

LE TRANSFERT D'ECHELLE EN HYDROLOGIE : CONCEPT OU CONFUSION ?

LEBEL T.

RESUME

S'agissant d'un concept aussi largement utilisé dans un grand nombre de disciplines que l'est le "transfert d'échelle", on ne s'étonnera pas qu'il puisse être compris très diversement et suscité la perplexité. Appliquer ce concept dans une discipline (l'hydrologie) qui est à la recherche d'un nouveau paradigme, c'est se plonger dans la contemplation d'un océan d'incertitudes. Entre une vision intégratrice classique qui prend comme Unité élémentaire le bassin versant et une démarche analytique visant à délimiter des unités de fonctionnement de chacune des composantes du cycle de l'eau, le débat est posé à la fois en terme d'échelle et d'objectif. Si à un objectif donné correspond une échelle d'étude privilégiée, la notion de transfert d'échelle n'a guère de sens, il s'agit simplement de déterminer une échelle d'analyse et d'instrumentation pertinente. La question se présente différemment à partir du moment où, pour des raisons les plus souvent liées à une volonté de modélisation, on estime nécessaire d'étendre les résultats obtenus à une certaine échelle à d'autres échelles. Quelques exemples récents de travaux menés à l'ORSTOM permettent d'illustrer ces deux cas de figure. Il n'est cependant pas toujours aisé de déterminer a priori si il existe effectivement une ou plusieurs échelles de travail pertinentes. Cette ambiguïté est à l'origine de nombreux échecs rencontrés dans le domaine de la modélisation. Elle peut également être source de discussions fécondes parce qu'elle oblige une discipline à affiner ses concepts ou tout du moins à tester de façon plus rigoureuse ceux sur lesquels elle a coutume de s'appuyer. C'est une telle situation qui guide la réflexion en cours sur la modélisation hydrologique à entreprendre dans le cadre du projet HAPEX telle qu'elle est présentée dans une autre communication à ce séminaire.

1 LES ECHELLES DE TRAVAIL EN HYDROLOGIE

Une des grandes vocations de l'hydrologie devrait être de travailler aux échelles continentale et planétaire, puisque son propos est l'étude du cycle de l'eau. En réalité, l'histoire récente de cette discipline est celle d'une recherche souvent laborieuse et tâtonnante

qui s'est concentrée autour de la compréhension et de la simulation d'un des mécanismes seulement de ce cycle : la formation des écoulements de surface, et leur transfert ultérieur dans le réseau hydrographique. Même dans ce domaine restreint, on attend encore l'émergence d'un concept dominant, supporté par des intuitions s'imposant à tous ou par des confirmations expérimentales : il nous manque l'équivalent de ce que fut par exemple la loi d'Ohm à la naissances des sciences électriques.

Dans ces conditions, c'est souvent le problème à traiter qui impose son échelle de travail à l'hydrologue, et non des considérations physiques. Or le bassin versant, unité de référence des études d'écoulement, est une entité naturelle dont la superficie, même en étant stricte sur sa définition, varie de plusieurs ordres de magnitude (en gros de 1 à 10^6 km²). Par ailleurs c'est un système qui est doté d'une réponse ponctuelle unique (le débit à l'exutoire) intégrant l'ensemble des mécanismes de détail qui président à son fonctionnement. Toutes ces conditions réunies ont créé une situation où le débit observé est considéré comme l'élément privilégié de connaissance du milieu. A défaut d'en bien comprendre la formation (en dehors de quelques généralités connues depuis longtemps), l'hydrologie s'est laissée guider par des besoins de type opérationnelle : reconstituer ou prévoir les débits sont devenus les deux impératifs finalisés qui permettaient de faire la preuve de l'utilité et de l'efficacité des hydrologues. Bâtie sur un corpus de connaissances suffisamment vague pour s'abstraire des problèmes d'échelle, la modélisation hydrologique a longtemps limité son ambition à gagner quelques points de variance expliquée dans la relation débits observés - débits calculés. L'abus de procédures numériques aveugles et réductrices a fini par masquer la grande diversité des observations et des connaissances empiriques acquises par les hydrologues un peu partout dans le monde. Quelques précurseurs comprirent dès le milieu des années 70 l'impasse dans laquelle nous entraînait cette approche. Il fallait pour cela être à la fois un homme de terrain, un expérimentateur et un esprit doué pour la conceptualisation, des qualités difficiles à réunir chez une même personne. Le manque de structuration de la discipline et la faible considération dont elle jouit dans les milieux dominants de la géophysique n'ont par ailleurs pas permis de constituer des équipes de recherche suffisamment solides et riches pour rassembler des individus à l'expérience et au tempérament complémentaires, condition souvent nécessaire à l'émergence de nouveaux concepts. On a donc assisté à la poursuite d'une démarche basée avant tout sur les techniques numériques au détriment de l'observation et de la compréhension. Cette démarche, qui a eu le mérite d'une certaine efficacité dès lors qu'on évitait de tester la transposabilité des modèles ainsi conçus, est désormais vouée à reproduire les échecs du passé, notamment parce qu'elle ne prend pas en compte un point essentiel : l'espace hydrologique est formé d'une juxtaposition de domaines limités par des discontinuités. Ces discontinuités peuvent être sensiblement invariantes dans le temps (discontinuités du milieu) ou évoluer (variables d'état). Pour déboucher sur une modélisation qui dépasse le niveau de la caricature, il faut donc définir des domaines élémentaires homogènes du point de vue des

mécanismes dominants et étudier comment agissent les forces créées par ces discontinuités.

La discrétisation de l'espace est ainsi le point central de tout projet de modélisation réaliste des bassins versants. On conçoit d'ailleurs aisément que ce qui est vrai pour le bassin versant, l'est aussi pour tout système hydrologique complet, c'est à dire incluant la proche atmosphère et le milieu souterrain. Il faut donc chercher des critères pertinents pour structurer l'espace hydrologique, fonctions du problème traité mais aussi de différentes échelles qui interfèrent : échelle du bassin, échelles de mesure (trop souvent négligées), échelles des zones élémentaires définies ci-dessus. De plus échelles de temps et d'espace doivent être cohérentes. Il est absurde de découper l'espace en unités très fines si on est incapable d'appréhender séparément l'excitation de chacune de ces unités, à cause d'un lissage temporel excessif. Si l'échelle de temps est imposé par des contraintes extérieures à la nature du problème traité, l'échelle d'espace s'impose à un niveau correspondant, ce qui peut amener à conclure que le problème n'est pas traitable dans ces conditions : conclusion triviale mais pourtant rarement admise.

2 VOUS AVEZ DIT TRANSFERT D'ECHELLE ?

Le transfert d'échelle a incontestablement été une notion à la mode, le type de vocabulaire qu'il fallait glisser dans toute demande de financement d'une action de recherche pour augmenter significativement les chances de voir cette demande aboutir. Est-ce pour autant un concept précis applicable aussi bien en sciences humaines qu'en sciences de l'environnement ? Il est plus vraisemblable que chaque discipline lui attribue en réalité un sens bien particulier.

Pour ce qui est de l'hydrologie, force est de constater que l'on mélange plusieurs idées lorsqu'on parle de transfert d'échelle. A dire vrai le mot échelle lui-même devient ambiguë dans ce contexte. C'est ainsi qu'on parle indistinctement de transfert d'échelle pour :

- la représentativité d'une mesure sur une petite surface pour évaluer la valeur moyenne sur une surface plus grande.
- les études de similitude entre structures représentées à des échelles différentes (échelle qualifie alors aussi bien l'aire d'étude que sa représentation).
- la généralisation à de grandes aires d'étude de lois caractérisant des processus étudiés sur de petites surfaces.

Ces trois questions relèvent en fait d'approches totalement différentes, comme nous allons le voir sur des exemples.

3 REPRESENTATIVITE DE LA MESURE PONCTUELLE : UN AUTRE ASPECT DE LA DISCRETISATION DE L'ESPACE

La pluviométrie est, en hydrologie, une des seules variables que l'on sache mesurer directement, et avec une assez bonne précision. Le seul inconvénient de cette mesure est qu'elle est virtuellement ponctuelle au regard des surfaces sur lesquelles on travaille usuellement. L'aire du cône de réception d'un pluviomètre varie en effet de 400 (parfois même 100) à 2000 cm², à comparer à des surfaces de bassins versants de 1 à plusieurs dizaine de milliers de km². On doit en conséquence s'interroger sur la possibilité de déduire d'une ou plusieurs de ces mesures ponctuelles P_i , la valeur moyenne P_S sur la zone d'étude, qui est la seule pertinente pour l'hydrologue. Il y a alors deux façons d'aborder la question. La première est de considérer la quantité d'eau recueillie dans le pluviomètre comme un simple indicateur pluviométrique. Si on possède plusieurs postes sur un bassin, on fait une moyenne, éventuellement pondérée empiriquement, de ces individus. Cette moyenne est utilisée comme donnée d'entrée (I_p) des modèles selon l'hypothèse :

$$P_S = a \cdot I_p$$

Le paramètre 'a' peut être un facteur de calage du modèle, puisque si on calcule des bilans annuels, la sortie moyenne sur l'année est généralement bien connue. Une des causes de l'inadéquation entre les sorties (débits) calculées et observées pouvant être attribuée au fait que 'a' est différent de 1, le respect de la conservation de la masse autorise en principe à l'ajuster pour équilibrer entrées (pluies réelles) et sorties (débits et évaporation), sous hypothèse de variation du stock nulle. L'inconvénient, bien entendu, est qu'on ne dispose d'aucun moyen objectif d'évaluer 'a' indépendamment du modèle, et que son estimation dépend alors fortement des spécifications de ce modèle, donc de ses erreurs. C'est pourquoi on préfère généralement considérer que $P_S = I_p$ ce qui présente l'inconvénient alternatif d'attribuer au modèle lui-même les erreurs résultant de cette approximation. Or, si on ne peut pas connaître 'a' de façon certaine (le contraire signifierait que l'on sait mesurer P_S), on peut par contre essayer d'obtenir une estimation de P_S graduée en probabilité. C'est ce que vise la deuxième approche, où on remplace I_p par :

$$P_S^* = \sum_i \lambda_i P_i$$

et où on cherche une méthode "objective" pour quantifier ($P_S - P_S^*$). Un critère couramment utilisé pour cela est celui de la variance d'estimation (e.g. Lebel, 1984)

$$\sigma_S^2 = E (P_S - P_S^*)^2 .$$

Les méthodes statistiques apparentées à l'analyse objective permettent d'obtenir un estimateur de σ_s^2 fondé sur l'identification d'une fonction de structure spatiale, par exemple le variogramme dans le cas du krigeage simple (Delhomme et Delfiner, 1973, sont les premiers à avoir utilisé le krigeage pour interpoler des champs pluviométriques). Dans les ouvrages de référence de géostatistique (e.g. David, 1977), σ_s^2 est appelée variance d'extension. Cette "extension" de la valeur ponctuelle à la valeur moyenne sur une surface n'est rien d'autre qu'une interpolation, puisque, dans la pratique on n'estime σ_s^2 que sur des zones situées à l'intérieur du domaine de mesure.

En analyse objective, on assimile la pluie à un champ aléatoire caractérisé par sa structure statistique dans l'espace. C'est à dire qu'il y a continuité entre la valeur mesurée ponctuellement et la valeur moyenne estimée. C'est une situation bien différente de celles pour lesquelles a été conçu le concept de "transfert d'échelle", où l'on est dans l'incapacité de formaliser analytiquement ou statistiquement le passage de la petite structure à celles caractérisant une structure de quelques ordres de grandeur supérieure.

Il faut remarquer que l'apparition relativement récente des moyens de télédétection, notamment radar, n'ont pas modifié la nature des traitements effectués. Les radars fournissent une valeur d'ensemble sur un pixel, et couvrent l'espace de façon continue. Mais comme cette valeur ne résulte que d'une mesure indirecte de la pluie, elle doit être étalonnée à l'aide de données sol, c'est à dire celles des pluviographes ou pluviomètres. On doit alors procéder à des interpolations spatiales basées sur des algorithmes purement numériques, ou en partie statistiques, de la même famille que ceux utilisés pour interpoler les données pluviométriques (e.g. Creutin et al., 1988). En conclusion, l'exemple de l'analyse des champs pluviométriques montre bien que l'estimation de valeurs moyennes spatiales à partir de valeurs quasi ponctuelles ne doit pas être vue comme un processus de changement d'échelle (passage de la valeur sur une petite surface à la valeur sur une surface plus grande), mais bien comme une simple interpolation.

4 TOPOLOGIE DES RESEAUX HYDROGRAPHIQUES : LE ROLE DE LA REPRESENTATION DANS L'ETUDE DES PROCESSUS PHYSIQUES

"Il est frappant, en effet, que lorsqu'une baie ou une péninsule que l'on avait retenue sur une carte au 1/100 000, est réexaminée sur une carte au 1/10 000, on aperçoit sur son pourtour d'innombrables sous-baies et sous-péninsules. Sur une carte au 1/1000, on voit aussi apparaître des sous-sous-baies et sous-sous péninsules, et ainsi de suite [...], et on trouve que les cartes correspondant aux niveaux d'analyse successifs [...] ont le même caractère global, les mêmes

traits génériques. En d'autres termes, on est amené à croire qu'à l'échelle près, le même mécanisme eût pu engendrer les petits aussi bien que les gros détails des côtes". Cette citation, tirée de l'introduction de Mandelbrot (1975) à la désormais classique théorie des fractales définit parfaitement ses deux fondements conceptuels :

1) il y a continuité des échelles, c'est à dire qu'il n'existe pas d'échelle privilégiée pour observer le phénomène étudié, autre que celles dictées par la simplicité des nombres (l'échelle du 1/100000 est plus parlante que celle du 1/126693 correspondant à 1 inch pour 1 mile) ou de la faisabilité expérimentale (il est assez aisée d'arpenter une côte, plus laborieux de mesurer le parcours d'une fourmi qui en suivrait les contours à son échelle);

2) cette continuité des échelles s'explique par l'existence d'un même mécanisme générateur pour les petites et les grandes structures.

Une application directe du concept fractal est la caractérisation de l'arborescence d'un réseau hydrographique. L'utilité d'une telle caractérisation ne sera pas discuter ici, mais on conçoit qu'elle puisse stimuler la réflexion au même titre que la détermination de la longueur de la côte bretonne. On peut ainsi étudier les changements de longueur de réseau de drainage ou de surface couverte par le chevelu hydrographique en fonction des échelles de représentation ou de discrétisation de l'espace.

La nature fractale du réseau hydrographique a suscité récemment de nombreux travaux, dont les conclusions varient du positivisme le plus absolu (Tarboton et al., 1988) au scepticisme modéré (e.g. Evans, 1989). Néanmoins, quelques points se dégagent qui permettent de mieux apprécier l'intérêt et les limites de cette approche basée sur l'autosimilarité. Tout d'abord, lorsqu'un auteur conclut à l'efficacité du modèle fractal pour décrire l'évolution de certains paramètres hydrographiques (e.g. Hjelmfelt, 1982), le modèle n'est validé que sur une gamme de magnitudes limitée. Par ailleurs, l'utilité de ce type de modèle ne va guère au delà de la description. Il n'a encore jamais servi de base à un quelconque modèle hydrologique, que ce soit sous la forme d'une prédétermination de paramètres hydrographiques ou de mise en évidence d'une relation opératoire entre la dimension fractale et la nature de l'écoulement, alors même que des essais dans cette direction ont été effectués (e.g. Moussa, 1989). Enfin le modèle fractal ne peut, par sa nature même, s'accommoder des discontinuités qui sont si fréquentes en géomorphologie (ruptures de pente, falaises, cluses, ...). En particulier, le modèle fractal est impuissant à rendre compte du passage d'un état de versant sans réseau de drainage à la brusque apparition d'un émissaire hydrologique les limites du modèle fractal sont parfaitement prévisibles dès lors qu'on réalise qu'au contraire des constructions humaines, la nature ne connaît pas la notion de modèle réduit. On n'y trouve pas l'équivalent des maquettes d'avion dont on fixe l'échelle pour que les pièces tiennent dans une boîte de taille donnée ou des modèles réduits d'architecte dont les dimensions sont fixées

pour flatter au mieux l'oeil du décideur. La nature est au contraire organisée autour d'échelles préférentielles qui résultent de mécanismes spécifiques, et c'est le passage d'un état à l'autre sur ce spectre discret qui importe pour la connaissance hydrologique. La notion de similitude, lorsqu'elle s'applique, n'est donc généralement valide que dans certaines limites et ne peut rendre compte des discontinuités qui se produisent au voisinage de certaines échelles. Elle échappe ainsi à la problématique du transfert d'échelle au sens couramment admis du terme

5 DE LA PARCELLE AU BASSIN VERSANT : QUELLE CONTINUITÉ ?

Il est aisé de faire l'inventaire des forces qui président à la partition de l'eau précipitée entre infiltration et écoulement de surface. Ce bilan hydrologique sommaire (où l'évaporation peut être négligée dans la phase de réponse rapide du système) est en effet sous la dépendance exclusive des forces de gravité (dans et à la surface du sol), et des forces de potentiel capillaire. On peut donc formuler de façon assez simple les équations de la physique fondamentale qui s'appliquent au niveau le plus élémentaire. Mis à part quelques problèmes d'intégration numérique, que l'apparition des gros ordinateurs modernes permettent de résoudre tant bien que mal, l'extension de ces équations à l'ensemble du domaine ne présente en principe aucune difficulté conceptuelle. On sait que la réalité est toute autre. En effet, si chaque processus considéré individuellement peut être intégré, les interactions possibles entre les différents processus qui entrent en ligne de compte, deviennent si nombreuses quand ce domaine grandit, qu'il est impossible de déduire leur influence des mesures effectuées à petite échelle. Cette influence est le plus souvent indétectable ou négligeable à cette échelle; elle peut devenir prépondérante à grande échelle. Ainsi l'étude du bilan hydrique d'un pot de fleur fait abstraction des contraintes de pente qui sont pourtant capitales lorsqu'on travaille sur un bassin versant. On pourrait objecter à cette remarque que ces deux terrains d'étude n'ont rien de commun et que nul scientifique censé n'essaierait de transposer les résultats obtenus sur un pot de fleur à la caractérisation du bilan hydrologique d'un bassin versant de plusieurs dizaines ou centaines de km^2 . Et pourtant, c'est à la philosophie du pot de fleur qu'obéissent les expériences de simulation de pluie sur parcelles de un ou quelques m^2 . Ces dernières visent à reproduire, en situation de pluie contrôlée, les processus d'infiltration sur sol naturel. Par delà les problèmes de réalisme expérimental (distribution de la taille des gouttes de l'asperseur, reconstitution d'une chronique plausible des apports, dégradation des surfaces, entre autres), l'inconvénient majeur de ce type d'expérimentation est le véritable saut conceptuel qu'il faut opérer pour admettre que ces résultats sont susceptibles d'être étendus à l'échelle supérieure. Les conditions aux limites qui influencent très fortement l'infiltration mesurée sur un m^2 n'ont rien à voir avec celles qui sont déterminantes sur bassin versant. Sur parcelle de 1 m^2 , on a une discontinuité sur le bord de la parcelle

entre volume arrosé et volume épargné. C'est à dire qu'il ne peut y avoir de relation de similitude entre la parcelle et le bassin, car la dimension verticale ne subit aucune distorsion (on travaille sans condition à la limite inférieure dans les deux cas), alors que les dimensions horizontales sont tronquées. De plus, sur bassin versant, une condition à la limite primordiale est la pente, dont l'effet, pas plus que pour le pot de fleur, ne peut être pris en compte sur la parcelle du simulateur. Cette absence de similitude a pour traduction notre incapacité à obtenir des performances améliorées de nos modèles en y intégrant les paramètres déduits des expériences de simulation de pluie. Par ailleurs ces expériences n'ont, jusqu'à présent, pas non plus permis d'imaginer d'autres modèles construits autour de ces paramètres et dont les résultats seraient meilleurs que ceux des modèles globaux les plus éprouvés. Ceci peut s'expliquer par le fait que, si ces derniers restent souvent proches de la caricature, ils n'en retiennent pas moins quelques caractéristiques majeures du fonctionnement global du bassin (par exemple sa pente ou certains indices de couverture végétale). Ces caractéristiques majeures, même décrites par des paramètres qui sont des moyennes grossières, ont finalement plus de pouvoir d'explication que la prise en compte de processus physiques, certes valides, mais dont la paramétrisation à l'échelle de la parcelle ne s'applique plus à celle du bassin.

6 CONCLUSION

Dans le cas particulier de l'hydrologie, une fois mis de côté des questions qui sont faussement interprétées comme relevant de la problématique du changement d'échelle (telle l'extension d'une valeur ponctuelle à une valeur spatiale par simple interpolation d'un champ aléatoire), il existe de nombreuses situations où les expériences et modèles développés à petite échelle sont d'une utilité limitée, voire nulle, pour les échelles supérieures. Dans certains cas, le concept de transfert d'échelle peut alors devenir un obstacle à la réflexion car il pousse à croire que les connaissances acquises à petite échelle doivent être "transférées" aux échelles supérieures. Cette vision des choses nous empêche alors de rechercher les paramètres qui sont déterminants pour l'analyse et la compréhension des processus à ces échelles. Certaines disciplines, proches de l'hydrologie, ont bien identifié le hiatus qui sous-tend ces questions et ont renoncé à expliciter ou même seulement à recourir au concept de transfert d'échelle. L'utilisation du formalisme statistique de la turbulence ou la schématisation fractale sont deux exemples d'une telle démarche (voir par exemple Lovejoy et Schertzer, 1986, en météorologie). A l'inverse, la notion de transfert peut être fructueuse si, au lieu de s'attacher à des paramètres descriptifs du milieu, elle s'attache à des variables physiques, l'énergie par exemple, qui ont la même signification quelle que soit l'échelle considérée. A défaut de savoir caractériser un système hydrologique par de tels variables, nous en sommes réduits à inverser les termes du problème. C'est la question posée qui conditionne l'échelle de travail et il s'agit d'identifier les mécanismes déterminants qui opèrent à cette échelle. Ces

mécanismes, si on peut les appréhender à l'aide de mesures ou de considérations théoriques, peuvent alors servir de base à la construction d'un modèle qui sera valide à cette échelle et à elle seule.

Comme le souligne Klemes (1983), l'extrapolation à un niveau supérieur de lois physiques valides à une échelle, a été régulièrement source de déceptions et de paradoxes. En hydrologie, comme dans beaucoup de disciplines voisines, la priorité n'est pas tant d'étudier les modalités d'une telle extrapolation, que de d'abord savoir identifier la ou les variables qui caractérisent le mieux un système hydrologique à une échelle donnée.

REFERENCES

- CREUTIN, J.D., G. DELRIEUX, and T. LEBEL, Rain measurement by raingage-radar combination : a geostatistical approach, *J. Atmos. and Ocean. Techno.*, 5(1), 102-115, 1988.
- DAVID, M., Geostatistical ore reserve estimation, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1977 .Delhomme, J.P., et P. Delfiner, Application du Krigeage à l'optimisation d'une campagne pluviométrique en zone aride, in *Proc. Symp. on Design of Water Resources Projects With Inadequate Data*, Vol.2, 191-210, UNESCO, Paris, 1973.
- EVANS, I.S., Digital terrain models in geomorphology. Deuxièmes Journées ULM : "Prise en compte du relief dans les études hydrologiques de bassins versants", ORSTOM - Montpellier, 6-7 Avril 1989.
- HJELMFELT, A.T., Fractals and the river length catchment-area ratio, *Water resources Bulletin*, 24(2), 1982.
- KLEMES, V., Conceptualization and scale in hydrology, *Journal of Hydrol.*, 65, 1-23, 1983.
- LEBEL, T., Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant: estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes, thèse docteur-ingénieur, USMG-INPG, Grenoble, 1984.
- LOVEJOY, S., and D. SCHERTZER, Scale invariance, symmetries, fractals, and stochastic simulation of atmospheric phenomena, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 67(1), 21-32, 1986.
- MANDELBROT, B., *Les objets fractals*, Flammarion ed., Paris, 1975, réédition 1989, 268 p.
- MOUSSA, R., Nature fractale du réseau hydrographique, Deuxièmes Journées ULM : "Prise en compte du relief dans les études hydrologiques de bassins versants", ORSTOM - Montpellier, 6-7 Avril 1989.
- TARBOTON, D.G., R.L. BRAS and I. RODRIGUEZ-ITURBE, The fractal nature of river networks. *Water resources research*, 24(8), 1317-1322, 1988