

Transfert versus mutualisation des coûts et des risques d'amont en aval – Apports des notions hydrologiques d'échelle, structure, émergence et impact

Christophe CUDENNEC, UMR G-EAU, IRD, Tunis ; Christophe.Cudennec@ird.fr

Résumé

Le bassin versant est l'unité territoriale qui détermine les ressources et les aléas hydrologiques. Son organisation hydrographique est la structure intégratrice des processus et des probabilités d'occurrence. La tendance naturelle des acteurs présents sur ce territoire consiste à prévenir localement les risques par rapport à des enjeux multiples et dispersés. L'agrégation des processus influencés par les aménagements et pratiques anthropiques diffus tend à transférer les risques vers l'aval, vers le futur et/ou vers des usages différents. Nous mettons alors en évidence l'intérêt d'une gestion intégrée du territoire par rapport aux ressources, flux et aléas hydrologiques, au niveau et au sein du bassin versant, autour de la structure hydrographique. Cela s'appuie sur une idée de mutualisation structurée d'amont en aval. Une telle perspective demande d'identifier les variables inter-disciplinaires et les niveaux de gouvernance pertinents pour d'une part expliciter les enjeux et d'autre part établir les règles de mise en œuvre de la mutualisation. L'objet de cette communication est de présenter cette idée de mutualisation du point de vue hydrologique.

Mots clés : agrégation, amont-aval, bassin versant, mutualisation, risque

Introduction

La mobilisation, le transport et la distribution de l'eau s'organisent selon une hiérarchie amont-aval. Cette hiérarchie est naturellement déterminée par le relief en surface et par les gradients hydrauliques pour les eaux souterraines. L'homme surimpose à cette nature des infrastructures de circulation et de stockage de l'eau qui accentuent les tendances naturelles, ou au contraire les combattent. Ces anthropisations contraignent et modifient la hiérarchie amont-aval, mais ne la gomment pas. La nature anthropisée, ainsi structurée, détermine une dynamique générale de convergence. Les lieux d'un territoire cohérent (bassin versant, périmètre, connexion ressources-usages à distance...) sont donc interdépendants, ainsi que les usages qui y sont implantés, avec leurs objectifs, contraintes et résultats.

Du point de vue hydrologique, les processus et leurs variabilités sont intégrés selon cette hiérarchie structurée et convergente, à différentes échelles d'espace, de temps et de fréquence. Chaque acteur-usager valorise ou subit les processus et ressources de son lieu d'implantation, ainsi que leurs variabilités et les aléas qu'elles représentent. Afin de minimiser sa sensibilité et sa vulnérabilité à ces variabilités et aléas, l'acteur-usager peut aménager et/ou gérer localement. Il peut également avoir des revendications vis à vis de l'amont. Mais il a, inversement, un impact sur l'aval à travers son usage du lieu et son influence sur les processus et ressources. Un tel impact 'individuel' se répercute plus ou moins loin dans la structure vers l'aval, et se manifeste plus ou moins selon les attendus et selon les conjonctures. En outre, les multiples impacts individuels sont intégrés par la structure, conduisant à l'émergence d'impacts agrégés.

La convergence hydrologique correspond ainsi à une forte anisotropie entre les lieux et acteurs-usagers implantés d'amont en aval, et donc également à une forte asymétrie d'information. L'acteur-usager perçoit et transforme cette hydrologie en bénéfices, coûts et risques. Il est fortement dépendant de l'amont et a une influence sur l'aval. Si chaque acteur-usager valorise, aménage et gère dans une perspective strictement individuelle, il va chercher à maximiser les bénéfices locaux et à influencer l'amont de façon à minimiser les risques émergents à son niveau de la structure. Par ailleurs, ce faisant, il va, consciemment ou non, transférer une majorité de ses coûts et de ses risques vers l'aval ; qui, combinés à ceux transférés par les autres acteurs-usagers, peuvent faire émerger de nouveaux risques et coûts.

L'ensemble des dynamiques et stratégies individuelles génère ainsi une tendance supérieure à transférer les problèmes vers l'aval, vers la collectivité, vers le futur et vers les situations extrêmes. Par analogie avec le domaine des assurances, on peut imaginer une stratégie collective inverse, visant à la mutualisation des coûts et des risques. Certaines approches, traditionnelles et modernes, de gestion de l'irrigation, et plus généralement de solidarité, peuvent être d'ores et déjà rapprochées de cette notion de mutualisation. Cependant, dans une optique de mutualisation holistique et à grande échelle, deux grands volets peuvent être identifiés :

- Les impacts des transferts et inversement des efforts de mutualisation doivent être objectivés aux niveaux individuels et locaux, mais aussi aux différents niveaux d'agrégation et d'émergence, de façon à établir et justifier des schémas de mutualisation 'physico-économique'.
- Les échelles territoriales sollicitées deviennent de plus en plus grandes, et donc les collectivités correspondantes sont à des niveaux de société et d'institution différents, emboîtés et interagissant.

Ces niveaux, leurs rôles respectifs, les règles de concertation et d'arbitrage inter- et intra-niveaux, et les variables et modalités d'échanges entre niveaux doivent donc être identifiés par un compromis entre mutualisation 'physico-économique' et gouvernance multi-niveaux. L'eau étant au cœur de la question, les interprétations et quantifications hydrologiques –autour des notions d'échelle, structure, émergence et impact– devraient permettre d'amorcer cette réflexion sur l'alternative transfert-mutualisation, y compris dans une perspective économique et institutionnelle.

Le bassin versant, territoire intégrateur orienté et hiérarchisé : intégration événementielle

L'unité territoriale de base en hydrologie continentale est le bassin versant, qui présente une relation complexe entre d'une part son échelle, son extension et son organisation territoriales, et d'autre part les transferts d'eau et d'éléments associés. Cette relation est interdépendante puisque le bassin versant détermine les dynamiques et vice versa ; et ce à différentes échelles de temps emboîtées. Le bassin versant est donc à la fois un 'système hydrologique' déterminant l'évolution de variables hydrologiques au fil de l'événement ou au fil des chroniques stochastiques ; un 'système morphogénique' dont la géométrie naturelle évolue au fil des événements ; un 'système anthropique' lorsque les caractéristiques territoriales sont déterminées et/ou gérées par l'homme ; et un 'système social' lorsque les enjeux individuels et collectifs sont liés par les dynamiques et usages de l'eau. Les événements déterminés par les systèmes hydrologique et morphogénique peuvent être dommageables pour les enjeux du système social.

Le bassin versant n'est pas stationnaire aux échelles de temps historique et géologique ; mais à l'échelle de l'événement normal, au sens de 'non catastrophique', c'est-à-dire non destructurant, le bassin versant est pseudo-stationnaire et est prépondérant dans l'évolution de l'événement hydrologique. Il transforme une précipitation incidente en différents flux et stockages d'eau, à travers et au sein des versants et cours d'eau qui constituent le territoire. En particulier, le bassin versant

détermine l'écoulement canalisé au niveau de l'exutoire, dont la chronique de débit est l'hydrogramme. Cette perturbation du système est l'événement hydrométéorologique (Figure 1). Globalement, l'entrée d'eau sous forme de précipitation alimente la sortie écoulement à l'exutoire après atténuation et transfert. L'atténuation est causée par les pertes d'eau par évapotranspiration et éventuelle fuite profonde d'une part et par les stockages internes d'autre part. Le transfert est lié quant à lui à l'intégration en un point des dynamiques organisées dans l'espace.

Plus précisément, cette transformation de la pluie en flux et stockages d'eau au sein du bassin versant relève de plusieurs processus appartenant à deux grandes familles, et correspondant à deux domaines géographiques différents : les processus de versants et les processus de réseau hydrographique. A tout moment et en tout point, le devenir de l'eau (évaporation, stockage, mise en mouvement dans le milieu environnant, changement de milieu) dépend des forces en présence et des conditions locales du milieu physique. Au niveau du versant lui même, différents écoulements (ruissellement strict, écoulement hypodermique, écoulement en nappe...) peuvent contribuer à la sortie de l'eau vers le drain à l'aval, plus ou moins importants selon le milieu physique (climat, exposition, pente, sol, substrat, occupation du sol, obstacles, chemins d'écoulement préférentiel...) et selon l'événement et sa conjoncture (météorologie de l'événement et de l'antécédant, saisonnalité de l'occupation du sol et des pratiques agricoles...). Ces écoulements ont des échelles de temps caractéristiques très différentes. De plus, ils ne sont pas strictement parallèles, dans la mesure où les hétérogénéités du versant et les changements de vitesse engendrent des échanges au sein même du versant, comme l'infiltration locale du ruissellement provenant de l'amont ou l'exfiltration d'eau souterraine. En outre, ces écoulements ne sont pas uniformes, dans la mesure où des stockages temporaires et des remises en circulation peuvent intervenir, en raison du parcours d'un milieu très variable. Le versant fournit donc au thalweg drainant une chronique d'écoulement complexe et composite.

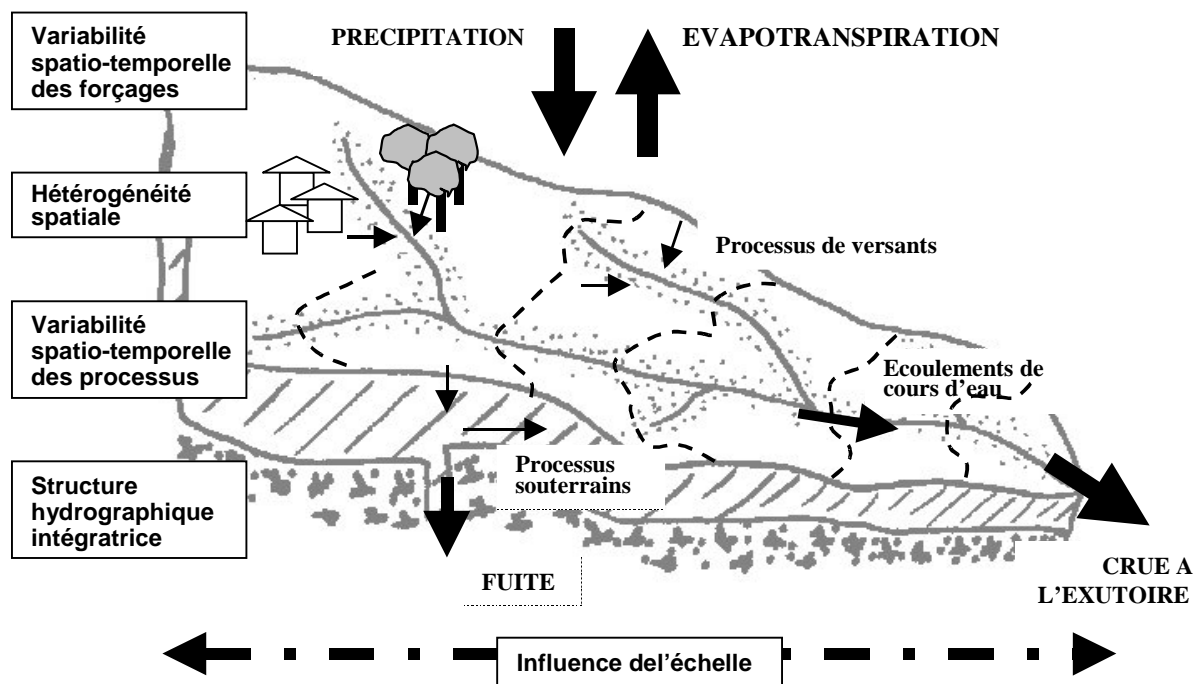


Figure 1 : Le rôle intégrateur du bassin versant à l'échelle de l'événement hydrométéorologique.
(Fond du schéma inspiré de Auzet, 1999)

Les différents écoulements voués à sortir du bassin versant par l'exutoire se retrouvent donc tôt ou tard dans le réseau hydrographique et forment ainsi l'écoulement au sens large. Notons que ce passage de l'eau du versant au réseau correspond à un hiatus fonctionnel, dans la mesure où la vitesse de l'écoulement s'accroît à cette occasion d'au moins un ordre de grandeur, même si une zone humide peut jouer le rôle de zone tampon. Les propriétés de l'écoulement fluvial dépendent des caractéristiques hydrauliques du réseau hydrographique : forme de la section du lit, rugosité, pente ; et

de sa forme en plan : type d'organisation, méandres, confluences, densité. Globalement, cet écoulement est rapide, même si des stockages peuvent avoir lieu, ainsi qu'une certaine dispersion.

Le fonctionnement interne du bassin versant peut donc être vu comme un ensemble de réservoirs temporaires, ayant chacun ses propres dimensions, seuils, vitesses de transferts, temps caractéristiques et consommations internes. L'agencement et l'emboîtement de ces réservoirs, et de leurs caractéristiques, est cause de complexité lors de la prise en compte des processus pertinents au niveau du bassin versant entier. Les causes de non-linéarité sont donc nombreuses, ce qui donne de l'importance à l'état initial du bassin versant lors de l'occurrence d'un nouvel événement en accentuant plus ou moins l'atténuation et le transfert globaux, et donc en aggravant ou minimisant la menace lors de la transformation de l'aléa météorologique en aléa hydrologique. D'autre part, la combinaison de ces causes multiples de non-linéarité avec l'hétérogénéité des caractéristiques du bassin versant accentue la variabilité des processus et le problème de transfert d'échelle.

Enfin la dynamique et la nature de chaque réservoir déterminent certaines interactions chimiques, biologiques et physiques entre l'eau et les milieux traversés. Ces interactions sont cruciales pour l'évolution des milieux eux-mêmes, ainsi que de la qualité de l'eau. Les éléments mobiles dont le vecteur est l'eau, c'est-à-dire en suspension ou dissous, voient donc leur dynamique également déterminée au niveau du bassin versant. Les flux de ces éléments sont dits associés aux flux d'eau. Il peut s'agir d'éléments chimiques, endogènes ou introduits par l'homme dans le milieu, et éventuellement considérés comme polluants ou pathogènes pour l'écosystème traversé ou bien pour l'utilisation de l'eau après prélèvement. Il peut également s'agir de matière comme des éléments issus des processus d'érosion, suivant des lois de transport et destinés à la sédimentation.

Ainsi les processus sont nombreux, interdépendants, emboîtés, dépendant de l'échelle et sensibles à l'historique et aux conditions initiales. De plus, ils présentent une forte variabilité spatio-temporelle, résultant de la variabilité des forçages et de l'hétérogénéité des caractéristiques du milieu physique. La conjugaison de ces éléments génère une forte complexité (voir Beven, 1995, 1996 ; Blöschl et Sivapalan, 1995). Mais le 'moteur gravité' impose une intégration générale qui se manifeste par un écoulement à l'exutoire. Même si cette dynamique globale est non-linéaire, on peut observer une tendance à la linéarité avec l'augmentation de la taille du bassin versant, qui peut s'expliquer par le rôle de plus en plus important du réseau hydrographique par rapport à celui du versant dans le transfert de l'eau. On relève ainsi les rôles majeurs i) de l'articulation géométrique et fonctionnelle des versants avec le réseau hydrographique et ii) de l'organisation géométrique et topologique du réseau hydrographique, squelette du bassin versant, dans la concentration progressive des flux hydrologiques jusqu'à l'exutoire.

Il apparaît donc que le bassin versant présente une structure interne forte, dominée par l'organisation spatiale de ses caractéristiques, la cascade d'échelles sollicitées, l'articulation des versants avec le réseau hydrographique, et l'organisation géométrique globale du réseau hydrographique (Beven et Kirkby, 1993 ; Cudennec, 2000). Cette structure détermine les flux d'eau et associés d'amont en aval, qui peuvent être perçus comme des aléas selon un point de vue fréquentiel, selon les lieux et selon les enjeux ; ou comme des ressources si ces flux sont mobilisables pour des usages, en des lieux, pour des périodes, et à des fréquences 'valables'. Cette génération d'aléas et de ressources en certains lieux géographiques et en certains niveaux de la structure correspond à un certain aspect de la notion d'émergence.

Intégration fréquentielle et historique

Un aspect majeur de la caractérisation d'un aléa est la connaissance de sa fréquence d'occurrence, c'est-à-dire de sa période de retour. Cette connaissance s'appuie généralement sur l'identification de la fonction densité de probabilité d'occurrence de ses valeurs de danger caractéristiques, à partir de

longues chroniques d'observation. Elle peut également s'appuyer sur des formules empiriques lorsque l'on cherche à caractériser un aléa précis en un lieu où aucune chronique n'est disponible.

Cependant, la caractérisation de la fréquence des aléas est un domaine délicat. En effet l'intérêt réside essentiellement dans l'étude des événements les plus intenses et les plus rares. Or les points de mesures sont rares sur le territoire et présentent rarement de longues archives. De plus, un événement ne présente pas nécessairement la même rareté en tout point du bassin versant. En matière de crue par exemple, un point aval peut subir un débit centennal alors qu'un affluent amont aura à peine atteint le débit décennal, pour des raisons de variabilité du champ pluviométrique ou de caractéristiques conjoncturelles des sous-bassins. Inversement un événement peut être exceptionnel pour un sous-bassin, mais voir son ampleur et sa rareté diminuer vers l'aval. La structure du bassin versant, préalablement identifiée pour l'intégration des processus se révèle donc être également intégratrice de la dimension fréquentielle des aléas, par agrégation, compensation ou dilution. Il en résulte que certains lieux particuliers dans la topologie de cette structure sont prédisposés pour subir des aléas menaçants : par exemple l'exutoire d'un sous-bassin imperméabilisé par l'urbanisation, l'exutoire d'un sous-bassin largement aménagé pour stocker l'eau, ou la confluence de deux bassins versants synchrones.

De plus, en raison des effets de non-linéarité au sein du bassin versant, et donc de la sensibilité de l'évolution d'un événement aux conditions initiales, un aléa météorologique de fréquence donnée n'est pas toujours transformé par le bassin versant en un aléa hydrologique de même fréquence. Il en est de même lorsque certaines conditions aux limites sont très contraignantes, comme par exemple l'état de la mer lors de la crue d'un bassin versant côtier. Nous retrouvons ici l'importance contingente de la conjoncture dans l'occurrence des phénomènes réellement dangereux. En outre, le bassin versant n'est pas nécessairement resté identique tout au long de la période d'observation qui a permis d'enregistrer la chronique. L'étude fréquentielle est alors biaisée par la modification du système. Cette modification peut être naturelle morphogénique ou bien anthropique ; et dans ces deux cas elle peut être brutale ou progressive. Dans le cas où l'on s'intéresse à l'évolution du relief lui-même, et donc au système morphogénique, le bassin versant peut en effet subir des modifications brutales (changement de tracé de cours d'eau à l'occasion d'une captation ou d'une coupure de méandre par exemple ; glissement de terrain...) ou progressives (modification lente du relief par érosion/sédimentation). Ces modifications du bassin versant semblent tendre vers une certaine auto-organisation : l'existence de la complexité dans la nature reflète la tendance des grands systèmes comportant un grand nombre de composants, comme un tas de sable alors utilisé comme paradigme, à évoluer vers un état intermédiaire critique attracteur, loin de l'équilibre, et pour lequel des perturbations mineures peuvent déclencher des événements de toutes tailles, appelés 'avalanches' ou 'événements catastrophiques' (Bak, 1999).

Ces modifications peuvent d'ailleurs être elles-mêmes considérées comme des aléas menaçants ou dommageables pour certains usages du territoire ou de l'eau : perte de fertilité par érosion progressive des versants en rhexistasie ; événement brutal de transport solide (éboulement, glissement de terrain, coulée de boue) ; déplacement du tracé du cours d'eau qui déplace la disponibilité en eau d'une part et la menace de crue d'autre part ; modification de la topographie. Ces aléas interviennent ou sont probables au sein même du bassin versant, en de nombreux points ou zones sensibles d'un point de vue géomorphologique. Lorsque ces localisations coïncident avec des usages du territoire ou de ses ressources, une vulnérabilité à l'aléa peut être identifiée comme une remise en cause totale ou partielle, temporaire ou définitive, de l'usage (Carbonnel et Margat, 1996).

La question peut alors se poser de gérer les systèmes anthropique et social pour diminuer les risques, ou du moins ne pas les aggraver, les accepter, voire les partager.

Nécessaire objectivation de l'impact des aménagements et pratiques anthropiques

Certains aménagements et pratiques anthropiques jouent sur l'agencement des réservoirs, tels que nous les avons préalablement identifiés, et donc sur la dynamique de l'événement ; ou bien sur la relaxation du bassin versant après un événement, conditionnant par conséquent l'état initial lors de l'événement suivant. Ainsi, par exemple, l'homme crée ou rompt la connectivité des versants avec les thalwegs pour tout ou partie des écoulements en créant des obstacles (talus, haies, terrasses, banquettes, zones enherbées...) ou des chemins préférentiels (fossés, dérayures, semelles de labour, dérivations...) ; l'homme ralentit ou accélère les écoulements successifs en changeant les caractéristiques des milieux et de leurs interfaces au sein des versants (occupation du sol, porosité des horizons pédologiques, drainage...) et des cours d'eau (recalibrage, débroussaillage, engraissement, ouvrages de perte de charge...) (Auzet, 1999 ; Leblois, 1999 ; Calder, 2002 ; Graaf, 2002).

Mais chaque modification locale peut engendrer un ensemble de conséquences vers l'aval, à travers la structure intégratrice du bassin versant. Le problème est alors de savoir si les conséquences sont dommageables en elles-mêmes ; à quelle(s) échelle(s) ; dans quelles situations ; et quel est le rapport entre ses conséquences dommageables et son bénéfice local. Cela est d'autant plus vrai que la société présente sur le territoire, ou qui en exploite les ressources à distance (le captage de l'eau pour une ville par exemple), revendique des enjeux variés et dispersés, éventuellement indépendants dans le temps, mais nécessairement hiérarchisés d'amont en aval.

Ainsi, selon une logique individuelle d'aversion au risque, chaque acteur-usager va chercher à aménager et/ou gérer localement de façon à minimiser ses risques et ses coûts associés. Il en va ainsi de l'agriculteur qui exploite une ressource locale pour l'irrigation, qui aménage sa parcelle et ses bordures pour faciliter l'infiltration de l'eau et diminuer l'érosion ou qui détruit des obstacles pour regrouper des parcelles et faciliter le travail mécanisé. L'objectif est alors de limiter les risques (en l'occurrence hydriques et édaphiques) ou les coûts. Dans la même logique locale, l'entrepreneur de travaux publics va dimensionner une buse pour la crue décennale et ainsi fixer lui-même le risque de dysfonctionnement acceptable de son ouvrage. Le maire d'une commune quant à lui peut souhaiter recalibrer le cours d'eau lors de la traversée de son agglomération pour minimiser localement la menace (en termes de hauteur d'eau, de vitesse et d'extension, et par rapport à la sécurité des biens et des personnes sous sa responsabilité) générée par le bassin amont.

Des conséquences sur l'aval sont alors inévitables. Elles sont absolument dommageables s'il s'agit du déplacement pur et simple d'un danger. Cela peut être le cas par exemple lors de la lâchure brutale d'un barrage dans l'attente d'une crue alarmante ou au contraire lors de la mobilisation absolue de la ressource en période de sécheresse. Les conséquences aval peuvent également être dommageables, mais de façon plus insidieuse, si l'on transforme le bassin versant intégrateur de processus en initiateur de danger. C'est le cas par exemple lorsque l'on modifie artificiellement le temps de réponse des sous-bassins d'un bassin total, de telle façon que leurs débits de pointe deviennent synchrones. C'est également le cas lorsque l'on développe les aménagements de mobilisation de la ressource, ce qui diminue les flux aval eux-mêmes générateurs potentiels de ressources en d'autres lieux.

Cependant, en raison des éléments de complexité hydrologique que nous avons identifiés (non-linéarité, hétérogénéité et variabilité spatio-temporelle, effet d'échelle, simultanéité et succession de processus aux échelles de temps différentes), il est parfois délicat de dire si tel ou tel aménagement ou pratique anthropique est aggravateur ou réducteur d'un risque de manière absolue. Ainsi par exemple le drainage agricole est plutôt atténuateur des crues, dans la mesure où il restaure la capacité d'infiltration du sol entre deux événements. Par contre l'assainissement agricole associé peut être aggravateur puisque sa vocation est d'évacuer l'eau rapidement vers l'aval.

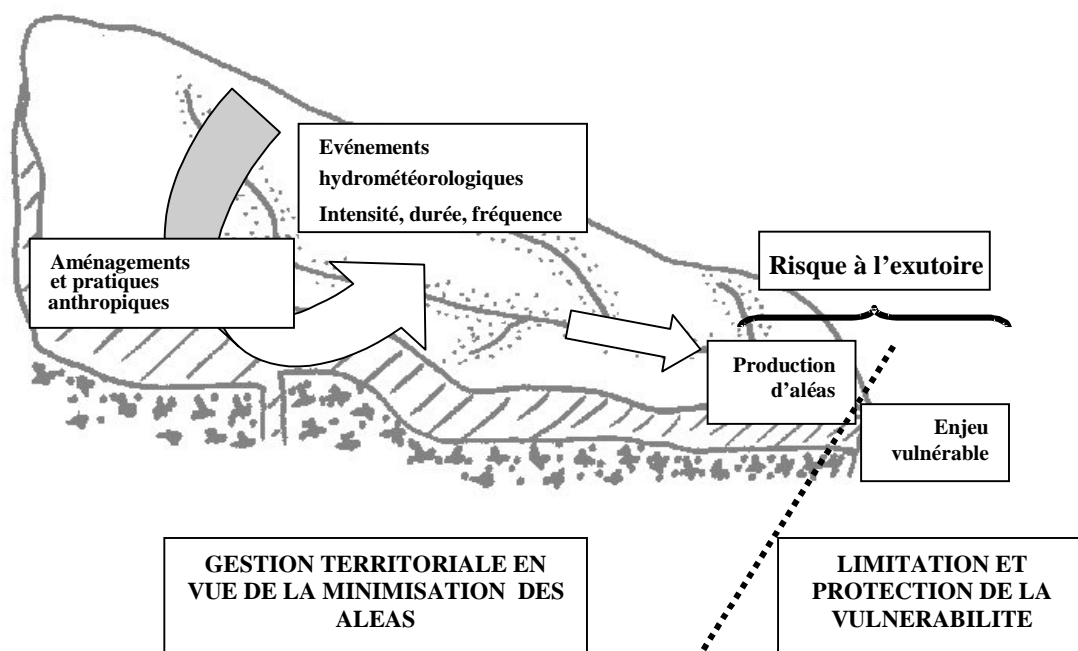


Figure 2 : La gestion du bassin versant dans le contexte de la prévention des risques hydrologiques.

Devant l'état actuel de l'art et des connaissances, il est aujourd'hui possible d'identifier des pratiques, des facteurs et des situations à risques et de préconiser des aménagements (solutions structurelles) et des pratiques (solutions non-structurelles), dites 'bonnes pratiques' (Nédelec, 1999). Même si cela n'est pas toujours étayé de manière quantitative, cela peut permettre d'aider à l'objectivation et à la prise de conscience par les différents acteurs des effets et interdépendances. Plus précisément, une gestion intégrée des aménagements et pratiques du territoire du bassin versant peut être envisagée, afin de tendre au contrôle, événementiel ou statistique, de l'atténuation et du transfert des aléas.

L'idée du ralentissement dynamique s'inscrit dans cette logique (Oberlin, 2000) : il s'agit de favoriser le ralentissement et le laminage des crues en stockant les eaux le plus à l'amont possible, au sein des versants et des lits majeurs des cours d'eau. On cherche alors à favoriser certains des écoulements et certains des stockages d'eau parmi ceux que nous avons identifiés plus tôt. Une telle démarche s'appuie alors sur deux volets : i) l'implantation d'aménagements et d'ouvrages structurels sur les versants, en lit majeur et en lit mineur, et ii) l'acceptation d'un certain risque d'inondation en certaines parcelles, généralement agricoles, où l'épandage est favorisé. En outre, il est possible d'aménager de façon différentielle des sous-bassins pour les désynchroniser et minimiser ainsi les aléas extrêmes.

Une démarche analogue à celle du ralentissement dynamique est en émergence en contextes de pollution diffuse et d'érosion, en particulier dans l'ouest de la France, pour favoriser les obstacles à l'écoulement rapide et de surface (talus, bandes enherbées, zones humides...), et ainsi limiter les flux.

Mais un enjeu est d'aller au delà des préconisations basées sur des connaissances qualitatives et sur le bon sens, en quantifiant les influences agrégées et éventuellement en identifiant les zones du bassin versant à gérer en priorité, car plus influentes. La modélisation, basée sur la structure hydrographique du bassin versant et l'intégration des variabilités et effets d'échelle (Cudennec, 2000 ; Cudennec et al, 2005b), ouvre aujourd'hui des perspectives dans ce domaine. Ainsi, par exemple, il est possible de proposer des éléments de quantification de l'impact de la multiplication de petits barrages à vocation agricole sur les crues d'un bassin versant, pour des événements de projet, selon différents scénarios de répartition géographique et de densité (Cudennec et al, 2004). Il est également envisageable d'intégrer le fonctionnement différentiel de versants naturels et de versants aménagés, par exemple par des rizières, et donc d'étudier le potentiel d'écêtement de crue que constitue une coordination des pratiques hydro-agricoles à l'échelle de l'événement (Sumarjo Gatot, 1999).

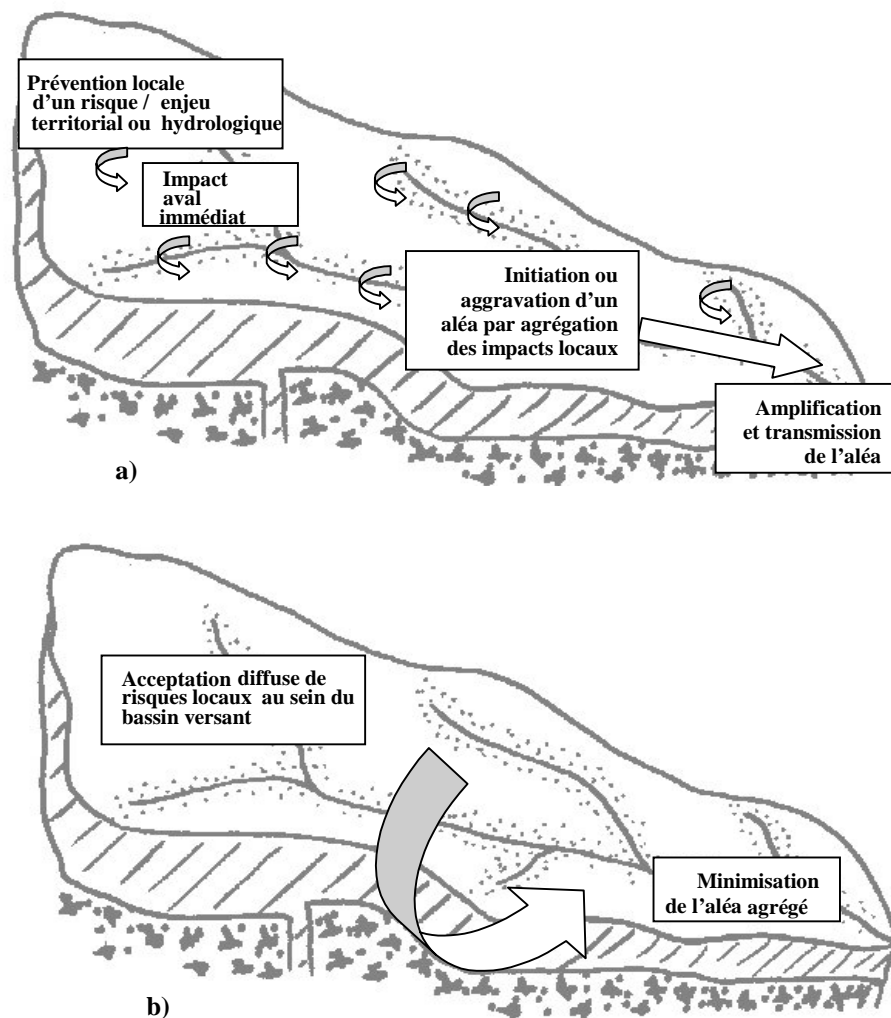


Figure 3 : Gestion territorialisée des risques. a) Transfert. b) Mutualisation.

Plus largement, les aléas aval résultent de l'intégration de processus amont, éventuellement amplifiés par de multiples préventions de risques locaux et réductions de coûts d'usages, réparties au sein du territoire, autour de la structure géométrique et fonctionnelle du bassin versant. Par analogie avec la gestion des risques en assurances, cela revient à un transfert des coûts et risques vers l'aval, généralement inconscient. Les principes qualitatifs et quantitatifs de gestion intégrée du bassin versant, que nous venons de présenter, correspondent quant à eux, et en gardant la sémantique de l'assurance, à l'idée d'une mutualisation des risques et des coûts à travers l'ensemble de la structure (Figure 3). Mais en plus d'aborder la complexité hydrologique naturelle, cette idée de mutualisation est confrontée à la complexité socio-économique. Elle doit donc être appuyée par des instruments cohérents et explicites, relevant de ce domaine.

Eléments socio-économiques

Derrière chaque enjeu et chaque besoin de prévention, se trouve un acteur, une collectivité ou une institution. L'acceptation et la mutualisation des risques est donc délicate. Lorsqu'elle se met en place, elle est consciente ou non pour chaque acteur. Parfois héritée de l'historique, elle est de plus en plus nécessaire devant l'émergence de nouveaux enjeux (aggravation des aléas, augmentation de la

vulnérabilité, augmentation des besoins...). Lorsque l'eau n'est pas utilisée comme une arme dans un conflit d'états, et lorsque le territoire du bassin versant n'échappe pas à la juridiction des enjeux aval, une politique de gestion intégrée peut se mettre en place. Il faut alors noter que des politiques sectorielles sont insuffisantes, dans la mesure où la résolution d'un problème peut avoir l'effet pervers d'en accentuer d'autres. D'autre part, la gestion doit être intégrée dans le long terme avec un objectif de durabilité. En particulier, il faut veiller à éviter les effets pervers d'accroissement des besoins et des vulnérabilités favorisés par l'augmentation du sentiment de sécurité. De même, il faut éviter que les aménagements préventifs pour des événements de période de retour faible, ne dysfonctionnent gravement et de manière généralisée lors d'un événement exceptionnel, au point d'en amplifier la gravité, comme cela s'est passé par exemple en Tunisie en 1969. Une dimension réellement holistique doit donc être recherchée à travers une gestion du territoire et de l'eau-menace, de l'eau-milieu et de l'eau-ressource associées. La gestion structurelle et conjoncturelle du bassin versant en tant qu'outil de prévention des risques en est alors à première vue un sous-ensemble, mais peut recouvrir l'ensemble si tous les objectifs ont été traduits en termes d'enjeux et de risques. Il s'agit alors bien de rechercher la mutualisation pour éviter les transferts vers l'aval, vers le futur ou vers un enjeu différent.

La première étape vers cet objectif nous semble être la prise de conscience de l'entité territoriale bassin versant. A l'échelle des états, cela correspond à la gestion par bassins hydrographiques. A l'échelle intermédiaire plus locale, l'enjeu est de fédérer les collectivités locales et les institutions d'un même bassin versant. Enfin, à l'échelle de l'acteur individuel cette prise de conscience 'hydrographique' est nécessaire. Mais basée sur la sensibilisation et l'approche participative, elle doit être accompagnée de mesures incitatives ou régulatrices. Plusieurs instruments sont alors disponibles pour influencer les comportements individuels comme la réglementation (et sa police), la régulation économique (subventionnement, taxation, commerce des droits d'usage), et l'intégration économique (labellisation, certification, valorisation et rémunération des aménités) (Mermet, 1992 ; Gilbert et Bourdeaux, 1997 ; Monachesi et Albaladejo, 1997 ; Beuret, 1999 ; Calder, 2002 ; Kiersch, 2002).

Cette cascade de niveaux de conscience, d'action et d'influences, et de leviers éventuels renvoie à nouveau à la notion d'émergence. En l'occurrence socio-économique, cette émergence devrait être mise en relation explicite et en adéquation avec les émergences hydrologiques (événementielles, fréquentielles et d'impacts) discutées ci-dessus. Cela est particulièrement vrai à l'heure actuelle des dynamiques de décentralisation et de déconcentration en œuvre dans de nombreux pays du Monde. Cela renvoie à une grande diversité de situations, correspondant à des croisements de variabilités naturelles, sociales et politiques. Et cela devrait pouvoir être appuyé sur certains héritages technico-socio-économiques qui correspondent parfois à un bon ajustement empirique – capitalisé génération après génération –, des relations ressource-usage, de la robustesse par rapport aux aléas, des relations amont-aval... En la matière, la Tunisie, terre d'histoire et de traditions et carrefour de civilisations adaptées aux climats sud-méditerranéens, est d'une grande richesse (e.g. Romagny et Cudennec, 2005). Mais au delà de ces éléments d'articulation en cascade des niveaux de gestion, correspondant aux notions de gouvernance et de subsidiarité (GWP, 2002, 2003), et afin d'étayer et d'argumenter l'idée de mutualisation, il faut développer des quantifications ad hoc. Cela demande i) d'identifier et d'articuler précisément les variables et les indicateurs physiques, techniques, sociaux et économiques ; ii) d'explorer les phénomènes d'émergence et de transfert d'échelle des variables pertinentes ; iii) d'apprécier la sensibilité des variables d'objectif (satisfaction des besoins, danger, bénéfice...) aux variables de gestion et de développer en conséquence des modes d'optimisation multi-sectorielle, multi-échelles et multi-fréquences. Il s'agit d'un défi majeur d'inter-disciplinarité, basé en grande partie sur l'interfaçage de concepts et de modèles, à mettre explicitement dans une perspective historique (capitalisation de l'héritage, objectivation des expériences technico-économico-politiques et des impacts, prise en compte des non-stationnarités passées, projections dans l'avenir) (Cudennec et al, 2005 ; Pouget et al, 2005).

Conclusion

Du point de vue hydrologique, le bassin versant est donc un territoire géographique orienté et hiérarchisé autour des axes d'écoulements préférentiels. Il présente ainsi une structure fonctionnelle contrainte d'une part par le réseau hydrographique inscrit dans le relief, et d'autre part par les aménagements et pratiques anthropiques, qui peuvent avoir un effet de rétention et de ralentissement ou au contraire d'évacuation ; de contamination ou d'épuration. De plus, la notion de bassin versant est adimensionnelle : la taille du territoire auquel il correspond est imposée par le choix de l'exutoire. Les processus dominants et l'influence des aménagements et pratiques anthropiques au niveau global sont donc variables selon les échelles caractéristiques relatives. La taille et l'organisation morpho-fonctionnelle du territoire du bassin versant déterminent par conséquent l'évolution événementielle des grandeurs hydrologiques, dont certaines peuvent prendre des valeurs 'à risque', et influencent donc également leur probabilité d'occurrence.

En outre, des enjeux territoriaux et hydrologiques s'agencent autour de cette structure hydrographique et sont liés par de fortes interdépendances. A ces enjeux sont associés des risques dont certains aménagements et pratiques locaux permettent de se prévenir. Cependant cette prévention multiple et diffuse peut avoir pour conséquence l'initiation et l'aggravation d'aléas dangereux à l'aval. Il apparaît par conséquent que la mutualisation des risques hydrologiques et territoriaux, au sein d'une gestion intégrée du bassin versant, est un moyen de prévention globale des risques par minimisation des aléas, à associer à la prévention des vulnérabilités aval plus locale et spontanée.

L'idée d'une gestion intégrée du bassin versant et de son hydrologie est en plein développement, en particulier sous le terme de «Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) / Integrated Water Resources Management (IWRM) » promu par le « Global Water Partnership (GWP) ». En outre, l'identification des différents compartiments hydrologiques, valorisables différemment par les usages, est mise au cœur des réflexions autour de l'eau agricole, en particulier avec les notions d'eau verte et d'eau bleue promue par le GWP et l'IWMI. Nous proposons ici d'envisager ces enjeux sous l'angle de la gestion des risques, en particulier d'une mutualisation de ces risques. Cela pose concrètement la question de la quantification inter-disciplinaire des aléas, vulnérabilités, coûts et bénéfices, dans la perspective triple i) de la structuration amont-aval, des phénomènes d'émergence et de la nécessaire gouvernance en cascade ; ii) de la gamme de fréquence des risques eux-mêmes ; et iii) de l'histoire passée et à venir. Ces différents aspects posent le défi de la véritable inter-disciplinarité. Ils renforcent en outre l'analogie avec la notion de mutualisation dans le domaine des assurances, analogie qui pourrait *a priori* être explorée avec profit.

Bibliographie

- Auzet A.V., 1999. *Les cheminements de l'eau naturels et/ou influencés*. In Leblois E. (Coord.), L'influence humaine dans l'origine des crues, Cemagref Ed., 19-46.
- Bak P., 1999. *Quand la nature s'organise. Avalanches, tremblements de terre et autres cataclysmes*. Flammarion, Paris, 283 p.
- Beuret J.E., 1999. *Petits arrangements entre acteurs... Les voies d'une gestion concertée de l'espace rural*. Nature Sciences Sociétés, 7, 1, 21-30.
- Beven K., 1995. *Linking parameters across scales: subgrid parameterizations and scale dependent hydrological models*. Hydrological Processes, 9, 507-525.
- Beven K., 1996. *The limits of splitting: Hydrology*. The Science of the Total Environment, 183, 89-97.
- Beven K., Kirkby M.J., 1993. *Channel network hydrology*. Wiley Ed., Chichester, 319 p.
- Blöschl G., Sivapalan M., 1995. *Scale issues in hydrological modelling : a review*. Hydrological Processes, 9, 251-290.

- Calder I., 2002. *Land use impacts on water resources*. In 'Land-water linkages in rural watersheds', Kiersh B. (Ed.), FAO land and water bulletin n°9, FAO, Rome.
- Carbonnel J.P., Margat J., 1996. *Risque hydrologique ou lié à l'eau*. In Dictionnaire français d'hydrologie, Carbonnel J.-P. (Ed.), <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/indexdic.htm>, Comité National Français des Sciences Hydrologiques.
- Cudennec C., 2000. *Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique*. Thèse de doctorat de l'ENSAR, 198 p. + annexes.
- Cudennec C., Calvez R., Pouget J.C., Kingumbi A., Le Goulven P., 2005a. *Constitution et structuration territoriales des ressources, des impacts et des risques hydrologiques au sein du bassin du Merguellil – Perspectives de modélisation hydrologique pour la transposition d'approches de gestion*. In 'Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant', Le Goulven P., Bouarfa S., Kuper M. (Ed.), CEMAGREF-CIRAD-IRD, Montpellier (CD Rom, ISBN: 2-87614-591-X), 11p.
- Cudennec C., Sarraza M., Nasri S., 2004. *Modélisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface*. Revue des Sciences de l'Eau, 17, 2, 181-194.
- Cudennec C., Slimani M., Le Goulven P., 2005b. *Accounting for sparsely observed rainfall space-time variability in a rainfall-runoff model of a semiarid Tunisian basin*. Hydrological Sciences Journal, 50, 4, 617-630.
- Gilbert C., Bourdeaux I., 1997. *Au-delà de l'alternative maîtrise-non-maîtrise des risques collectifs : propositions pour des analyses et politiques intermédiaires*. Nature Sciences Sociétés, 5, 3, 50-57.
- Graaff (de) J., 2002. *Downstream effects of land degradation and soil and water conservation*. In 'Land-water linkages in rural watersheds', Kiersh B. (Ed.), FAO land and water bulletin n°9, FAO, Rome.
- GWP, 2002. *Effective water governance*. GWP Background paper 7, Stockholm.
- GWP, 2003. *Effective water governance – Learning from the dialogues*. Stockholm, 32p.
- Kiersch B., 2002. *Instruments and mechanisms for upstream-downstream linkages : a literature review*. In 'Land-water linkages in rural watersheds', Kiersh B. (Ed.), FAO land and water bulletin n°9, FAO, Rome.
- Leblois E. (Coord.), 1999, *L'influence humaine dans l'origine des crues*, Cemagref Ed., Paris, 195 p.
- Mermet L., 1992. *Stratégies pour la gestion de l'environnement. La nature comme jeu de société*. L'Harmattan, Paris, 205 p.
- Monachesi A., Albaladejo C., 1997. *La gestion concertée de l'eau dans un bassin versant pampéen. Apprendre l'hydraulique et la démocratie*. Nature Sciences Sociétés, 5, 3, 24-38.
- Nédélec Y., 1999, *Activités rurales et inondations, connaissances et bonnes pratiques*, Cemagref Ed., Paris, 149p
- Oberlin G., 2000. *Guide méthodologique des aménagements réducteurs des crues en petits bassins versants*. Cemagref Ed., Paris, 26 p.
- Pouget J.C., Cudennec C., Leduc C., Le Goulven P., Le Grusse P., Poussin J.C., 2005. *Co-construction d'un outil de gestion intégrée sur le bassin du Merguellil, Tunisie – Articulation et cohérence de modèles*. In 'Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant', Le Goulven P., Bouarfa S., Kuper M. (Ed.), CEMAGREF-CIRAD-IRD, Montpellier (CD Rom, ISBN: 2-87614-591-X), 8p.
- Romagny B., Cudennec C., 2005. *Gestion de l'eau en milieu aride : considérations physiques et sociales pour l'identification des territoires pertinents dans le Sud-Est tunisien*. Développement Durable et Territoires, dossier n°6 : Les territoires de l'eau, <http://www.revue-ddt.org>, sous presse.
- Sumarjo Gatot I., 1999. *Modélisation de la transformation pluie-débit et de l'influence de l'aménagement de terrasses sur les crues de mousson. Cas du bassin versant du Kali Garang à Java central, Indonésie*. Thèse de doctorat de l'ENSAR, 197 p. + annexes.