HYDROLOGIE DES RÉGIONS TROPICALES ET ÉQUATORIALES

J. PRUNET

Ingénieur Principal des Travaux Publics de la France d'Outre-mer

Les précipitations annuelles atteignent en un certain nombre de points caractéristiques des colonies françaises d'Afrique tropicale, et pour la moyenne de 10 années :

ABIDJAN	1.960 m/m
BOUAKE	1.186 m/m
FERKESSEDOUGOU	1.200 m/m
BOBO DIOLASSO	1.178 m/m
OUAGADOUGOU	881 m/m
LOME	760 m/m

A Paris, elles n'excèdent pas 600 m/m. Il pleut donc beaucoup plus en Afrique tropicale qu'en France. Cependant, les rivières permanentes sont rares, sauf dans les régions très accidentées et les grands fleuves exceptés, et les vallées de ces fleuves et rivières sont généralement désertiques, en raison de leur régime torrentiel comportant des crues d'une extrême violence. Cette observation ne s'applique toutefois pas aux vallées du Sénégal et du Niger, à partir de l'endroit où elles ont une faible pente. Ainsi dans l'ensemble de l'Afrique Occidentale la plupart des installations de captage destinées à alimenter les villes ou les industries doivent emprunter leur débit au sous-sol.

Or, jusqu'à ces dernières années, les travaux faits dans ce but avaient bien montré qu'une nappe phréatique existait à peu près partout et qu'elle était à assez faible profondeur, mais que les ouvrages de prise ne donnaient que des débits faibles, la nappe étant contenue dans les terrains éboulux où les captages présentaient des difficultés techniques d'exécution considérables.

Au cours de 10 années de travaux de recherches et de captages ayant amené à faire plus de 200 sondages et à observer des centaines de puits indigènes, nous nous sommes efforcés d'expliquer des constatations souvent en apparence paradoxales et contradictoires, en tous cas s'écartant des règles pratiques admises en pays tempérés. Le but de cette étude est d'exposer les résultats de ces travaux et les procédés tech-

niques utilisés à leur exécution en espérant apporter notre contribution à la mise en valeur de territoires où la question de l'eau se pose toujours et présente souvent des obstacles à ce jour insurmontés à l'évolution économique.

Nos observations s'étendent à toute la Côte d'Ivoire et au Bas-Togo, régions comprises entre le 5° et le 13° parallèle Nord, où se rencontrent toutes les formations géologiques constituant le socle africain, c'est-à-dire les granito-gneiss, le birrimien, les séries intermédiaires plissées, le primaire et les alluvions tertiaires et quaternaires. Les séries minéralogiques rencontrées présentent une très grande variété, allant des granites d'âge très divers et des roches basiques les plus compactes, aux sables continentaux récents, en passant par tous les intermédiaires de gneiss et de grès plus ou moins métamorphisés, plus ou moins siliceux. Cependant, tous ces terrains ont un caractère commun dans les régions qui nous intéressent : ils ont subi, en surface, des altérations souvent très importantes, notamment une latérisation souvent très évoluée. A ce caractère commun, qui masque presque partout la roche-mère, sont dues les difficultés d'établissement de la carte géologique qui néglige, en principe, ces formations superficielles. Les travaux de captage ne bénéficient pas de cette faculté. Aussi, commençons-nous par les étudier, d'autant plus que nous le verrons, si l'eau existe dans le sous-sol, c'est précisément dans les formations d'altération.

CHAPITRE I^{er}

TERRAINS D'ALTERATION

Dans son *Traité Pratique de Géologie*, Paul LEMOINE, Professeur au Laboratoire de Géologie du Muséum, s'exprime ainsi, page 131 :

« Une fois déposée ou mise en place, une roche est soumise, d'une part à l'action des eaux

CARTE GEOLOGIQUE SCHEMATIQUE DE L' A . O . F .

qui circulent dans sa masse, d'autre part à l'action des agents atmosphériques qui altèrent et désagrègent sa surface. Ce sont les roches cristallines ignées qui sont le plus susceptibles de se désagréger à cause de la décomposition chimique de leurs feldspaths et de leurs éléments ferromagnésiens. Beaucoup de roches schisteuses subissent le même sort. Leur résistance, leur solidité, leur dureté diminuent.

« Au contraire, les roches sédimentaires sont composées de produits déjà désintégrés : elles sont donc plus stables, moins susceptibles de subir des changements chimiques. Au lieu d'être désagrégées par l'action de l'eau, elles sont même souvent consolidées par l'introduction, dans leurs pores, de divers minéraux qui les consolident ».

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, sous les climats tropicaux et équatoriaux, les altérations superficielles revêtent un caractère particulier d'intensité, dû à la température et à l'acidité des eaux, à la violence des précipitations, à l'importance de l'évaporation, des apports éoliens, etc... Il en résulte que l'épaisseur de la couche altérée superficielle sera généralement importante. Elle atteindra couramment plusieurs dizaines de mètres dans les terrains anciens contenant une forte proportion de silicates.

Toute hydrogéologie des pays tropicaux doit donc être précédée d'une étude des altérations superficielles, car les formations en provenant sont le plus près de la surface et les travaux de captage y seront le moins onéreux. Bien souvent même, c'est là seulement qu'ils seront possibles, car les roches-mères n'apparaissent nulle part ou encore, étant très anciennes et compactes, ne contiennent pas d'eau susceptible d'être captée.

La Pédologie, qui est la science du sol, étudie les transformations aboutissant à la création du milieu où les plantes trouvent des éléments nécessaires à leur existence, c'est-à-dire qu'elle a pu percevoir dans les sols africains tropicaux, ce qui les distingue des sols des climats tempérés. Les altérations sont longuement étudiées dans les ouvrages inspirés par cette science et les noms d'ERHARDT, de SCAETTA, de LOMBARD, de BESAIRIE, se trouvent sur des traités ou des articles qui sont du plus grand intérêt pour l'hydrogéologie. Toutefois, la pédologie s'occupe plus spécialement des horizons superficiels, les horizons profonds n'étant envisagés que dans la mesure où ils participent à la formation du sol. L'Hydrogéologie, au contraire, s'attache à déterminer les conditions de gisement de l'eau et celle-ci se trouve surtout dans les couches profondes des terrains d'altération. Elle cherche aussi à connaître le mode d'alimentation des nappes, par conséquent le mode et le lieu d'infil-

tration des eaux de pluie comme la circulation des eaux infiltrées. Donc, pour examiner les phénomènes d'altération, cette étude s'appuiera sur les études pédologiques, dont les résultats théoriques et pratiques n'ont pas à être repris. Mais elle les étendra et les complètera en les appliquant à l'hydrogéologie.

ALTERATION DES SILICATES

Le sous-sol de la Côte d'Ivoire est formé en majeure partie, de terrains anciens, cristallins, dont, par conséquent, les silicates constituent l'élément principal. Ils sont très susceptibles d'altération.

Le numéro 12, des publications du Comité d'Etudes Géologiques et Minières Coloniales, contient un article de M. ERHARDT, Directeur de l'Institut de Pédologie du Bas-Rhin, sur la formation de certains sols de Madagascar : sols de forêts et sols de prairies en partant d'une roche-mère cristalline. Il dit :

« La roche-mère peut être un granite ou un gneiss ou encore un micaschiste. L'âge des sols est très grand et se chiffre certainement par des milliers d'années.

« Si l'on regarde de près un pareil sol forestier, on voit qu'il peut être divisé en plusieurs horizons :

« 1°) *Zone de départ* : Au-dessus de la roche-mère fraîche, on voit un horizon plus ou moins blanc ou grisâtre, friable dans lequel les minéraux sont extrêmement altérés, mais où la texture primitive de la roche est restée presque intacte. Cette zone peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur.

« 2°) *Zone tachetée* : Plus haut, la texture de la roche se perd, petit à petit. On voit apparaître des taches rouges, violettes, jaunes. Dans le cas d'une roche granitique, ces taches sont distribuées irrégulièrement. Dans le cas d'un gneiss à biotite, il y a des traînées rouges qui correspondent aux feuillets à biotite, tandis que les feuillets à feldspaths sont encore blancs.

« 3°) *Zone rouge* : La couleur rouge devient de plus en plus dominante à mesure qu'on monte, en même temps que la texture de la roche ou sa schistosité s'efface complètement. L'horizon est transformé finalement en une masse rouge homogène, de caractère argileux.

« 4°) *Zone podzolée* : Avant d'atteindre la surface du sol, la zone rouge passe d'habitude à un horizon plus ou moins fortement décoloré, le plus souvent de couleur rose pâle ou saumon.

« 5°) *Couche végétale* : Celle-ci est de très faible épaisseur, 5 à 10 cm seulement, composée

presque uniquement de débris végétaux, en voie de décomposition rapide. Pas d'humus au sens habituel du mot.

« C'est là le schéma d'un profil de sol forestier latéritique auquel peuvent être rattachés tous les sols forestiers que nous avons étudiés dans la région de l'Est de Madagascar.

« Nous allons discuter leur genèse à l'aide des documents analytiques qui nous ont été fournis par un profil étudié aux environs de Moramanga.

« Nous constatons, d'abord, que la zone de départ C_0 possède 1,5 % d'hydrate de fer et 12 % d'hydrate d'alumine, à côté d'un résidu insoluble dans l'acide sulfurique, de 82 %. Il n'y a pas d'argile. Dans cette zone, on voit très nettement comment les feldspaths se transforment en hydrargilite ($Al_2O_3 \cdot H_2O$).

« Dans la zone rouge B qui suit la zone tachetée, la proportion en fer s'est accrue considérablement, en même temps que celle de l'hydrate d'alumine et pour 36 % d'argile.

« L'étude des p.H. a montré que les couches superficielles du sol sont sensiblement acides (p.H. = environ 5). Mais cette acidité décroît continuellement en allant vers le bas et nous avons en C_0 , qui est la zone d'attaque de la roche, un p.H. franchement alcalin de 7,4. »

« La genèse du profil étudié doit s'expliquer à notre avis, de la manière suivante : la latérisation, c'est-à-dire la décomposition des minéraux silicatés alumineux, avec production de silice libre et d'alumine libre, se fait actuellement en C_0 dans les conditions de réaction alcalin. La silice est éliminée par les eaux descendantes, tandis que les hydroxydes de fer et d'alumine flocculent ou précipitent au voisinage de la zone de départ. La réaction alcaline s'explique naturellement par une hydrolyse extrêmement intense qui libère les bases de la roche ».

« Celles-ci ne peuvent être que très incomplètement neutralisées par des apports humiques venant d'en haut. En effet, les sols de forêt vierge de la région étudiée n'ont pour ainsi dire pas du tout d'humus. Les produits de décomposition de la matière organique sont incolores et semblent être presque instantanément repris par la végétation. Si une certaine quantité de ces produits acides se dirige vers le bas, ces derniers sont fixés sur leur passage et neutralisés par les bases des minéraux qui continuent à se décomposer à la partie supérieure ».

Nous citerons également la description tirée du même article et relative à un sol de prairie :

« Pour comprendre les sols latéritiques de prairie, il faut les étudier dans une zone assez éloignée de la forêt actuelle et sous des condi-

tions climatiques qui comportent une saison sèche bien accusée. Nous voyons alors des profils du type suivant :

1°) Zone de départ,

2°) Zone tachetée,

3°) Zone rouge,

(Ces horizons ont les mêmes caractères que ceux décrits précédemment dans les sols forestiers).

4°) Zone de concrétion : On trouve dans cet horizon des matériaux concrétionnés qui se cimentent parfois en une nappe compacte et dure, tachetée de blanc et de rouge. Souvent, il se forme des alvéoles à l'intérieur desquels les matériaux sont friables.

5°) Zone humifère : Très peu d'humus provenant de la décomposition des graminées.

« C'est par la présence d'une zone de concrétion superficielle que le sol de prairie se distingue du sol forestier. Cet horizon remplace l'horizon podzolé. Il contient toujours plus d'éléments latéritiques que les horizons inférieurs. La plupart du temps, il est plus riche en éléments latéritiques qu'en argile. Dans certains cas, les éléments latéritiques peuvent constituer à eux seuls, la quasi-totalité de la zone de concrétion. Nous avons alors affaire à une véritable latérite. Par la cimentation de ses constituants, cette latérite peut devenir très dure et former une cuirasse dans laquelle, suivant les cas, le fer peut dominer sur l'alumine ou inversement.

« Le mécanisme de la genèse des vraies latérites est facile à expliquer. Il semble évident qu'il se fait dans ces sols, un transport d'éléments latéritiques vers le haut. Ce transport se fait en saison sèche, quand l'évaporation superficielle fait monter les solutions du sol par capillarité. Les éléments latéritiques précipitent sous forme de « Gel », deviennent irréversibles ou cristallisent. En somme, la zone de concrétion est une zone d'enrichissement tout à fait analogue à un horizon alluvial ou à un Ortstein. Il se constitue en surface, parce que nous avons une prépondérance du mouvement ascendant des solutions du sol ».

Les descriptions qui précèdent ont été faites à Madagascar. Elles sont intégralement applicables à l'Afrique Occidentale. Elles valent pour toutes les roches-mères contenant des silicates. Nous tirons d'ailleurs du traité de Pédologie du même auteur, la citation suivante : « Des roches différentes peuvent, sous certaines conditions, évoluer vers des types de sols semblables, ainsi par exemple, des latérites formées aux dépens d'un granite ou d'un basalte se ressemblent beaucoup ».

Nous compléterons ces indications par une remarque sur l'épaisseur des terrains d'altéra-

tion. Les planches accompagnant l'ouvrage de M. ERHARDT, reproduites d'ailleurs dans la publication N° 12 du Bureau d'Etudes Géologiques et Minières Coloniales intitulée « Etude des Altérations superficielles » et dont nous donnons un schéma, assignent une profondeur de 6 m. 50 environ à l'ensemble des horizons compris entre la zone de départ de l'altération et la surface du sol. Mais il n'indique que la hauteur de 30 m. comme courante (tranchées de chemin de fer, de routes ou d'exploitations minières, page 190). En fait, tous les sondages exécutés sur des terrains à relief doux et au voisinage des plateaux nous ont indiqué des profondeurs de 20 m. à 50 m. de terrains altérés (20 à 25 m. à Cayenne, Agboville, Abengourou, 21 à 50 m. à Bouaké, 25 à 40 m. à Ouagadougou). Ces épaisseurs doivent être en relation avec la vitesse d'approfondissement de l'attaque chimique d'une part, et la vitesse d'érosion des matériaux superficiels d'autre part, les deux étant fonctions du climat et de la végétation, de l'alimentation de la nappe phréatique d'une part, de la texture de la roche, et en particulier du nombre, de l'importance et de la disposition des diaclases qui la sillonnent d'autre part. Ainsi les granites généralement très diaclasés semblent plus rapidement attaqués que les gneiss présentant peu de diaclases verticales. Les massifs de roches cristallines apparentes à la surface du sol sont remarquablement peu fissurés. Ainsi également peut-on constater qu'il existe des relations entre le relief superficiel des terrains altérés et le relief de la roche-mère. Mais nous traiterons plus loin cette question. Bref, une série d'interdépendances du climat du relief, de la nature de la roche se laisse entrevoir, qui sont encore mal déterminées et que des observations plus nombreuses et plus générales pourront probablement préciser.

Quoi qu'il en soit, dans les régions tropicales à sous-sol cristallin et sous les plateaux, 20 à 50 m. de terrains latéritiques recouvrent la roche-mère. Les surfaces de séparation des diverses couches seront peu marquées, car souvent les transitions sont insensibles. Elles seront irrégulières aussi, les dépôts affectant une allure capricieuse et la roche n'étant pas attaquée partout à la fois. Ainsi, les roches fissurées seront décomposées à partir de leur face supérieure et des faces des fissures plus ou moins inclinées qu'elles présentent et où circule l'eau. Comme celles-ci décomposent la roche en blocs, l'attaque se fera de l'extérieur vers l'intérieur de ceux-ci. Elle affectera l'aspect d'une sorte de pénétration des blocs par le milieu environnant. On trouve quelquefois des éléments de roche-mère intacte, plus ou moins gros qui ont pu subsister dans l'épaisseur des couches supérieures altérées.

Leur surface présente alors des desquamations caractéristiques. Le processus d'attaque explique que le nombre et la disposition des diaclases aient une grande influence sur la rapidité de l'approvisionnement de l'altération.

M. ERHARDT dans son ouvrage, ne parle pas des nappes rencontrées. En fait, dès que l'épaisseur des terrains d'altération dépasse 12 à 15 m. il est rare qu'ils ne renferment pas une nappe phréatique. Alors le profil que nous avons reproduit plus haut est allongé par interposition entre la zone de départ et la zone tachetée d'une épaisseur plus ou moins grande d'arènes siliceuses, parfois feldspathiques et micacées, argileuses ayant la consistance de bouillies et très aquifères. Leur importance peut atteindre plusieurs dizaines de mètres.

SOL de PRAIRIE à GUIRASSE LATÉRIQUE sur GRANIT

Nous donnons ci-dessus un profil rencontré à Bouaké (Côte d'Ivoire). Il semble que cette zone ne soit guère qu'une zone où l'attaque de la roche s'achève dans les horizons inférieurs et où les produits de décomposition sont transportés

vers le haut pour se fixer dans la zone d'alluvionnement.

Une remarque s'impose quant au p. H. des eaux rencontrées dans ces terrains. Lorsque le captage est fait dans les régions inférieures exclusivement, au contact de la roche-mère, là où les silicates sont en voie de décomposition, le p. H. des eaux est, en effet, voisin de 7,4. Mais si le captage est fait sur une grande épaisseur, le p. H. devient acide car les eaux alcalines inférieures sont mélangées aux eaux acides supérieures et le p. H. varie de 7,4 à 5, suivant les cas. Donc en terrain d'altération, il faudra toujours s'attendre à avoir des eaux acides et prendre des dispositions en conséquence, pour les ouvrages en contact avec l'eau (ouvrages de prises, conduites, réservoirs, pompes).

En résumé, l'altération des silicates en régions tropicales se traduit par leur décomposition par les eaux acides, les alcalis disparaissant, la silice hydratée et l'alumine hydratée ainsi que les composés colloïdaux des autres métaux étant transportés vers le haut et se déposant à des niveaux différents sous une forme irréversible, c'est-à-dire n'entrant plus en solution et y créant toute une gamme d'argiles latéritiques et de latérites plus ou moins colorées et compactes, dont le terme ultime est la cuirasse latéritique rencontrée sur les plateaux de la région Soudanaise.

Mais l'érosion superficielle agit simultanément ; la forme abrupte des rebords des plateaux avec blocs roulés détachés de la carapace par l'expansion des racines sur les versants le prouve. La coloration marquée des eaux de ruissellement au cours des pluies violentes, caractéristiques de ces régions, en est aussi un indice. En sorte que, actuellement, l'altération et les érosions revêtent, en régions tropicales, un caractère d'intensité particulier, grâce à l'importance, à l'acidité et à la température élevée des précipitations, grâce aussi à l'intensité de l'évaporation en saison sèche. Elles se traduisent par :

— Une attaque gagnant en profondeur des roches en général, des roches silicatées en particulier.

— Un transport de leurs éléments vers le haut, pour y former des argiles latéritiques ou des cuirasses latéritiques.

— Une érosion de ces mêmes couches par les eaux superficielles.

Dans les climats tempérés, le processus est bien analogue et les érosions superficielles agissent bien sur des terrains déjà plus ou moins désagrégés par les actions chimiques et les agents atmosphériques : eaux de ruissellement et

d'infiltration, gelée, insolation, vent, etc... Mais cette action ne s'étend qu'à une faible profondeur et la couche d'altération superficielle est négligeable dès qu'il est question d'eaux souterraines devant être cherchées à quelques dizaines de mètres de profondeur. En Afrique Occidentale, au contraire, la règle générale est que les quelques dizaines de mètres soient des terrains d'altération formés de latérites compactes, argiles latéritiques et sables argileux. C'est dans ces terrains que l'Ingénieur devra établir les captages dont il se servira pour alimenter les centres urbains et ruraux.

COMPORTEMENT DES DIVERS TERRAINS

Les cas d'altération examinés par M. ERHARDT ne concernent que les silicates. Or les roches contiennent, dans les régions envisagées, des oxydes libres : silice, hématite, ilménite, magnétite et d'autres corps plus complexes et d'ailleurs sans importance. La silice sous forme de quartz est de beaucoup l'élément jouant le plus grand rôle en hydrogéologie. Très peu attaquée par les eaux, elle subsiste longtemps après le début de l'altération de la roche-mère et permet souvent de la reconnaître. Cependant les cristaux perdent peu à peu leurs arêtes et peuvent donner l'impression d'un sable d'alluvions fluviales dans les horizons supérieurs.

Parfois, dans les sables d'alluvions par exemple, dont les grains étaient tangents au moment du dépôt, les grains de silice ont diminué de grosseur, tandis que les centres restaient à la même distance et que les vides étaient comblés par des argiles alluvionnaires jusqu'à prendre la structure et l'aspect d'une terre à poterie. C'est dire que même pour le quartz, l'altération peut apporter les plus grandes modifications.

Le point de vue examiné ici étant l'hydrogéologie et le quartz étant l'élément le plus important dans les questions de circulation d'eau souterraine, l'altération des roches sera examinée d'après leur teneur en silice. Nous aurons :

Les roches composées de quartz pur ou cimenté : sables et grès.

Les roches composées de quartz et de silicates et d'autres corps cristallisés.

Les roches ne contenant pas de quartz, mais surtout des silicates.

Les calcaires ne sont pas envisagés, ils n'existent pas en Afrique Occidentale à l'état de formation de quelque importance, sauf dans la région lagunaire et dans le Sénégal où nous ne les avons pas étudiés.

ALTÉRATION DES SABLES (très grossis)

SABLES ET GRAVIERS. — Ils sont rencontrés :

a) dans la zone côtière (cordon littoral et zone lagunaire) où ils affectent une importance de plusieurs dizaines de kilomètres en largeur sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur par endroits.

b) dans les vallées des grands fleuves où ils forment des terrasses parfois très importantes (carrières de gravillon de Dimbokro de Kumikro).

c) en couverture sur les plateaux de grès primaires situés dans le Soudan Méridional et dans le voltaïen de la Gold Coast.

d) en couverture également sur certains plateaux élevés dont le sous-sol est formé de quartzites et schistes des séries intermédiaires plissées.

L'âge, toujours récent, de ces formations, n'aura pas permis à l'altération de leur enlever beaucoup d'éléments : en sorte que les grains de silice seront restés à peu près intacts, sauf si leurs dimensions très faibles ont facilité l'attaque. La roche altérée montrera donc toujours le gravier ou le sable. Mais les vides seront comblés par les intercalations, les transformant en grès ou poudingues. En surface, nous trouverons souvent une carapace latéritique (région de la gare à Bobo, au terrain d'aviation à Bobo) quand le ciment apporté sera ferrugineux et argileux. En d'autres points, il sera argileux, par exemple dans les vallées des grands fleuves (carrière de Dimbokro de Kumikro, rive droite du Bandana, de Tombokro près du bac, rive gauche et dans la terre de barre du Dahomey et du Togo). La cuirasse latéritique ferrugineuse aura pu se former à une certaine profondeur. Sous Abidjan, on trouve ainsi une couche de ces grès ferrugineux sous plusieurs dizaines de mètres de sable, ainsi d'ailleurs qu'aux sources du Banco et à la carrière de Bingerville. Au-dessus de cet horizon, le sable a vu ses grains très diminués et leurs vides comblés par une argile dont l'origine pourrait fort bien se

trouver, d'après SCAETTA et BESAIRIE, dans les apports éoliens. Ceux-ci sont composés, en partie, de silicates très fins qui, altérés, donnent une argile plus ou moins ferrugineuse entraînée sous forme colloïdale au-dessus de la couche de grès ferrugineux. En dessous de cette couche et de l'horizon de grès ferrugineux, des intercalations argileuses ajoutées à la diminution des grains de sable, donnent au terrain une allure pseudo-stratifiée qui peut faire illusion. Le sable altéré est devenu parfois une véritable argile, où les éléments sablonneux sont en faible quantité et qui a tous les caractères d'une argile à poterie dont elle peut remplir le rôle. Si ces terrains peuvent être examinés en place, on les trouvera percés de canalicules verticaux ou para-verticaux, reliquats de la circulation des eaux qui les ont parcourus, pour les former. Car les terrains d'altération ont un caractère commun, ils sont plus ou moins perméables, mais sont tous perméables, depuis la cuirasse latéritique la plus dure (à moins qu'elle ne soit colmatée en surface si elle est dénudée, par exemple sur un bewal) jusqu'à l'argile la plus plastique et la moins sablonneuse en apparence. Nous reviendrons sur cette question au sujet de la perméabilité verticale des divers terrains. Les argiles d'altération latéritiques ont un autre caractère : elles prennent beaucoup moins de retrait que les argiles sédimentaires de composition analogue, ce qui s'explique par les vides que les premières contiennent.

Les intercalations argileuses ont dû se faire au-dessus du niveau phréatique ; mais celui-ci a pu beaucoup varier. Ainsi, à Abidjan, les horizons d'altération se trouvent actuellement jusqu'à plusieurs dizaines de mètres sous le niveau de la lagune, mais les formes des vallées submergées prouvent que le niveau phréatique a pu se trouver encore plus bas.

Très souvent, presque toujours même, des sables fins additionnés d'argile, formeront des terrains qui, noyés, seront mouvants. Nous en avons trouvé une couche à Bobo. Il en existe

aussi à Abidjan, dans la vallée du Banco et de l'Agneby, à Lomé et dans toutes les régions de terre de barre.

En résumé, l'altération des sables et graviers se traduit surtout par un enrichissement des horizons supérieurs qui les transforme en grès ferrugineux ou argileux, parfois en argiles sablonneuses allant jusqu'à l'argile de poterie, mais toujours perméables.

Dans ces terrains, l'eau se trouvera à la base et en une seule nappe par suite de la perméabilité verticale de tous les horizons. C'est le cas à Abidjan, à Bobo, à Lomé. La perméabilité horizontale ne sera grande que dans les couches non enrichies par l'alluvionnement. C'est donc où se trouvent celles-ci, c'est-à-dire vers la base des formations, tout au moins à plusieurs mètres sous la surface phréatique, que seront rencontrées les couches favorables aux captages. Au contraire, vers la surface phréatique de saison sèche, les terrains seront des sables argileux de très mauvaise tenue, à la fois peu perméables et éboulés. Un puits ordinaire, dans ces terrains, trouvera de l'eau partout, mais ne pourra jamais être assez descendu pour en donner beaucoup et l'eau sera colorée par l'argile que le clapotis mettra en suspension pendant le puisage au seau.

En résumé, les sables d'alluvions donnent, en Afrique Occidentale, comme en Europe, les meilleurs terrains pour les captages à la condition que les ouvrages de prise les pénètrent profondément.

L'étude des modifications apportées par l'altération nous explique également pourquoi l'eau y est trouvée partout, mais n'est jamais fournie en abondance par un puits ordinaire.

Elle nous montre également combien l'aspect superficiel du sol est trompeur, puisque la formation alluvionnaire la plus perméable à l'origine, le sable, peut se transformer dans ses horizons supérieurs, en cuirasse latéritique ou en argiles plus ou moins compactes, tandis que ses horizons inférieurs conservent une perméabilité leur permettant de contenir une nappe phréatique abondante.

Grès. — Les grès sont constitués par des éléments de quartz agglomérés par un ciment. Cet alluvionnement se sera produit au cours des périodes géologiques et avec des matériaux souvent très peu attaquables par l'eau. Le grès se prête donc mal à la formation de terrains d'altération. Aussi l'érosion superficielle ira plus vite que l'altération dès que la forme du relief le permettra (ruissellements importants) et la roche-mère sera souvent apparente. Elle pourra être recouverte d'une cuirasse latéritique sub-aérienne provenant d'éléments mélangés du sol sous-jacent et d'apports éoliens. Dans tous les cas, la grosseur des éléments siliceux sera celle de la roche-mère au maximum. Donc sur les grès anciens de la région de Bobo, à éléments très fins, les couches d'altération seront peu épaisses et à éléments siliceux très fins, c'est-à-dire que l'eau y sera peu abondante. Pour la

COUPE GÉOLOGIQUE SCHÉMATIQUE
 Suivant les routes de Ouagadougou et de
Sikasso
 Echelles :

Hauteurs : 0,0075 p.km. 1/ 150.000

Longueurs : 0,00037 p.m. 1/ 3.000

trouver, il conviendra de descendre dans la roche où elle est contenue dans les lits et diaclases. L'étude se ramènera à une étude de terrains sédimentaires avec reconnaissance des périmètres d'alimentation, sondages, etc... ce qui est le cas habituel dans les terrains sédimentaires d'Europe. Il semble inutile de l'examiner dans cette étude ayant pour but les cas spéciaux aux terrains rencontrés en Afrique tropicale.

Mais il importe de bien remarquer que souvent, ces grès seront recouverts d'un énorme manteau d'alluvions sablonneuses qui a été mentionné plus haut et qui sera capable de fournir des débits très importants comme le prouvent les rivières permanentes qu'il alimente et qui seront les seules de la région. Donc, quand un sous-sol sera gréseux, il conviendra toujours d'envisager que ses terrains d'altération sont en principe peu épais et que, s'ils semblent avoir une grande importance, il est fort possible que les horizons recouvrant les grès soient en réalité un manteau alluvionnaire d'âge plus récent. Alors les recherches hydrogéologiques se ramèneront à l'étude de terrains sablonneux altérés donnée plus haut.

La coupe géologique supposée de la région de Bobo donne un exemple de ce cas. Généralement, il ne pourra être éclairci que par des forages profonds et nombreux et surtout par l'examen des éléments siliceux des grains de quartz.

Avant d'aborder les roches ayant une forte proportion de silicates nous devons parler des roches formées par des grès métamorphisés très anciens, fréquents dans le Birrimien et les séries intermédiaires plissées et les formations pré-dévonniennes du Togo, du Dahomey et de la Gold Coast. Ce sont des quartzites plus ou moins micacées, des arkoses, des grès calcaires, etc.... Très généralement, ces roches très compactes sont imperméables malgré leur structure stratifiée et leur pendage important. Elles sont donc peu altérables et apparentes en surface ou recouvertes de quelques mètres ou décimètres de terrain meuble. Cette épaisseur n'est pas assez grande pour contenir une nappe en saison sèche. Les régions ayant ce sous-sol, sont parmi les plus déshéritées, au point de vue hydrologie. Mais parfois leur surface est recouverte tout comme celle des grès horizontaux, de manteaux sablonneux alluvionnaires récents qui forment de bonnes réserves d'eau si leur superficie et leur épaisseur sont suffisantes. Les rivières permanentes tombant en cascade autour des Monts Togo, dans la région de Palimé, sont des preuves de l'existence de ces sortes de formation.

GRANITO-GNEISS. — L'altération de ces roches a été étudiée plus haut. La circulation de l'eau et son mode de gisement seront seuls traités ici.

La roche-mère est attaquée à partir des fissures : lits diaclasés qui découpent la roche en blocs. Il en résulte que, à un même niveau, l'évolution de l'attaque pourra être plus ou moins avancée, suivant les points examinés, et que verticalement les zones plus ou moins altérées pourront alterner aussi. Le voisinage immédiat des fissures est privé plus tôt des éléments que l'eau a enlevés : bases d'abord, ensuite hydrate d'alumine et de silice. Autour de l'ancien emplacement de la fissure, se crée donc une zone où le terrain est moins plein et où le quartz de la roche-mère subsiste sous forme d'arènes à grains anguleux dont les vides sont incomplètement remplis de kaolin et de mica. Ainsi se forme, au voisinage de la roche-mère, un réseau de veines sablonneuses relativement perméables, qui ont pris la place des diaclases et lits de celles-ci. Or, les granites présentent toujours un quadrillage de diaclases plus ou moins inclinées et ayant deux directions faisant entre elles un angle plus ou moins voisin de l'angle droit, recoupant les lits horizontaux. Cette disposition sera reproduite par les veines sablonneuses. Dans les gneiss, les couches arénacées seront parallèles comme l'étaient les lits de la roche-mère.

Entre ces veines, la roche-mère sera moins altérée, elle aura conservé sa structure dans les horizons inférieurs et l'aspect ne sera pas différent de la roche intacte, bien que la consistance soit celle d'une argile sablonneuse. Cet aspect pourra subsister par places dans la plus grande partie de l'épaisseur de la nappe de saison sèche, parfois même, exceptionnellement au-dessus, lorsque les érosions superficielles très rapides sur les flancs des hauteurs auront baissé le niveau phréatique en modifiant le niveau d'affleurement de la nappe.

Mais plus généralement la zone d'enrichissement commence à quelques mètres sous le niveau phréatique et s'étend jusqu'à la surface du sol. Les horizons sont de plus en plus argileux. Au fur et à mesure qu'on s'élève, la structure de la roche-mère a disparu. On en arrive aux horizons décrits plus haut.

Souvent, à quelques mètres sous le niveau phréatique, le mélange sable, kaolin, mica, et eau forme une bouillie sans aucune consistance, où le tube de sondage descend par son propre poids sans qu'il soit besoin de creuser son emplacement, ou tout au moins au prix de quelques coups de soupape à boulet, seulement.

Cette forme particulière est généralement observée là où la circulation souterraine est intense, par exemple au voisinage des zones d'affleurement.

Enfin, dans ces terrains, comme dans les sables

altérés, tous les horizons sont perméables verticalement ; mais ils le sont assez peu dans les horizons superficiels d'aspect argileux.

NAPPES. — L'eau infiltrée à la surface, formera donc tout comme dans les sables alluvionnaires, une immense nappe reposant sur la roche-mère et ayant toute l'épaisseur qui la sépare de la surface phréatique. Elle sera alimentée par toute la surface du terrain où sa profondeur ne sera pas trop grande et circulera par les veines sablonneuses en profondeur. Un puits ordinaire trouvera, comme dans les sables, de l'eau partout, mais ne pourra pas être enfoncé profondément dans la nappe, donc ne donnera pas un gros débit parce que, au voisinage de la surface phréatique, les terrains sont très argileux étant enrichis par alluvionnement, tout comme dans les sables. L'eau sera louche, colorée en blanc ou jaune, par les argiles mises en suspension par le clapotis.

L'importance de l'extension des terrains de granite ou gneiss qui occupent une grande partie de l'Afrique Occidentale, montre l'importance des applications dont les observations ci-dessus sont susceptibles. En particulier les recherches d'eau dans les terrains d'altération de granite doivent être conduites *comme dans une formation sablonneuse reposant sur un substratum imperméable*. Pour saisir toute la portée de cette analogie des terrains à sous-sol granitique en régions tropicales et des sables, il faut les comparer aux indications données par le Dr Ed. IMBEAUX dans son *Essai d'Hydrogéologie*, p. 35 : « Dans les plates-formes surhaussées, où le bed-rock est voisin de la surface, on ne trouvera que peu d'eau souterraine et seulement dans les fissures de la roche (boucliers canadiens et scandinaves, môles sibériens et simiens). » Ainsi des sous-sols granitiques qui sont systématiquement pauvres en eau en régions tempérées ou froides, d'après IMBEAUX, sont au contraire riches en régions tropicales, d'après les résultats obtenus par nous. C'est une observation qui mérite d'être notée.

ROCHES COMPOSÉES SEULEMENT DE SILICATES OU CONTENANT DU QUARTZ SEULEMENT EN ÉLÉMENTS TRÈS FINS. — L'absence de quartz en gros éléments fait que l'altération de ces roches produit des argiles plus ou moins colorées blanches au contact de la roche-mère, et souvent sur une épaisseur allant jusqu'au-dessus de la nappe phréatique, colorées ensuite pour aller jusqu'à la cuirasse latéritique d'ailleurs plus rare. Les produits d'altération sont beaucoup moins perméables, les roches plus souvent apparentes en surface. Les argiles d'altération se présentent parfois sous forme feuilletée, dont l'eau peut

être extraite par pression. (Abongourou, jardin du Cercle).

NAPPE. — Il existe encore dans ces terrains, une nappe phréatique, mais elle est contenue dans les horizons très peu perméables tant verticalement qu'horizontalement. Toutefois, la roche-mère a été parcourue au cours des âges géologiques par des diaclases généralement remplies de filons de quartz. Ceux-ci se sont aussi formés dans les très nombreux lits de la roche. En définitive ils constituent des canaux d'assez grosse section, où l'eau peut circuler : mais pour cela il faut que ces canaux soient reliés entre eux. Auquel cas, ils forment des drains naturels, susceptibles d'un débit non négligeable. Dans le cas contraire, la roche altérée est comme la roche-mère peu perméable, et la nappe souterraine qui existe cependant, est peu alimentée.

Donc, ici encore, un puits ordinaire trouve de l'eau partout mais ne peut être descendu profondément dans la nappe phréatique nulle part, d'autant plus que les argiles d'altération sans sables à gros grains et peu compactes sont particulièrement fluentes. Un tel puits ne donnera un débit appréciable que s'il rencontre un filon de quartz de grande étendue. Comme les filons les plus intéressants sont les filons de diaclases verticales ou subverticales, ceux-ci pourront être reconnus dans le terrain superficiel. C'est à leur voisinage que devront être faites les recherches.

A Abongourou, par exemple, sur la piste qui conduit au jardin du Cercle, des filons de quartz importants et peu nombreux, sont visibles. Un forage fait dans ce terrain a fourni un débit permanent de 4 m³/heure.

Dans la vallée de la Volta, près de Horomo, au passage de la voie ferrée (Usine S.E.C.A.C.O.), le sous-sol est formé de schistes à séricite avec très nombreux filons de quartz sans grande longueur et indépendants. En saison sèche, des puits descendus à plusieurs mètres sous le niveau du fleuve sont à sec.

CONCLUSION

On peut tirer de cet examen des altérations en régions tropicales, des diverses roches observées, les règles générales suivantes :

1°) Les grès, quartzites arkoses mis à part, toutes les roches subissent en régions tropicales, des altérations importantes.

2°) Tous les terrains d'altération se comportent comme des sables plus ou moins argileux, reposant sur une roche imperméable. En particulier, les granito-gneiss sont généralement recouverts d'arènes aquifères.

Cette observation s'applique même aux argiles d'altération des roches silicatées qui sont

parcourues par des canaux capillaires et par des filons de quartz.

3°) Ces terrains renferment donc toujours une nappe et une seule, la nappe phréatique. Mais celle-ci peut être très pauvre dans les terrains d'altération de schistes non parcourus par des filons de quartz importants.

4°) Les horizons les plus perméables sont les horizons inférieurs. Les captages devront donc les atteindre pour être abondants.

C'est donc à cette nappe et à ces terrains que seront empruntées les eaux de captage et leur étude constitue toute l'hydrogéologie particulière de ces régions. Par contre, il est inutile d'espérer trouver de l'eau quand les roches anciennes non altérées sont apparentes en surface, même si elles ont conservé un aspect sédimentaire net.

CATALOGUE DES RESSOURCES HYDROGEOLOGIQUES CLASSEES D'APRES LES AGES DES TERRAINS

Ce tableau n'est applicable qu'aux formations situées au Sud du 13° parallèle et ne concernent pas les formations sédimentaires du Sénégal.

I. — SOCLE ANCIEN - FORMATIONS GRANITO-GNEISSIQUES

Elles sont généralement composées de roches calco-alcalines de couleur claire. Elles sont très sujettes à altération, sauf dans le cas où elles sont très peu diaclasées. Elles contiennent partout une nappe phréatique intéressante dans les terrains d'altération. Un puits filtrant pourra débiter de 3 à 10 m³ heure.

FORMATIONS BIRRIEMIENNES DE SCHISTES ET QUARTZITES REDRESSÉS.

Elles sont composées de :

a) schistes généralement altérés sur une épaisseur suffisante pour contenir une nappe. Mais celle-ci est peu abondante, sauf s'ils sont parcourus par des filons de quartz importants.

b) de quartzites qui ne sont pas altérées suffisamment en surface pour contenir une nappe phréatique. Il n'y a pas été constaté de circulation diaclasienne utilisable.

c) des roches effusives interstratifiées dans les schistes. Ces roches sont souvent peu altérées en surface et apparentes. Leur relief est accusé. Elles ne contiennent pas de nappe. Quelquefois les thalweg sont recouverts d'alluvions argileuses reposant sur des formations d'altération de la roche-mère. Une nappe phréatique pauvre, ne permettant que l'établissement de puits de faible débit, peut alors y être rencontrée.

II. — SERIES INTERMEDIAIRES PLISSEES

Leur superficie est faible. Elles sont composées de conglomérats de quartzites, grès et

schistes très généralement peu altérés en surface et ne contenant aucune nappe ni ne présentant de circulation diaclasienne importante.

Mais des manteaux de sables récents importants en étendue et épaisseur peuvent les recouvrir et donner des nappes riches alimentant des rivières permanentes. Toute rivière permanente de quelque importance, prenant sa source à la surface des plateaux que forment les séries intermédiaires plissées doit être considérée a priori comme devant son origine à l'existence d'un de ces manteaux.

III. — FORMATIONS PALEOZOIQUES PRIMAIRES.

Ces formations ont une grande extension. Elles sont composées essentiellement de grès horizontaux qui leur donnent parfois leur nom.

Ces grès, peu altérables superficiellement, ne contiennent pas de nappe phréatique importante.

La circulation diaclasienne existe : mais elle y donne rarement de gros débits.

Par contre, les manteaux de sables récents sont nombreux et importants. Ils sont toujours signalés par des rivières permanentes. Ils constituent un lieu d'élection pour des captages importants.

IV. — SECONDAIRES, TERTIAIRES ET QUATERNAIRES

Ces formations sédimentaires sont importantes : toutefois, nous ne traitons pas ici l'hydrogéologie du Sénégal ni des régions situées au Nord du 13° parallèle où elles ont leur plus grande extension.

Dans la zone considérée, elles se bornent aux formations littorales et aux recouvrements des plateaux de grès. Les formations sédimentaires récentes sont les seules contenant l'eau sous la forme où les Ingénieurs sont habitués à la rencontrer en Europe. En particulier, dans la zone littorale du Dahomey-Togo, elles fournissent des nappes captives qu'il peut y avoir intérêt à rechercher.

Mais en règle générale, ces formations sont recouvertes de sables continentaux quaternaires qui renferment partout une nappe phréatique, réplique de ce que nous avons signalé sur les plateaux gréseux. C'est dans ces formations qu'il faudra établir les captages s'ils fournissent un débit assez élevé. L'eau est d'excellente qualité, mais souvent très peu minéralisée. Dans les routes élevées des plateaux, il est possible que la nappe soit trop profonde pour être alimentée; cette question devra faire l'objet d'un examen particulier.

Malgré leur faible extension superficielle, ces sables continentaux présentent une grande importance pratique, car la zone côtière est plus que

toute autre, peuplée et parsemée de centres urbains importants : tous les ports français de la côte du Golfe de Guinée, qui sont aussi les chefs-lieux des territoires, y sont établis.

Dans ces terrains, les puits filtrants ont donné de 10 à 100 m³/heure suivant les dispositions et diamètres adoptés.

RELIEF SUPERFICIEL DE LA ROCHE-MÈRE ET NIVEAU PHRÉATIQUE

Trois surfaces superposées intéressent l'hydrogéologie d'une région composée de roches cristallines :

- la surface du terrain
- la surface de la roche-mère
- le niveau phréatique qui se place entre les deux surfaces.

M. ERHARDT, dans les citations qui précèdent, ne donne aucune indication sur le niveau phréatique ni sur les relations rattachant le relief superficiel au relief de la roche-mère. Comme ses observations ont surtout porté sur des tranchées ou puits ouverts à l'occasion de travaux publics, ou miniers, qui par conséquent évitaient de pénétrer en dessous du niveau phréatique ou en tous cas le modifiaient, sa réserve est normale. Les observations faites dans des sondages sont plus complètes et plus précises.

Puisqu'une nappe phréatique existe partout où se rencontrent des terrains d'altération, l'attaque de la roche-mère continuera partout où cette nappe présente une pente, donc une circulation. Mais l'importance et la rapidité de l'attaque varieront avec l'importance de la circulation comme avec la structure et la texture de la roche-mère. Ainsi se créera un relief souterrain de la roche-mère. Mais l'altération n'a pas pour seul effet de modifier la composition chimique de la roche-mère. Elle enlève de nombreux éléments qu'elle transporte vers les couches supérieures. Cette altération, dont l'effet sur les horizons inférieurs est de ne laisser que la silice libre ou au moins d'enlever la majeure partie des produits de décomposition des silicates, s'accompagne d'une diminution de volume des terrains altérés remplaçant les roches compactes. Donc, les zones où l'attaque chimique de la roche-mère est la plus intense, sont aussi des zones où la surface du sol subit un affaissement vertical lent.

D'autre part, les terrains superficiels à un stade très évolué d'altération provenant de roches très différentes présentent les mêmes caractéristiques et opposeront une résistance analogue à l'érosion. Celle-ci aura les plus grands effets dans les dépressions ayant leur origine dans l'affaissement du sous-sol et qui constitueront des

bassins de réception des torrents au moment des précipitations violentes. Le mouvement d'affaissement de la surface sera accru de l'enlèvement de matériaux dus à l'érosion. Donc, dans les régions où se forment des torrents d'hivernage, c'est-à-dire au voisinage immédiat des plateaux, les vallées ou tout au moins leurs parties supérieures coïncideront avec les dépressions de la surface de la roche-mère très attaquée en ces points. Au contraire, sur les plateaux, la roche-mère sera peu attaquée et sera souvent à une assez faible profondeur. Elle pourra même apparaître en surface. Elle sera alors toujours très peu diaclasée ou composée exclusivement de silicates puisque nous l'avons vu, l'hydrolyse est d'autant moins rapide que la roche-mère présente ces caractéristiques.

Bien entendu, les torrents une fois formés devront se frayer un écoulement et la vallée, dès qu'elle aura quelque longueur, ne se trouvera plus forcément au-dessus d'une dépression de la roche-mère. Il arrivera même fréquemment que celle-ci apparaîtra dans le fond du lit d'un ruisseau de quelque importance. Elle sera toujours découverte dans le lit d'une grande rivière ou d'un fleuve qui a enlevé mécaniquement toute la couche de terrains altérés.

Ainsi, la roche-mère apparaîtra lorsque l'érosion superficielle ira plus vite que l'hydrolyse, c'est-à-dire :

a) sur les plateaux où l'érosion superficielle est faible, mais qui subsiste là où l'hydrolyse progresse très lentement en raison de la nature de la roche.

b) dans les vallées importantes où l'érosion superficielle dans le thalweg est très rapide au moment des crues et par conséquent plus rapide que la vitesse de propagation en profondeur de l'hydrolyse quelle que soit la nature de la roche-mère.

Entre ces deux surfaces, vient se placer la surface phréatique, variable entre saison sèche et saison des pluies, influencée par la pesanteur et la perméabilité du terrain, agissant à son tour sur cette perméabilité conditionnée par l'alluvionnement provenant de la nappe phréatique. La coupe obtenue par 5 sondages à Bouaké est caractéristique. Ouagadougou présentera une coupe tout à fait analogue.

La nappe affleure bien entendu dans les naissances des thalweg où elle créera des écoulements permanents dans les régions pluvieuses (Bouaké), ou elle se trouvera à faible profondeur dans les régions sèches (Ouagadougou, Ferkessedougou).

Sous le plateau latéritique, le niveau phréatique est sensiblement plus élevé. Mais la nappe est beaucoup moins épaisse et les terrains d'alté-

ration moins perméables. Parfois elle est même inexistante, même en saison des pluies.

Dans les vallées importantes où la roche-mère apparaît, la nappe n'existe plus en saison sèche ou est insignifiante.

Entre ces points obligés, la surface phréatique affectera des formes complexes, variables avec les saisons. Mais pour ce qui nous intéresse, au point de vue hydrogéologique, les épaisseurs minima de nappe seront rencontrées là où les terrains sont le moins perméables, c'est-à-dire sous les plateaux et au fond des vallées importantes. Au contraire, sous les versants et surtout à la naissance des vallées, se rencontreront et les plus grandes épaisseurs de nappe et les terrains les plus perméables.

A cette conception pourrait être opposé le fait que des suintements devraient se produire sur le flanc des vallées, même peu importantes, mais toujours plus basses que le niveau phréatique des versants alors que ces suintements sont très rarement constatés. Ceci est dû, d'abord à la faible pente des surfaces phréatiques, ensuite à la différence de perméabilité des terrains de surface et de profondeur, que nous avons examinée plus haut. Les terrains colorés sont tous peu perméables, alors que la partie inférieure des terrains peu colorés (zone d'attaque) l'est beaucoup plus. Or, sur le flanc des vallées, la zone colorée existe en plus ou moins grande épaisseur et affleure généralement dans le lit de la rivière, et quelquefois le fond de la vallée plus ou moins marécageuse. C'est seulement par ces terrains que l'eau, circulant en profondeur, peut venir au jour. Ailleurs, elle s'évapore avant d'atteindre la surface car, en raison de la faible

pente, le débit allant vers la vallée est faible. Si donc la zone rouge est forcément zone d'alimentation de la nappe par infiltration, la zone blanche est la zone de circulation et les limites entre les diverses zones colorées seront en relations plus ou moins apparentes avec la surface du sol.

De cette constitution du terrain, nous tirerons une conclusion immédiate : la majeure partie des marécages sont, non pas comme il est fréquent en Europe, des eaux stagnantes sur terrains imperméables, mais des zones d'émergences sur des fonds de vallées très plats, ou en dépression légère. Ils ne s'assèchent que par des drainages dont l'influence doit se faire sentir dans la nappe phréatique avoisinante. Ceci ne concerne pas, bien entendu, les mares artificielles du pays Mossi (Ouagadougou, Koudougou, etc.).

Une deuxième conséquence est que presque toujours sur les versants et surtout au pied des versants, le niveau piézométrique de la partie inférieure de la nappe phréatique est légèrement en charge, par rapport à la surface de cette même nappe. La raison en est, dans ce fait, que les terrains contenant la partie supérieure de la nappe phréatique sont, nous l'avons vu, peu perméables, car les eaux qui s'évaporent y déposent les minéraux qu'elles contiennent en solution. Pour que l'eau puisse remonter vers la surface pour s'y évaporer par les racines ou par le sol, il faut donc qu'elle ait une certaine charge. Elle est très généralement constatée et peut atteindre quelques décimètres (Bouaké 0 m. 80 - Abidjan 0 m. 30 - à 1 m. 20, etc.).

Nous avons représenté ces diverses constatations sur la coupe schématique figurant un

COUPE SCHÉMATIQUE des TERRAINS d'ALTÉRATION sur ROCHES CRISTALLINES RELATION du RELIEF SUPERFICIEL de la ROCHE MÈRE et de la NAPPE PHRÉATIQUE

terrain tel qu'il se rencontre fréquemment dans toute la région soudanaise de la Côte d'Ivoire. Les hauteurs sont bien entendu beaucoup moins réduites que les longueurs. La différence du niveau de la vallée et du plateau est de 50 m. environ, tandis que la longueur du profil peut atteindre plusieurs kilomètres. Le plateau est figuré avec son rebord abrupt, silhouette caractéristique due à la résistance de la cuirasse latéritique attaquée par ses bords, par les eaux de ruissellement, et surtout désagrégée par les racines et s'écroulant sur le versant. Des phénomènes de latérisation actuels remanient les flancs des vallées et y forment des croûtes moins dures et moins épaisses. Enfin, le niveau de la nappe peut présenter des pulsations annuelles importantes. Il est difficile de fixer des règles générales. Là où existe un ruisseau permanent la variation sera bien entendu nulle. Mais sous les plateaux et dans les vallées asséchées, elle pourra être importante. Nous avons observé :

7 m. à Ouagadougou dans le puits de l'Usine près du thalweg.

6 m. à Ouagadougou au puits du camp sur le plateau.

2 m. à Bobo au puits de la gare, sur le plateau.

2 m. à Bouaké et à Badikaba sur des plateaux.

Au contraire, à Abidjan, la variation, commandée par le débouché en lagune, n'excède pas quelques décimètres ; de même d'ailleurs qu'à Bouaké en bordure du ruisseau permanent.

Ces observations sont très importantes pour la constatation des quantités d'eau infiltrées d'une part, et pour l'équipement avec des pompes, d'autre part.

En principe, et jusqu'à preuve du contraire, des variations de 2 à 8 m. sont à escompter dès que la nappe est à une certaine profondeur et n'affleure pas en saison sèche à proximité. C'est là une donnée qu'il faudra toujours vérifier, car elle a une influence prépondérante sur l'équipement des captages.

Toutes les constatations qui précèdent contribuent à montrer que les terrains d'altération des roches contenant de la silice libre, se comportent comme des massifs sablonneux reposant sur un substratum imperméable, dont le relief est en relation avec le relief superficiel.

OU SE PLACER POUR AVOIR DE L'EAU

Ces considérations, bien trop courtes pour avoir la prétention d'épuiser la question, mais destinées seulement à donner une idée générale de ce qu'est l'altération des terrains en régions tropicales ou équatoriales, et de ses conséquences au point de vue hydrogéologie, permettent de tirer des règles pratiques sur les points où il convient de placer les captages pour avoir

des débits importants. Ceux-ci ne sont en effet, possibles, que si les captages réunissent les conditions suivantes :

1° Périmètre d'alimentation suffisant.

2° Coefficient d'infiltration suffisant.

3° Eau potable chimiquement et bactériologiquement.

4° Perméabilité horizontale du terrain permettant un débit suffisant des ouvrages du captage proprement dit.

Première et deuxième conditions.

La première et la seconde condition se complètent l'une et l'autre. Le terrain est en totalité perméable dans ses horizons situés sous le sol. Mais la violence des pluies et l'importance du ruissellement pourraient laisser penser que le coefficient d'infiltration est faible. En réalité, si on examine le sol d'un terrain couvert de végétation, on percevra des quantités de petits trous provenant du travail des animaux : insectes, termites, vers rongeurs et reptiles. Une tranchée fraîchement ouverte les montrera nettement. Au moment des pluies, tout se remplit d'eau qui s'écoule lentement dans le sol, par les trous capillaires dont nous avons signalé la présence dans tous les terrains d'altération même d'aspect le plus argileux. Mais ceci ne donne qu'une idée de la façon dont l'eau s'infiltré.

Il est difficile d'en évaluer la proportion. Aux Etats-Unis, on admet au-dessous de 40° parallèle $D = 0,40 \times H^2$ — entre les 40° et 30° $D = 0,19 H^2$.

D est en m³ la quantité d'eau atteignant la nappe phréatique par m² ; H est la hauteur de précipitation évaluée en mètres. Les régions considérées sont situées sous une latitude très inférieure. Si cependant on admet cette formule, les quantités d'eau infiltrées seront annuellement :

— à Abidjan	
0 m ³ 73	soit par hectare 7.300 m ³
— à Bouaké	
0 m ³ 267	soit par hectare 2.670 m ³
— à Ferkessedougou	
0 m ³ 274	soit par hectare 2.740 m ³
— à Bobo	
0 m ³ 264	soit par hectare 2.640 m ³
— à Ouaga	
0 m ³ 147	soit par hectare 1.470 m ³

Ces chiffres offrent des possibilités énormes étant donné les surfaces des périmètres d'alimentation puisque tout le pays peut constituer ce périmètre, les endroits où la roche-mère est apparente mis à part.

Toutefois une indication plus précise et une vérification pourront être fournies par les variations de niveau phréatique au cours des saisons.

Les pulsations de la nappe sont importantes, nous l'avons dit. A Ouagadougou, par exemple, les variations constatées atteignent 6 à 7 m. A Bobo, sur le plateau de la Gare, elles sont de 2 m. environ. Par contre, ces variations seront très faibles ou nulles au voisinage des thalweg donnant lieu à des écoulements permanents : mais ceux-ci augmentent avec la saison. Donc c'est le chiffre observé sur les plateaux qui peut être pris comme bon pour déterminer les quantités infiltrées. Celles-ci correspondent au remplissage des vides de terrain.

L'essai d'hydrogéologie du Dr IMBEAUX fournit des chiffres sur les quantités d'eau que peut contenir un terrain.

Les vides sont très variables. Ils varient de :

- 0,02 à 0,56 % dans les granites.
- 0,49 à 7,55 % dans les schistes.
- 4,76 à 28,28 % dans les grès.
- 35 à 40 % dans les sables à granulométrie échelonnée.
- 26 à 47 % dans les sables uniformes.
- 44 à 47 % dans les argiles.

D'autre part, l'eau qui peut être tirée d'un terrain par abaissement de la nappe phréatique (variation saisonnière ou pompage) est la différence entre l'eau totale contenue dans les vides et l'eau de rétention qui reste toujours dans ledit terrain à moins qu'elle ne s'évapore. Le pouvoir de rétention varie avec la grosseur des éléments et diminue avec le temps, c'est-à-dire que l'eau continue à s'écouler pendant un temps très long. Après deux ans et avec des grains de sable de grosseur variable, elle est :

- de 6,87 % pour des sables $d = 0 \text{ m/m } 475$
- 11,37 % pour des sables $d = 0 \text{ m/m } 155$
- 18,87 % pour des sables $d = 0 \text{ m/m } 083$

Pour l'argile, l'eau de rétention correspond à la totalité des vides.

En réalité, les terrains qui nous intéressent ne sont ni des sables purs, ni des argiles pures, ni des terrains sédimentaires, c'est-à-dire ayant leurs éléments rangés pour obtenir le minimum de vide. Les chiffres donnés toujours par IMBEAUX sur les quantités d'eau qu'on peut tirer d'alluvions en place sont de 20 à 25 % pour des sables, de 12 % pour un terrain composé de 29 % de gravier, 2 % de sable et 69 % d'argile.

Le sable du sous-sol de Bobo, analysé a donné :

- Sable 81 %
- Argile 19 %

Mais le sable est de granulométrie très échelonnée et ses vides n'excèdent pas 31,4 %. Donc le vide du sable non rempli d'argile atteint :

$$31,4 - 19 = 12,4 \%$$

La quantité d'eau à en attendre peut varier de 5 à 10 %.

Nous n'avons pas de mesure analogue pour les argiles d'altération de granite. Le chiffre doit être un peu plus faible. Nous pourrions admettre 5 %.

Dans ces conditions, la quantité d'eau infiltrée à Ouagadougou (sous-sol granitique) sera :

$$6 \text{ m.} \times 0,05 = 0 \text{ m}^3 30 \text{ par mètre carré}$$

A Bobo elle atteindra :

$$2 \text{ m.} \times 0,10 = 0 \text{ m}^3 20 \text{ par mètre carré}$$

A Bouaké on aurait :

$$2 \text{ m.} \times 0,025 = 0 \text{ m}^3 05 \text{ par mètre carré.}$$

Ces chiffres sont beaucoup plus faibles que les indications de la formule américaine :

1,3 fois pour Bobo-Dioulasso

2,7 fois pour Bouaké.

Toutefois à Ouagadougou, le chiffre indiqué est deux fois plus fort. Il faut d'abord remarquer que le coefficient caractérisant la différence avec la formule américaine varie avec le relief, celui-ci étant beaucoup plus doux à Ouagadougou (coeff. 2) et à Bobo (coeff. $\frac{1}{1,3}$) qu'à Bouaké

(coeff. $\frac{1}{2,7}$). Il varie aussi avec la profondeur de la nappe sous la surface du sol :

2 à 6 m. à Ouagadougou, 15 m. à Bouaké et à Bobo.

En tous cas, et en l'absence de mesures plus précises, on peut admettre la formule américaine $D = 0,19 H^2$ pour les pays plats (Ouagadougou, Bobo) et la formule américaine diminuée, soit $0,10 H^2$ pour les pays accidentés (Bouaké); les cubes que nous pourrions tirer du sous-sol seront ainsi chaque année :

$$\text{à Ouagadougou } 0,19 \times \overline{0,881}^2 = 0 \text{ m}^3 147 \text{ par m}^2$$

$$\text{à Bobo } 0,19 \times \overline{1,178}^2 = 0 \text{ m}^3 264 \text{ par m}^2$$

$$\text{à Bouaké } 0,10 \times \overline{1,186}^2 = 0 \text{ m}^3 141 \text{ par m}^2$$

Ces chiffres correspondent à des réserves annuelles de respectivement 1470 m³, 2640 m³ et 1410 m³ par hectare et 147.000 m³, 264.000 m³ et 141.000 m³ par kilomètre carré. C'est-à-dire qu'une distribution d'eau intéressant 1 km² pourra donner chaque jour :

$$\text{à Ouagadougou } 400 \text{ m}^3$$

$$\text{à Bobo } 725 \text{ m}^3$$

$$\text{à Bouaké } 386 \text{ m}^3$$

Il suffit de considérer l'étendue des villes pour voir qu'elles peuvent toujours être alimentées avec l'eau de leur sous-sol.

Mais des observations faites tant à Bobo-Dioulasso (Côte d'Ivoire) et à Lomé (Togo) que dans les nombreux sondages effectués par nous tendent à prouver que dès qu'une nappe phréa-

tique est rencontrée à une profondeur supérieure à 10 m., l'eau superficielle ne l'atteint pas et s'évapore auparavant. Ces observations sont de trois sortes :

1°) Dans les régions granitiques, où par conséquent les nappes sont contenues dans les formations provenant de l'altération de la roche-mère, il est rare que la surface de la nappe, même en saison sèche, soit rencontrée à plus de 10 m. de profondeur. C'est que, en effet, s'il en était ainsi, la nappe ne serait plus alimentée. Or, la circulation de l'eau est nécessaire à l'altération. Celle-ci serait donc arrêtée. Mais l'érosion superficielle agissant seule, enlèvera les terrains superficiels jusqu'à ce que la nappe soit alimentée et que l'altération reprenne grâce à l'apport des eaux météoriques. Ce mécanisme explique la profondeur voisine de 10 m. si souvent constatée.

2°) Il arrive néanmoins que la surface phréatique se trouve à une profondeur supérieure à 10 m. : la nappe est alors alimentée par une région voisine où elle est à profondeur inférieure et qui constitue son bassin de réception. Mais si on observe en saison des pluies des puits situés en divers points d'une telle nappe, on constate que :

a) là où la nappe est à moins de 10 m. la courbe des variations de niveau de la nappe est influencée immédiatement par les précipitations et présente une montée brusque au moment des maxima des courbes les représentant.

b) si elle est à plus de 10 m., la montée ne se produit qu'avec un certain retard.

c) ce retard croît avec la distance à ce que nous avons appelé le bassin de réception de la nappe : ce retard peut atteindre plusieurs mois.

Ceci n'est guère explicable qu'en admettant que, sous le lieu où la nappe est alimentée, il se crée une intumescence de la surface phréatique produisant une véritable onde de crue qui se propage lentement sur cette surface et n'atteint que successivement les puits observés.

3°) L'arrière-pays de Lomé est constitué par un plateau de sables continentaux récents argileux dits terre de barre, dont la surface est située à environ 25 m. au-dessus de la nappe phréatique. Celle-ci varie fort peu avec les saisons. Elle présente une pente générale très faible vers la mer et semble alimentée en effet par des infiltrations se produisant là où la profondeur de la nappe est faible sur les rebords Nord du plateau. Mais la surface du plateau présente des ondulations de quelques mètres d'amplitude. Aux points bas, la nappe y est rencontrée entre 12 et 15 m. Alors que la salure des eaux atteint d'habitude 100 à 200 milligrammes de chlorure par litre, elle peut atteindre 500 milligrammes

sous ces dépressions ; ce qui ne peut s'expliquer que de la façon suivante : sous ces cuvettes, dont la surface n'est pas salée bien entendu, l'eau des pluies dont la salure est de 20 milligrammes par litre, n'atteint pas la nappe. Au contraire, l'évaporation concentre l'eau souterraine, car elle augmente quand la profondeur des terrains de couverture diminue. Les indigènes qui ont constaté le fait, font leurs puits dans les parties hautes du plateau.

Donc sous les climats tropicaux, des terrains de couverture même perméables ne permettent pas l'alimentation des nappes dès que celles-ci sont à une certaine profondeur qui doit, bien entendu, varier avec les circonstances : pluviométrie, hygrométrie, etc... Il en résulte que pour évaluer correctement le périmètre d'alimentation d'une nappe, il faut tenir compte non seulement de la nature des terrains de couverture, *mais aussi de la profondeur de la nappe*, et il sera prudent de ne pas considérer comme surface de réception toutes les aires superficielles sous lesquelles la nappe phréatique est à plus de 10 m. de profondeur.

A titre de contrôle, il serait intéressant de réaliser des observations directes sur la percolation des eaux superficielles. Les difficultés de réalisation des appareils présentant une précision suffisante et réalisant les conditions naturelles, nous ont empêchés jusqu'à ce jour de les faire.

Au point de vue pratique, nous avons vu que dans les terrains d'altération de granito-gneiss, il est assez rare que la nappe soit assez profonde pour ne pas être alimentée. Il n'en est pas de même pour les sables recouvrant les plateaux gréseux et formant les zones littorales. Dans ces formations, aucune prévision utile ne pourra être faite quant au débit si on ne connaît pas d'une façon précise la topographie du terrain superficiel de la nappe et si des observations de longue durée n'ont pas déterminé le régime des divers puits qu'on y rencontre.

Troisième condition. — Il faut que l'eau soit potable. Les nappes des sables sédimentaires ou des terrains d'altération sont, nous l'avons vu, intéressantes si elles présentent une grande épaisseur. L'eau sera prise à la partie inférieure. Les terrains sont verticalement peu perméables et ne contiennent que des trous capillaires. L'eau aura toujours accompli un long trajet dans le sol d'une longue durée dans un milieu perméable en petit avant d'être captée. Elle sera donc bactériologiquement potable selon toute probabilité, en raison de la filtration et de l'oxydation des matières organiques qui auront eu le temps de se produire.

Ces eaux sont évidemment déminéralisées, leur p.H. varie de 5 à 6. Elles devront être calcifiées, ce qui constitue un problème dont la solution est bien connue.

Quatrième condition. — Perméabilité horizontale du terrain : nous avons vu que partout où une nappe a une certaine épaisseur, elle est contenue dans des bouillies formées de sable argileux ayant une assez bonne perméabilité. Mais cette donnée ne peut être précisée que par un pompage.

CONCLUSION

Pour faire un captage en régions tropicales, il faudra toujours essayer de se placer sur le lieu même d'utilisation, sauf si la surface du sol laisse apparaître la roche-mère, ce qui est rare.

La nappe rencontrée sera alors étudiée comme les nappes phréatiques en terrain sableux, quelle que soit la nature du sol. Il ne faut compter rencontrer aucune possibilité de captage important dans les terrains sédimentaires ou éruptifs anciens apparents en surface.

Enfin, si on a le choix de l'emplacement, comme l'étude des terrains d'altération a montré que les terrains perméables se trouvaient à une certaine profondeur, sous la surface phréatique, pour être bien placé, il suffira d'avoir une bonne profondeur de cette nappe. Les puits filtrants atteignent à Ouagadougou, 32 mètres sous le niveau phréatique de saison sèche, à Bobo, 22 mètres, à Bouaké, de 28 à 34 mètres, à Ferkessedougou, 18 mètres. D'ailleurs, il est fort possible que, à quelques dizaines de mètres de pointements rocheux non altérés, on trouve une épaisseur de terrains altérés suffisante : c'est le cas de Ferkessedougou et ce que nous avons dit sur les vitesses variables d'attaque des roches, le justifie. Finalement, on peut fixer les règles suivantes pour les recherches destinées à l'alimentation en eau potable :

A. — Partout où la roche-mère n'est pas apparente, en surface, existe une nappe phréatique susceptible de donner des débits importants si le périmètre d'alimentation est suffisant. L'eau en est potable.

B. — En particulier, cette nappe existe généralement sous les villes et son captage constituera presque toujours une solution satisfaisante, tout en exigeant le minimum de dépense.

C. — Comme la nappe sera d'autant plus facile à capter qu'elle aura une plus grande épaisseur, c'est au voisinage des plateaux qu'il conviendra de se placer, car c'est là que les

terrains d'altération ont la plus grande épaisseur.

D. — La présence sur un plateau d'une cuirasse latéritique, indice d'une altération superficielle poussée au dernier degré d'évolution, est un très bon indice de la présence de l'eau dans le sous-sol. Toutefois, la nappe pourra ne plus exister sous le plateau lui-même, car l'érosion des terrains avoisinants, plus meubles, aura pu provoquer son abaissement. Elle existera sûrement sous les versants.

E. — De plus, sous les plateaux eux-mêmes, la surface de la roche-mère sera en principe assez élevée et les terrains stériles seront épais, en définitive la nappe peu importante et mal alimentée.

F. — Pour éviter ces inconvénients, le meilleur emplacement sera situé sur le versant du plateau, à la naissance des vallées qui offriront généralement au captage des profondeurs minima de terrains stériles, des épaisseurs maxima de terrains aquifères. En plus les terrains aquifères y seront plus perméables et par conséquent draineront l'eau au loin. En ces points on sera d'ailleurs sur le versant de la surface phréatique et le périmètre d'alimentation sera important en amont.

G. — Par contre, si une vallée a déjà une certaine longueur, c'est-à-dire si elle entaille profondément les terrains d'altération et surtout si la roche-mère est dénudée dans le lit, il est préférable de s'en éloigner pour éviter des recherches qui ne peuvent pas aboutir. L'eau en Afrique noire se trouve non pas dans les vallées, mais sous les plateaux ou leurs abords.

Les meilleurs endroits pour les captages sont en définitive les dépressions creusées par les érosions des eaux de ruissellement et les émergences des nappes en saison des pluies au pied des plateaux à cuirasses latéritiques.

Sont ainsi placés les captages de Bouaké, Abengourou, Tafiré et Ouagadougou. A Bobo et Ferkessedougou, placés sur le bord d'une vallée assez longue, le captage est situé très au-dessus de la vallée, au pied du plateau qui la domine.

EXEMPLES DE NAPPES EN TERRAINS D'ALTERATION

Nous donnons ci-dessous, des résultats de recherches exécutées dans des terrains d'altération de granito-gneiss. Ils ne sont pas choisis. *Ils représentent l'ensemble des travaux exécutés à ce jour dans ces régions.* Nous avons négligé les captages dans les sables alluvionnaires altérés qui ne présentent rien de particulier aux captages en pays de climat tropical et sont

d'ailleurs plus faciles à réaliser en donnant des débits plus élevés.

BOUAKE

La ville de Bouaké est située sur le contrefort orienté Sud-Ouest-Nord-Est, d'un plateau formant la ligne de partage des Eaux du N'Zi et du Bandama Blanc. La position géographique est donc dominante. En fait, le plateau de Bouaké domine la région à plusieurs kilomètres à la ronde.

Hydrologie superficielle. — Le contrefort est entouré de vallées peu profondes qui naissent sur ses rebords. Les ruisseaux qui les parcourent ont un débit très faible ou nul, en saison sèche. En plus, leurs eaux sont polluées par les habitations établies partout sur les flancs des vallées. Il a donc été admis qu'il était impossible de les utiliser pour l'alimentation de la ville.

Géologie. — Le sous-sol de Bouaké, apparent au fond des vallées dès que celles-ci ont une certaine longueur, est granitique. Cette observation est confirmée sous la ville même par :

1°) l'examen des terrains d'altération, renfermant des cristaux de silice à angles vifs grossiers (superficie et puits).

2°) les résultats des sondages faits qui atteignent partout le granite.

Hydrologie souterraine. — Des puits ordinaires ouverts dans Bouaké, donnent de l'eau, donc rencontrent la nappe phréatique. Ils ne fournissent nulle part un gros débit, car ils atteignent cette nappe dans un terrain éboulé formé d'argile sablonneuse blanche ou peu colorée, peu perméable.

Au contraire, des forages traversent plusieurs dizaines de mètres de terrains d'altération formés de couches alternativement très perméables ou peu perméables, avec bouillie aquifère sur des épaisseurs variables.

Puits filtrants. — Pour se placer dans les conditions les plus commodes pour le captage, en partant du principe que l'eau est partout, nous avons choisi pour région à prospecter, le thalweg situé au Sud-Ouest de la Résidence et à 600 m. environ de celle-ci. La Résidence est en effet placée au point culminant du plateau et le réservoir de distribution devra être très voisin. La région choisie est la naissance du thalweg le plus proche de la Résidence.

Une série de sondages a déterminé :

- l'épaisseur des terrains d'altération.
- le profil de la roche-mère.
- le profil de la nappe phréatique.

Les forages ont montré l'existence d'un thalweg de la roche-mère situé à peu près sous le thalweg superficiel. C'est dans cette dépression où l'épaisseur des terrains d'altération contenant la nappe phréatique est maxima que le captage sera établi, des sondages situés en dehors de ce profil en complètent l'étude.

Le captage suivra la ligne 2 — 4.

L'épaisseur de la nappe y sera de 27 m. 20, sondage 2 (soit 22 m. utiles pour la crépine).

de 34 m. 30 au sondage 4, soit 28 m. utiles.

Essais de pompage : Les forages ont été faits avec du matériel de 150 - 165. Ils ont été équipés en puits filtrants sur les hauteurs indiquées. Ils ont été soumis à des essais de pompage avec une pompe Japy à main.

Celle-ci aspire sur le tube crépine et donne les résultats suivants :

- dépression 35 cm. de mercure
- hauteur au-dessus niveau phréatique 1 m. 80

— débit 2 m³,3/heure.

On en peut tirer les conclusions suivantes :

— Dépression réelle sur la nappe : 0 m. 35 de mercure égalent $0,35 \times 13,6 = 4,76$ eau

— Dépression sur tube crépine

$$4,76 - 1,80 = 2,96 \text{ eau}$$

La dépression avec une pompe appropriée peut être double, soit 6 m. Le débit du puits filtrant sera alors compris entre :

$$2,3 \times 2 = 4 \text{ m}^3 \text{ 6}$$

$$\text{et } 2,3 \times \sqrt{2} = 3 \text{ m}^3 \text{ 25}$$

On peut admettre 4 m³ environ. Mais si on observe que ces résultats sont obtenus avec une pompe Japy à débit discontinu, que la dépression indiquée par l'aiguille est la dépression instantanée maxima, le débit escompté peut être supérieur. Un tel puits doit fournir de 6 à 8 m³/heure. C'est ce que vérifiera un pompage mécanique. Nous avons admis le débit de 6 m³/heure pour chacun des forages.

Vérification. — 1°) Vitesse d'entraînement du terrain. La surface filtrante atteint :

$$\pi \times 0,16 \times 22 \text{ m.} = 11 \text{ m}^2, 2$$

COUPE GEOLOGIQUE DU VERSANT OUEST DE BOUAKE — (Naissance d'un thalweg)

Echelles :
Longueurs : 1/ 2.500
Hauteurs : 1/ 1.500

Argile sablonneuse
légèrement colorée
Structure amorphe

Structure granitique
conservée

Bouillie sablonneuse argi-
leuse légèrement micacée

Cote du terrain	334,46	341,95	348,97	356,--	366,66
Nappe	333,86	334,75	337,25	341,30	345,25
Roche mère	313,--	301,--	303,07	320,20	337,86

Toutefois, le terrain n'est pas partout également filtrant. Les longueurs intéressantes paraissent être (voir schéma joint) pour le puits N° 2 :

— 13,75 à 18,40	4,65
— 25,70 à 28,	2,30
	6,95

En plus, la bouillie qui règne de 18,40 à 25,70, soit 7 m. 30, est toujours assez perméable après pompage par entraînement de l'argile. On peut donc estimer à 14 m. environ l'épaisseur de terrain perméable, soit une surface de 7 m² et une vitesse filtrante moyenne de l'eau à la sortie du terrain, pour pénétrer dans l'enrobage.

$$\frac{7 \text{ m}^3 \text{ 000}}{3.600 \times 7 \text{ m}^2} = 0 \text{ m. 000278}$$

Soit une vitesse effective :

$0,000278 \times 5 = 0,001390$ ou 1 m/m 4
bien inférieure à la vitesse d'entraînement d'un terrain dont certains éléments sont des grains de quartz assez gros. Par ailleurs, aux essais, le gravillon $2 < d < 5$ a parfaitement retenu le sable.

Donc le puits filtrant arrivera assez vite à un état d'équilibre et le terrain aux environs ne subira plus d'entraînement.

Captage d'ensemble. — La ville de Bouaké et le chemin de fer ont besoin d'environ 400 m³ par jour. Un puits filtrant peut donner 7 m³/heure. Donc le nombre de puits nécessaires, en admettant un pompage de 20 heures par jour, est :

$$\frac{400}{7 \times 20} = 3 \text{ puits}$$

Nous disposerons ceux-ci sur la ligne 2-4 du plan, en intercalant le puits 10 entre 2 et 4. La distance 1-4 est de 280 m. Les 3 puits seront donc à 140 m. l'un de l'autre.

Vérification du débit. — L'examen du relief du terrain laisse penser que le périmètre d'alimentation du thalweg atteint environ au point considéré

$$0 \text{ km. } 800 \times 1 \text{ km. } 500 = 1 \text{ km}^2 \text{ 200}$$

Si l'eau infiltrée atteint suivant la formule admise :

$$0,10 H^2 = 0,10 \times 1,2^3 = 0 \text{ m}^3 \text{ 144 au m}^2$$

$$\text{ou } 144.000 \times 1.200 = 174.000 \text{ m}^3$$

Or l'alimentation de Bouaké ne demande que :

$$400 \times 365 = \dots 146.000 \text{ m}^3$$

Le coefficient de sécurité est suffisant. On pourra doubler l'alimentation en installant de nouveaux puits filtrants vers l'aval du thalweg, ce qui augmentera le périmètre d'alimentation.

REMARQUE

Cette étude n'est pas définitive en ce sens que les pompages effectués ne permettent pas de connaître les effets des puisages envisagés sur la nappe. Donc les niveaux de celle-ci devront être observés pendant l'exploitation. Mais cette objection n'est pas à retenir si on tient compte de ce que le captage est établi en un endroit où la pente de la nappe est faible. Donc un abaissement provoquera un afflux important. Si la nécessité s'en fait sentir, il sera possible d'abaisser les pompes de plusieurs mètres car les épaisseurs de terrains filtrants sont très grandes. Ce travail ne présente aucune difficulté. Il est donc probable que les débits escomptés seront obtenus.

Organe de captage. — Le croquis joint donne la disposition du puits filtrant N° 4 équipé avec une pompe à axe vertical noyée. Un résultat meilleur et plus sûr serait obtenu avec :

- a) un forage de 500 m/m
- b) un tube crépine de 300 m/m inoxydable
- c) une pompe noyée ou un émulseur placé au fond du tube crépine.

OUAGADOUGOU

Le sol et le sous-sol de Ouagadougou et des environs, sur plusieurs dizaines de kilomètres, sont formés de granites ou gneiss altérés. La coupe géologique jointe, établie grâce aux puits et forages exécutés en 1938-39-40 est faite de l'Ouest à l'Est du village de Gounga (route de Bobo) au Gouvernement.

1°) *Le relief superficiel* est peu marqué. Les variations de niveau n'excèdent pas quelques mètres sur des kilomètres. La ville est bâtie sur les contreforts d'un plateau latéritique situé au Sud-Ouest. Elle est traversée par des vallées peu marquées et parallèles, orientées du Sud au Nord, et collectées à 2 km 500 au nord du Centre de la ville par une vallée Ouest-Est. La coupe géologique est parallèle à cette vallée.

2°) *Relief de la roche-mère.* — Le relief des granites sous-jacents, qui sont la roche-mère des terrains superficiels, est lui-même peu accusé. Il est en relation avec le relief superficiel, les vallées se trouvent au-dessus des dépressions de la surface de la roche-mère. Celles-ci se sont formées où le granite était le plus aisément altérable, soit en raison de sa structure, soit en raison des nombreuses diaclases qui permettaient la circulation, donc l'attaque des eaux. Les effets de ces deux circonstances peuvent d'ailleurs s'ajouter. Les zones de roche-mère sont orientées Sud-Nord et l'orientation des vallées naissantes en résulte (marigot du Cercle et marigot du Camp militaire).

3°) *Couches de terrains altérés.* — Entre la surface du sol et la surface de la roche-mère sont situés les terrains d'altération. Leur épais-

seur varie de 10 à 12 m. (à Gounga) à 38 m. au puits situé à l'ouest du Cercle. Ces terrains sont tous perméables. Toutefois, leur perméabilité varie :

a) verticalement, la coupe verticale étant formée du haut en bas de croûtes latéritiques, puis d'argiles très colorées, puis d'argiles blanches kaoliniques, le tout peu perméable, enfin en profondeur, au contact de la roche, d'arènes plus ou moins argileuses et plus perméables.

b) horizontalement, les couches supérieures sont toutes analogues, mais les couches inférieures sont plus ou moins perméables, suivant la structure de la roche qui les a formées comme il a été dit plus haut. Aussi trouve-t-on en profondeur deux zones où le terrain est très perméable et qui sont situées sous les marigots du Cercle et du Camp Militaire et encadrées par les zones peu perméables qui supportent de l'Est à l'Ouest le Gouvernement, la ville commerciale et le village de Gounga.

4°) *Hydrologie.* — Les formations provenant de l'altération des granites se comportent donc comme des formations de sable de perméabilité variable verticalement et horizontalement. La seule couche imperméable est la formation alluvionnaire peu épaisse déposée au fond des vallées dans les mares artificielles où les eaux de ruissellement se décantent.

Les sables en question contiennent donc une nappe et une seule: la nappe phréatique dont le niveau varie beaucoup avec les saisons. En basses eaux, la surface phréatique est à plusieurs mètres en dessous du fond de la vallée et celle-ci s'assèche sauf dans les mares artificielles à fond imperméable.

COUPE GEOLOGIQUE DE OUAGADOUGOU
DE GOUNGA AU GOUVERNEMENT(ouest-est)

En hautes eaux, le niveau phréatique affleure au fond des vallées et les relie en affectant des surfaces bombées. Il produit alors des sources dans le thalweg.

Dans l'ensemble, les variations du niveau phréatique atteignent de 6 à 8 m.

Des observations ci-dessus peuvent être tirées les conclusions pratiques suivantes, au point de vue hydrogéologie :

a) en plaçant les ouvrages de prise dans les vallées et en leur donnant une profondeur suffisante pour atteindre les couches arénacées perméables sous-jacentes, un gros débit instantané dû à la perméabilité locale et un gros débit continu dû à la surface de terrains perméables intéressés et à la faible profondeur de la nappe, pourront être obtenus.

En fait, un puits filtrant, muni d'une pompe électrique à débité, en mai 1942, 9 mètres cubes à l'heure pendant 15 heures par jour (soit 135 m³ par jour) et 10 jours de suite sans qu'il ait été observé d'abaissement du niveau phréatique permanent. Le schéma du puits en question est joint. Depuis lors, le pompage est effectué en toutes saisons pendant 15 heures environ sans difficulté.

b) d'ailleurs la quantité d'eau infiltrée dans le sous-sol et qui par conséquent est emmagasinée, peut être évaluée en observant que les variations de niveau annuelles atteignent en moyenne 7 m. Or, le sol peut contenir 5 % de son volume d'eau qu'il peut restituer. Le cube disponible atteint donc :

$$7 \times 0,05 = 0 \text{ m}^3 35 \text{ par mètre carré}$$

ou 350.000 m³ par kilomètre carré.

Les surfaces intéressées atteignent plusieurs kilomètres carrés où la nappe est à quelques mètres de profondeur.

c) l'eau tirée de la partie inférieure des terrains d'altération est d'une qualité parfaite au point de vue bactériologique. Au point de vue chimique elle est très peu minéralisée. Son p.H. est de 7,4. En résumé, elle est excellente pour la boisson et les usages industriels ou ménagers.

d) le niveau phréatique de saison sèche est complètement indépendant du niveau des mares. La preuve en est fournie par le niveau de l'eau du puits où est installée la pompe électrique. Situé à quelques mètres de l'eau stagnante, au mois de mars par exemple, son niveau est de 5 m. environ inférieur au niveau de la mare et ne varie pas quels que soient les pompages effectués. C'est donc une erreur grossière que d'attribuer au maintien de ces mares le niveau des puits dans la ville. Il n'y a aucune relation entre les deux. Les caractéristiques de l'eau pompée au puits du Cercle le prouvent.

PUITS OUAGADOUGOU PRES BUREAUX CERCLE

Ces résultats valaient d'être consignés dans une région où les pluies sont relativement moins abondantes, où des doutes ont été émis sur la perméabilité des terrains du sous-sol, et où, en tous cas, l'alimentation en eau potable a toujours présenté les pires difficultés tant pour les Européens que pour les Indigènes.

GARES DU RESEAU ABIDJAN-NIGER

Enfin les résultats suivants ont été obtenus en trois points de la voie ferrée qui manquaient d'eau en saison sèche :

TAFIRE. — La gare de Tafiré manquait d'eau à chaque saison sèche. Le sous-sol est un granite écrasé de couleur claire.

Un emplacement ayant été choisi à la naissance d'un thalweg proche de la gare (qui est sur une ligne de partage des eaux), un avant-puits de 3,70 est creusé, puis trois forages descendent jusqu'à la cote — 22,40. Ils traversent les terrains d'altération de granite, puis atteignent la roche-mère.

Des essais de pompage donnent un débit de 4 m³/h. avec une dépression de 3 m. 70 environ avec pompe Japy. Donc un débit de 6 m³/heure sera détenu avec une pompe couplée directement sur les tubes crépinés et y créant une dépression de 7 m. Un débit quotidien de 100 à 150 m³ est aisément pompé. C'est le débit effectivement fourni par l'installation en toutes saisons.

Il convient de noter que ce captage est réalisé à 50 m. d'un puits ordinaire de 5 m. de diamètre qui ne donnait qu'un débit insuffisant en saison sèche et ne pouvait pas être approfondi par les moyens dont disposait le réseau.

FERKESSEDOUGOU. — Le sous-sol est du gneiss apparent près de la Gare. Une nappe artésienne se révèle par un écoulement permanent du fossé de la gare de Ferkessedougou (cote 336,50). Cependant, le puits d'alimentation de la Gare situé beaucoup plus bas, s'assèche (cote 313,00). Six forages en lignes parallèles à la voie et équipés en puits filtrants donnent les débits portés au plan. Les forages A et B ne donnent pratiquement aucun débit. Le débit total atteint donc 6 m³ 900. Il a été obtenu avec une pompe Japy à main en assez mauvais état. Une pompe Worthington directement couplée devait donner un débit supérieur à 10 m³/heure, soit 150 à 200 m³ par jour, ce qui a été effectivement obtenu. L'installation est également en service.

Ce captage est une preuve que dans les vallées d'une certaine importance, l'eau est rencontrée non pas au fond de la vallée, mais sur le versant et assez haut sur celui-ci.

NIANGOLOKO. — Le sous-sol de Niangoloko est un granite écrasé à gros grains. La voie emprunte en ce point, une vallée longue déjà de plusieurs kilomètres. Un puits établi dans le fond de cette vallée, donne des débits insuffisants.

Des forages ont montré que la roche-mère intacte se trouvait partout entre 4 et 6 m. de profondeur sans couche arénacée importante. Donc aucune amélioration de débit n'est à espérer des forages.

Cette étude prouve que dans une vallée déjà longue, il est peu probable qu'un captage fait au fond du thalweg donne un débit intéressant.

Les recherches à Niangoloko seront poursuivies sur le versant.

CONCLUSION

Les études qui viennent d'être exposées sont incomplètes. Elles devraient être étayées de résultats de pompages prolongés et d'observations sur le niveau de nappes aux environs de façon à mesurer la perméabilité des terrains. Ces observations viendront en leur temps et seraient déjà faites si la pénurie de matériel n'était si grande. Les meilleures seront fournies par la surveillance des pompages établis suivant ces principes et en service pour l'alimentation des villes ou des gares.

D'ores et déjà, les résultats suivants sont à enregistrer :

FERKESSEDOUGOU

Echelle 1/88.000

SONDAGES DE FERKESSEDOUGOU

Echelles

Longueurs : 0,001 p.m.

Hauteurs : 0,0025 p.m.

COUPE

Le niveau de la nappe est à quelques centimètres au dessus du sol naturel.

PLAN

A) — Des règles générales ont pu être déduites de l'étude des terrains d'altération tant de terrains anciens que récents. Elles permettent de connaître l'emplacement optimum pour les captages. L'alimentation des trois villes de la Côte d'Ivoire les plus importantes, après Abidjan et de certaines gares importantes a été l'objet d'études suivant ces principes. Les essais ont été faits simplement à l'endroit le plus propice au point de vue prix de revient des installations superficielles (les conduites de refoulement ont 300 mètres à Bobo, 450 mètres à Bouaké, quelques mètres à Ouagadougou et à Ferkessedougou, 400 mètres à Tafriré).

Ces résultats ne peuvent être la conséquence d'une coïncidence.

B) — La perméabilité locale des terrains d'altération est suffisante pour permettre des débits importants (3 à 20 m³ par heure) en un seul puits filtrant et le matériel à main pour

exécuter ces ouvrages existe sur place. Le matériel de pompage est du type courant. Avec du matériel plus important on a obtenu 100 m³/heure à Abidjan, 60 m³/heure à Lomé.

C) — Puisque cette perméabilité est suffisante au voisinage des ouvrages de prise choisis au hasard, il y a infiniment de chances pour qu'elle permette l'afflux d'eau vers ces ouvrages dans un périmètre très étendu. Il y a donc infiniment de chances pour que les nappes ne s'épuisent pas, puisque, nous l'avons vu, elles sont presque partout à une profondeur permettant leur alimentation par les eaux de pluie.

Les constatations ou observations nous ont paru justifier la communication des conclusions de nos recherches avant qu'elles aient été entièrement vérifiées : car ce contrôle ne pourra être fait avant bien des années et la part très faible d'indétermination et d'incertitude que présentent nos études ne paraît pas justifier un pareil retard.