

GÉOMORPHOLOGIE ET EAUX SOUTERRAINES

PROFESSEUR J. TRICART

Directeur du Centre de Géographie Appliquée, Université, STRASBOURG

SUMMARY

The Centre de Géographie Appliquée, whose cooperation has been more and more frequently requested by hydrogeologists, is the author of a geomorphological method aiming to make more accurate the balance of subterranean waters. This method combines:

1. Systematical geomorphological mapping with consideration to every factor influencing superficial run-off (the angle of slope, the permeability of soils or of superficial formations and solid rock -when outcropping-, unconcentrated run-off, rills, gullies, temporary, seasonal or permanent water flow, dunes, alluvial fans, levees, bajadas, pediments etc...) which gives an accurate view of behaviour of waters.

2. Regional geomorphological analysis, aiming at the understanding of the composition and disposition of the detrital formations, at the reconstruction of former water courses, which are very frequent in every arid region, in order to give informations about the inferoflux and the possibilities of small depth water utilization and of ground water recharge.

3. Morphometrical analysis of the hydrographic basins, enlarging the basic conceptions of HORTON and establishing correlations between drainage density and run-off intensity. By mean of these correlations, computations of the amount of water available for the subterranean storage are made more accurate.

Such complex methods require a specialized training, different from the hydrogeology so that they must be used on the basis of a team-organization between geomorphologists and hydrogeologists, with constant cooperation in the analysis and collective establishment of the synthetic view required by the establishment of the ground-water balance.

Depuis quelques années, le Centre de Géographie Appliquée est sollicité pour collaborer à des travaux de recherche et d'inventaire des eaux souterraines avec une fréquence croissante. Aussi avons-nous été amenés à mettre au point des méthodes en partie originales pour répondre à ces demandes. Elles reposent sur une division logique du travail entre hydrogéologues et géographes physiciens, assortie d'une étroite collaboration au niveau de la synthèse.

Leur objet est de préciser la proportion des eaux de pluie qui s'infiltrent, les zones du bassin où cette infiltration est particulièrement importante et certains éléments du cheminement de ces eaux. Pour poursuivre cet objectif, ces méthodes combinent trois types de recherches analytiques : la cartographie géomorphologique, l'étude des modalités de l'écoulement superficiel concentré et l'analyse morphométrique des réseaux hydrographiques.

1. LA CARTOGRAPHIE GÉOMORPHOLOGIQUE

La cartographie systématique se met à jouer, en géomorphologie, un rôle aussi grand qu'en géologie. Elle seule permet des observations précises soigneusement placées dans le cadre spatial. En ce qui concerne les problèmes hydrogéologiques, la cartographie géomorphologique a pour objet de fournir toutes les données relatives au comportement de l'eau à la surface du sol. Elle permet ainsi de préciser qualitativement un des trois termes du bilan de l'eau :

Précipitations = Evapotranspiration + Ruissellement + Infiltration.

La chose est d'autant plus importante que l'évapotranspiration devient, de nos jours, de mieux en mieux connue et que des formules permettant de la calculer à

partir des observations climatiques ont été expérimentées avec succès dans des milieux géographiques fort divers. C'est le départ entre infiltration et ruissellement qui est le plus malaisé à faire. La cartographie géomorphologique permet de serrer le problème de plus près.

En effet, les cartes géomorphologiques telles que nous les établissons pour les besoins hydrogéologiques comportent :

a) Sous la forme d'un estompage, la valeur des pentes. La teinte est d'autant plus foncée que la pente est plus raide. Nous distinguons quatre classes de pentes

— Inférieures à 1°, où le ruissellement est rare et ne se concentre pas. Dans les régions arides, l'infiltration est importante sur de telles surfaces et il faut une averse très violente ou des terrains très imperméables pour qu'un ruissellement soit déclenché.

— Comprises entre 1 et 5°, où le ruissellement devient plus important lorsque jouent certains facteurs favorables. La plupart des cônes alluviaux et des glaciers d'épandage fréquemment parcourus par les crues, dans leur partie haute, entrent dans cette catégorie.

— Comprises entre 5 et 20°, où le ruissellement est toujours important en zone aride, mais encore influencé assez fortement par la végétation et, surtout, la nature lithologique.

— Pentes supérieures à 20° où, dans toutes les conditions, le ruissellement est intense et débute au dessus d'un seuil pluviométrique faible.

b) Sous la forme de surcharges rouges, des indications de caractère lithologique, généralement empruntées aux levés géologiques effectués conjointement par les hydrogéologues. Des systèmes de hachures et de points mettent en évidence les différences de perméabilité. Les signes sont d'autant plus serrés que celle-ci est plus élevée. Nous avons ainsi des hachures croisées sur les cailloutis ou sur les calcaires très fissurés lapiazés, et, au contraire, un pointillé très lâche sur les marnes et les argiles, plus lâche encore sur les argiles salées de solontchaks qui se glacent dès le début de l'averse et provoquent un ruissellement à peu près intégral, même sur des pentes faibles. Dans les régions franchement arides, la figuration de ce facteur est relativement simple. La carte de la perméabilité superficielle reproduit les unités lithologiques. Mais dans les régions plus humides, des différences importantes apparaissent, car ce n'est plus tant la roche qui importe que les sols. La carte de la perméabilité superficielle se rapproche alors des cartes pédologiques. Dans les formations meubles, nous l'établissons au moyen d'essais de perméabilité effectués au laboratoire. Dès qu'apparaissent des sols, dans la zone sahélienne d'Afrique Occidentale par exemple, il faut recourir à de tels essais. Par exemple, les sols bruns limoneux qui se développent sur les dunes quaternaires du Trarza (SW de la Mauritanie), sont 4 à 10 fois moins perméables que le sable dunaire sous-jacent. Il faut alors distinguer, dans les champs de dunes, les parties fixées, moins perméables, et les sables ravivés par le surpâturage, d'une perméabilité à peu près totale.

c) Sous la forme de signes figurés en bleu, tous les phénomènes d'hydrographie superficielle :

— Les zones de ruissellement diffus ou en nappe, identifiées au moyen d'observations minutieuses : décapage des sols, concentration superficielle d'éléments grossiers sous la forme de pavage, embâcles de brindilles ou de débris divers, traces de ruisselets. Lorsque l'on n'a pas la chance de parcourir le terrain juste après une averse, c'est généralement l'analyse granulométrique de profils, avec la comparaison de la proportion des éléments fins ou des éléments grossiers dans la pellicule superficielle (moins de 0,5 cm de profondeur) et dans un horizon plus profond (entre 5 et 10 cm en général), qui fournit les données décisives. En zone aride, il faut cependant bien faire attention à ne pas confondre les pavages de ruissellement et les amorces de reg dues à la déflation éolienne. C'est le contexte géomorphologique qui permet, en

général, cette distinction essentielle. Ces zones de ruissellement sont indiquées au moyen de systèmes de hachures, d'autant plus serrés que le phénomène est plus intense.

— Les phénomènes de ruissellement élémentaire, revêtant la forme de ravineaux ou de rigoles soumises à un écoulement sporadique réalisé seulement lors des plus fortes averses. Tels sont, par exemple, les micro-talwegs des zones de bad-lands. En zone semi-aride, de tels phénomènes revêtent une très grande importance et sont fonction du rapport entre la lithologie et l'intensité des averses, bref de la différence entre l'intensité de la pluie et la vitesse de filtration des formations superficielles. Cependant, dès que la pente dépasse 5°, c'est son influence qui l'emporte de plus en plus. La localisation des microformes de ruissellement concentré a donc une très grande signification hydrologique.

— Les phénomènes de ruissellement concentré plus importants. Tous les talwegs sont portés sur la carte, avec des précisions quant au régime de l'écoulement et quant à leurs caractères géomorphologiques. Le type de trait qui les figure varie suivant la fréquence de l'écoulement qui s'y produit. Nous distinguons généralement les talwegs où l'eau ne coule que lors des pluies et qui sont l'indice d'un régime où le ruissellement est à peu près exclusif, les talwegs où l'écoulement est saisonnier et indique un certain stockage, soit dans des nappes souterraines, soit dans des formations superficielles, soit sous la forme de neige en montagne (pré-Sahara marocain par exemple). Au point de vue géomorphologique, nos observations sont très poussées et reposent sur la distinction des lits rocheux en formations cohérentes (le signe lithologique couvrant la région indique le faciès des roches qui constituent ces lits) et en formations meubles perméables ou tapissés d'alluvions (dont la perméabilité est donnée par le figuré lithologique), les lits s'étalant à la surface de plaines et fonctionnant en épandages lors des crues, les lits entaillés entre des berges nettes avec distinction éventuelle du lit mineur et du lit majeur. Les zones où stagnent des mares lorsque l'oued s'assèche après une crue sont également figurées. Les pertes, les sources, les zones de suintement le sont aussi.

d) Enfin, divers types d'unités géomorphologiques présentant un intérêt au point de vue hydrologique : levées alluviales, terrasses, champs de dunes, phénomènes karstiques, cuvettes d'inondation temporaire (dayas, chotts, sebkhas etc...), actuelles ou anciennes, traces d'ancien écoulement superficiel d'oueds ayant changé de cours ou asséchés etc...

Ainsi orientée, la cartographie géomorphologique n'est possible qu'à des échelles allant du 1/10.000 au 1/100.000. Elle est pratiquée en associant étroitement les observations sur le terrain et l'utilisation des photographies aériennes qui sont extrêmement précieuses à condition que leur interprétation soit effectuée sur place et non au bureau. Elle offre à l'hydrogéologue une image détaillée et fidèle des eaux superficielles et, par voie de différence, lui permet de reconnaître les conditions d'alimentation des nappes souterraines qu'il étudie.

2. L'ANALYSE DE L'ÉVOLUTION GÉOMORPHOLOGIQUE

La cartographie géomorphologique donne une image très fouillée de l'hydrologie superficielle, mais une image statique. En zone aride, par exemple, elle montre les secteurs de ruissellement intense, où se constituent les crues des oueds, puis la façon dont les eaux s'écoulent vers les dépressions et les zones où elles s'étalent dans celles-ci. Tous ces mécanismes sont très importants, car les zones arides sont caractérisées en général par une évapotranspiration potentielle bien supérieure à la pluviosité. L'écoulement superficiel y résulte de conditions particulières empêchant l'infiltration complète des averses dans un sol sec. Une faible partie seulement de l'eau des nappes souterraines provient directement de la percolation des pluies dans

le sol là où elles sont tombées. La plus grande partie de cette eau n'arrive dans les nappes que de manière indirecte, après avoir ruisselé sur de plus ou moins grandes distances, puis s'être infiltrée dans une formation alluviale poreuse sur laquelle elle s'est étalée. La disposition du réseau hydrographique des déserts est significative à cet égard. Chaque massif de collines est buriné d'un dense chevelu de talwegs aptes à évacuer rapidement l'eau des averses tandis qu'à son pied, les dépressions sont à peu près dénuées de talwegs. Les eaux qui débouchent des hauteurs s'étalent à la surface d'un cône ou d'un glacis d'épandage, se divisent, s'avancent plus ou moins loin et finalement se perdent. Une partie en est absorbée par l'évaporation, soit directement dans l'air, soit après avoir mouillé les formations superficielles. Mais le reste descend plus profond et alimente les nappes. Si un tel mécanisme ne jouait pas, il n'y aurait pas d'eaux souterraines actuelles dans les déserts.

Une grande partie des eaux souterraines de la zone aride a donc son gisement dans des formations alluviales, d'où elle gagne parfois des couches perméables du substratum. Ce dernier aspect échappe à l'étude géomorphologique. Il n'en est pas de même, au contraire, des nappes alluviales. Leur nature et leur disposition sont étroitement liées à l'évolution géomorphologique régionale. En effet, c'est elle qui explique la mise en place des formations détritiques aquifères, qui rend compte de leurs faciès plus ou moins favorables au stockage souterrain de l'eau, de leur disposition, dont dépend l'allure des nappes et les possibilités de leur exploitation. Dans la quasi-totalité des régions actuellement arides, il y a eu, au cours du Quaternaire, parfois seulement quelques millénaires avant notre ère, des périodes de climat moins sec. L'écoulement était alors plus fréquent et des réseaux hydrographiques hiérarchisés ont pu se constituer. Dans tout le Sahara occidental, ils apparaissent sur des centaines, voire des milliers de kilomètres, partant des hauteurs plus humides (Atlas saharien de l'Algérie, Haut Atlas et Anti-Atlas du Maroc, Aïr, Tibesti, Hoggar du Sahara central, diffuences du Niger, déversements du système tchadien dans le Sahara méridional etc...) et parcourant des régions aujourd'hui asséchées. Les crues actuelles ne permettent plus qu'une remise en service partielle de ces artères, limitée le plus souvent aux zones de piémont. Mais cet écoulement superficiel, peu étendu et limité dans le temps, alimente un écoulement souterrain beaucoup plus durable et pénétrant plus loin dans le désert. En effet, une fois infiltrées dans des alluvions poreuses, les eaux peuvent continuer de cheminer à l'abri de l'évaporation. Ainsi se constituent les inféoflux, exploités de longue date par les hommes du Désert et dont les hydrogéologues ont reconnu de plus en plus souvent l'importance.

La recherche des inféoflux est souvent susceptible de fournir la solution de problèmes hydrogéologiques, surtout pour l'alimentation des troupeaux et des nomades, parfois même pour certains besoins industriels. Or, elle est grandement facilitée par l'analyse géomorphologique régionale. C'est, en effet, cette discipline qui est apte à reconstituer les anciens réseaux hydrographiques, à rendre compte de leur dynamique et de la manière dont ils ont déposé leurs alluvions, à préciser la nature de ceux-ci. Une reconstitution paléogéographique, tirée de l'analyse géomorphologique régionale, permet alors de déterminer la disposition vraisemblable des couches aquifères, donc d'orienter les recherches de l'hydrogéologue en diminuant les tâtonnements dans les sondages de reconnaissance, puis d'aider à l'interprétation hydrogéologique des résultats.

Par exemple, dans la région de la Bouche du Niger, arrivent des eaux provenant de la Dorsale Guinéenne, qui s'étalent sur un vaste delta intérieur où une partie d'entre elles s'évapore et s'infiltré tandis que le reste finit par s'écouler en direction du Golfe de Guinée par dessus le Seuil de Tossaye. Cette région a subi des vicissitudes paléoclimatiques importantes. Lors de nos périodes glaciaires, elle a été envahie par la zone aride des hautes pressions tropicales, refluant vers le Sud. Lors des interglaciaires, au contraire, elle a connu des climats plus humides, comme l'actuel, mais souvent

plus accentués encore. Lors des périodes sèches, le Niger se perdait plus en amont et les alluvions sableuses étaient remaniées par le vent en champs de dunes. Lors des périodes humides, l'écoulement du Fleuve se rétablissait et alimentait des épandages lacustres gagnant loin vers le Nord avant que l'ennoyage détritique ne provoquât le déversement de Tossaye. A l'Ouest de Tombouctou, la cuvette du Moyen-Niger est ainsi remplie d'une alternance complexe de formations fluviales allant des sables grossiers aux argiles des cuvettes de décantation, de formations deltaïques et lacustres plus fines et de formations éoliennes sableuses. L'essentiel de l'alimentation des nappes se fait là où la zone d'inondation actuelle atteint les dunes quaternaires. Celles-ci offrent, en effet, la seule formation suffisamment poreuse pour permettre une percolation importante, car les étendues d'accumulation alluviale, riches en argiles et en limons argileux, sont très peu perméables. Comme l'on montré les travaux de G. PALAUSI, le cheminement se fait ensuite souterrainement vers le N, direction dans laquelle la nappe devient de plus en plus profonde et de plus en plus salée. Dans cette direction, les anciens dépôts d'épandage passent à des faciès deltaïques et lacustres de plus en plus fins, donc de moins en moins perméables, dans lesquels le cheminement devient de plus en plus difficile, ce qui fait que la nappe perd progressivement de son intérêt.

L'évolution géomorphologique rend donc parfaitement compte des observations hydrogéologiques et permet de les interpréter. Elle montre que cette nappe n'est exploitable que jusqu'à 100-150 km du Niger, dans la zone où les épandages alluviaux quaternaires sont encore assez grossiers pour permettre un cheminement assez rapide des eaux souterraines. Elle explique aussi pourquoi la salure devient de plus en plus élevée vers le Nord et pourquoi, aux abords même du Niger, on observe souvent un cloisonnement des eaux souterraines. Celles-ci se rencontrent en effet, dans les formations dunaires fossilisées ou dans certaines levées alluviales sableuses, séparées, les unes des autres, par des dépôts argileux de cuvettes de décantation. Enfin, c'est encore l'évolution géomorphologique qui montre la voie à suivre pour une réalimentation éventuelle de ces nappes : contrebalancer la diminution des zones d'inondation résultant de l'érosion régressive déclenchée par le déversement de Tossaye par des ouvrages facilitant l'inondation annuelle du bord des zones dunaires et, éventuellement, la pénétration de la crue entre les dunes elles-mêmes. De tels aménagements reconstitueraient partiellement la situation paléogéographique réalisée lorsque le déversement de Tossaye venait d'avoir lieu. Ils permettraient donc d'utiliser au mieux les possibilités naturelles pour remettre en fonctionnement un dispositif stable et bénéfique.

3. LES ANALYSES MORPHOMÉTRIQUES DES BASSINS HYDROGRAPHIQUES

Une troisième méthode géomorphologique s'applique également avec succès aux problèmes hydrogéologiques : l'analyse morphométrique des bassins hydrographiques. Des recherches récentes, dont HORTON est l'initiateur, nous ont permis, en effet, de montrer que les réseaux hydrographiques sont, par certains de leurs caractères, en équilibre avec les modalités de l'écoulement superficiel. Les lits fluviaux se façonnent sous l'effet de débits de certaines fréquences. Les talwegs élémentaires, topographiquement marqués, apparaissent lorsqu'un certain débit minimum d'écoulement concentré est réalisé. Ils ne persistent, résistant à l'effacement par d'autres processus morphogénétiques et se creusant peu à peu grâce à l'évacuation des débris, que si l'écoulement les parcourt avec une fréquence suffisante. La surface-seuil du ruissellement concentré, définie comme la superficie moyenne de l'aire drainée par un talweg élémentaire, ou, ce qui revient au même, la densité des talwegs, revêt donc une très grande importance géomorphologique et hydrologique. Dans une région où les conditions pluviométriques sont homogènes, elle dépend essentiellement de

la pente topographique et des facteurs lithologiques. D'une manière générale, la densité des talwegs est proportionnelle au ruissellement. Dans des conditions pluviométriques données, elle est donc inversement proportionnelle à la quantité d'eau soustraite d'une part par l'évapotranspiration, surtout pendant la durée même de l'averse, et, d'autre part, par l'infiltration.

Dans les régions sèches, comme nous l'avons rappelé, la plupart des nappes souterraines sont alimentées par l'infiltration à partir de l'écoulement concentré s'effectuant sur des formations perméables. Il faut sortir de la zone aride proprement dite pour que les pluies soient suffisamment fréquentes et suffisamment abondantes pour qu'elles provoquent une infiltration capable de rejoindre directement les nappes souterraines. A pluviosité égale, en zone aride, l'alimentation d'une nappe dans une dépression dépend directement du coefficient de ruissellement sur les reliefs qui la dominent et où se forment les crues qui s'infiltreront dans les épandages pour rejoindre la nappe. Généralement, il n'est pas possible de calculer ce coefficient avec précision, car les mesures hydrologiques font défaut. Exceptionnels sont les bassins, comme les bassins expérimentaux de l'O.R.S.T.O.M. dans le Tibesti, où on se livre à des évaluations précises du débit de crue des oueds. De plus, le calcul de l'évapotranspiration, en zone aride, est beaucoup plus difficile que sous climat humide. En effet, la plus grande partie de cette évapotranspiration est constituée par une évaporation purement physique dans laquelle entre l'eau qui humecte la surface des roches, la pierraille et les formations superficielles, qui stagne dans les creux de rochers, dans les mares du lit après la crue et qui se perd dans des fissures peu profondes. Le volume de cette eau varie beaucoup d'une averse à l'autre, en fonction de la température et, surtout, de l'intensité de la pluie. Il varie aussi beaucoup à faible distance du fait de la pente, du microrelief, de la densité des fissures et diaclases. Une telle complexité exige l'analyse de masses considérables de mesures, qui, justement, font défaut. Il est donc plus expédient de prendre en considération l'effet global du phénomène, tel qu'il se traduit dans la densité des talwegs.

C'est pourquoi nous nous sommes attachés, au Centre de Géographie Appliquée, à rechercher les corrélations entre certaines caractéristiques morphométriques des bassins hydrographiques et les phénomènes hydrologiques. Les résultats préliminaires auxquels nous avons abouti sont très encourageants pour les zones humides. Nous espérons pouvoir bientôt les développer, les rendre plus systématiques et, ainsi, les appliquer avec succès aux régions arides.

Conclusion : Les récents progrès de la géomorphologie et l'orientation pratique que nous lui avons donnée au Centre de Géographie Appliquée nous ont permis de la mettre au service de l'hydrogéologie, comme elle l'est déjà à celui d'autres disciplines. Une telle collaboration est dans la logique de la Nature, et c'est pourquoi, à condition d'être convenablement orientée, elle est couronnée de succès. En effet, le rôle des eaux courantes dans le façonnement du relief est admis par tous de longue date et maintenant reconnue de manière générale dans les zones arides. Il est donc légitime qu'une meilleure connaissance des lois fondamentales de la morphogénèse aboutisse, à travers la cartographie systématique des faits géomorphologiques, à travers les reconstitutions de l'évolution du relief, à travers certaines analyses morphométriques, à préciser l'importance des eaux courantes et, par voie de différence, la part des précipitations qui, s'infiltrant, constitue les précieuses réserves d'eaux souterraines.

Le développement de ces méthodes géomorphologiques entraîne à des recherches de complexité croissante, impliquant une formation spécialisée différente de celle des hydrogéologues. Pour sauvegarder l'unité de vue exigé par la synthèse qu'est l'établissement d'un bilan de nappe, il faut organiser le travail en équipe. Dans son cadre, la géomorphologie apporte à l'hydrogéologue des éléments dont l'incertitude a limité le plus souvent jusqu'à présent la précision de ses propres résultats, car elle l'aide à répondre à des questions fondamentales telles que : Comment et où s'alimentent les nappes ? Quelle est la part de l'eau qui s'infiltré ?