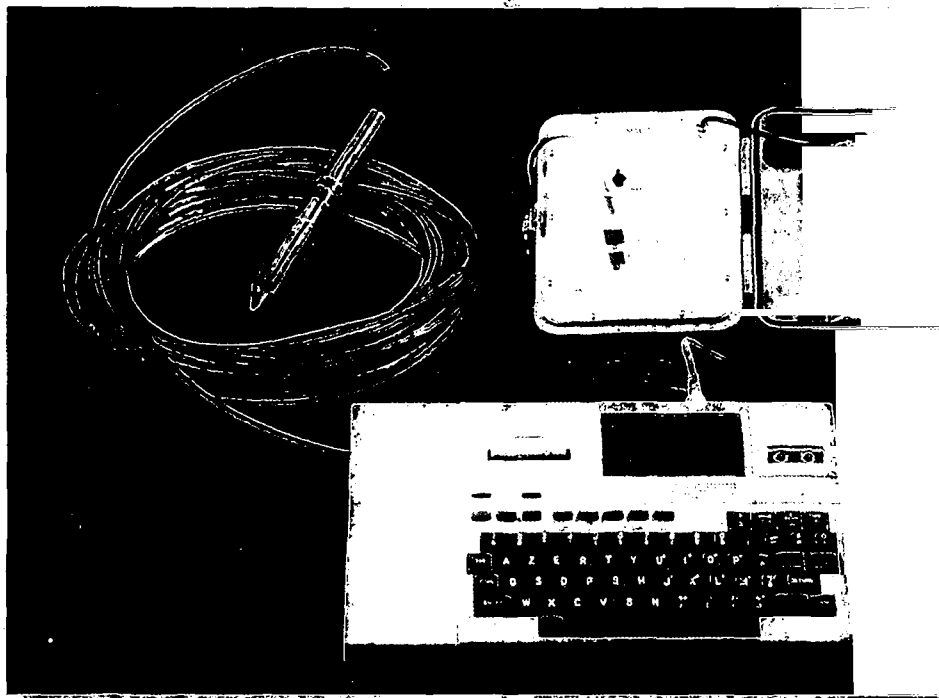
Laboratoires MERCK-CLEVENOT

DIVISION CHIMIE

5 à 9, rue Anquetil
B.P. N° 8 - 94 130 NOGENT SUR MARNE
Tél. (1) 376.11.50 - Téléc. 215720

MADO®

MODULE D'ACQUISITION DE DONNÉES



C'est un système autonome d'acquisition de données, adapté aux conditions de terrain difficiles.

Sa principale application est le registrement du niveau des nappes phréatiques et des eaux de surface; on l'utilise également pour les pompages d'essai et la mesure de débits.

Le principe de fonctionnement est le registrement sur mémoire électronique du niveau d'eau mesuré par un capteur de pression. L'utilisateur peut transférer ultérieurement les données sur un micro-ordinateur portable qui sert également à définir les paramètres de fonctionnement du MADO.

La conception du système répond à plusieurs critères : acquisition de 1 à 4 paramètres, fiabilité (aucune pièce mécanique), autonomie importante (par exemple : mesure toutes les 20 mn pendant 6 mois),

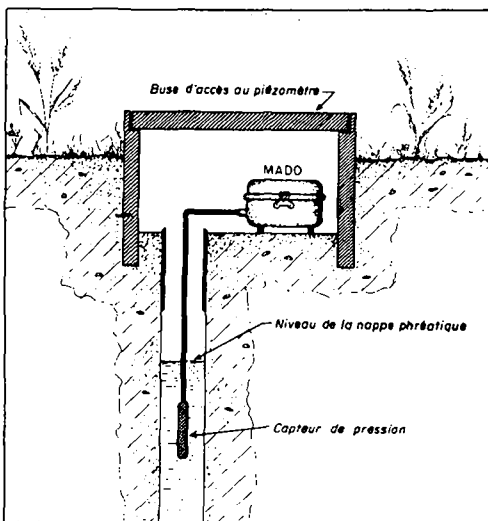
mise en œuvre très simple et sécurité d'utilisation, étanchéité, faible encombrement, possibilités d'extension sur option, carte télétransmission (ARGOS, MINITEL), autres types de mesures (conductivité, température).

Le système complet comprend, pour le suivi piézométrique :

un boîtier contenant l'électronique et les piles,

un capteur de pression immergé dans le forage et relié au boîtier par un câble blindé.

un petit micro portable pour la gestion et le transfert des mémoires de MADO sur cassettes.



BRGM Instruments

B.P. 6009

45060 ORLÉANS CEDEX 2 - FRANCE

Tél.: (33) 38.64.34.18

Télex : BRGM 780258 F

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Présentation

- boîtier en fibre de verre et résine gris clair
- dimensions : 110 x 220 x 250 mm
- étanche aux projections d'eau (IP55) double étanchéité de l'électronique
- connecteurs étanches et verrouillables
- poids : 2,5 kg

Conditions de fonctionnement

- température d'utilisation : -25°C à +70°C
- humidité : 0 à 100 %

Alimentation

- 6 piles rondes de type R20,
- sauvegarde des mémoires sur pile au lithium assurée pour 10 ans.

Capacités d'enregistrement

- sauvegarde de 16 000 mesures, arrêt automatique de l'acquisition à saturation des mémoires
- sauvegarde des paramètres d'étalonnage de chaque capteur

Programmation de l'acquisition

- sortie RS232C
- fréquence de mémorisation (interrogation du capteur) programmable de 5 s à 23 h 59 mn 59 s
- possibilité de différer la date et l'heure de début d'enregistrement

Options

MODEM, MINITEL, interface balise ARGOS

MADO®

CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS PROPOSÉS

Capteurs de pression

(mesure de niveaux d'eau)
BHL de Transamerica Instruments,
avec compensation de la pression
atmosphérique.

Gammes de mesure :

- BHL 4292-4293 : 0-1, 0-1.6, 0-2.5, 0-4, 0-6, 0-10 bar pour des variations de quelques mètres à 100 mètres d'eau
- BHL 4194 : 0-35, 0-75, 0-150, 0-200, 0-275, 0-350 mbars pour des variations de quelques dm à 3,5 m d'eau

Non linéarité et hystérésis : $\pm 0,2\%$ PE (pleine échelle)

Gamme de température : compensation de -54°C à $+120^{\circ}\text{C}$

Dérive thermique du zéro : $\pm 0,03\%$ PE/ $^{\circ}\text{C}$

Dérive thermique de la sensibilité : $\pm 0,015\%$ PE/ $^{\circ}\text{C}$

Les capteurs de pression sont livrés avec un lest et une prise de mise à pression atmosphérique (licence BRGM)

Capteurs de température

Gamme de mesure : -20°C à $+80^{\circ}\text{C}$,
résolution $0,1^{\circ}\text{C}$

Autres capteurs (débit, résistivité, ...) nous consulter

LOGICIEL

Un logiciel qui permet de définir les paramètres de fonctionnement du système d'acquisition et d'effectuer les relevés de données. Il est disponible sur EPSON HX 20 et sur PC compatible portable. Ses principales fonctions sont :

- initialisation de **MADO** (date de début des mesures, fréquence d'acquisition...),
- étalonnage des capteurs,
- sauvegarde des données sur une micro-cassette ou sur disquette,
- impression des données, édition de graphiques,
- transfert vers un autre micro-ordinateur.

Le programme est entièrement conversationnel pour une utilisation optimale sur le terrain.

LOGICIELS DE TRAITEMENT

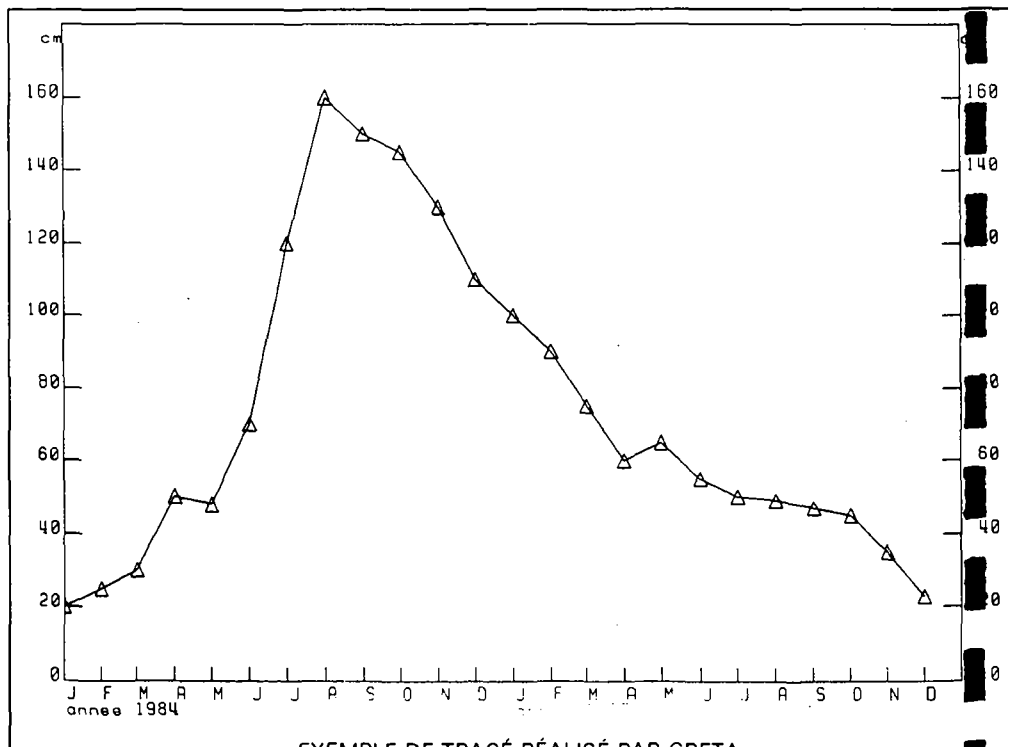
ISAPE est un programme d'interprétation de pompages d'essai. Il permet la détermination des paramètres hydrogéologiques par ajustement des points de mesures avec une courbe théorique.

Le programme prend en compte la géométrie de l'aquifère, différents schémas hydrodynamiques, ainsi que des phénomènes perturbateurs : pertes de charge, effet de capacité, variation de débit, etc.

GRETA est un logiciel de tracé d'historiques de mesures sur compatible PC. Il permet de visualiser immédiatement les données acquises par **MADO**. De nombreuses options peuvent être sélectionnées :

- le type de report (cartésien, logarithmique),
- le type de trait (continu ou tireté),
- les symboles utilisés pour représenter les points,
- un commentaire sur la figure,
- un quadrillage sur le fond du tracé,
- la possibilité de ne pas relier des points éloignés de plus d'un certain temps,
- l'élimination de certaines valeurs
- etc.

Le dessin visualisé à l'écran peut être copié sur imprimante graphique ou sur traceur.

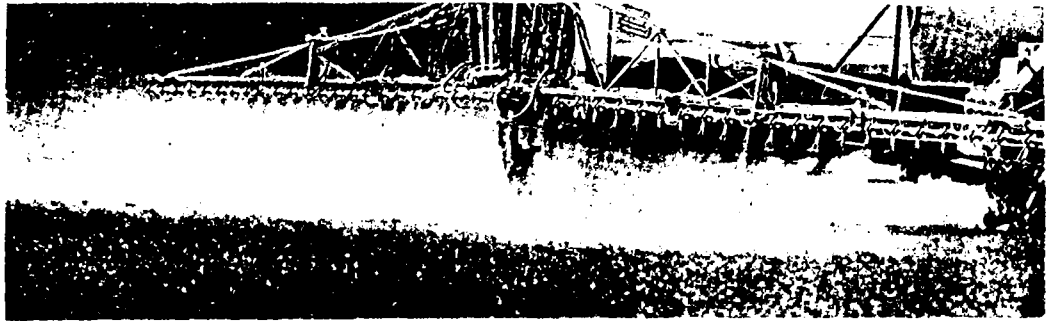
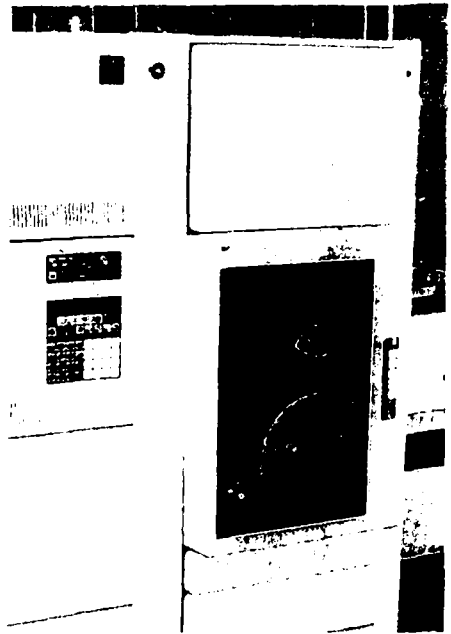
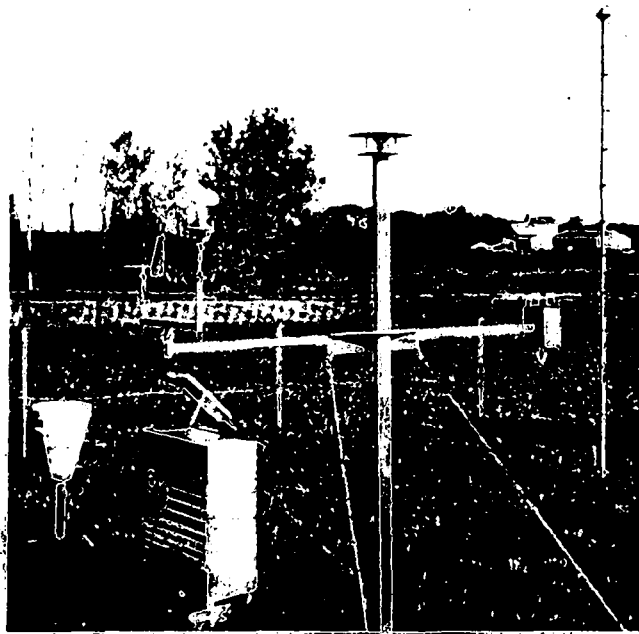


EXEMPLE DE TRACÉ RÉALISÉ PAR GRETA



CLIMATOLOGIE
AGRONOMIE
AERONAUTIQUE

9, place de l'évêché 30540 milhaud Nîmes, France





L'INFORMATION SUR MESURE A DOMICILE

De la production à la mise en marché en passant par l'environnement, les produits C A A et les services C A A : une aide à la décision basée sur une puissante chaîne informatique.

LA STATION C A A SATURNE...

Véritable ordinateur capable de saisir, stocker, traiter et transmettre les informations par tous les moyens (câble, balise, radio, téléphone, valise de transfert).

Dispositif de télémesure, télécommande et télésignalisation par réseau commuté ou en liaison spécialisée P T T.

Modulaire pour répondre aux différents besoins.

Technologie C-MOS.

Equipée d'un double protection parfaitement adaptée à un service en milieu sévère (-30°C à +70°C et 100 % d'humidité).

Livrée en standard avec 16 voies.

Option sortie RS 232.

DOMAINES D'APPLICATIONS : par ses possibilités d'adaptation, ses performances, sa sécurité de transmission et sa fiabilité, la station SATURNE C A A trouve son emploi dans : L'AGRICULTURE

CONSEIL PERSONNALISE A L'IRRIGATION

du type de sol, par parcelle, des cultures, des dates de semis, des stades de développement, des systèmes d'irrigation, des conditions climatiques.

EVOLUTION CLIMATIQUE HEURE/HEURE

température, humidité, ensoleillement, vent, pluie, autres capteurs ... Evapotranspiration potentielle.

MODELISATION BOTRYTIS

Suivi des Etats potentiels d'infection
Conseil de traitement.

PREVISIONS METEOROLOGIQUES

A moyenne échéance,
Mise à jour régulièrement.

DIFFUSION DES AVERTISSEMENTS AGRICOLES DE LA PROTECTION DES VEGETAUX

DIFFUSION DU SERVICE DES NOUVELLES DES MARCHES EN TEMPS REEL (MERCURIALES)

ALERTE ET TELECOMMANDE CONTRE LE GEL

DIFFUSION RESULTATS ANALYSE DU SOL + CONSEILS.



LES OUTILS DU FUTUR AU SERVICE DU PRÉSENT

L'activité agricole étant définie en terme de métier, l'agriculteur doit conquérir son pouvoir de décision.

Les Produits et Services C A A sont des conseillers privés à votre disposition pour accroître la productivité des exploitations agricoles.

Siège social : 9, Place de l'Evêché - 30540 MILHAUD (NIMES) - FRANCE - Télex : 490981 CECOMEX

RC NIMES : B 322 187 931 - APE 7701

TEL : (66) 74.27.34

PRESENTATION

Cette station météorologique permet de prendre en compte la majorité des capteurs utilisés en climatologie.

La centralisation des mesures s'effectue à partir de l'une de nos centrales de mesures saturne en fonction de l'utilisation envisagée, c'est à dire stockage des données sur le site (cassette de bande magnétique ou mémoires statistiques), ou transmission.

La station se compose des sous-ensembles suivants :

- un coffret de mesures et d'enregistrement ou de transmission,
- un coffret d'alimentation et raccordement des capteurs,
- un bâti sur lequel sont fixés les deux coffrets et qui sert de table de nivellement pour un ou deux capteurs solaires,

- un mât télescopique d'une hauteur de 2 mètres portant le panneau solaire d'alimentation en énergie, les capteurs météo ainsi que les accessoires de haubannage,

- un support semi-enterré portant 4 sondes de température à + 50 cm, + 10 cm, -10 cm. et -50 cm,

- un conteneur de transport (option).

CARACTERISTIQUES

Mesures

- vent passé (comptage),
- direction du vent,
- températures : sous abri, à l'air libre, dans le sol,
- précipitation (comptage),
- hygrométrie,
- durée du mouillage,
- rayonnements : direct, diffus, net, incliné,
- d'autres mesures peuvent être envisagées.

PROGRAMMATION

Elle peut être faite soit en usine sur REPRON, soit par l'utilisateur sur CCPROM.

Une mémoire de consignes programmée en fonction de l'utilisation de la centrale de mesures définit voie par voie, la période des cycles de scrutation, le nombre de cycles constituant une séquence de mesures, ainsi que les traitements à effectuer sur les mesures brutes, plusieurs traitements pouvant être faits sur chaque voie.

.../...

Liste des programmes standards de traitement :

- Valeur instantanée,
- Valeur moyenne,
- Valeur totale d'un comptage avec mise à l'échelle,
- Valeur minimale et maximale avec leur rang dans la séquence de mesures,
- Classement durant la séquence du nombre de valeurs supérieures à un seuil, inférieures à un autre seuil, et comprises entre les deux seuils.
- Valeur intégrée entre deux cycles consécutifs par conversion tension/fréquence.

Cette liste n'est pas exhaustive.

Visualisation des données sur le site

Trois possibilités sont offertes pour visualiser les 200 dernières mesures avec la date et l'heure des séquences et effectuer la mise à l'heure de l'horloge avant la mise en service :

- utiliser l'afficheur à cristaux liquides de 16 caractères alphanumériques et les boutons poussoirs qui peuvent être intégrés à la centrale, pour la version avec enregistrement sur cassette,
- Dialoguer par l'intermédiaire d'un terminal miniature (format calculette),
- Exploiter les possibilités du coffret de test-programme

Alimentation

- Tension 12 V CC - consommation de 20 à 50 mA.

L'énergie est fournie par le panneau solaire monté sur le mat. D'autres sources d'énergie peuvent être envisagées en fonction des sites de mesures.

Environnement

- Température de fonctionnement : - 15 à + 50° C.
- Température de stockage : - 25 à + 70° C.

**LE LOCALISATION
DE COLLECTES
DE DONNÉES
ARGOS**

**ARGOS DATA
COLLECTION AND
PLATFORM
LOCATION SYSTEM**



COMPAGNIE POUR L'ÉLECTRONIQUE
L'INFORMATION ET LES SYSTÈMES
ESPACE

rue des Frères-Boudes, Z.I. Thibaud
31084 TOULOUSE CEDEX
Tél. (61) 44.39.31 Téléx 521 02

Le système de localisation et de collectes de données ARGOS se compose de :
deux satellites simultanément en orbite qui emportent des équipements de réception et de réémission vers le sol ;

des plates-formes équipées d'une électronique de transmission vers les satellites et de capteurs destinés à prendre en compte les mesures que souhaitent obtenir les utilisateurs (ex. : PTT type CML 80) ;

des stations de réception directe et de traitement des informations issues des plates-formes (ex. : type SRDA 81) ;

un centre de traitement général.

Le système est opérationnel depuis 1979 et sa pérennité est assurée de façon très certaine pendant de nombreuses années.

The ARGOS system is made up of :

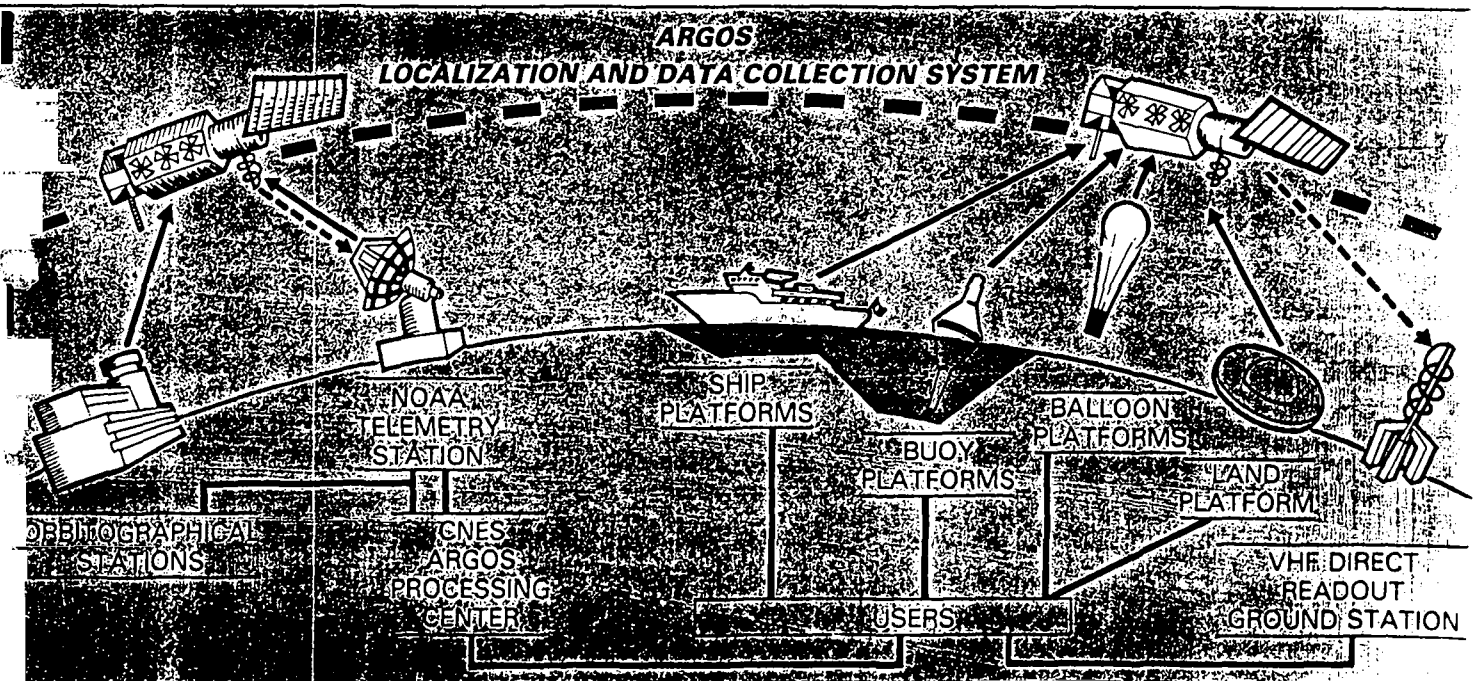
two low-altitude polar orbiting satellites in orbit simultaneously with onboard receivers and retransmission equipment ;

platforms installed with uplink PTTs and sensors for transmitting data requested by users (ex. : PTT type CML 80) ;

direct read-out and platform generated data processing systems (ex. : SRDA 81) ;

a main computing center.

This system has been operational since 1979 and a long service lifetime has been ensured for a very long time.



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Chacune des plates-formes, qui peut-être placée en un point quelconque du globe, émet régulièrement vers les satellites un message qui contient :

- les informations fournies au niveau des capteurs ou tout autre moyen de mesure et de contrôle,
- un numéro d'identification.

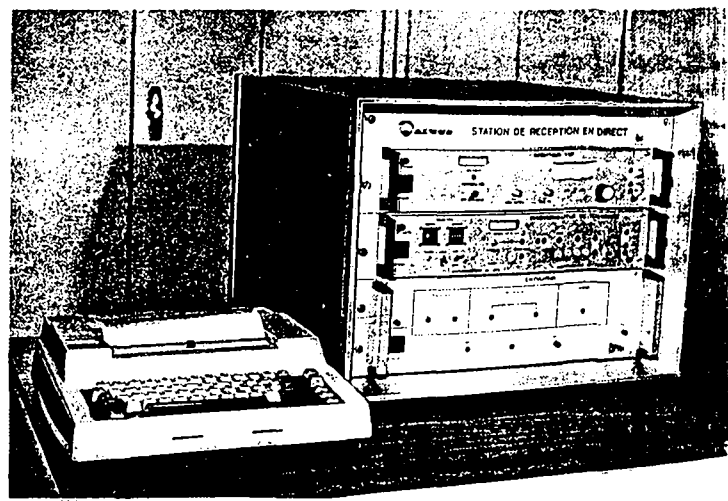
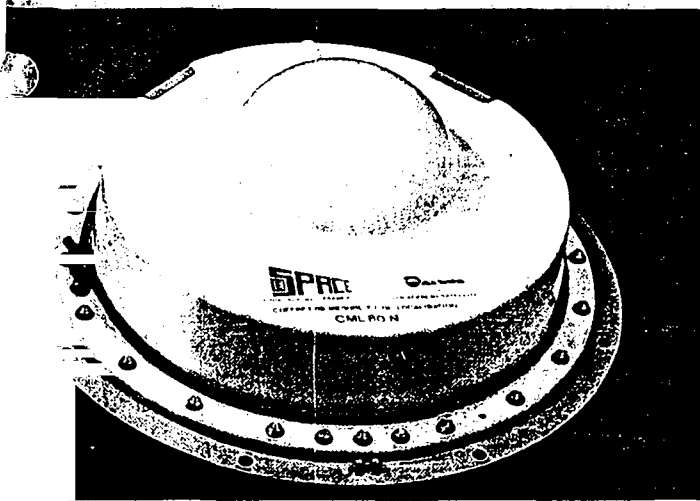
Les satellites placés sur une orbite circulaire polaire à 850 km d'altitude reçoivent les messages émis par les plates-formes dans leur visibilité.

FUNCTION PRINCIPLE

Each platform, which can be installed in any part of the globe, transmits a message regularly to the satellites; the message contains the following data :

- data generated by sensors or by all other measurement and control systems.
- PTT id. number.

The satellites are placed on a 850 km circular polar orbit and collect data from platforms within satellite coverage.



CEIS ESPACE développe et commercialise :

- émetteurs balises ARGOS type 80 N localisables ou non localisables;
- plates-formes de mesures et de localisation (type 80 N), complètes pouvant recevoir jusqu'à 32 capteurs;
- bancs de test destinés à ces plates-formes;
- stations de réception directe ARGOS (type SRDA 81);
- des mini-stations de météorologie, hydrologie, etc.

CEIS ESPACE fournit des systèmes de collectes et traitement de données, « clés en main » pour le système ARGOS.

Exemple : ensemble de surveillance d'un bassin hydrologique fournissant en clair toutes les informations relatives au bassin (niveau d'eau - débit - pluviométrie - alarme).

CEIS ESPACE assure la formation du personnel destiné à les mettre en œuvre.

CEIS ESPACE develops and commercializes :

- ARGOS 80 N PTTs with or without platform location capability;
- location and measurement platforms (CML 80 N), which can take up to 32 sensors;
- test facilities for these platforms;
- direct read-out ARGOS ground stations (SRDA 81);
- meteorology, hydrology, mini-stations, etc.

CEIS ESPACE supplies « turn-key » DC and DP systems for service ARGOS.

Example : an overall hydrology monitoring system which will give all data on a water basin (water level, flowrate, rainfall measurements, alarm).

CEIS ESPACE ensures personnel training for staff who are to operate these stations.

VISIBILITÉ DE DEUX SATELLITES, SUR UNE PÉRIODE DE 24 heures DEPUIS UN POINT AU SOL, EN FONCTION DE LA LATITUDE SATELLITE VISIBILITY OVER 24 hrs FROM THE EARTH AS A FUNCTION OF LATITUDE.

Latitude Latitude	Durée cumulée de visibilité sur 24 h Cumulated visibility time over 24 hrs	Nombre de passages sur 24 h Number of passes in 24 hrs			Durée moyenne d'un passage Mean pass duration
		min. min	moy. mean	max. max	
± 0°	80 mn	6	7	8	10 mn
± 15°	88 mn	8	8	9	
± 30°	100 mn	8	9	12	
± 45°	128 mn	10	11	12	
± 55°	170 mn	16	16	18	
± 65°	246 mn	21	22	23	
± 75°	322 mn	28	28	28	
± 85°	360 mn	28	28	28	
± 90°	384 mn	28	28	28	

Les satellites :

- Réémettent immédiatement les informations reçues vers les stations de réception directe (type SRDA 81) ce qui permet aux utilisateurs disposant de telles stations de recueillir et de traiter en temps quasi réel, les informations de collectes de données.
- Gardent en mémoire l'ensemble des informations reçues des plates-formes et les restituent à un centre de traitement général situé à Toulouse (France).

Le premier mode de fonctionnement est surtout intéressant pour les utilisateurs :

- qui désirent obtenir des informations collectées de données de plates-formes très rapidement après le passage du satellite ;
- qui ne disposent pas de moyens de transmission rapides et sûrs entre le centre de traitement et leur propre implantation ;
- dont toutes les plates-formes sont situées dans une zone de l'ordre de 2 000 km de rayon autour de la station de réception directe ;
- qui n'ont pas besoin d'informations de localisation de ces plates-formes (plates-formes fixes).

Le second mode s'adresse plus particulièrement aux utilisateurs :

- qui souhaitent pouvoir localiser ou recueillir les données émises par des balises placées en des points quelconques du globe ;
- pour lesquels des délais de restitutions de données de l'ordre de quelques heures sont admissibles ;
- qui sont situés dans des zones disposant de bonnes liaisons téléphoniques ou Telex.

CAPACITÉ DU SYSTÈME ARGOS

La capacité maximale du système est :

- 16 000 plates-formes en collectes de données,
- 4 000 plates-formes en localisation pour des plates-formes uniformément réparties sur le globe.

Une station de réception directe utilisateur peut recevoir jusqu'à 800 plates-formes qui peuvent être reçues en collectes de données seulement, dans un cercle de l'ordre de 2 000 km de rayon centré autour de la station.

Le centre de traitement de TOULOUSE est dimensionné pour recevoir l'ensemble des balises du système au plan mondial.

DOMAINES D'UTILISATION DU SYSTÈME ARGOS

En météorologie

Mesure de pression au sol : température, anémométrie, hygrométrie, ensoleillement, pluviométrie, etc.

En océanologie

Étude des ondes de surface, des niveaux, des courants, de la température et de la salinité, du mouvement des icebergs, etc.

En géologie

Surveillance et prévision des tremblements de terre, des éruptions volcaniques, des glissements de terrain, ressources minières.

En hydrologie

Prévision des inondations, surveillance des grands fleuves, prévision des ressources en eau, niveau des barrages, hauteur et épaisseur de la neige, prévision des avalanches.

Localisation des mobiles maritimes

Bouées dérivantes, bateaux).

Localisation des mobiles aériens

(balises sondes, par exemple).

Localisation de mobiles terrestres

(expéditions dans les zones isolées).

Off-shore - Pollution.

et de nombreuses autres applications.

The satellites

- retransmit data down to the direct read-out ground station (SRDA 81) and thus enable users equipped with such systems to collect and process data in quasi real-time.
- store data received from platforms in their memory and store it to a general computing center located in TOULOUSE (France).

The first function mode is especially useful to users :

- who want to have very rapid data collection systems once the satellite has passed overhead;
- who do not have rapid and reliable transmission between processing center and their premises;
- whose platforms are located within a 2.000 km radius of direct read-out ground station;
- who do not require platform location data (for fixed platforms).

The second mode mainly concerns users :

- who want to be able to locate platforms or collect data transmitted by PTTs located all over the world;
- for whom the data restitution times (some hours) are admissible;
- who are located in zones with good telephone or telex links.

SYSTEM ARGOS CAPABILITIES

The maximum capability is :

- 16.000 platforms for data collection,
- 4.000 platforms for platform location (for platforms spread evenly over the globe).

A direct read-out ground station can receive up to 800 platforms in the data collection mode only in a 2.000 km radius around the station.

The TOULOUSE DPC is designed to receive data from all the systems PTTs throughout the world.

SYSTEM ARGOS APPLICATIONS

Meteorology

Ground pressure measurements, temperature, wind speed, hygrometry, insolation, rainfall, etc.

Oceanology

Studies on surface waves, layers, currents, temperature, salinity (salt content), iceberg drift.

Geology

Monitoring and forecasting of earthquakes, volcanic activity, mineral resources and ground movements.

Hydrology

Flood control, monitoring main rivers, water resources, dam levels, thickness and density of snow, avalanche forecasting.

Location of sea mobiles

(drifting buoys, boats).

Location of air mobiles

(sounding balloons).

Location of land mobiles

(expedition to remote areas).

Off-shore - Pollution.

... and many other applications.

G R E T A

1. - INTRODUCTION

GRETA (Graphique En Temps Automatisé) est un logiciel interactif et conversationnel de tracé de courbes historiques. Ce logiciel est écrit en Fortran 77 Lahey (version 2.21) et utilise la norme graphique GKS, développée au BRGM pour micro-ordinateur (GDMGKS).

GRETA est à ce jour exécutable sur un micro-ordinateur PC compatible disposant d'un coprocesseur arithmétique, de 640 KO de mémoire vive et d'une version 3.1 (ou supérieure) du DOS.

2 - POSSIBILITES DU LOGICIEL

GRETA est un logiciel extrêmement convivial offrant de nombreuses possibilités à l'utilisateur.

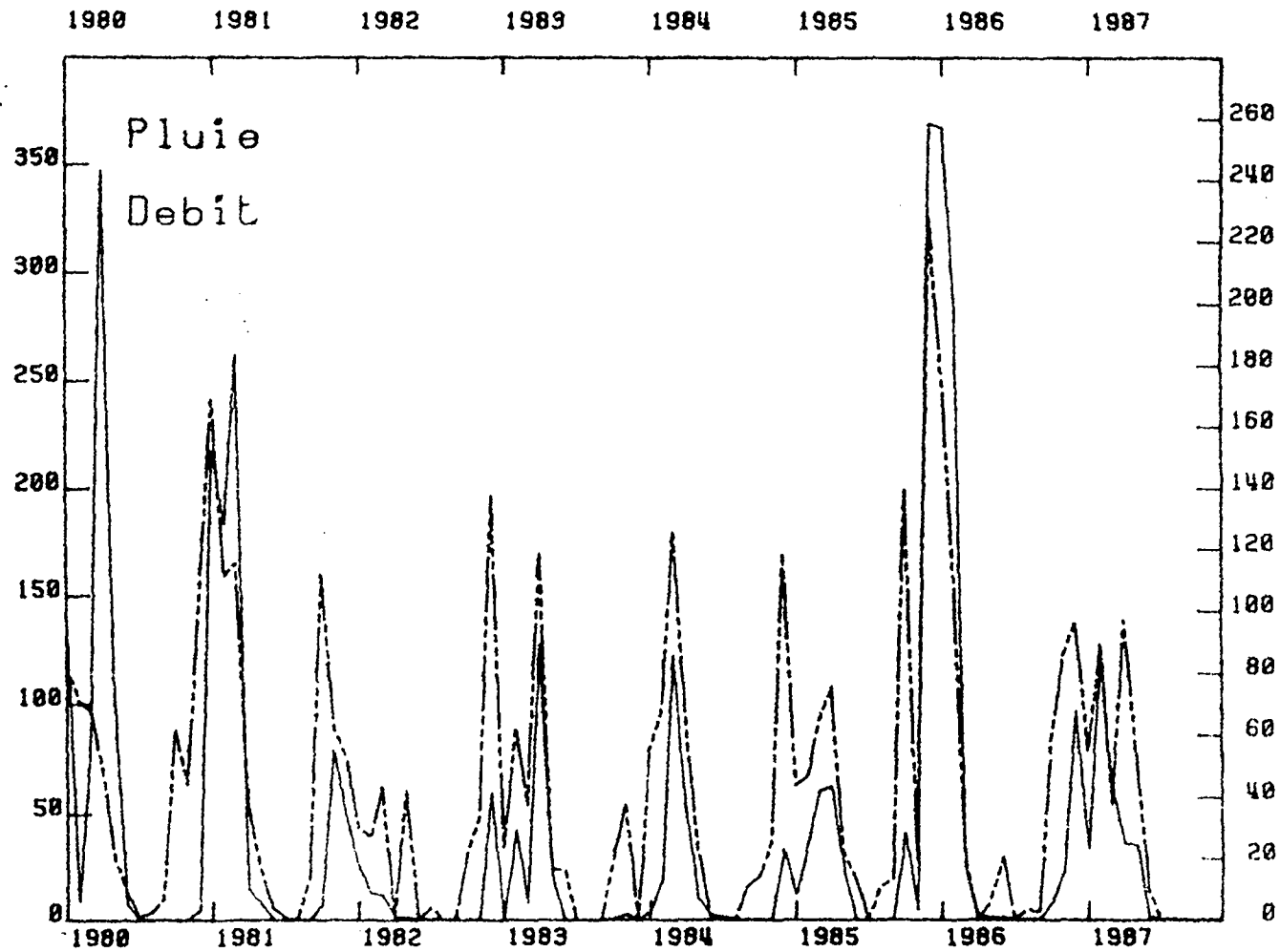
Le programme est capable d'optimiser par lui-même tous les paramètres du dessin correspondant à un fichier de données. L'utilisateur pressé qui veut obtenir rapidement une première visualisation de son fichier peut se contenter d'accepter les options que lui propose GRETA.

Si ce premier dessin ne convient pas, l'utilisateur peut, sans quitter le programme, rappeler l'option de définition des paramètres et modifier ceux-ci à son gré. Il est ainsi possible de modifier les limites du dessin, les échelles de temps et de valeurs, la taille du dessin, les types couleurs et figurés des courbes, le mode de représentation (arithmétique, logarithmique), la position des graduations en abscisse et en ordonnée.

Il est possible de tracer les courbes sous forme d'histogramme ou non, de faire une transformation du type $ay+b$ sur les ordonnées, de choisir une échelle inversée, de mettre ou non un titre au-dessous ou au-dessus du dessin (selon le cas).

Lorsque le dessin est affiché à l'écran, il est encore possible de le modifier à l'aide du menu graphique qui s'affiche dans le coin supérieur droit de l'écran. On peut alors en particulier changer les graduations de l'échelle des temps, ou positionner un commentaire. Ces modifications seront prises en compte sur la sortie papier que l'on pourra demander ensuite.

Les paramètres d'un tracé peuvent être sauvegardés dans un fichier "témoin" qui pourra être réutilisé en lecture pour dessiner une autre courbe (soit au cours de la même exécution de GRETA, soit au cours d'une exécution ultérieure).



Exemple de tracé de 2 courbes à 2 échelles différentes
(mesures réelles)

PLUIE ET DEBIT A KALAYA