



Sud-Ouest Européen

Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest

Regards croisés sur les fleuves Èbre et Garonne

PRESSES UNIVERSITAIRES DU MIDI

SOMMAIRE

PH. VALETTE, A. OLLERO , Regards croisés sur les fleuves Èbre et Garonne (Avant-propos) <i>Crossed viewpoints on Garonne and Ebro rivers</i>	5
A. PUEYO, E. CLIMENT, A. OLLERO, F. PELLICER, J. L. PEÑA-MONNÉ, M. SEBASTIÁN , L'interaction entre Saragosse et ses cours d'eau : évolution, conflits et perspectives <i>The interaction between Zaragoza and its rivers: evolution, conflicts and perspectives</i>	7
J.-M. ANTOINE, PH. VALETTE , La place des inondations dans la fabrique des paysages fluviaux urbains. Le cas de la Garonne à Toulouse (du xvii ^e siècle à aujourd'hui) <i>The role of floods in urban's fluvial landscape generation. The case of Garonne river in Toulouse (since the 18th century)</i>	25
A. OLLERO, A. IBISATE, V. ACÍN, D. BALLARÍN, D. GRANADO, J. HORACIO, D. MORA, E. NADAL, M. SÁNCHEZ FABRE, M. SEBASTIÁN, F. SEGURA, A. VALLS , Dynamique fluviale, changement global et pression anthropique dans le bassin, le cours et le delta de l'Èbre <i>River dynamics, global change and human pressure in Ebro basin, channel and delta</i>	41
M. A. GARCÍA VERA, R. GALVÁN PLAZA, J. A. LOSADA GARCÍA , La gestion de l'eau dans le bassin de l'Èbre : évolution, planification et défis <i>Water management in Ebro basin: evolution, planning and challenges</i>	55
B. LABBOUZ, D. SALLES, PH. VALETTE , Les territoires garonnais face aux changements globaux : quatre adaptations possibles en 2050 ? <i>Global change: four possible paths of adaptation for the Garonne region by lausible adaptations in 2050</i>	71
H. JANTZI, J.-M. CAROZZA, J.-L. PROBST, PH. VALETTE , Les extractions de granulats dans le lit mineur de la Moyenne Garonne toulousaine durant la seconde moitié du xx ^e siècle <i>Sediment mining in the minor riverbed of the middle Garonne river during the second half of the 20th century</i>	83
M. SÁNCHEZ FABRE, A. OLLERO, M. L. MORENO, J. A. LOSADA GARCÍA, R. SÁNCHEZ PUERTAS, R. SERRANO NOTIVOLI , Évolution hydrologique et inondations récentes dans l'Èbre moyen <i>Hydrological evolution and recent floods in the middle Ebro</i>	97
A. STURMA, J.-M. ANTOINE, S. BECERRA, A. PELTIER , La crue de juin 2013 dans les Pyrénées garonnaises : de la crise hydrologique au territoire en crise <i>The flood of June 2013 in the Garonne Pyrenees: from the hydrological crisis to the territory in crisis?</i>	117
A. OLLERO, D. BALLARÍN, P. BONÉ, S. CASAMAYOR, P. ESPINOSA, J. HORACIO, A. IBISATE, A. P. JR MAGALHÃES, F. SEGURA , Une synthèse sur la restauration fluviale dans le bassin de l'Èbre <i>River restoration in Ebro basin, a synthesis</i>	137

M. DAVID, PH. VALETTE, J.-M. CAROZZA, M. COTTET , La restauration des services écosystémiques le long de la Garonne toulousaine : premier état des lieux	151
<i>Restoration of ecosystem services in the middle Garonne river: first review</i>	
Au fil des fleuves et des rivières, quelques notes bibliographiques	167
Notes bibliographiques	171

REGARDS CROISÉS SUR LES FLEUVES ÈBRE ET GARONNE

AVANT-PROPOS

Ce numéro de *Sud-Ouest Européen* déborde les frontières entre les états et s'intéresse à des « regards croisés sur les fleuves Èbre et Garonne ». Il est le fruit d'une collaboration entre le département de géographie de l'université de Saragosse (par l'intermédiaire d'Alfredo Ollero) et le département de géographie de l'université Toulouse – Jean Jaurès (par l'intermédiaire de Philippe Valette).

L'Èbre et la Garonne sont séparés par la chaîne des Pyrénées et l'un, l'Èbre, débouche par un delta dans la mer Méditerranée et l'autre, la Garonne, termine sa course par un estuaire dans l'océan Atlantique. Cette rapide description nous montre, qu'au départ, tout oppose ces deux fleuves puisqu'ils coulent dans le sens inverse l'un de l'autre. Ils se partagent le même château d'eau constitué par la montagne pyrénéenne qui joue le rôle d'une véritable frontière climatique. Le versant nord pyrénéen est beaucoup plus arrosé en eau de pluie que le versant sud aux caractéristiques plus sèches. Et pourtant, le module de l'Èbre à Saragosse (233 m³/s) est légèrement supérieur à celui de la Garonne à Toulouse (190 m³/s).

Au-delà de ces différences, des ressemblances et des similitudes apparaissent entre l'Èbre et la Garonne. Ce numéro de *Sud-Ouest Européen* cherche à faire un tour d'horizon des recherches en cours, dans le cadre de la discipline de la géographie, sur les deux fleuves. À bien des égards, les trajectoires temporelles de ces deux fleuves sont voisines. L'eau fluviale est utilisée de façon massive dans l'agriculture dans les deux vallées et permet d'alimenter en eau de boisson ses habitants riverains. Partout, de multiples aménagements visent à valoriser la ressource fluviale mais aussi à limiter la contrainte constituée par les crues et les inondations.

Dans ce numéro de *Sud-Ouest Européen*, il s'agit de croiser les regards autour de thématiques communes qui, au final, permettent de mieux connaître les savoirs français et espagnols sur les spécificités de l'Èbre et de la Garonne.

La première thématique développée dans ce numéro concerne le rapport ville-fleuve à travers le temps. Saragosse (661 100 habitants en 2016) et Toulouse (466 297 habitants en 2014 ; agglomération : 935 440 habitants en 2014), souvent qualifiées de « villes sœurs », possèdent des paysages fluviaux spécifiques qui sont définis et caractérisés à travers deux articles. Les deux villes se sont installées à proximité de leurs fleuves respectifs (sur la rive droite) et l'urbanisation massive de la fin du xx^e siècle a soumis de nombreux territoires au risque d'inondation (sur la rive gauche). Pueyo *et al.* s'intéressent au cas de Saragosse à travers son évolution et son étalement urbain au cours de l'histoire depuis la fondation de la ville. Après avoir délaissé pendant longtemps les berges des cours d'eau, les habitants de Saragosse ont redécouvert leurs berges à la fin des années 2000. L'exposition universelle de 2008, dont le thème était autour de l'eau, a permis de valoriser les paysages fluviaux urbains. À Toulouse, Antoine et Valette montrent que la physionomie des paysages fluviaux urbains toulousains est directement héritée de la longue lutte des toulousains contre les inondations. Dans cette ville, la valorisation des berges est intervenue un peu plus tôt qu'à Saragosse, dès les années 1990. Cette dernière connaît un regain d'intérêts depuis 2010 à travers le projet du parc Garonne.

La deuxième thématique développée dans ce numéro fait le point sur des recherches traitant de l'évolution des

fleuves au cours du temps, mais aussi des usages et du changement climatique. Ollero *et al.*, dans leur article, traitent de l'ensemble du bassin de l'Èbre à travers des questions de dynamiques fluviales et de pression anthropique. Le cours de l'Èbre est impacté par de nombreux barrages réservoirs et les activités humaines ont simplifié la morphologie du fleuve au cours du temps. Les processus de stabilisation et de simplification fluviale sont généralisés partout dans le bassin. Les conséquences de ces changements se traduisent par une modification forte du delta. Losada *et al.*, membres de la confédération hydrographique de l'Èbre, évoquent les questions de la gestion de l'eau dans la vallée. Après une présentation générale du bassin de l'Èbre, les auteurs axent leur propos sur l'évolution des politiques de gestion de l'eau dans la vallée pour terminer par la description du plan hydrologique de 2015-2021. La question de la ressource en eau et son utilisation se pose de manière cruciale dans un bassin-versant comme celui de l'Èbre.

Côté français, Labbouz *et al.* s'interrogent sur l'avenir de l'espace fluvio-estuarien de la Garonne et de la Gironde. À partir d'un diagnostic mêlant différentes disciplines (écologie, géographie, géohistoire, sociologie), les auteurs proposent quatre scénarios prospectifs sur les futurs possibles de la Garonne et de la Gironde. Ces réflexions permettent de s'interroger sur le devenir du cours d'eau dans un contexte de changement climatique. Dans cette optique, le regard croisé entre l'Èbre et la Garonne, que nous proposons dans ce numéro de *Sud-Ouest Européen*, ne permet-il pas de rendre visible le futur de la Garonne et de la Gironde ? Les pressions actuelles fortes sur le fleuve espagnol ne sont-elles pas le futur de la Garonne ? Dans un autre article, Jantzi *et al.*, quant à eux, montrent l'impact lié aux extractions de granulats dans la Garonne entre la confluence de l'Ariège et du Tarn. Dans cette partie du fleuve, de nombreux affleurements de molasses émaillent les paysages fluviaux. Ces derniers sont apparus à cause de l'extraction massive de granulats en lit mineur dans la seconde moitié du xx^e siècle. La conséquence de cette pratique s'est traduite par une incision généralisée du lit mineur et donc une simplification des formes fluviales.

La troisième thématique développée dans ce numéro s'intéresse aux risques et notamment aux inondations récentes. Sanchez *et al.* traitent de l'évolution

hydrologique et des inondations récentes dans la partie médiane de l'Èbre. Même si ces dernières années, les apports annuels en eau de l'Èbre ont tendance à diminuer, il n'en reste pas moins que ce fleuve connaît des épisodes de crues et inondations fortes. Depuis les années 2000, la moyenne vallée a été touchée par des inondations en 2003, 2007, 2013 et 2015, ce qui pose la question de la cartographie du risque et des conflits inhérents au passage des inondations. Pour la Garonne, Sturma *et al.* reviennent sur la crue de juin 2013 qui s'est déroulée dans la partie amont pyrénéenne de la Garonne. Plusieurs aspects sont développés par les auteurs à partir de cet événement : facteurs hydrologiques et météorologiques, facteurs anthropiques, exposition au risque, difficultés techniques de surveillance et d'alerte.

Enfin la dernière thématique s'intéresse à la question de la restauration des cours d'eau à travers deux articles. Ollero *et al.*, après un survol de la question en Espagne, font un inventaire de la restauration fluviale dans le bassin de l'Èbre. Pour la Garonne, David *et al.* dressent un premier état des lieux sur la restauration des services écosystémiques, où 86 actions ont été inventoriées. À la lecture de ces deux articles, l'Èbre et la Garonne n'apparaissent pas réellement comme des chefs de file dans la question de la restauration fluviale, alors que de nombreux sites pourraient faire l'objet de « renaturation ». Face à ces deux fleuves lourdement impactés par les activités humaines, cette réalité reste un sujet d'étonnement.

Au final, ces regards croisés entre l'Èbre et la Garonne permettent de confronter les histoires, les réalités et les trajectoires temporelles des deux fleuves. En filigrane apparaissent aussi les acteurs, les usages, les aménagements, la gestion et les solutions apportées par les sociétés riveraines. Si l'Èbre et la Garonne ne coulent pas dans le même sens, tous ces articles réunis ici, laissent présager un prolongement à toutes ces réflexions, c'est-à-dire la possibilité d'un rapprochement et d'une comparaison plus poussée entre deux des grands fleuves du Sud-Ouest européen.

Philippe Valette et Alfredo Ollero

DYNAMIQUE FLUVIALE, CHANGEMENT GLOBAL ET PRESSION ANTHROPIQUE DANS LE BASSIN, LE COURS ET LE DELTA DE L'ÈBRE

Alfredo OLLERO ¹, Askoa IBISATE ², Vanesa ACÍN ³, Daniel BALLARÍN ^{1,4}, David GRANADO ³,
Jesús HORACIO ⁵, Daniel MORA ⁴, Estela NADAL ¹, Miguel SÁNCHEZ FABRE ¹,
María SEBASTIÁN ¹, Francesca SEGURA-BELTRAN ⁶, Ana VALLS ⁶

RÉSUMÉ – Le fonctionnement des rivières du bassin de l'Èbre a subi d'importants changements depuis 1950. Il s'agit d'un processus rapide et très marqué, de simplification et de stabilisation sur le fleuve principal et sur ses principaux affluents pyrénéens. Ce processus s'est manifesté par des changements dans la morphologie fluviale, le développement de la végétation sur les lits, un rétrécissement de l'espace naturel fluvial et une incision des lits fluviaux. Les facteurs de ce processus sont le changement global dans le bassin, la construction de réservoirs d'eau et d'autres nombreuses pressions humaines directes, notamment d'extractions de graviers et de canalisations. Le delta de l'Èbre, actuellement dans une situation de recul, réagit lui aussi à ces facteurs et à ce processus.

ABSTRACT – RIVER DYNAMICS, GLOBAL CHANGE AND HUMAN PRESSURE IN EBRO BASIN, CHANNEL AND DELTA. The river Ebro and its tributaries has undergone very remarkable changes since 1950. They have suffered marked process of simplification and stabilization, both in the main river and in its main Pyrenean and Iberian tributaries. They show important changes in the channel morphology, vegetation encroachment, narrowing of the fluvial natural space and incision. The causes of these adjustments are the global change that has affected the basin, accompanied by the construction of reservoirs and other numerous direct human pressures, especially gravel extractions and channelization. The Ebro Delta, currently regressive, also responds to the same factors and processes.

RESUMEN – DINÁMICA FLUVIAL, CAMBIO GLOBAL Y PRESIÓN ANTRÓPICA EN LA CUENCA, CAUCE Y DELTA DEL EBRO. El funcionamiento de los ríos de la cuenca del Ebro ha asistido a cambios muy notables desde 1950. Se trata de un proceso rápido y muy marcado de simplificación y estabilización, tanto en el río principal como en sus principales afluentes pirenaicos y en algunos ibéricos, manifestado en cambios en la morfología del cauce, incremento de la vegetación en el mismo, estrechamiento del espacio natural fluvial e incisión. Los factores de estos cambios se encuentran en el cambio global al que ha asistido la cuenca, acompañado por la construcción de embalses y otras numerosas presiones humanas directas, en especial extracciones de gravas y encauzamientos. El Delta del Ebro, en situación actual regresiva, también responde a los mismos factores y procesos.

GEOMORPHOLOGIE FLUVIALE – CHANGEMENT ENVIRONNEMENTAL – STYLES FLUVIAUX – IMPACT ENVIRONNEMENTAL

FLUVIAL GEOMORPHOLOGY – ENVIRONMENTAL CHANGE – CHANNEL PATTERNS – ENVIRONMENTAL IMPACT

GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL – CAMBIO AMBIENTAL – ESTILOS FLUVIALES – IMPACTO AMBIENTAL

¹ Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, aollero@unizar.es, danielbf@unizar.es, estelanr@unizar.es, msanchez@unizar.es, msebas@unizar.es

² Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, askoa.ibisate@ehu.eus

³ Ecología y Territorio ECOTER S.C., vanesa.ecoter@gmail.com, davidgranadog@gmail.com

⁴ Medio Ambiente, Territorio y Geografía MASTERGEO S.L., danielbf@unizar.es, dmoramur@gmail.com

⁵ Departamento de Geografía, Universidad de Santiago de Compostela, hhorahh@gmail.com

⁶ Departamento de Geografía, Universidad de Valencia, francisca.segura@uv.es, avalls5@alumni.uv.es

Une des lignes de travail fondamentale de la géomorphologie fluviale identifie, quantifie et analyse la dynamique, les changements et les ajustements des lits fluviaux et des plaines alluviales, tout en essayant d'interpréter et d'évaluer leurs origines (Zawiejska et Wyzga, 2010 ; Buffington, 2012 ; Scorpio et Roskopf, 2016). Identifier dans quelle mesure les changements analysés dans un tronçon fluvial particulier répondent à la dynamique naturelle (Ibáñez *et al.*, 2011), à des impacts locaux, au changement global ou à la synergie entre tous ces facteurs constitue un labeur complexe (Ollero *et al.*, 2015). Ce défi, de grand intérêt scientifique et utile à la gestion et à la restauration, requiert l'étude d'innombrables variables durant un temps prolongé (Ollero, 2011 ; Horacio, 2015).

Les changements morphologiques dans l'Anthropocène récente ont beaucoup été étudiés dans la littérature, et l'on a prêté une attention toute particulière à la perte de modèles en tresses dans les aires de montagne (Piégay *et al.*, 2009). Comme dans tous les pays développés, dans le district hydrographique de l'Èbre les lits fluviaux se trouvent très endommagés, aussi bien par les pressions du bassin versant que par des impacts locaux.

Dans cet article, nous exposerons les principaux changements qui ont eu lieu récemment, à travers les changements naturels mais aussi ceux induits, enregistrés dans le réseau fluvial du bassin-versant de l'Èbre, dans son cours principal et dans le delta. On expliquera leurs causes et l'on fera un diagnostic de la problématique actuelle.

I – Données et méthodes

Le bassin-versant de l'Èbre occupe une bonne partie du quadrant nord-est de la péninsule Ibérique avec une superficie de 84 393 km². Il présente une grande diversité de territoires ; des hautes cimes pyrénéennes aux aires semi-désertiques du centre de la dépression de l'Èbre. Le réseau fluvial possède lui aussi une grande géodiversité, qui va des torrents de montagne et des cours d'eau en tresses du pied de versant aux grands chenaux méandriformes situés dans d'amples plaines d'inondation de l'Èbre et de ses principaux affluents. Mais il existe aussi un important réseau de cours d'eau temporaires. Le delta de l'Èbre, qui s'étend sur 320 km² de superficie, est l'un des plus importants de la Méditerranée. Toutes ces caractéristiques font du bassin versant de l'Èbre une

excellente zone pilote pour réaliser des études intégrales sur la dynamique globale des fleuves et des rivières en Méditerranée.

Nous présenterons un travail de compilation des résultats obtenus jusqu'à maintenant par divers groupes d'investigation, qui ont participé à de nombreux projets. Il s'agit donc, d'un travail sur l'état de la question, qui soulève de nombreuses questions et ouvre une porte à la réflexion. Nous avons travaillé à partir de la documentation pré-existante et de la consultation d'études scientifiques et techniques antécédentes. Ces études s'appuient principalement sur l'analyse statistique et évolutive de données climatiques et hydrologiques et sur l'interprétation diachronique des systèmes fluviaux à partir de cartes anciennes et de photos aériennes. Pour certains secteurs – Èbre moyen et cours en aval de ses principaux affluents pyrénéens – nous nous sommes appuyés sur les cartes historiques et les photographies d'un vol réalisé en 1927 par la Confédération hydrographique de l'Èbre.

Les auteurs de cet article ont participé à différents projets et contrats d'investigation sur ce thème. Ils possèdent donc une solide expérience de travail sur le terrain dans ce domaine d'étude. Les projets antécédents les plus remarquables sont les suivants : « *Estudio hidrológico, jurídico, ecológico y económico de los recursos hídricos de la cuenca del Cinca para el diseño de un modelo de gestión sostenible* » (1996-2000), « *Plan gestor del LIC y ZEC tramos bajos del Aragón y el Arga* » (2001), « *Delimitación y caracterización de áreas inundables por procesos de alta y media frecuencia en los cursos fluviales del Irati y el Aragón como base para la gestión de caudales* » (2001-2002), « *Determinación del estado ecológico de los ríos de Aragón, tramificación e indicadores hidromorfológicos* » (2002-2003), « *Bases para la gestión ambiental y la reducción de riesgos en el tramo aragonés del Ebro* » (2003), « *Tramificación de la red fluvial de la cuenca del Ebro* » (2004-2005), « *Estudio hidrológico, geomorfológico, hidráulico y ecológico del bajo Gállego en el término municipal de Zaragoza para su gestión como espacio fluvial* » (2003-2005), « *Plan Medioambiental del Ebro y tramo bajo del Cinca* » (2004-2005), « *Evaluación del riesgo de inundación en Fraga por crecidas del Cinca. Propuesta de soluciones* » (2005), « *Caracterización y valoración hidromorfológica y ecológica de los ríos y riberas de las cuencas altas del Aragón y el Gállego, para el diseño de un plan ambiental* » (2005-2006), « *Funcionamiento y evolución del sistema fluvial, valoración ecológica y criterios de actuación en el río Aragón entre Jaca y el embalse de*

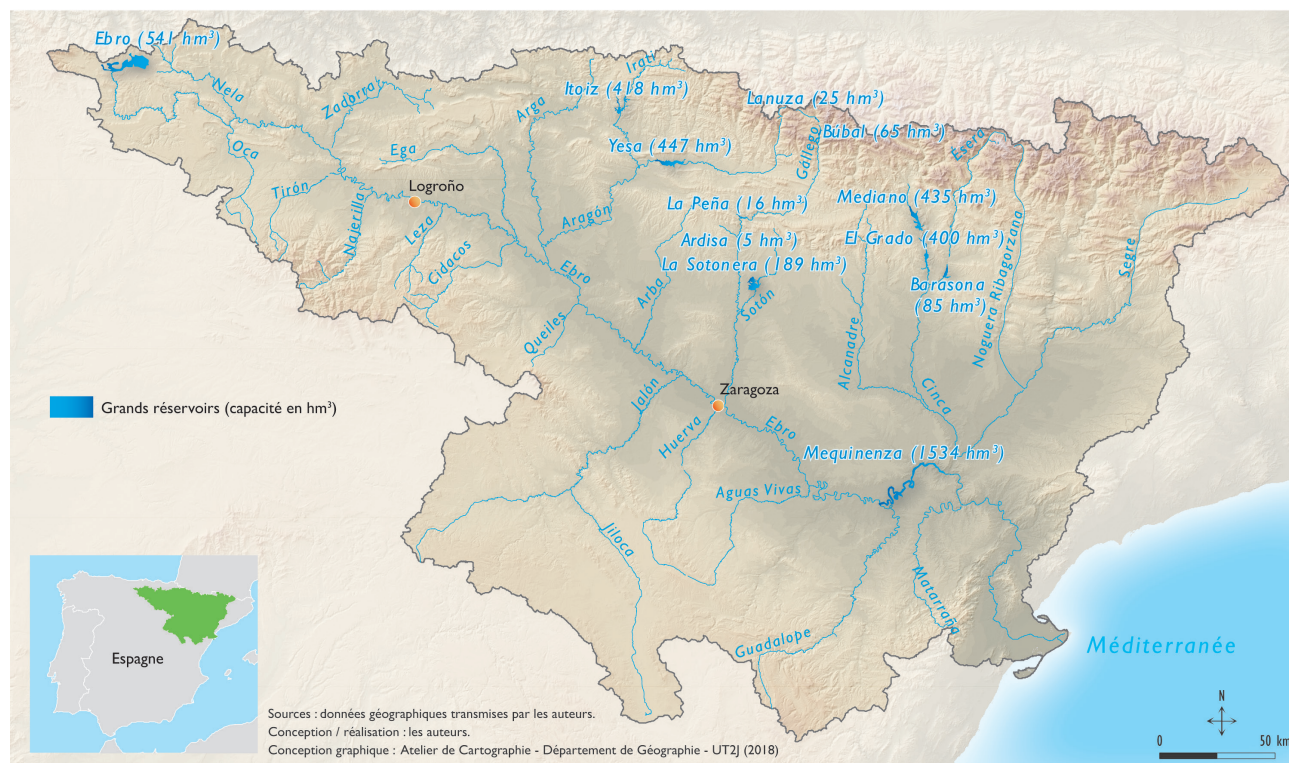


Fig. 1 – Aire d'étude. Base : système d'information territoriale de l'Èbre

Yesa » (2006), « Estrategia Nacional de Restauración de Ríos » (2006-2007), « Procesos y balances hidrológicos y de sedimento a diferentes escalas espaciales en ambientes mediterráneos: efectos de las fluctuaciones climáticas y los cambios de uso del suelo » (2006-2010), « Evaluación de procesos de dinámica fluvial para la restauración del río Aragón en Caparroso » (2008), « Efectos de las minicentrales hidroeléctricas en los sistemas fluviales de Navarra: diagnóstico, tendencias y propuestas de gestión » (2007-2009), « Mejorando la aplicación de los resultados de la investigación y de las experiencias de casos a las respuestas ecológicas de la degradación y rehabilitación hidromorfológicas » (2008-2010), « Caracterización y valoración geomorfológica de los ríos de la comarca de Sobrarbe » (2009), « Estudio de alternativas de actuación de restauración de ríos y defensa frente a inundaciones en la zona de confluencia de los ríos Arga y Aragón » (2009-2010), « Protocolo de caracterización hidromorfológica de masas de agua de la categoría ríos » (2013-2015), « Cambios ambientales y antrópicos en cuencas fluviales mediterráneas: impactos históricos en la morfología, los flujos sedimentarios y la vegetación » (2013-2016), « Elaboración de la herramienta científica RiMR (River-Management-Restoration)

para la gestión ambiental sostenible de cuencas fluviales » (2016-2017).

II – Changement global et dynamique fluviale dans le bassin de l'Èbre

Le fonctionnement hydrogéomorphologique des fleuves et rivières du bassin de l'Èbre a connu des changements notables tout au long de l'histoire, et particulièrement depuis 1950. Les changements des dernières décennies ont constitué la réponse géomorphologique à une importante réduction des débits, des crues et des apports sédimentaires. Les causes de ce phénomène se trouvent dans le changement global, qui inclut une évolution des températures et des précipitations mais aussi des changements importants d'utilisation du sol et des couvertures végétales dans le bassin, auxquels s'ajoute l'effet des nombreux barrages-réservoirs. L'on peut donc affirmer sans crainte, que la dynamique fluviale des lits fluviaux répond à la transformation globale du bassin versant (Ollero et al., 2015). La situation présente de nombreuses similitudes avec d'autres aires péennsulaires

(Conesa, 1999 ; Segura-Beltran et Sanchis-Ibor, 2013 ; Sanchis-Ibor et Segura-Beltran, 2014) et d'autres régions de la planète (Blösch *et al.*, 2007 ; Hoffmann *et al.*, 2010). La réduction des débits de tous les fleuves depuis 1950 (Beguería *et al.*, 2003) s'est intensifiée à partir de 1980 (López Moreno *et al.*, 2011) non seulement à cause de la diminution des précipitations (Del Río *et al.*, 2011) mais aussi et surtout en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration provoquée par des températures plus élevées (Lorenzo *et al.*, 2010). Des tendances similaires ont été observées dans le Sud-Ouest français (Lepinas *et al.*, 2011, 2015). Il faut ajouter à cela une réduction de la fréquence et de l'intensité des crues ordinaires qui correspond à l'augmentation de la couverture forestière dans les aires de montagne (García Ruiz *et al.*, 2011 et 2015). Le bassin de l'Èbre est celui qui compte le plus de réservoirs au monde par rapport aux ressources disponibles (Zarfl *et al.*, 2015). Cette abondance de petits et grands réservoirs et les importantes consommations d'eau destinée à l'irrigation ont provoqué des changements notables de la saisonnalité des régimes fluviaux et ont altéré la fréquence des crues (Frutos *et al.*, 2004 ; Sánchez Fabre et Ollero, 2010). La figure 2 fait la synthèse de cette évolution hydrologique sur les principaux fleuves du bassin (Ollero *et al.*, 2015).

Le monitoring de quatre bassins expérimentaux dans les Pyrénées, gérés par l'institut pyrénéen d'Écologie (IPE-CSIC), a servi à démontrer l'importance hydrologique jouée par la couverture végétale. Le fonctionnement hydrologique de ces bassins, selon les utilisations faites du sol, a démontré que l'abandon des terres de culture favorise une rapide extension de la colonisation végétale et une diminution des aires d'écoulements et de sédimentation (García Ruiz *et al.*, 2015).

Dans une perspective hydro-morphologique, les effets hydrologiques des réservoirs et du changement global dans le bassin de l'Èbre ont été attentivement analysés dans les cours d'eau pyrénéens (Beguería *et al.*, 2003 ; Batalla *et al.*, 2004 ;

Ibáñez, 2013 ; López Moreno *et al.*, 2006, 2008 et 2011 ; Batalla *et al.*, 2014), de même que leurs répercussions dans le transport de sédiments (Batalla, 2003 ; Day *et al.*, 2006 ; Liqueste *et al.*, 2009 ; Batalla et Vericat, 2011). Les conséquences géomorphologiques de ces derniers ont été moins étudiées, en particulier les changements dans la morphologie des lits, et on a souvent simplifié le problème. Cependant, il nous faut mentionner certains travaux de Beguería *et al.* (2006) ou de García-Ruiz *et al.* (2010) où l'on constate le processus de changement des lits fluviaux liés aux facteurs principaux, quoiqu'ils n'apportent aucune cartographie, ni aucune donnée superficielle issue de la photo-interprétation. Néanmoins, les mesures faites des variations superficielles des lits et des plaines inondables ont été réalisées dans certaines études telles que celles de Acín (2004), Granado (2004), Acín *et al.*, (2011) ou de Llena *et al.*, (2016), et plus récemment, on a évalué des typologies et des ajustements dans certains travaux de synthèse (Besné et Ibáñez, 2015 ; Lobera *et al.*, 2015).

Il faut souligner la grande diversité des cours d'eau présents dans le bassin, diversité mise en exergue dans des travaux de classifications et de tronçonnement (Ollero *et al.*, 2004), ainsi que plusieurs singularités comme certains

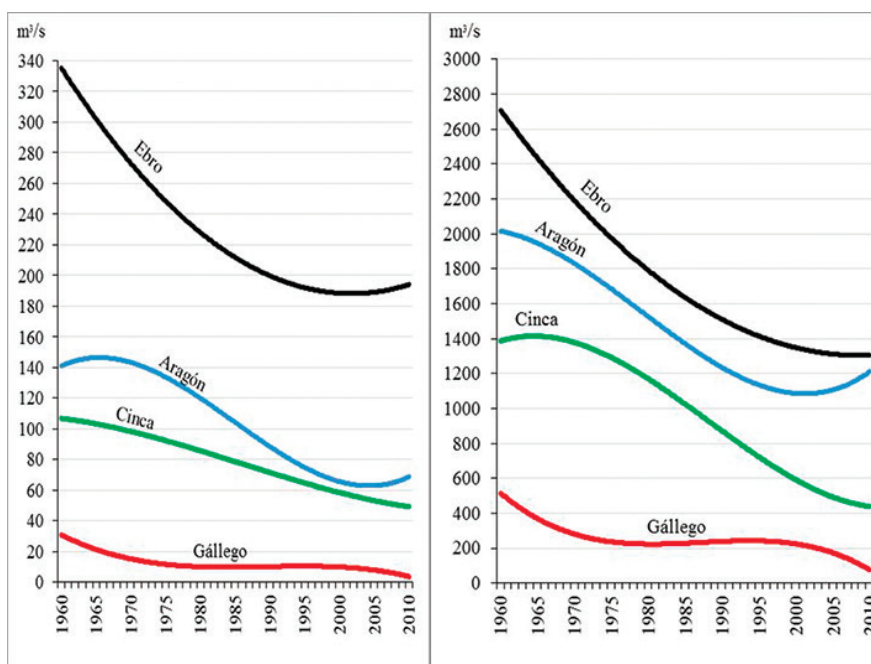


Fig. 2 – Lignes de tendance de 1960 à 2010 dans les débits moyens (gauche) et maxima annuels

Source : données de jaugeage (Èbre à Saragosse, Aragon à Caparros, Cinca à Fraga, Gállego à Saragosse)

Tableau 1 – Généralisation d'ajustements et d'impacts-type dans les six styles fluviaux principaux du bassin

Type de cours	Ajustements	Impacts locaux	Exemples
Torrents et cours supérieurs	Colonisation végétale	Barrages de rétention de sédiments	Arás, Remáscaro
Cours en tresses	Rétrécissement, simplification	Extractions	Ara, Cinca, Aragón
Cours encaissés rocheux	Fonctionnement naturel	Dérivations de débit, débordements	Alcanadre, Vero, Isuala
Sinueux	Rétrécissement, incision, colonisation végétale	Canalisations, occupation, dérivations de débit	Jalón, Huerva
Méandriformes	Rétrécissement, stabilisation	Canalisations, occupation, dérivations de débit, extractions	Ebro, Aragón
Temporaires	Rétrécissement, incision	Barrages de rétention, canalisations, occupation, gués, extractions	Seco, Valcodo

Source : Ollero *et al.*

cours anastomosés dans des aires de remplissage glaciaire (Aguastuertas, Aigualluts, Neila, Arcalis). De cette façon il est possible de définir à grands traits six grands types de cours fluviaux:

- i) torrents (gaves) et cours supérieurs ;
- ii) tronçons en tresses ;
- iii) secteurs encaissés dans des roches cohérentes ;
- iv) cours sinueux de faible développement latéral ;
- v) rivières méandriformes libres ;
- vi) cours d'eau temporaires tels que les barrancos et les ramblas.

La plupart de ceux-ci ont souffert des processus d'ajustement récents dus au changement global et à la régulation des débits. De plus, ils ont aussi subi des impacts locaux parfois très importants (tableau 1).

Les ajustements les plus courants dans le réseau fluvial du bassin versant, conséquences du changement global, peuvent se résumer en cinq processus associés qui s'alignent entre eux :

- i) simplification (et réduction de bras et de morphologies) ;
- ii) stabilisation du lit (qui perd sa dynamique latérale) ;
- iii) colonisation végétale à l'intérieur du lit ;
- iv) rétrécissement du lit ;
- v) incision ou encaissement dans le fond des lits fluviaux.

On peut observer certains d'entre eux, ou tous, dans les cours d'eau du bassin-versant avec plus ou moins d'intensité. La comparaison de photographies anciennes (1927 pour certaines vallées, 1946 ou 1956 pour d'autres) avec les images actuelles met en évidence ces transformations. On peut trouver certains cas recueillis dans la figure 3.

Depuis la seconde moitié du ^{xx}e siècle, on assiste à une simplification de la dynamique fluviale dans le bassin versant de l'Èbre. L'exode rural, la régulation au moyen de réservoirs et l'augmentation de la consommation d'eau (notamment pour les cultures irriguées) ont accéléré ce processus de changement global. À ce jour, ces processus ne semblent pas s'atténuer.

Dans les cours supérieurs et les tronçons encaissés rocheux on trouve peu de modifications. Néanmoins, sur les cônes de

déjection des torrents, les secteurs les plus actifs se sont rétractés avec une réduction de superficie de la bande active (Gómez Villar, García Ruiz, 2000). C'est dans les cours d'eau plus larges du piémont qu'ont lieu les changements morphologiques les plus rapides et significatifs (Beguiria *et al.*, 2006 ; Gómez Villar *et al.*, 2014). Les lits en tresses, de style divagant, et les fonds de gravier en général souffrent d'un processus de rétrécissement, de simplification, de stabilisation et de colonisations végétales évidentes. Ils se voient substitués par des styles sinueux simples (Ollero *et al.*, 2016). Dans les cours d'eau plus simples et plus sinueux, comme les ibériques Jalón et Huerva, la colonisation végétale du lit mineur est complète et les barres sédimentaires mobilisables ont disparu au long des 15 dernières années.

III – Changements récents dans le cours moyen de l'Èbre

Le cours moyen de l'Èbre, entre Logroño et La Zaida, est constitué d'un cours libre de 350 km sur une plaine inondable de 3,2 km de largeur moyenne. Ce lit a été extraordinairement dynamique au cours de l'histoire et il constitue un indicateur parfait des changements environnementaux du bassin-versant. Jusqu'en 1900, il présente un style essentiellement méandriforme qu'il est possible de décrire à travers les traces encore visibles dans les plaines d'inondation : courbes, migrations et coupures de méandres (Ollero, 1992). L'abondance de sédiments déposés entre 1880 et 1940 à cause de la pression démographique (terrasses, réduction des

masses forestières) dans les aires de montagne du bassin, a obligé à un ajustement de l'Èbre moyen à un modèle divagant avec nombre de barres et d'îles fluviales. Cependant, entre 1950 et 1980 le fleuve a récupéré son tracé méandrique et l'a consolidé grâce à la récupération de la couverture végétale dans le bassin-versant et

la régulation croissante des eaux, en particulier celle des barrages-réservoirs en amont de l'Èbre (depuis 1945) et de Yesa dans le fleuve Aragón (depuis 1960).

Dans les photographies aériennes de 1927 et 1957 on a pu constater 81 changements naturels (augmentations de la sinuosité, migration de méandres, élargissement des lobes, coupures et même quelques avulsions) tout au long du tracé du lit dans ce tronçon de l'Èbre, avec une superficie mobilisée de près de 2 000 ha. Entre 1957 et 1980 la dynamique s'est réduite à 39 changements et moins de 400 ha mobilisées (Ollero, 2010). Après 1980, aucun changement important du tracé n'a été enregistré, à part quelques modifications minimales des bancs d'alluvions de barres graveleuses de moins en moins mobilisables par les crues du fait de l'augmentation de la végétation. L'indice de sinuosité moyen s'est maintenu à 1,51 depuis lors.

Le fonctionnement global du bassin a provoqué la même réponse dans l'évolution de l'Èbre que dans celle de ses affluents. Nous mettrons en exergue certains patrons tels que : une simplification progressive du cours (Ollero, 2010 ; Cabezas *et al.*, 2009), une colonisation végétale croissante et une accélération des processus de succession de la ripisylve (Magdaleno, Fernández Yuste, 2011 ; Magdaleno *et al.*, 2012). Nous signalerons aussi l'incision significative (jusqu'à 2 m) dans certains tronçons ponctuels du cours de l'Èbre moyen, mais qui n'est pas généralisée, puisque certains tronçons connaissent un léger

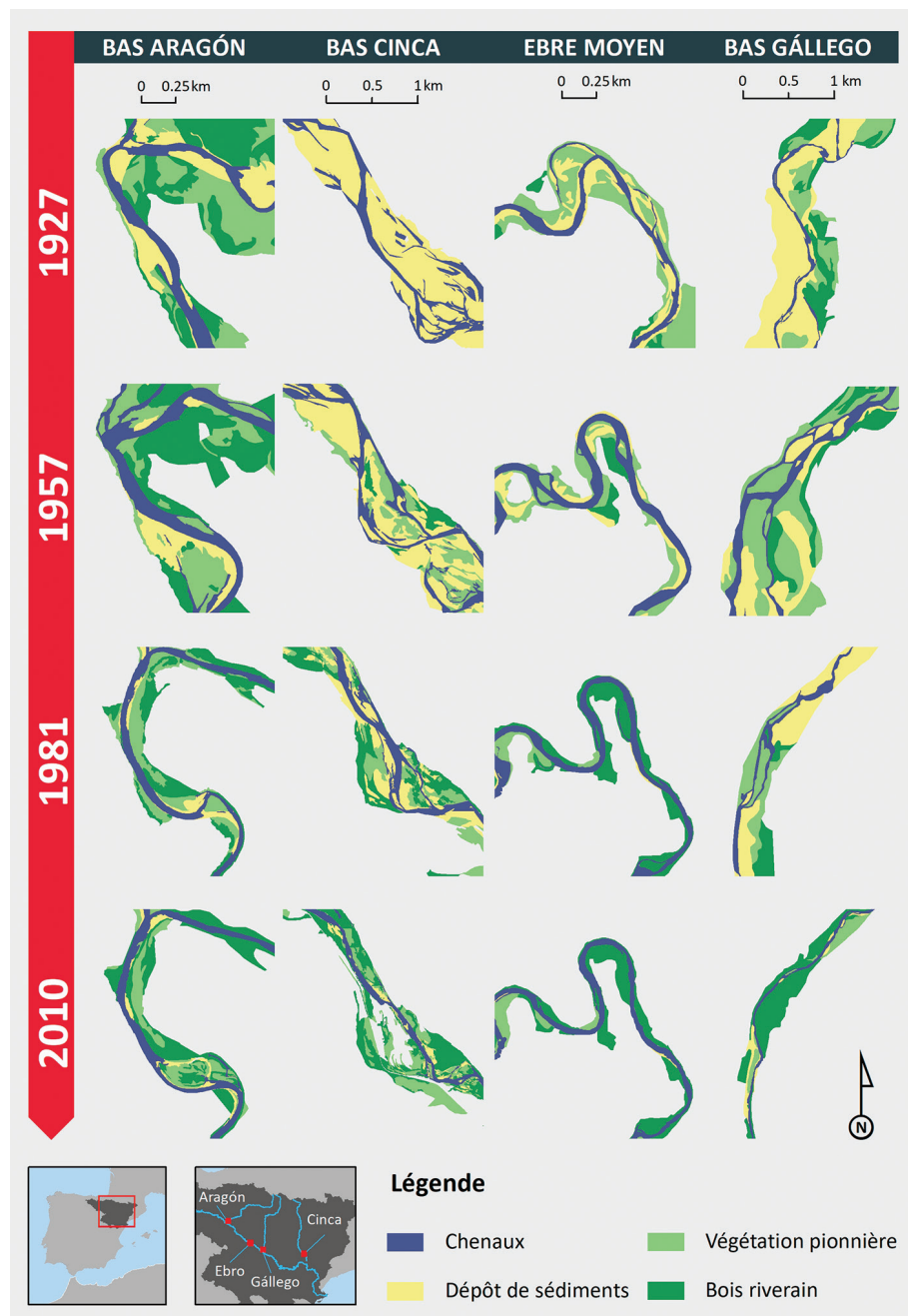


Fig. 3 – Exemples de dynamique fluviale en processus de simplification. Élaboration propre à partir de projets de recherche antérieurs

Source : Ollero *et al.*, 2015.

exhaussement (jusque 0,5 m) par rapport aux obstacles et à la perte de pente (Ollero *et al.*, 2015).

Entre tous les facteurs qui ont causés ces impacts, les travaux de défense terminés entre 1980 et 1985 ont fini par éliminer toute possibilité de changement du tracé, de telle sorte que l'Èbre moyen actuel est un fleuve méandriforme stabilisé et limité par les ouvrages de défense (Ollero, 2010). Nous avons aussi constaté des changements dans l'utilisation des sols dans la plaine alluviale, avec une augmentation de l'urbanisation et des installations d'équipements destinés à l'élevage, ce qui accroît la vulnérabilité face aux inondations. Les crues, en particulier celles de février 2003 et de mars 2015, maintiennent leur fréquence, quoiqu'elles aient diminué en débit solide et en magnitude, du fait du laminage créé par les multiples barrages du bassin versant.

IV – Évolution et problématique du delta de l'Èbre

Le delta de l'Èbre possède une superficie émergée de 320 km² et un volume sédimentaire supérieur à 28 km³ (Guillén et Palanques, 1992). On considère qu'il s'agit d'un delta micromaréal dominé par les processus fluviaux et les houles. On attribue sa forme actuelle à une décélération de l'augmentation du niveau de la mer qui aurait eu lieu ces 8 000 dernières années (Somoza et Rodríguez-Santalla, 2014). De chaque côté de la plaine deltaïque se forme une flèche à pointe libre, Banya (ou Alfacs) [S], uni au delta par les flèches du Trabucador (S) et le Fangar (N). Deux îles se sont formées dans le lit : celle de Gràcia, à environ 15 km de la côte, et celle de Buda qui sépare les deux tributaires de l'embouchure (fig. 4).

On a étudié l'évolution du delta à différentes échelles temporelles, à partir de la sédimentologie et de la stratigraphie (Maldonado, 1972 ; Maldonado, Riba, 1971 ; Somoza, Rodríguez-Santalla, 2014), de la cartographie historique (Canicio, Ibañez, 1999 ; Valls *et al.*, 2016) et de la photographie aérienne (Guillén, Díaz, 1990 ; Guillén, Palanques, 1997). Tout au long de l'histoire, le delta a subi une progradation due aux changements environnementaux et anthropiques, qui ont eu lieu ces 2 000 dernières années. À l'époque des Romains, l'embouchure se trouvait près de Tortosa, alors qu'au x^e siècle la côte s'avancait jusqu'à Amposta. Entre 1149 et 1362 apr. J.-C. le lobe du Riet Vell s'est formé alors

qu'entre 1350 et 1700 apr. J.-C. l'embouchure s'est déplacée vers le nord, dans le Riet Fondo. Durant les xiv^e et xv^e siècles, un nouveau lobe s'est formé au nord-ouest (le Goleró) et depuis 1700 c'est celui de Migjorn qui est actif. C'est à partir de ce moment que se développe le lobe de Buda, formé par le lit actuel (Somoza, Rodríguez-Santalla, 2014).

La cartographie historique de la fin du xix^e siècle présente un delta très différent à celui d'aujourd'hui, où l'on distingue les paléolits fluviaux, certains encore actifs, associés aux lobes historiques. Le delta de la carte de Francisco Coello, de 1858 (fig. 4a), a une superficie approximative de 307,21 km², si l'on compte les flèches de Fangar et la Banya, dont l'aire est d'environ 1,65 km² et 24,20 km² respectivement. Dans la carte on peut voir le paléolit d'el Riet, au nord, qui forme un important méandre avec deux diffuences qui débouchent à travers el Goleró, l'une dans la baie de Fangar et l'autre en mer ouverte, en direction nord-est. La carte de Rafael Pardo Figueroa (1887-1890) (fig. 4b) montre un delta plus développé et une forte accréation des crochets, qui s'assimilent beaucoup à leur forme actuelle. Il s'agit d'un delta progradant avec un lobe en pointe à l'embouchure, que l'on peut encore observer dans la photographie aérienne de 1956 (fig. 4c). Les dimensions du delta se maintiennent jusqu'à nos jours et la forme des crochets est très semblable à l'actuelle. Entre 1918 et 1927 une grande inondation ouvre plusieurs crevasses en direction nord, ce qui facilite l'abandon et le colmatage de la Gola del Nord et l'apparition de la Gola Tramuntana, ouverte vers le nord. À partir de 1970 commence une phase érosive qui se poursuit encore (fig. 4d). L'embouchure a perdu sa forme en pointe, et a adopté une forme plus arrondie, similaire à celle décrite par Coello (1858) et se consolide à l'embouchure septentrionale. Les flèches en crochet augmentent leur superficie et croissent vers l'ouest, où ils ferment partiellement les baies de Fangar et d'Alfacs dans la partie nord et sud du delta respectivement (fig. 4e).

L'analyse des changements du trait de côte entre 1890 et 2012 nous donne une vision à long terme de l'évolution du delta, de ses différentes tendances en fonction des secteurs (fig. 4f). La régression la plus importante se produit dans l'ancienne embouchure, avec des valeurs qui oscillent entre – 2 600 et – 2 100 m (fig. 4f, secteur 6). Dans les flèches une érosion se produit sur la face extérieure, avec des valeurs qui varient entre – 600 et – 700 m dans le Fangar (secteurs 3 et 4) et entre – 500 et – 600 m dans le Trabucador (secteur 7). À cette

période la flèche septentrionale s'érode davantage que la méridionale et les deux pivotent vers la côte, avec des processus d'érosion qui se compensent dans la face interne, associés normalement à des phénomènes de tempêtes. L'accrétion du delta est localisée sur les flèches en crochet, avec des valeurs entre 700 et 2 000 m dans la Banya (secteur 9B), et entre 400 et 800 m sur la face interne du Fangar (secteur 2).

On peut aussi observer que la face externe de la flèche en crochet de la Banya a un double comportement : d'érosion sur son extrémité orientale (secteur 9A) et d'accrétion dans sa partie occidentale (9B). Dans le cas du Fangar (secteur 3), il est légèrement érosif et l'accumulation se concentre sur la face interne. L'érosion du delta ne se produit pas de façon uniforme, car la plaine deltaïque souffre une diminution importante de sa superficie, mais les sédiments érodés se déposent dans les crochets qui croissent de façon continue (fig. 4e). Ainsi donc, la superficie totale du delta n'a souffert d'aucun changement notable depuis les années 1970, en revanche il s'est produit une redistribution des sédiments qui arrivent au delta. D'autre part, pour la même période, on observe une forte érosion du delta submergé, qui tend à démanteler les lobes déposés les siècles antérieurs (Martínez-Clavel *et al.*, 2016).

Durant les ^{xv}^e et ^{xvi}^e siècles, la déforestation du bassin-versant, dont les arbres étaient utilisés pour la construction de bateaux pour les traversées transocéaniques, a provoqué la majeure accrétion du delta (Somoza, Rodríguez-Santalla, 2014). Entre les ^{xvii}^e et ^{xviii}^e siècles, des changements significatifs ont eu lieu aux embouchures (Maldonado, Riba, 1971 ;

Maldonado, 1972). Au ^{xix}^e siècle, l'apport de sédiments a été estimé à 25x106 tm/an (Guillén, Palanques, 1997), tendance qui aurait changé au long du ^{xx}^e siècle puisque la construction de réservoirs, qui entravent la circulation de l'eau et retiennent les sédiments, a diminué le débit d'eau circulant (Dolz *et al.*, 1997 ; Guillén, Palanques, 1997 ; Sánchez-Chóliz, Sarasa, 2015). La réduction

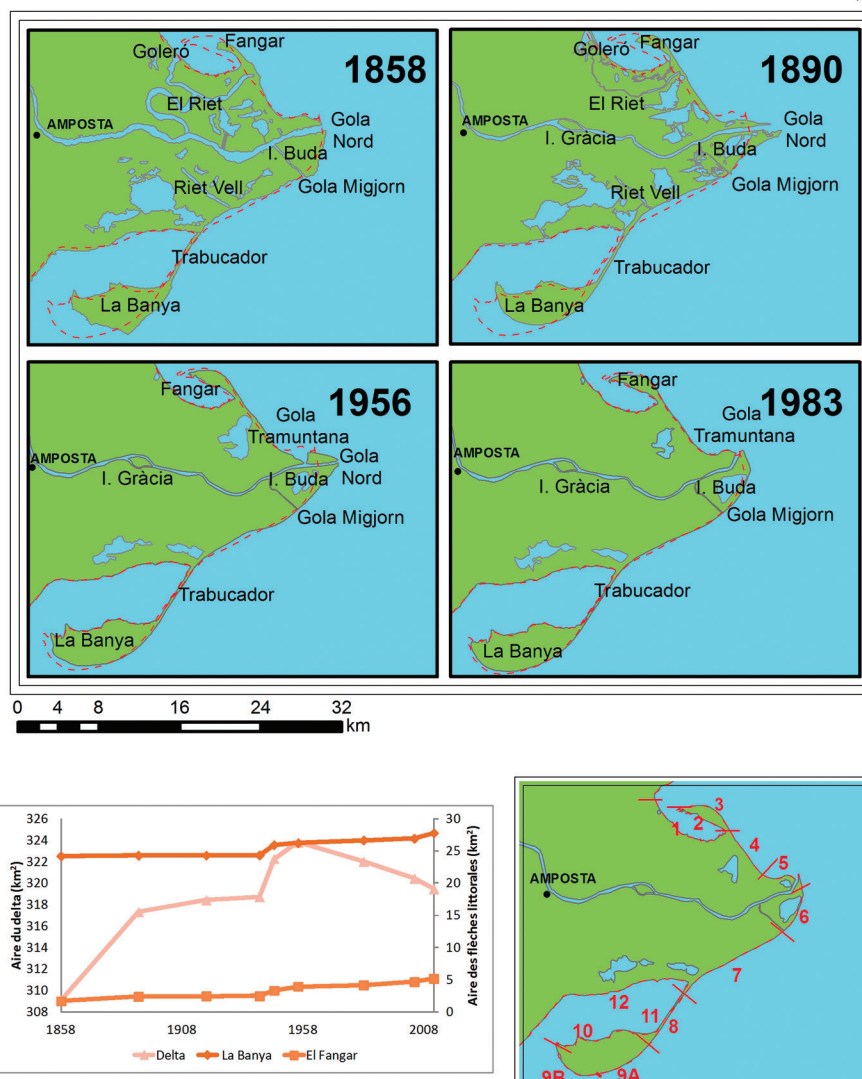


Fig. 4 – Évolution du delta entre 1858 (a), 1890 (b), 1956 (c) et 1983 (d) [en lignes discontinues apparaît la silhouette du delta en 2012]. Tout au long de cette période la superficie du delta (y compris la plaine deltaïque émergée, les flèches et les zones humides) a souffert de profonds changements (e), avec une forte croissance jusqu'en 1956 et une diminution à partir de ce moment. Cependant, l'érosion du lobe frontal du delta est compensée par une augmentation de la superficie des flèches et des ganchos. D'autre part, l'analyse des changements de la ligne de côte du delta (f) montre des secteurs différenciés avec un comportement érosif ou d'accrétion (voir explication dans le texte)

Source : Valls *et al.*, 2016.

d'apports solides et liquides a provoqué des changements essentiels dès les années 1970. La construction de plus de 200 barrages-réservoirs dans le bassin-versant et surtout la construction de ceux de Mequinenza (1964) et de Riba-roja (1969) ont réduit de 99 % la charge sédimentaire, qui maintenant se trouve retenue dans ces barrages-réservoirs (Guillén, Palanques, 1992 ; Ibañez *et al.*, 1996). La différence évolutive est évidente si l'on compare la situation avant et après 1969, date de la dernière construction de barrage-réservoir et où l'on observe une diminution de la superficie de la plaine deltaïque. On peut observer comment certains secteurs qui étaient progradants en régime naturel sont devenus érosifs dans la seconde phase, et le retrait particulièrement important de l'embouchure actuelle.

Actuellement le delta pâtit des changements environnementaux enregistrés tout au long du xx^e siècle :

- i) diminution des débits et des alluvions ;
- ii) balance de sédimentation négative pour l'ensemble du delta ;
- iii) subsidence ;
- iv) montée du niveau de la mer ;
- v) détérioration de la qualité de l'eau du fleuve, de l'estuaire, des lagunes et des baies ;
- vi) intrusion du biseau salé dans le cours d'eau ;
- vii) perte de zones humides, d'autres habitats naturels et d'espèces qui y habitent (PIPDE, 2006).

La diminution du débit est associée à l'intrusion du biseau salé, à la détérioration de la qualité de l'eau du fleuve et aux pertes de zones humides et de biodiversité. Pour combattre ce problème, des débits écologiques ont été établis, quoiqu'ils aient suscités une certaine polémique entre les différentes administrations qui gèrent l'eau. La confédération hydrographique de l'Èbre (administration centrale) propose dans le plan hydrologique national 2015-2021, des débits écologiques moindres que la commission de Durabilité des terres de l'Èbre (*Comisión de Sostenibilidad de las Tierras del Ebro*, 2015) [administration régionale]. Cependant il y a consensus sur le fait qu'au-dessous d'environ 100-130 m³/s le biseau salé progresse jusqu'à atteindre son maximum, au-delà de l'Amposta, et au-dessus de 400 m³/s, il disparaît. Récemment un accord a été conclu entre toutes les parties pour établir un débit écologique annuel qui oscille entre 5 871 hm³ (année sèche), 7 732 hm³ (année moyenne) et 9 907 hm³ (année humide). Ces chiffres proposés par la commission de Durabilité des terres de l'Èbre (CSTE), sont bien supérieurs à ceux que proposait le plan hydrologique (CSTE, 2015). D'un autre côté, il

semble que tous soient d'accord sur la nécessité de crues de 1 500-1 800 m³/s pour détruire les macrophytes et créer un débit régénérateur du lit.

Le manque de sédiments provoque une diminution de la plaine deltaïque et met en exergue les effets de la subsidence et de la montée du niveau de la mer. Ce dernier siècle, le taux moyen de transgression eustatique dans le delta est estimé entre 1 et 2 mm/an et le volume annuel de sédiments nécessaires pour combattre cette transgression est estimé à 2 millions de m³/an. Si en plus on admet un taux de subsidence de 5 mm/an sur une superficie de 250 km², il faudrait 1 300 000 tm/an de sédiments, alors qu'actuellement on ne dispose que de 0,15 million de tm/an (PIPDE, 2006).

V – Impact anthropique direct sur les lits fluviaux

S'il est vrai que le changement global a provoqué de nombreux problèmes hydrogéomorphologiques généralisés, il n'en est pas moins vrai que les nombreux impacts locaux dérivés d'activités anthropiques ont, eux aussi, eu des conséquences sur les cours d'eau. Il s'agit là d'impacts très nombreux, dans tous les cours fluviaux du bassin-versant dus à l'utilisation intensive des espaces et des ressources fluviales (Ollero, 2008).

Cette problématique environnementale n'a cependant pas suscité un grand intérêt scientifique, et d'ailleurs on ne peut trouver que quelques références de cas concrets (*e. g.* García Ruiz, Puigdefàbregas, 1985 ; Serrano-Notivol *et al.*, 2017). Malgré cela, il nous faut souligner l'intérêt croissant des administrations publiques (ministère de l'Environnement, confédérations hydrographiques, communautés autonomes, mairies) et de certains collectifs de défense de l'environnement (Sánchez Fabre, Ollero, 2010). C'est ainsi que dans la dernière décennie de nombreux forums, congrès, mais aussi de nombreuses réunions techniques et d'études ont eu lieu. Certains spécialistes en géomorphologie fluviale ont participé à ce processus technique de dialogue, de formation, de participation et de recherche de solutions. C'est dans ce cadre-là que l'on a dénoncé les problèmes fluviaux dérivés des interventions directes sur les lits.

Mis à part les barrages-réservoirs, à l'origine de grandes altérations, associés aux effets du changement global, dans de nombreux cours d'eau de plaines et de

montagne on enregistre des dérivations du débit pour l'approvisionnement de mini-centrales hydroélectriques (Ibáñez *et al.*, 2013) ou plus fréquemment pour irriguer les terres. Dans certains cas, les réductions de débit sont très fortes, de telle sorte que les lits fluviaux sont envahis par la végétation et on assiste à des processus locaux de rétrécissement et d'incision du lit. Ces processus de simplification géomorphologique, ajoutés à ceux dus au changement global se généralisent et s'étendent en aval en particulier dans les cours d'eau contrôlés. Les exemples les plus représentatifs sont certains tronçons des rivières pyrénéennes telles que le Gállego, l'Ésera et la Noguera Ribagorçana. Ces trente dernières années, la colonisation végétale de tous les lits du bassin-versant a été substantielle, que ce soit à cause du changement global ou des impacts locaux.

La construction systématique de digues pour éviter les inondations, de cordons d'enrochement et d'autres systèmes défensifs pour éviter l'érosion des berges commence dans les années 1960 dans les cours d'eau sinueux et méandriformes du bassin-versant. Dans le cas de l'Èbre, on doit leurs constructions surtout aux inondations de 1959, 1960 et 1966 (Ollero, 2010). Le processus

s'est terminé au début des années 1980 dans l'Èbre et l'Aragon et dans les années 1990 dans le Cinca, cours fluvial touché en novembre de 1982 par une inondation. Parallèlement, une occupation massive des terres à des fins agricoles se développe dans les plaines d'inondation, de telle sorte qu'en 2012 seulement 14,3 % de celles-ci demeurent à l'état naturel dans le cours moyen de l'Èbre, 9,3 % dans le cours inférieur de l'Aragon, 18,8 % dans le cours inférieur du Gállego et 19,3 % dans le cours inférieur du Cinca (Ollero *et al.*, 2015). De nos jours, 100 % des berges actives du cours moyen de l'Èbre sont protégées. La canalisation complète des 13 derniers km de l'Arga (terminée dans les années 1980) est un cas extrême d'endiguement. Elle a provoqué une coupure des méandres qu'il décrivait et a créé un lit artificiel et peu sinueux (Acín *et al.*, 2011).

Les extractions de granulats ont été abondantes et fréquentes dans de nombreux cours d'eau du bassin-versant. On les a employés dans la construction mais aussi pour augmenter la capacité d'évacuation des crues. Les tronçons graveleux des cours pyrénéens, dans lesquels on trouve encore certaines entreprises d'extraction minière, ont été particulièrement touchés par ces activités

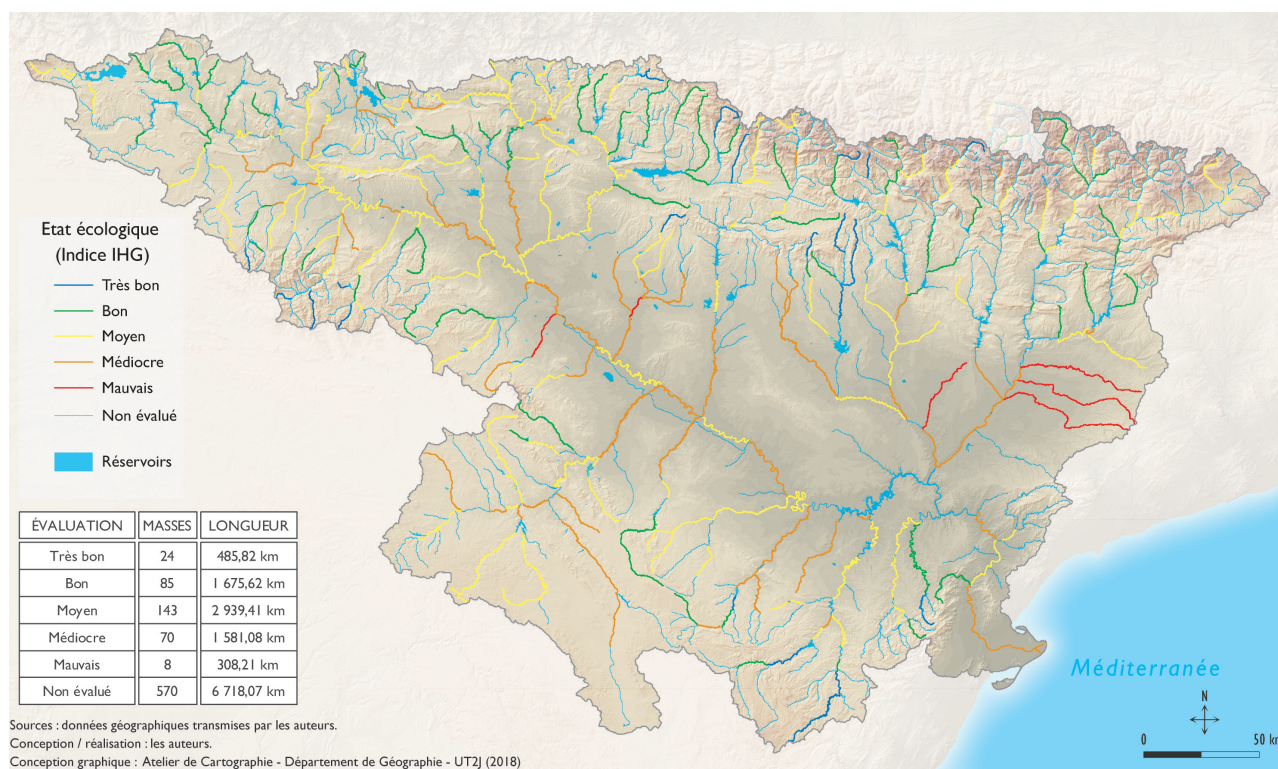


Fig. 5 – Évaluation hydromorphologique des fleuves du bassin versant de l'Èbre selon l'indice IHG

Source : Durán *et al.*, 2010

extractives. Nous ne disposons d'aucune information ni d'aucune évaluation des volumes extraits, et les conséquences de ces activités n'ont pas été évaluées non plus. La seule étude dont nous disposons, est celle faite du cours bas du Gállego, qui met en évidence l'intensité des extractions dans les années 1960 et 1970 (Martín Vide *et al.*, 2010), en raison de l'accroissement de la ville de Saragosse.

Par le fait des impacts signalés, l'état hydromorphologique des cours du bassin-versant de l'Èbre présente des déficiences importantes, comme on peut le constater dans différents rapports techniques (Mora *et al.*, 2012). La perte de styles géomorphologiques dans les lits fluviaux due aux altérations anthropiques ou suite aux effets du changement global constitue une détérioration de l'état écologique des masses d'eau affectées, conformément à la directive européenne de l'Eau (2000/60/CE). Cela suppose aussi une perte de patrimoine géomorphologique et de géodiversité fondamentale. Les cours les plus détériorés sont ceux des plaines, ainsi que ceux des montagnes du fait des activités hydroélectriques et de la régulation (fig. 5). Les cours en meilleur état seraient les cours supérieurs des fleuves ibériques et les pyrénéens situés dans des espaces protégés.

Conclusion

La géomorphologie fluviale, appliquée à l'analyse des changements récents dans les lits fluviaux du bassin-versant de l'Èbre et dans son delta, s'est révélée utile pour le diagnostic des changements environnementaux, pour l'explication de ses causes et de ses conséquences.

Les processus de stabilisation et de simplification fluviale sont généralisés dans tout le bassin. Ils sont le résultat du changement global et des pressions humaines et impliquent une importante perte de géodiversité et de fonctionnement naturel. Il s'agit là de problèmes de premier plan et dont la solution est complexe. La restauration fluviale constitue le principal défi pour l'avenir. Elle ouvre une voie à la récupération de la naturalité pour mitiger les effets des changements survenus.

Bibliographie

- ACÍN V., *Cambios en la dinámica fluvial de los ríos Gállego (tramo Biescas-Sabiñánigo) y Aurín en los últimos 50 años*, Trabajo fin de licenciatura de Geografía, Universidad de Zaragoza, 2004.
- ACÍN V., DÍAZ E., GRANADO D., IBISATE A., OLLERO A., « Cambios recientes en el cauce y la llanura de inundación del área de confluencia Aragón-Arga (Navarra) », *Geographicalia*, n°s 59-60, 2011, p. 11-25.
- BATALLA R. J., « Sediment Deficit in Rivers Caused by Dams and Instream Gravel Mining. A Review with Examples from NE Spain », *Cuaternario y Geomorfología*, n° 17, 2003, p. 79-91.
- BATALLA R. J., GÓMEZ C. M., KONDOLF G. M., « Reservoir-Induced Hydrological Changes in the Ebro River Basin (NE Spain) », *Journal of Hydrology*, n° 290, 2004, p. 117-136.
- BATALLA R. J., VERICAT D., « An Appraisal of the Contemporary Sediment Yield in the Ebro Basin », *Journal of Soils and Sediments*, n° 11, 2011, p. 1070-1081.
- BATALLA R. J., VERICAT D., TENA A., « The Fluvial Geomorphology of the Lower Ebro (2002-2013): Bridging Gaps Between Management and Research », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 40, 2014, p. 29-52.
- BEGUERÍA S., LÓPEZ-MORENO J. I., LORENTE A., SEEGER M., GARCÍA-RUIZ J. M., « Assessing the Effect of Climate Oscillations and Land-Use Changes on Streamflow in the Central Spanish Pyrenees », *Ambio*, n° 32, 2003, p. 283-286.
- BEGUERÍA S., LÓPEZ-MORENO J. I., GÓMEZ VILLAR A., RUBIO V., LANA-RENAULT N., GARCÍA RUIZ J. M., « Fluvial Adjustments to Soil Erosion and Plant Cover Changes in the Central Spanish Pyrenees », *Journal of Hydrology*, n° 290, 2004, p. 117-136.

- Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, n° 88, 2006, p. 177-186.
- BESNÉ P., IBISATE A., « River Channel Adjustment of Several River Reaches on Ebro Basin », *Quaternary International*, n° 364, 2015, p. 44-53.
- BLÖSCHL G., ARDOIN-BARDIN S., BONNELL M., DORNINGER M., GOODRICH D., GUTKNECHT D., MATAMOROS D., MERZ B., SHAND P., SZOLGAY J., « At What Scales Do Climate Variability and Land Cover Change Impact on Flooding and Low Flows? », *Hydrological Processes*, n° 21, 2007, p. 1241-1247.
- BUFFINGTON J. M., « Changes in Channel Morphology over Human Time Scales », dans CHURCH M., BIRON P. M., ROY A. G. (dir.), *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, Wiley, 2012.
- CABEZAS A., COMÍN F. A., BEGUERÍA S., TRABUCCHI M., « Hydrologic and Landscape Changes in the Middle Ebro River (NE Spain): Implications for Restoration and Management », *Hydrology and Earth System Sciences*, n° 13, 2009, p. 1-12.
- CANICIO A., IBÁÑEZ C., « The Holocene Evolution of the Ebro Delta, Catalonia, Spain », *Acta Geographica Sinica*, n° 54, 1999, p. 462-469.
- COMISSIÓ TÈCNICA DE SOSTENIBILITAT DE LES TERRES DE L'ÈBRE (CSTE), *Revisión y actualización de la propuesta de régimen de caudales ecológicos en el tramo final del río Ebro, delta y estuario*, 2015.
- CONESA C., « Cambio ambiental y equilibrio dinámico de los cauces », *Papeles de Geografía*, n° 30, 1999, p. 31-46.
- DAY J. W., MALTBY E., IBÁÑEZ C., « River Basin Management and Delta Sustainability: A Commentary on the Ebro Delta and the Spanish National Hydrological Plan », *Ecological Engineering*, n° 26, 2006, p. 85-99.
- DEL RÍO S., HERRERO L., FRAILE R., PENAS A., « Spatial Distribution of Recent Rainfall Trends in Spain (1961-2006) », *International Journal of Climatology*, n° 31, 2011, p. 656-667.
- DOLZ J., GÓMEZ M., NIETO J., « El Ebro en el delta », *Revista de Obras Públicas*, n° 3368, 1997, p. 7-14.
- DURÁN C., NAVARRO P., PARDOS M., BALLARÍN D., MORA D., MONTORIO R., OLLERO A. *Aplicación del Índice Hidrogeomorfológico IHG a la cuenca del Ebro*, Confederación Hidrográfica del Ebro, 2010.
- FRUTOS L. M., OLLERO A., SÁNCHEZ FABRE M., « Caracterización del río Ebro y su cuenca y variaciones en su comportamiento hidrológico », dans GIL OLCINA A. (dir.), *Alteración de los regímenes fluviales peninsulares*, Fundación Caja Murcia, 2004.
- GARCÍA RUIZ J. M., PUIGDEFÁBREGAS J., « Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del Pirineo Central », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 10, 1985, p. 91-102.
- GARCÍA RUIZ J. M., LÓPEZ MORENO J. I., VICENTE S. M., LASANTA T., BEGUERÍA S., « Mediterranean Water Resources in a Global Change Scenario », *Earth Science Reviews*, n° 105, 2011, p. 121-139.
- GARCÍA RUIZ J. M., LANA-RENAULT N., BEGUERÍA S., LASANTA T., REGÜÉS D., NADAL E., SERRANO P., LÓPEZ MORENO J. I., ALVERA B., MARTÍ BONO C., ALATORRE L. C., « From Plot to Regional Scales: Interactions of Slope and Catchment Hydrological and Geomorphic Processes in the Spanish Pyrenees », *Geomorphology*, n° 120, 2010, p. 248-257.
- GARCÍA RUIZ J. M., LÓPEZ MORENO J. I., LASANTA T., VICENTE S. M., GONZÁLEZ SAMPÉRIZ P., VALERO B. L., SANJUÁN Y., BEGUERÍA S., NADAL E., LANA-RENAULT N., GÓMEZ VILLAR A., « Los efectos geoecológicos del cambio global en el Pirineo central español: una revisión a distintas escalas espaciales y temporales », *Pirineos*, n° 170, 2015.
- GÓMEZ C. M., DELACÁMARA G., PÉREZ-BLANCO C. D., RODRÍGUEZ M., « Voluntary Agreement for River Regime Restoration Services in the Ebro River Basin (Spain) », *Journal of Hydrology*, n° 518, 2014, p. 365-378.
- GÓMEZ VILLAR A., MARTÍNEZ CASTROVIEJO R., « Channel Degradation as a Response to Erosion Control Works: A Case Study », dans Sala M., Rubio J. L., García Ruiz J. M. (dir.), *Soil Erosion Studies in Spain*, Geoforma, 1991.
- GÓMEZ VILLAR A., GARCÍA RUIZ J. M., « Surface Sediment Characteristics and Present Dynamics in Alluvial Fans of the Central Spanish Pyrenees », *Geomorphology*, n° 34, 2000, p. 127-144.
- GÓMEZ VILLAR A., SANJUÁN Y., GARCÍA RUIZ J. M., NADAL E., ÁLVAREZ J., ARNÁEZ J., SERRANO M. P., « Sediment Organization and Adjustment in a Torrential Reach of the Upper Ijuez River, Central Spanish Pyrenees », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 40, 2014, p. 191-214.
- GONZALO L. E., OLLERO A., IBISATE A., BALLARÍN D., « Impacto geomorfológico de actuaciones en cauces fluviales de La Rioja », *Zubía*, n° 28, 2010, p. 7-30.
- GRANADO D., *Dinámica fluvial y vegetación de ribera del río Aragón en el tramo Jaca-Puente la Reina*, Trabajo fin de licenciatura de Geografía, Universidad de Zaragoza, 2004.
- GUILLÉN J., DÍAZ J. I., « Elementos morfológicos en la zona litoral: ejemplos en el delta del Ebro », *Scientia Marina*, n° 54, 1990, p. 359-373.

- GUILLÉN J., PALANQUES A., « Sediment Dynamics and Hydrodynamics in the Lower Course of a River Highly Regulated by Dams: The Ebro River », *Sedimentology*, n° 39, 1992, p. 567-579.
- GUILLÉN J., PALANQUES A., « A Historical Perspective of the Morphological Revolution in the Lower Ebro River », *Environmental Geology*, n° 30, 1997, p. 174-180.
- HOFFMANN T., THORNDYCRAFT V. R., BROWN A. G., COULTHARD T. J., DAMNATI B., KALE V. S., MIDDELKOOP H., NOTEBAERT B. WALLING D. S., « Human Impact on Fluvial Regimes and Sediment Flux During the Holocene: Review and Future Research Agenda », *Global and Planetary Change*, n° 72, 2010, p. 87-98.
- HORACIO J., *Medicina fluvial. Un nuevo paradigma en la conservación y restauración de ríos bajo el enfoque de la geomorfología*, Jolube, 2015.
- IBAÑEZ C., PRAT N., CANICIO A., « Changes in the Hydrology and Sediment Transport Produced by Large Dams on the Lower Ebro River and Its Estuary », *Regulated Rivers: Research and Management*, n° 12, 1996, p. 51-62.
- IBAÑEZ C., CANICIO A., DAY J. W., CURCÓ A., « Morphologic Development, Relative Sea Level Rise and Sustainable Management of Water and Sediment in the Ebre Delta, Spain », *Journal of Coastal Conservation*, n° 3, 1997, p. 191-202.
- IBISATE A., « Variación del riesgo de inundaciones en el río Zadorra (País Vasco) como consecuencia de su regulación », *Investigaciones Geográficas*, n° 36, 2005, p. 119-133.
- IBISATE A., OLLERO A., DÍAZ E., « Influence of Catchment Processes on Fluvial Morphology and River Habitats », *Limnetica*, n° 30, 2011, p. 169-182.
- IBISATE A., DÍAZ E., OLLERO A., ACÍN V., GRANADO D., « Channel Response to Multiple Damming in a Meandering River, Middle and Lower Aragón River (Spain) », *Hydrobiologia*, n° 712, 2013, p. 5-23.
- LESPINAS F., LUDWIG W., HEUSSNER S., « Impact of Recent Climate Change on the Hydrology of Coastal Mediterranean Rivers in Southern France », *Climatic Change*, n° 99, 2010, p. 425-456.
- LIQUETE C., CANALS M., LUDWIG W., ARNAU P., « Sediment Discharge of the Rivers of Catalonia, NE Spain, and the Influence of Human Impacts », *Journal of Hydrology*, n° 366, 2009, p. 76-88.
- LLENA M., VERICAT D., MARTÍNEZ CASASNOVAS J. A., « Cambios geomorfológicos en el Alto Cinca, período 1927-2014 », *Actas de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología*, 2016.
- LOBERA G., BESNÉ P., VERICAT D., LÓPEZ-TARAZÓN J. A., TENA A., ARISTI I., DÍEZ J. R., IBISATE A., LARRAÑAGA A., ELOSEGI A., BATALLA R. J., « Geomorphic Status of Regulated Rivers in the Iberian Peninsula », *Science of the Total Environment*, n° 508, 2015, p. 101-114.
- LÓPEZ MORENO J. I., BEGUERÍA S., GARCÍA RUIZ J. M., « Trends in High Flows in the Central Spanish Pyrenees: Response to Climatic Factor or to Land-Use Change? », *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, n° 51, 2006, p. 1039-1050.
- LÓPEZ MORENO J. I., BENISTON M., GARCÍA RUIZ J. M., « Environmental Change and Water Management in the Pyrenees: Facts and Future Perspectives for Mediterranean Mountains », *Global and Planetary Change*, n° 61, 2008, p. 300-312.
- LÓPEZ MORENO J. I., VICENTE S. M., MORÁN E., ZABALZA J., LORENZO J., GARCÍA RUIZ J. M., « Impact of Climate Evolution and Land Use Changes on Water Yield in the Ebro Basin », *Hydrology and Earth System Sciences*, n° 15, 2011, p. 311-322.
- LORENZO J., VICENTE S. M., LÓPEZ MORENO J. I., MORÁN E., ZABALZA J., « Recent Trends in Iberian Streamflows (1945-2005) », *Journal of Hydrology*, n° 414-415, 2012, p. 463-475.
- MAGDALENO F., FERNÁNDEZ J. A., « Hydromorphological Alteration of a Large Mediterranean River: Relative Role of High and Low Flows on the Evolution of Riparian Forests and Channel Morphology », *River Research and Applications*, n° 27, 2011, p. 374-387.
- MAGDALENO F., FERNÁNDEZ J. A., MERINO S., « The Ebro River in the 20th Century or the Ecomorphological Transformation of a Large and Dynamic Mediterranean Cannel », *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 37, 2012, p. 486-498.
- MALDONADO A., « El Delta del Ebro. Estudio sedimentológico y estratigráfico », *Boletín de Estratigrafía*, n° 1, 1972, p. 1-486.
- MALDONADO A., RIBA O., « El delta reciente del río Ebro : descripción y evolución », *Acta Geológica Hispánica*, n° 5, 1971, p. 131-138.
- MARTÍN VIDE J. P., FERRER-BOIX C., OLLERO A., « Incision Due to Gravel Mining: Modeling a Case Study from the Gállego River, Spain », *Geomorphology*, n° 117, 2010, p. 261-271.
- MARTÍNEZ-CLAVEL B., SEGURA-BELTRAN F., PARDO-PASCUAL J., GUILLÉN J., « Análisis de los cambios morfológicos en el delta sumergido del Ebro (1880-1992) », *Actas de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología*, 2016.
- MORA D., BALLARÍN D., MONTORIO R., ZÚÑIGA M., OLLERO A., DURÁN C., NAVARRO P., « Aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG en el territorio aragonés

- de la cuenca del Ebro », *Naturaleza Aragonesa*, n° 28, 2012, p. 35-42.
- OLLERO A., *Los meandros libres del Ebro medio (Logroño-La Zaida) : geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*, Tesis doctoral. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, 1992.
- OLLERO A., « Alteraciones geomorfológicas de los ríos en Europa y principios para la restauración de su dinámica », dans GONZÁLEZ DEL TÁNAGO M. (dir.), *Ríos y sostenibilidad. Semana temática « Agua para la vida »*, Tribuna del Agua de la Exposición Internacional Zaragoza, 2008.
- OLLERO A., « Channel Changes and Floodplain Management in the Meandering Middle Ebro River, Spain », *Geomorphology*, n° 117, 2010, p. 247-260.
- OLLERO A., « Los cauces fluviales como indicadores de cambio global : propuesta metodológica », *Zubía*, n° 23, 2011, p. 189-202.
- OLLERO A., IBISATE A., GRANADO D., REAL DE ASUA R., « Channel Responses to Global Change and Local Impacts: Perspectives and Tools for Floodplain Management (Ebro River and Tributaries, NE Spain) », dans HUDSON P. F., MIDDELKOOP H. (dir.), *Geomorphic Approaches to Integrated Floodplain Management of Lowland Fluvial Systems in North America and Europe*, Springer, 2015.
- OLLERO A., ACÍN V., GRANADO D., HORACIO J., IBISATE A., « Censo, tipología y puesta en valor de los cauces de gravas del Pirineo central y su piedemonte meridional », *Revista Geográfica del Sur*, n° 7, 2016, p. 10-25.
- PIÉGAY H., ALBER A., SLATER L., BOURDIN L., « Census and Typology of Braided Rivers in the French Alps », *Aquatic Sciences*, n° 71, 2009, p. 371-388.
- PLAN INTEGRAL DE PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO (PIPDE), http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/documentobase-final3_tcm7-29340.pdf, 2006.
- SÁNCHEZ-CHÓLIZ J., SARASA C., « River Flows in the Ebro Basin: A Century of Evolution, 1913-2013 », *Water*, n° 7, 2015, p. 3072-3082.
- SÁNCHEZ FABRE M., OLLERO A., « Agua y medio ambiente en España: diagnóstico y perspectivas de algunas líneas de acción », *Investigaciones Geográficas*, n° 51, 2010, p. 53-79.
- SANCHIS-IBOR C., SEGURA-BELTRAN F., « Spatial Variability of Channel Changes in a Mediterranean Ephemeral Stream in the Last Six Decades (1946-2006) », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 40, 2014, p. 89-118.
- SEGURA-BELTRAN F., SANCHIS-IBOR C., « Assessment of Channel Changes in a Mediterranean Ephemeral Stream Since the Early Twentieth Century. The Rambla de Cervera, Eastern Spain », *Geomorphology*, n° 201, 2013, p. 199-214.
- SERRANO-NOTIVOLI R., MORA D., OLLERO A., SÁNCHEZ FABRE M., SANZ P., SAZ M. A., « Floodplain Occupation and Flooding in the Central Pyrenees », *Cuadernos de Investigación Geográfica*, n° 43, 2017.
- SCORPIO V., ROSSKOPF C. M., « Channel Adjustments in a Mediterranean River over the Last 150 years in the Context of Anthropic and Natural Controls », *Geomorphology*, n° 275, 2016, p. 90-104.
- SOMOZA L., RODRÍGUEZ-SANTALLA I., « Geology and Geomorphological Evolution of the Ebro River Delta », dans *Landscapes and Landforms of Spain*, Springer, 2014.
- VALLS A., SEGURA-BELTRAN F., MARTÍNEZ-CLAVEL B., « El delta del Ebro a través de la cartografía histórica y la fotografía aérea: evolución morfológica de la llanura deltaica (1858-2012) », *Actas de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología*, 2016.
- ZARFL C., LUMSDON A. E., BERLEKAMP J., TYDECKS L., TOCKNER K., « A Global Boom in Hydropower Dam Construction », *Aquatic Sciences*, n° 77, 2015, p. 161-170.
- ZAWIEJSKA J., WYZGA B., « Twentieth-Century Channel Change on the Dunajec River, Southern Poland: Patterns, Causes and Controls », *Geomorphology*, n° 117, 2010, p. 234-246.

