Sculpted forms into bedrock channel: typology, spatial distribution and implications for channel dynamic. Insight from molassic knickpoints on the Middle Garonne (South-West France)

Hugo Jantzi, Jean-Michel Carozza, Jean-Luc Probst

▶ **To cite this version:**

Hugo Jantzi, Jean-Michel Carozza, Jean-Luc Probst. Sculpted forms into bedrock channel: typology, spatial distribution and implications for channel dynamic. Insight from molassic knickpoints on the Middle Garonne (South-West France). Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2020, 26 (2), pp.79-96. 10.4000/geomorphologie.14202 . hal-02999664

HAL Id: hal-02999664
https://hal.science/hal-02999664

Submitted on 10 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Géomorphologie : relief, processus, environnement
Articles sous presse

Les formes d'érosion en lit mineur rocheux : typologie, distribution spatiale et implications sur la dynamique du lit. Exemple à partir des seuils rocheux molassiques de la moyenne Garonne toulousaine (Sud-Ouest, France)

Sculpted forms into bedrock channel: typology, spatial distribution and implications for channel dynamic. Insight from molassic knickpoints on the Middle Garonne (South-West France)

Hugo Jantzi, Jean-Michel Carozza, Jean-Luc Probst, ECOLAB UMR 5245, Université de Toulouse, CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse INP, Avenue de l'Agrobiopole, 31326 Castanet-Tolosan and France.

OpenEdition Journals

Electronic version
URL: http://journals.openedition.org/geomorphologie/14202
ISSN: 1957-777X

Publisher
Groupe français de géomorphologie

Electronic reference
Hugo Jantzi, Jean-Michel Carozza, Jean-Luc Probst, ECOLAB UMR 5245, Université de Toulouse, CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse INP, Avenue de l'Agrobiopole, 31326 Castanet-Tolosan and France., « Les formes d'érosion en lit mineur rocheux : typologie, distribution spatiale et implications sur la dynamique du lit. Exemple à partir des seuils rocheux molassiques de la moyenne Garonne toulousaine (Sud-Ouest, France) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [Online], Articles sous presse, Online since 22 April 2020, connection on 22 April 2020. URL : http://journals.openedition.org/geomorphologie/14202

© Groupe français de géomorphologie

article sous presse

revue en ligne : https://journals.openedition.org/geomorphologie/

GÉOMORPHOLOGIE : RELIEF, PROCESSUS, ENVIRONNEMENT
vol. 26, n° 4 (2020), p. xxx-xxx
Mise en ligne le 22 avril 2020 sur journals.openedition.org
https://journals.openedition.org/geomorphologie/14202
DOI:10.4000/geomorphologie.14202
© 2020 GFG Editions - Tous droits réservés
http://edytem.univ-savoie.fr/gfg/

Les formes d'érosion en lit mineur rocheux : typologie, distribution spatiale et implications sur la dynamique du lit. Exemple à partir des seuils rocheux molassiques de la moyenne Garonne toulousaine (Sud-Ouest, France)

Sculpted forms into bedrock channel: typology, spatial distribution and implications for channel dynamic. Insight from molassic knickpoints on the Middle Garonne (South-West France)

Hugo Jantzi [a*], Jean-Michel Carozza [b], Jean-Luc Probst [c]

[a] GEODE UMR 5602, Université de Toulouse, CNRS, Université Jean Jaurès, 5 allée Antonio Machado, 31058 Toulouse, France.
[b] LIENSS UMR 7266, Université de la Rochelle, CNRS, 1 parvis Fernand-Braudel, 17042 La Rochelle, France.
[c] ECOLAB UMR 5245, Université de Toulouse, CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse INP, Avenue de l'Agrobiopole, 31326 Castanet-Tolosan, France.

RÉSUMÉ

Les seuils formés durant le siècle dernier dans le lit de la Garonne (SO France) présentent des formes sculptées allant de quelques centimètres à quelques mètres de large. L'analyse de ces formes, fondée sur des observations et des mesures de terrain, permet de produire *(i)* un inventaire de ces formes, *(ii)* une description morphométrique et une distribution statistique des trous d'eau – la forme d'érosion la plus commune, *(iii)* une analyse de la distribution spatiale et sa corrélation avec les conditions hydrodynamiques et *(iv)* de mettre ces éléments en corrélation avec la dynamique du chenal. Les résultats mettent en évidence une grande variété de morphologie et permettent de distinguer 52 types de formes d'érosion. Leur distribution spatiale montre une distribution agrégée qui peut être liée aux conditions hydro-géomorphologiques locales. Certaines formes étant associées à des processus d'érosion particuliers, un développement spatialement non uniforme des seuils a été observé. De plus, l'analyse morphométrique des trous d'eau révèle une forte corrélation linéaire entre le diamètre et la profondeur. Cette relation indique que ces formes s'approfondissent plus vite qu'elles ne s'élargissent et suggère également que le processus de coalescence est un facteur important dans la disparition de ces dernières. Ainsi, l'érosion des affleurements rocheux serait due non seulement à une incision du lit, mais aussi à un processus d'érosion latérale des formes amenant à leur fusion. Ceci est confirmé par les observations sur le terrain.

Mots clés : Garonne, chenal à fond rocheux, molasse, formes sculptées, distribution spatiale, seuil.

ABSTRACT

Knickpoints formed during the last century within the channel of the Garonne River (SW France) exhibit sculpted forms ranging from few centimeters to meters width. The analysis of these forms, based on field observations and measurement allows to produce (i) an inventory of these forms, (ii) a morphometric description and a statistical distribution of potholes – the most common landform, (iii) a spatial distribution analysis and its correlation to hydrodynamic sitting and (iv) to correlate these elements to channel dynamic. The results highlight a large range of sculpted forms morphology and allow distinguishing 52 types of erosional forms. Their spatial distribution shows an aggregated distribution that can be related to local hydro-geomorphological conditions. Some forms being associated with particular erosion processes, a spatially non-uniform development of knickpoints has been observed. Moreover, the morphometric analysis of the potholes reveals a strong linear correlation between diameter and depth. This relationship indicates that these forms deepen faster. This suggests that the coalescence process is an important factor for the removal of the potholes. Thereby, the erosion of bedrock outcrops would not only be due to an incision of the bed but also to a process of lateral erosion of the forms leading to their merging. This is confirmed by field observations.

Keywords: *Garonne River, bedrock channel, molassic soft rock, sculpted forms, spatial distribution, knickpoint.*

INFORMATION SUR L'ARTICLE
Article soumis le 24 septembre 2019.
Reçu sous sa forme révisée le 29 mars 2020.
Définitivement accepté le 3 avril 2020.

*Auteur correspondant. Tél : +33 (0)5 61 50 36 26
Courriels : hugo.jantzi@univ-tlse2.fr (H. Jantzi)
jean-michel.carozza@univ-lr.fr (J.-M.Carozza)
jean-luc.probst@ensat.fr (J.-L. Probst)

1. Introduction

Les rivières à fond rocheux sont caractérisées par une charge alluviale minimale et/ou transitoire dans un contexte où la capacité de transport des sédiments est excédentaire par rapport à la fourniture sédimentaire sur une période de temps long (Howard, 1994 ; Whipple et al., 2000). Ce type de rivières est présent dans différents contextes géodynamiques (baisse du niveau de base, surrection tectonique par faille ou plissement, etc.) et géomorphologiques (montagne, piémont, plaine). Dans le cas des rivières à fond rocheux de plaine, le rôle des impacts anthropiques dans la réduction des flux solides peut fréquemment être évoqué à l'image des rivières

Ropa en Pologne (Rinaldi et al., 2005), Semois en Belgique (Gob et al., 2005), Rambla de la Viuda en Espagne (Calle et al., 2017) ou encore Garonne en France (Jantzi et al., 2018a). Les extractions de granulats représentent la cause majeure de leur déficit sédimentaire. Fréquemment dans ce type de cours d'eau, les affleurements rocheux sont discontinus et peuvent prendre la forme de seuils ou de platiers rocheux. Ces formes, immergées une partie de l'année hydrologique, présentent alors un modelé d'érosion diversifié dont la taille peut varier entre quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres (Bradwell, 2005 ; Richardson et Carling, 2005). La formation et l'évolution de ces rivières répondent à une combinaison de facteurs liés à l'hydraulique (type d'écoulement, etc.), à la lithologie (nature de la roche, organisation et homogénéité/hétérogénéité, pendage, présence de failles, etc.) et aux processus d'érosion et d'altération (mécanique, biologique et chimique) (Whol, 1998 ; Hall et al., 2012 ; Inoue et al., 2017 ; Gomez-Heras et al., 2019). Les mécanismes d'érosion façonnant la morphologie des rivières à fond rocheux au travers de formes d'érosion ont été déclinés en six types qui sont (Hancock et al., 1998 ; Whipple et al., 2000 ; Richardson et Carling, 2005) :

- l'abrasion (*i.e., abrasion*) produit une usure de la surface et une perte de matière sous l'impact de sédiments en mouvement transportés par charriage et/ou en saltation.
- l'arrachage (*i.e., plucking*) entraîne le soulèvement puis le glissement de blocs délimités par des fractures ou diaclases dans la roche ou l'écaillage de roche saine.
- la cavitation (*i.e., cavitation*) peut produire une onde de choc liée à la formation de bulles de vapeur dans un fluide lorsque la pression du fluide chute localement en dessous de la pression de vapeur. Elle est susceptible de provoquer un éclatement de la roche.
- la dissolution (*i.e., dissolution*) concerne prioritairement des roches solubles, en premier lieu les carbonates, sous l'effet de l'acidité de l'eau. Ce processus peut affecter de manière plus marginale d'autres roches (dissolution de la silice par exemple).
- le calage hydraulique (*i.e., hydraulic wedging*) contribue à l'ouverture de fractures préexistantes par des particules sédimentaires faisant office de coin (sables, graviers, galets). Les fissures vont alors s'ouvrir progressivement sous l'effet de la pression du fluide sur les particules contribuant ainsi à disloquer la roche en plusieurs blocs.
- l'altération mécanique (*i.e., physical weathering*) entraînant un affaiblissement physique de la roche avec la propagation de fissures et sa désagrégation par différents processus de fragmentation (thermoclastie, hydroclastie) favorisant son érosion par les processus cités aux points précédents. Les roches stratifiées sont généralement particulièrement sensibles à ce type de mécanisme.

À ces différents mécanismes il faut rajouter le rôle de la végétation qui peut s'installer temporairement (quelques mois à quelques années) mais aussi le rôle des biofilms et des alternances humectation/dessiccation qui ont fait jusqu'à présent l'objet de peu de travail (Seiffert et al., 2016 ; Wieler et al., 2019).

Parmi ces différents processus d'érosion, l'abrasion et l'écaillage sont considérés comme les plus importants avec pour le premier une prédominance pour les roches fracturées présentant des discontinuités et pour le second une prédominance dans les roches massives faiblement fracturées (Hancock et al., 1998 ; Whipple et al., 2000 ; Chatanantavet et Parker, 2009 ; Lamb et Fonstad, 2010). Les processus de dissolution et de météorisation ont été peu étudiés mais peuvent représenter des facteurs importants d'érosion (Büdel, 1982 ; Lamb et Fonstad, 2010 ; Pelletier et Baker, 2011). La dégradation de la molasse par dissolution en moyenne Garonne a fait l'objet d'une analyse et a montré que le processus contribuait de manière significative à l'érosion des seuils rocheux (Jantzi, 2018). Quant au processus de cavitation, sa contribution dans l'érosion des formes, si elle apparaît comme probable, ne saurait être précisé en raison d'un manque d'étude à ce sujet et des difficultés à observer ce type de processus *in situ* (Whipple et al., 2000 ; Carling et al., 2009).

Les formes d'érosion observées dans les lits mineurs des rivières à fond rocheux sont d'une très grande diversité et ont fait l'objet de travaux visant à construire une typologie à partir d'approches morphométriques (Allen, 1971 ; Richardson et Carling, 2005). Les trous d'eau représentent l'une des formes les plus répandues, communément observées et qui ont retenu l'attention (Alexander, 1932 ; Allen, 1982 ; Zen et Prestegaard, 1994 ; Lorenc et al., 1994 ; Richardson et Carling, 2005 ; Springer et al., 2005, 2006 ; Ortega et al., 2014 ; Lima et Binda, 2015 ; Pelletier et al., 2015). Il s'agit de formes en creux cylindriques ou hémisphériques, pouvant mesurer de quelques centimètres à plusieurs mètres de diamètre et de profondeur (Whipple et al., 2000 ; Springer et al., 2005). Elles se développent aussi bien dans des substrats tendres comme l'argile ou résistants comme le granite. Les processus érosifs à l'origine des trous d'eau ne sont pas complètement compris à ce jour, mais les mécanismes d'arrachage, d'abrasion et de cavitation contribueraient au façonnement de ces formes (Hancock et al., 1998 ; Sklar et Dietrich, 1998 ; Dubinski et Wohl, 2013). L'abrasion est cependant mise en avant comme le principal processus de leur formation (Hancock et al., 1998 ; Whipple et al., 2000). Le trou d'eau se développe par érosion de sa paroi et de son fond sous l'effet du déplacement de sédiments piégés à l'intérieur (sables, graviers ou galets). Ces derniers entraînés par un écoulement tourbillonnant, vont abraser la roche et/ou arracher des fragments par leur impact (Springer et al., 2005). Si le charriage fin et grossier est perçu comme étant en grande partie responsable de la croissance des trous d'eau, Whipple et al. (2000) ont montré que l'abrasion par les sédiments en suspension pouvait également jouer un rôle important dans leur développement. Ces formes sont ainsi caractéristiques des rivières à haute énergie (Wohl, 1993 ; Montgomery et al., 1996 ; Whipple et al., 2000).

L'existence de ces formes pose plusieurs questions d'intérêt pour la compréhension des phénomènes d'évolution des chenaux fluviaux : *(i)* quel est leur rôle dans le processus général d'incision du chenal à fond rocheux ? *(ii)* à quelle vitesse et sur quelle durée se développent-elles ? *(iii)* les différents types de formes sont-elles ubiquistes, uniquement influencées par la lithologie ou sont-elles organisées spatialement en réponse à la variabilité des conditions d'écoulement, ce qui permettrait de les considérer comme des indicateurs du fonctionnement et de l'évolution du chenal.

Leur étude peut permettre d'identifier d'une part l'organisation des écoulements et d'autre part les processus d'érosion intervenant dans l'évolution des lits fluviaux rocheux et notamment des seuils rocheux. Pour cela, l'analyse morphométrique des formes est une

article sous presse

étape importante afin de définir leur origine (Gomez-Heras et al., 2019). Elle représente le principal outil permettant de discriminer les formes, dont la diversité et la complexité sont liées à de multiples facteurs (caractéristiques hydrauliques de l'écoulement, lithologie de la roche, présence de fractures, etc.). Dans ce travail, nous proposons d'étudier les formes d'érosion développées sur un substrat de type molassique en moyenne Garonne. À ce jour, peu de travaux ont été menés sur des roches sédimentaires stratifiées comme les molasses.

2. Contexte des sites d'étude

La Garonne est un fleuve situé dans le sud-ouest de la France drainant un bassin versant de 56 000 km² (fig. 1). Les trois sites d'études (Portet-sur-Garonne, Beauzelle et Grenade) se situent dans la partie médiane de la Garonne, entre la confluence avec l'Ariège à Portet-sur-Garonne en amont et la confluence avec le Tarn à Moissac en aval, soit un linéaire d'environ 80 km (fig. 1). Sa surface drainée est de 15 700 km² (soit 28 % du bassin versant de la Garonne) pour une pente moyenne de 0,9 m.km^{-1} et une puissance spécifique moyenne estimée à 70 W.m^{-2} (tab. 1) (Steiger et al., 2000). Le cours d'eau présente sur ce tronçon un régime hydrologique de type pluvio-nival (Pardé, 1928 ; Lambert, 1989). Le débit moyen annuel est de 190 m^3.s^{-1} à Portet-sur-Garonne (Banque Hydro) et l'année hydrologique se caractérise par des basses eaux de juillet à décembre et des hautes eaux de janvier à juin, période durant laquelle se produit l'essentiel des crues.

Les sites, caractérisés par la présence de seuils rocheux, s'inscrivent dans la plaine holocène (David et al., 2016) large de quelques kilomètres où le chenal s'est incisé dans un substratum sédimentaire molassique de type fluvio-lacustre (Mouline, 1989 ; David et al., 2015). Ce dernier est issu de l'érosion de la chaîne

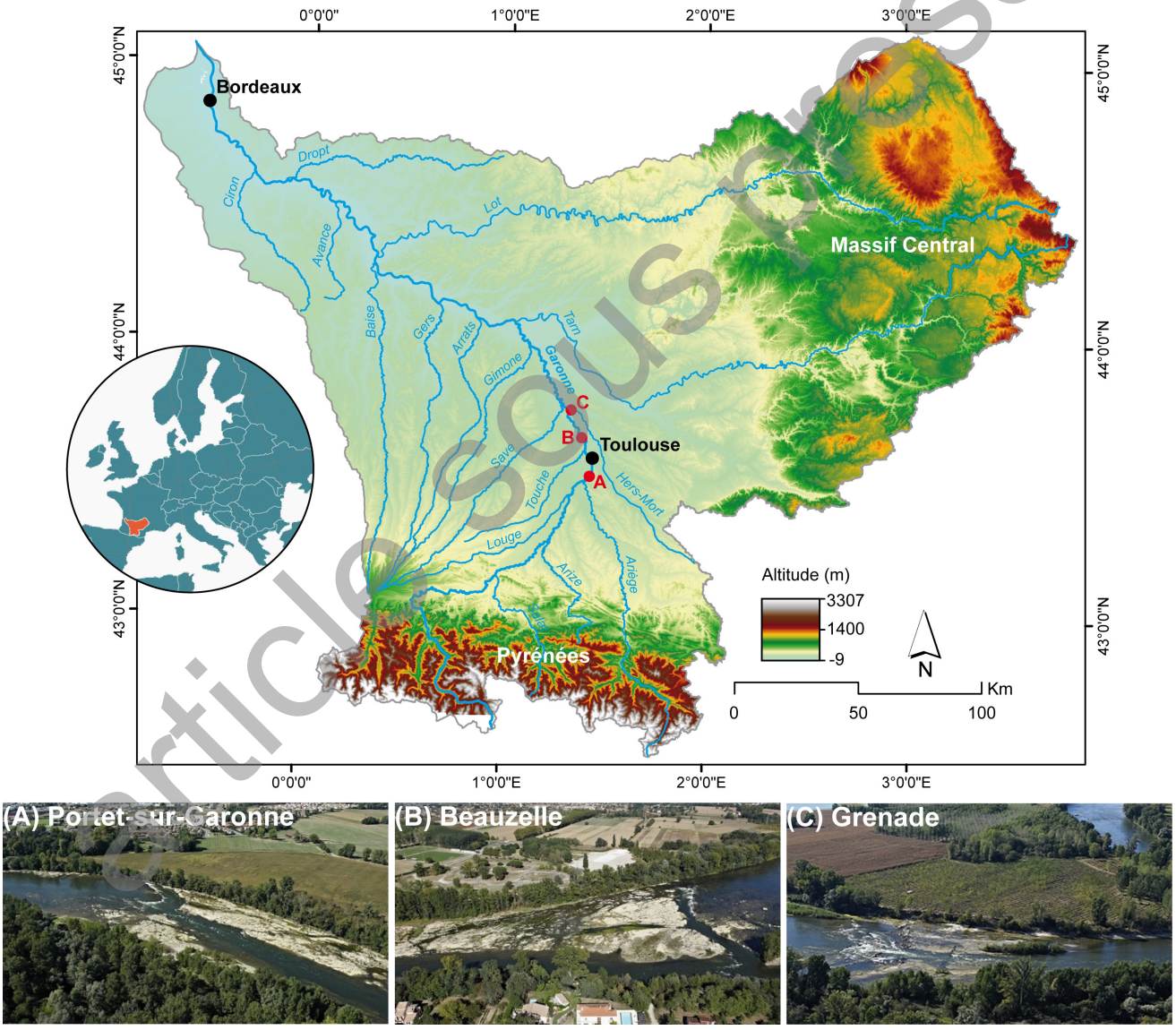

Fig. 1 – Carte de localisation des sites d'études.
BD Alti IGN, Photos SMEAG.

Fig. 1 – Location map of the three study sites.
BD Alti IGN, Photos SMEAG.

article sous presse

des Pyrénées. Cette formation molassique, datée entre l'Oligocène et le Miocène, est constituée de marnes et d'argiles plus ou moins sableuse où s'intercalent localement des bancs calcaires indurés (Sunyach, 1984). Cette différence de dureté entre strates, induit une érosion différentielle créant un étagement en paliers des seuils rocheux. En périodes d'étiage, ces derniers peuvent couvrir une surface de plusieurs hectares et engendrer une rupture de pente de plus de 2 m.

Ces formes ont évolué rapidement au cours de la seconde moitié du 20e siècle, essentiellement sous l'effet d'interventions anthropiques dans le lit mineur entre les années 1960 et 1980. La mise en place de barrages hydro-électriques en amont, d'ouvrages de fixation du chenal (digues, enrochements, etc.), ainsi que les extractions de granulats, ont contribué au tarissement des apports solides et à un déficit sédimentaire en moyenne Garonne. Cela s'est traduit par un enfoncement moyen du lit de 1 m avec des valeurs pouvant atteindre localement 2,7 m (Jantzi et al., 2017a ; Jantzi, 2018). Parmi ces activités, les extractions qui ont eu lieu sur chacun des sites, représentent le principal facteur d'apparition des seuils rocheux. Ces dernières, ont entrainé un décapage de la charge alluviale par érosion régressive, laissant apparaître des affleurements molassiques. Les processus d'incision changent alors de nature et passent de l'évacuation des alluvions à l'érosion du substratum. Dans le cas du seuil de Beauzelle, l'incision a atteint 2,8 m en moyenne et jusqu'à 4,5 m localement.

Tab. 1 – Caractéristiques géomorphologiques des sites d'études.
Tab. 1 – Geomorphological settings of the study sites.

	Moyenne Garonne	Portet	Beauzelle	Grenade
L (km)	≈ 93	≈ 500	≈ 500	≈ 320
W_m (m)	150	170	135	146
SI	1.31	1.11	1.09	1.55
Z_m (m)	4	-	-	-
S_m (m.km^{-1})	0.9	1.8	2.0	1.4
Ω (W.m^{-2})	68	163	264	282

L : longueur du chenal, W_m : largeur moyenne du chenal, SI : sinuosité, Z_m : profondeur moyenne du chenal, S_m : pente moyenne du chenal, Ω : puissance spécifique.

L: channel length, W_m: mean channel width, SI: sinuosity, Z_m: mean channel depth, S_m: mean channel slope, Ω: specific stream power.

3. Méthodologie

3.1. Inventaire des formes d'érosion

Un inventaire des formes d'érosion pour chaque site a été effectué en 2017 afin d'établir une typologie de ces dernières. Les relevés ont été réalisés au mois de juillet c'est à dire en étiage, afin de permettre la prospection des surfaces les plus étendues possibles. Environ 800 formes ont été relevées à partir d'un échantillonnage systématique. La méthode a consisté en un relevé des formes le long de transects perpendiculaires à l'axe du chenal et matérialisés par un fil tendu tous les 10 m. Chaque forme intersectée a fait l'objet d'une série de relevés qui comporte *(i)* sa localisation (x, y, z) par dGPS (*Trimble Geo 7X* ± 1 cm en X et Y), *(ii)* son orientation (azimut, mesuré à la boussole à bain d'huile *Chaix*), *(iii)* la présence de fissures et leur orientation, *(iv)* la présence de particules (galets, graviers et sables) et la mesure de leur largeur (axe b), *(v)* sa géométrie (largeur, longueur, profondeur), et *(vi)* son rattachement à un type de formes sur la base de la typologie de Richardson et Carling (2005) qui, dans certains cas, a été précisée et/ou adaptée ultérieurement à partir de photographies prises lors des relevés.

3.2. Analyse spatiale de la distribution des formes d'érosion

La localisation des formes d'érosion relevées par dGPS a été intégrée dans un SIG (sous ArcGis) afin de permettre une analyse de leur répartition spatiale. Dans un premier temps, une approche descriptive a été adoptée à partir d'une analyse cartographique de la répartition des différents types de formes permettant de rendre compte du contexte hydro-géomorphologique dans lequel elles s'inscrivent. Dans un second temps, une approche quantitative de la répartition des formes a été adoptée. Une première analyse a consisté en un calcul de densité par noyau (*kernel*) permettant de produire une cartographie des densités de formes.

En complément, une analyse par quadrats a permis une cartographie des densités sous la forme d'un maillage et de déterminer le type de distribution spatiale des formes (aléatoire, agrégative, homogène). Les sites d'étude ont été découpés selon un maillage carré régulier (10 m x 10 m) pour dénombrer les formes et déterminer leur répartition. Le mode de distribution est appréhendé par un test d'hypothèse (H_o) consistant à comparer une distribution observée avec une distribution théorique correspondant à une hypothèse selon laquelle la répartition des individus est le résultat d'un processus particulier (Taylor, 1977). Dans le cas présent, il s'agit de comparer la distribution observée par rapport à une distribution aléatoire (distribution de Poisson, hypothèse H_o) pour laquelle la distribution observée est le résultat d'un processus stochastique. Si H_o est rejetée, il peut être admis que la distribution présente une tendance significative à l'agrégation et/ou à la dispersion des individus.

Le type de distribution spatiale a été déterminé à partir de l'indice de dispersion (I_D) et l'indice de Morisita (I_M), qui sont calculés de la manière suivante :

$$I_D = S^2\text{-m} \quad [1]$$

$$I_M = k\left(\frac{\sum_{i=1}^{\kappa} 1^{x^2} - \sum_{i=1}^{\kappa} 1^{x}}{\left(\sum_{i=1}^{k} 1^{[x^2)]} - \sum_{i=1}^{k} 1^{x}\right)}\right) \quad [2]$$

où :

- s^2 correspond à la variance de la densité,
- m à la densité moyenne d'individus par maille,
- k au nombre total de mailles,
- $\sum_{i=1}^{k} x$ à la somme des individus par quadrat,
- $\sum_{i=1}^{k} x^2$ à la somme des carrés des individus par quadrat.

Pour les deux indices, la distribution est considérée comme aléatoire si le résultat est égal à 1, régulière s'il est inférieur à 1 ou agrégative s'il est supérieur à 1. Afin de valider les résultats des indices I_D et I_M et pouvoir rejeter H_o, le test du *Chi-2* (X^2) et le test Z ont été réalisés.

article sous presse

3.3. Caractérisation géomorphométrique des trous d'eau

Les trous d'eau étant la forme la plus commune et la mieux définie sur le terrain, une analyse statistique de leurs caractéristiques géométriques a été réalisée. La taille et la forme des trous d'eau échantillonnés étant diversifiées (Jantzi, 2018), seuls les trous d'eau simples et individuels (sans structure secondaire et lien avec des formes voisines), avec une ouverture circulaire ou elliptique et dont la surface interne est relativement lisse, ont été sélectionnés pour cette analyse (fig. 2).

Afin d'obtenir un jeu de données plus conséquent que celui obtenu par l'échantillonnage systématique, un échantillonnage exhaustif ciblé sur ce type de formes a été réalisé en complément. Toutefois pour cette analyse, seuls les sites de Portet-sur-Garonne et Grenade sont pris en compte en raison d'un nombre de formes insuffisant sur le site de Beauzelle pour obtenir un résultat significatif.

La caractérisation géométrique de chaque trou d'eau a été réalisée à partir de la mesure du diamètre d'ouverture sur deux axes perpendiculaires D_1 et D_2, puis de la profondeur Z. A partir de ces mesures, plusieurs indicateurs ont été calculés qui sont *(i)* le rapport d'aspect d'ouverture ($Ro = D_1/D_2$), *(ii)* le diamètre moyen d'ouverture (D), et *(iii)* le rapport diamètre-profondeur ($Y = D/Z$) qui forme une relation indépendante de l'échelle spatiale (Pelletier et al., 2015). Ce rapport permet de caractériser en première approche la dynamique

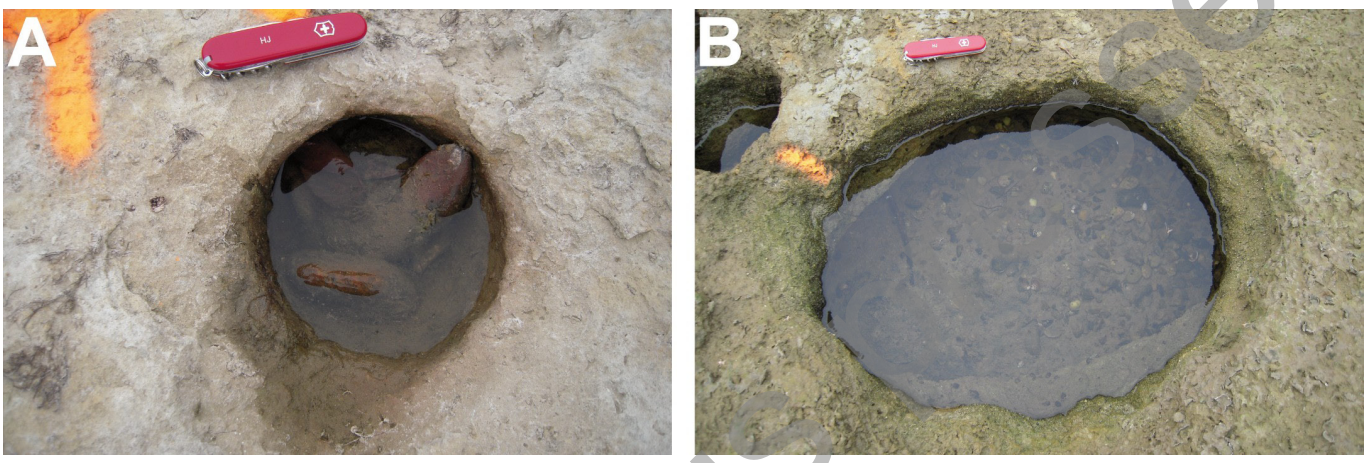

Fig. 2 – Exemple d'un trou d'eau circulaire (A) et d'un trou d'eau elliptique (B).
Notez la présence de galets (A) et de sables grossiers (B) dans le fond des trous d'eau.

Fig. 2 – Example of circular pothole (A) and elliptical pothole (B).
Note the presence of pebbles (A) and coarse sand (B) in the bottom of potholes.

des trous d'eau (Abbott et Pottratz, 1969). La profondeur mesurée correspond à la profondeur maximale de la forme après l'avoir vidée des sédiments. La mesure de l'axe b de tous les sédiments présents dans les trous d'eau étant impossible, seule la plus grosse particule a été mesurée pour chaque forme contenant des sédiments.

4. Résultats

4.1. Typologie des formes d'érosion

Si le nombre de formes échantillonnées entre Portet-sur-Garonne (nb = 370) et Grenade (nb = 356) est quasi-similaire, l'échantillon pour Beauzelle est bien moins important (nb = 86). Ce nombre relativement faible s'explique : *(i)* par une surface d'affleurement rocheux bien moins importante par rapport aux autres sites, et *(ii)* par une quantité importante d'algues dans les zones immergées rendant les formes difficiles à identifier. Cependant, les densités de formes entre sites sont similaires avec 0,03 formes par mètre carré à Portet-sur-Garonne et Grenade et 0,02 formes par mètre carré à Beauzelle. Il existe également une hétérogénéité de la présence des formes entre les seuils. En effet certaines formes, comme les trous d'eau et les sillons sont faiblement représentées à Beauzelle.

L'inventaire par échantillonnage systématique a permis d'identifier sept groupes de formes qui sont (fig. 3A) :

- *les trous d'eau*, qui correspondent à une dépression généralement fermée, de forme circulaire ou elliptique en plan, à paroi plus ou moins verticale (Richardson et Carling, 2005). Le diamètre et la profondeur peuvent aller de quelques centimètres à 50 cm environ.
- *les sillons longitudinaux*, qui sont des formes allongées et orientées parallèlement à la direction de l'écoulement local et de manière plus générale à celle du chenal (Richardson et Carling, 2005).
- *les flûtes*, qui se caractérisent par un aspect en plan parabolique (Allen, 1971). La partie supérieure (amont) présente généralement un profil concave à forte pente tandis que la partie inférieure (aval) présente une pente plus douce, la profondeur étant plus importante près de l'extrémité amont (Richardson et Carling, 2005). Leur bordure est marquée en zone proximale (extrémité amont), soit de manière arrondie ou angulaire, pour s'effacer vers l'aval et se confondre avec la surface générale (Richardson et Carling, 2005). Leur profondeur peut atteindre une dizaine de centimètres pour une longueur et une largeur n'excédant pas 50 cm.
- *les flaques*, qui correspondent à une dépression peu marquée de faible profondeur, inférieure à 10 cm, avec une forme en plan variée (elliptique, allongée, multilobée, etc.). Le fond est relativement plat et les bords sont peu marqués, en pente douce et fuyant de profil convexe. Leur taille est variable avec des dimensions allant de plusieurs dizaines de centimètres à

article sous presse

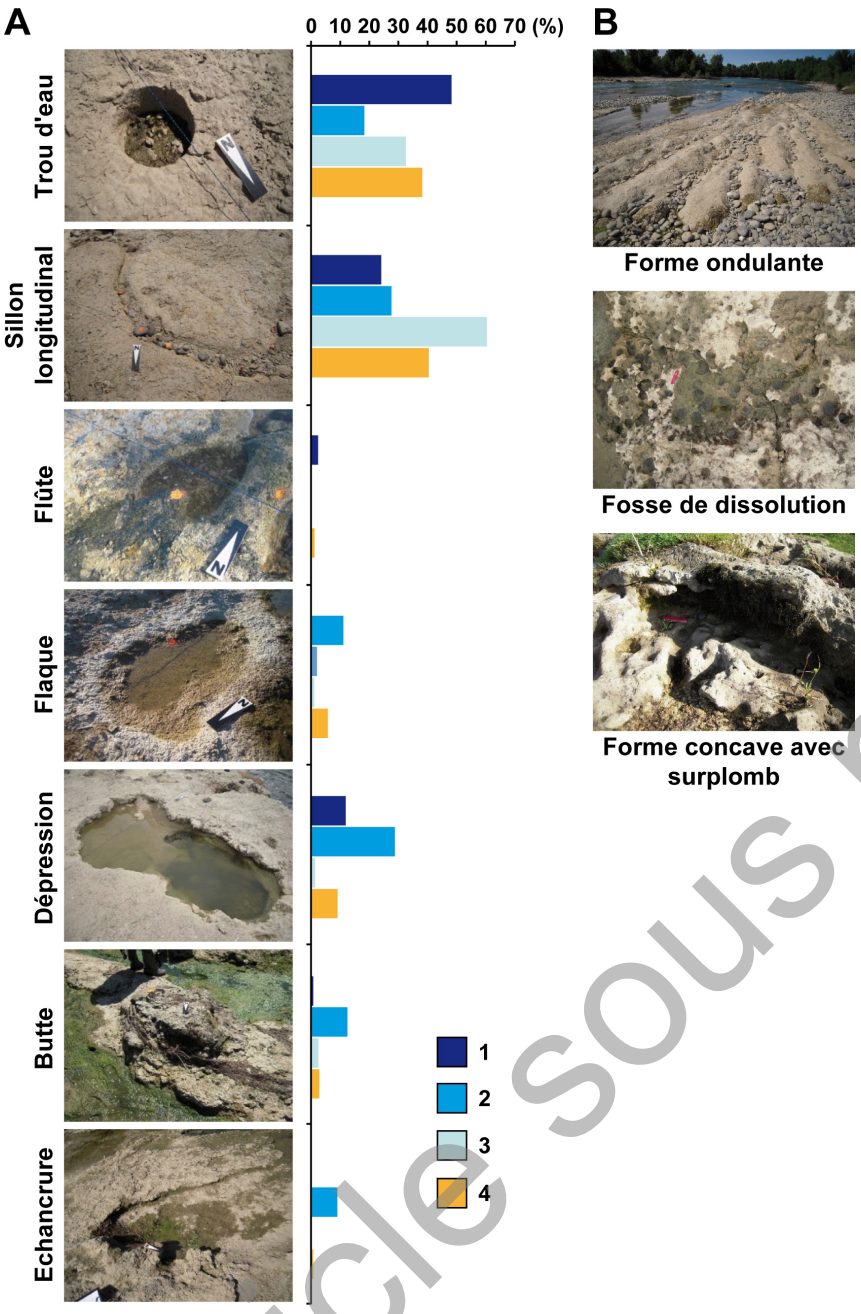

Fig. 3 – A : Effectif et distribution des formes d'érosion pour chaque groupe identifié par échantillonnage systématique. B : Groupes de formes identifiés par échantillonnage aléatoire.

1. Portet-sur-Garonne (nb = 369) ; 2. Beauzelle (nb = 86) ; 3. Grenade (nb = 356) ; 4. Total (nb = 811).

Fig. 3 – A: Number and distribution of bedforms for each group identified by systematic sampling. B: Groups of bedforms identified by random sampling.

1. Portet-sur-Garonne (#369); 2. Beauzelle (#86); 3. Grenade (#356); 4. Total (#811).

quelques mètres.

- *les dépressions*, qui sont des formes marquées de profondeur supérieure à 10 cm et pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres. La forme en plan présente un aspect varié (elliptique, allongée, multilobée, etc.). Leur fond peut être plat mais également constitué de formes secondaires (trou d'eau, sillon) et se caractérise par des bords arrondis ou vifs bien marqués, de profil concave avec des parois abruptes. Leur dimension peut aller de quelques décimètres à plusieurs mètres.
- *les échancrures*, qui s'apparentent à un renfoncement le long d'un rebord d'érosion et dont la forme, en V ou en U, en plan peut être large ou étroite avec des dimensions variables allant de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres en largeur et en longueur. La partie amont de la forme se caractérise par une rupture de pente marquée, au profil concave, et des bords pouvant être arrondis ou vifs avec des parois abruptes. Le plus souvent, les échancrures s'observent dans le sens de l'écoulement (ouverture vers l'aval) mais peuvent également se développer à contre-sens de ce dernier (ouverture vers l'amont).
- *les buttes*, sont des reliefs positifs qui se caractérisent généralement par une surface arrondie et plus ou moins lisse avec des dimensions en largeur et en longueur d'ordre métrique à plurimétrique ainsi qu'une hauteur pouvant être de plusieurs dizaines de centimètres. Elles sont la relique d'un ancien niveau pour lequel l'intensité de l'érosion est moins importante en raison d'un différentiel de dureté entre une couche supérieure indurée (encroûtement calcaire) et une couche inférieure plus tendre (marno-sableuse).

article sous presse

À cela s'ajoute trois autres groupes identifiés à partir de l'échantillonnage aléatoire mais qui n'ont pas été intégrés dans l'analyse quantitative (fig. 3B) :

- *les formes ondulantes*, qui correspondent à des surfaces d'aspect bosselé, relativement arrondies et lisses, avec une orientation longitudinale dans le sens de l'écoulement principal ou non-directionnelle. Elles s'observent en groupe et essentiellement à proximité du chenal principal avec des dimensions variables allant de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres.
- *les fosses de dissolution*, qui sont de petites dépressions d'aspect varié (circulaire, allongé, irrégulier). La taille des formes peut aller de quelques millimètres à plusieurs décimètres. Elles peuvent être isolées, en groupes ou agglomérées par la fusion de plusieurs formes.
- *les formes concaves avec surplomb*, qui s'inscrivent sur un plan vertical ou approchant et forment un surplomb. Elles peuvent être profondes avec un surplomb horizontal de la paroi supérieure ou moins profondes avec un surplomb courbé entre la paroi supérieure et la paroi du fond de la forme.

Ces 10 groupes de formes peuvent se décliner en 52 sous-groupes de formes différentes. Le détail de la présentation des groupes et sous-groupes est décrit par Jantzi (2018). Pour l'ensemble des sites, les trous d'eau et les sillons sont les formes les plus présentes avec respectivement 38 % et 41 % du total. Les flaques et les dépressions représentent respectivement 6 % et 9 %, tandis que les autres catégories (flûtes, échancrures et buttes) représentent 6 % (fig. 3A).

La comparaison inter-sites met en évidence une variabilité dans la répartition de ces formes (fig. 3A). Les sillons, par exemple, forment le groupe le plus présent sur le site de Grenade avec 61 % tandis qu'à Portet-sur-Garonne et Beauzelle, leur part est deux fois moins importante. A l'inverse, les trous d'eau sont plus fréquents à Portet-sur-Garonne avec 49 % contre 33 % à Grenade et deux fois moins à Beauzelle. Ces variations entre groupes et sites sont interprétées comme le résultat des variations dans les faciès sédimentaires de la molasse et des conditions d'affleurement du substratum d'une part, et des conditions d'érosion d'autre part, mais sans qu'il soit possible de déterminer l'importance respective de chaque facteur.

4.2. Distribution spatiale des formes d'érosion

L'approche descriptive par analyse cartographique de la répartition des types de formes met en évidence : *(i)* une localisation préférentielle selon les formes en lien avec les conditions hydro-

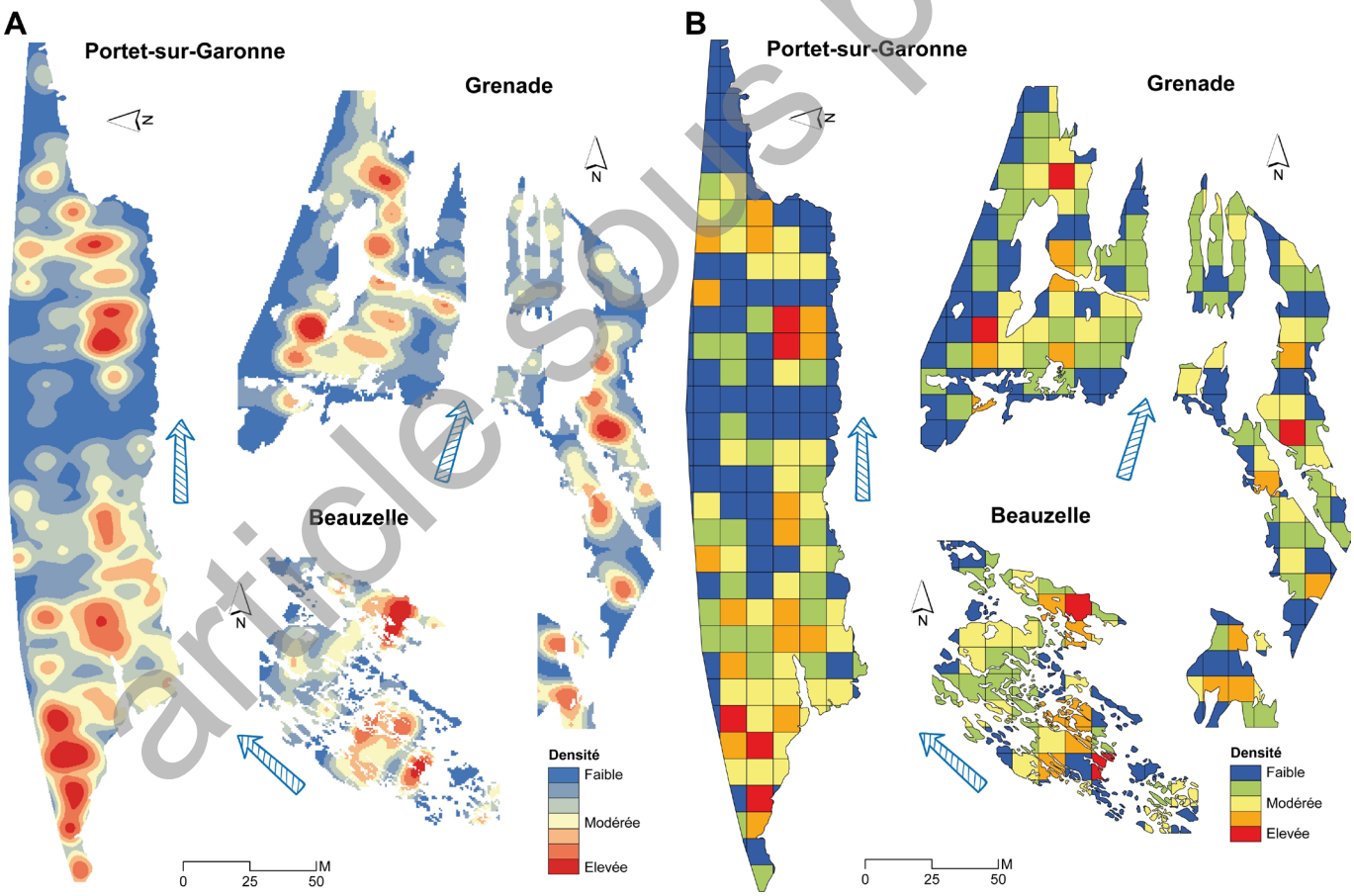

Fig. 4 – Méthodes de détection et cartographie des formes d'érosion.

A : Carte de densité obtenue par la méthode du noyau avec un rayon d'analyse de 15 m. B : Carte de densité obtenue par la méthode des quadrats avec un maillage de 10 m. La flèche bleue représente la direction de l'écoulement principal.

Fig. 4 – Methods of detection and mapping of erosional forms.

A: Density map obtained by the kernel method with an analysis radius of 15 m. B: Density map obtained by quadrat method with a grid size of 10 m. The blue arrow represents the direction of the main flow.

article sous presse

géomorphologiques dans lesquelles elles s'inscrivent ; *(ii)* les secteurs où se produisent les processus d'érosion dominant qui interviennent dans l'évolution des seuils. Il est ainsi possible de distinguer les observations générales suivantes.

Les *trous d'eau* se présentent généralement dans des zones de convergence d'écoulements et/ou dans des secteurs où le relief présente des irrégularités marquées par une rugosité importante favorable à la formation de courants turbulents. La présence de sédiments dans ces cavités est également courante. Ainsi, il peut être suggéré que les trous d'eau sont entretenus principalement par l'action de flux tourbillonnants, leur morphologie favorisant le phénomène, et par l'abrasion.

Les *sillons* se localisent majoritairement près d'un écoulement secondaire. C'est le cas notamment pour le site de Portet-sur-Garonne et Grenade. Ces formes ont pour effet, à faible niveau d'eau, de canaliser l'écoulement avec une hauteur d'eau plus importante et une vitesse plus élevée par rapport à l'écoulement sur les surfaces adjacentes, accentuant l'effet érosif de l'écoulement. Par ailleurs, les sillons s'accompagnent très fréquemment de sédiments grossiers suggérant également une érosion par abrasion.

Les *flaques et dépressions* sont essentiellement localisées dans les secteurs au relief faiblement disséquée, où de l'eau stagnante est présente régulièrement. Par ailleurs, on note une absence de piégeage sédimentaire dans le cas des flaques. De forme étalée, à la surface peu rugueuse et de faible profondeur, les flaques semblent se développer essentiellement sous l'effet de la dissolution. Il peut en être de même pour les dépressions, qui semblent correspondre à un stade d'évolution plus avancé de flaques.

Les *échancrures* sont principalement observées sur les rebords d'érosion qui correspondent à des ruptures de pentes abruptes, à l'interface entre deux niveaux pouvant être une alternance entre un faciès dur et tendre. Les échancrures se forment généralement dans le sens de l'écoulement et peuvent traduire un processus d'érosion régressive, notamment sur le site de Beauzelle.

Les résultats de l'approche quantitative illustrés par les cartes de densités, obtenues par la méthode des noyaux (fig. 4A), mettent en évidence une distribution hétérogène avec des secteurs à la densité contrastée pour chacun des sites. Cette observation est également confirmée par les densités issues de la méthode des quadrats (fig. 4B). Globalement, la répartition des formes répond aux observations suivantes.

À Portet-sur-Garonne (fig. 4-5A), trois secteurs sont identifiés. Un secteur amont qui présente une densité de formes élevée à modérée, avec des concentrations plus fortes observées principalement en première moitié de zone et en bordure de berge. Dans la partie centrale, les densités les plus fortes sont observées en bord de chenal, tandis qu'en bord de berge la densité est plus faible avec quelques zones à la densité modérée mais très localisée. Il est à noter la présence d'une bande transversale au centre du secteur sur toute sa largeur, dont la densité est faible. Le troisième secteur (en aval), se caractérise par une première moitié amont à la densité élevée à modérée. A l'inverse, la seconde moitié du secteur, présente une densité faible.

À Beauzelle (fig. 4-5B), trois secteurs peuvent également être distingués. En amont, la densité est faible avec quelques zones à densité modérée en partie supérieure du secteur. En partie centrale, la densité élevée à modérée peut s'expliquer par la proximité du

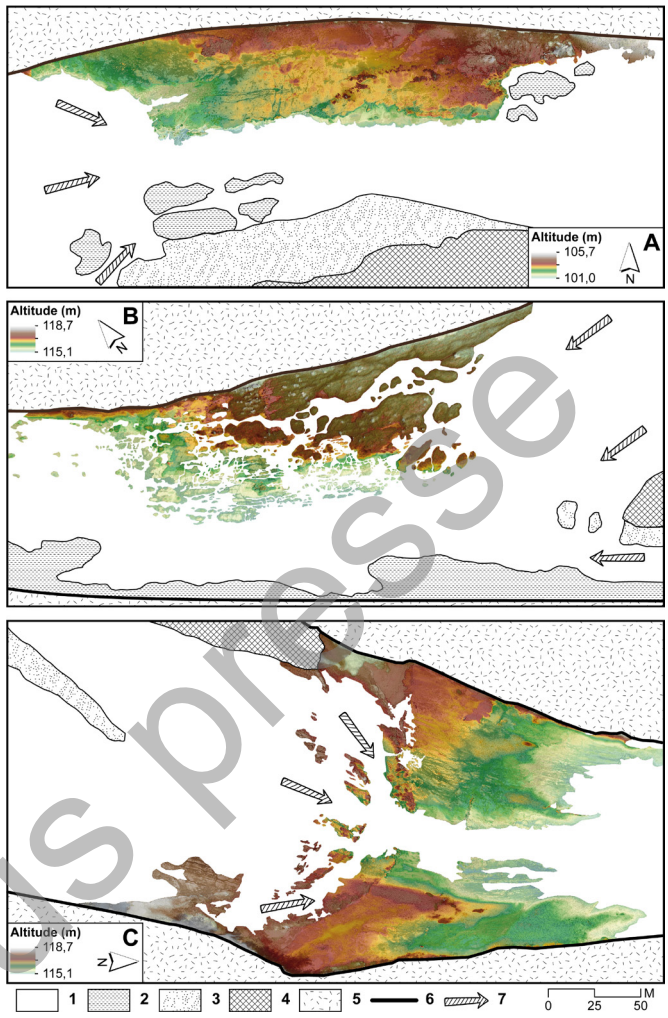

Fig. 5 – Croquis des principales unités géomorphologiques et MNT des seuils à Portet-sur-Garonne (A), Beauzelle (B) et Grenade (C).

1. Chenal ; 2. Affleurements rocheux ; 3. Bancs de galets ; 4. Bancs végétalisés ; 5. Terrasse holocène ; 6. Talus (h ≥ 4 m) ; 7. Sens d'écoulement.

Fig. 5 – Diagram of the main geomorphological units and DEM of the knickpoints at Portet-sur-Garonne (A), Beauzelle (B) and Grenade (C).

1. Channel; 2. Bedrock outcrops; 3. Gravel bars; 4. Vegetated bars; 5. Holocene terrace; 6. Embankment (h ≥ 4 m); 7. Flow direction.

chenal principal d'écoulement et la situation en dévers induisant des vitesses d'écoulement plus élevées. En aval, la densité est modérée avec néanmoins en bordure de berge une présence assez élevée de formes qui peut s'expliquer par la topographie irrégulière et marquée induisant localement un écoulement turbulent. Comme pour Portet-sur-Garonne, les secteurs à densité élevée correspondent à une proximité au chenal d'écoulement et à des altitudes plus faibles. En plus d'une durée d'immersion plus importante lors de hautes eaux, les contraintes hydrauliques (hauteur d'eau et vitesse) y sont plus importantes. De plus, la partie centrale se trouve à un point de convergence d'écoulements de directions différentes.

À Grenade (fig. 4-5C), le seuil se présente en deux parties distinctes séparées par un chenal d'écoulement. En rive gauche, le secteur en bord de berge présente une densité faible notamment en amont qui peut s'expliquer par son éloignement au chenal d'écoulement, par une altitude plus élevée, suggérant des contraintes hydrauliques moins importantes, et par la présence de végétation en amont

article sous presse

	Portet-sur-Garonne		Beauzelle		Grenade	
	I_D	I_M	I_D	I_M	I_D	I_M
D_m (m)	2.51	-	2.48	-	2.17	-
s^2	9.34	-	4.25	-	9.00	-
Index	3.72	2.08	1.72	1.29	4.14	2,44
d.d.l.	12	12	8	8	15	15
X^2	5.76×10^3	653.99	33.7	84.06	1.32×10^7	918.75
$p < 0.05$	21.03	21.03	15.51	15.51	25	25
Z_D	4.54	-	0.90	-	5.29	-
$p < 0.05$	1.96	-	1.96	-	1.96	-

Tab. 2 – Paramètres statistiques de l'Indice de Dispersion (I_D) et de l'Indice de Morisita (I_M) pour chaque site.

Tab.2 – Statistical parameters of the Dispersion Index (I_D) and the Morisita Index (I_M) for each site.

D_m : densité moyenne, s^2 : écart-type, d.d.l. : degrés de liberté, X^2 : test du Khi².

D_m: mean density, s^2: standard deviation, d.d.l.: degrees of freedom, X^2: Chi-square test.

réduisant la vitesse d'écoulement. À l'inverse, la partie centrale montre une densité élevée mais qui tend à diminuer vers l'aval. Cette zone étant plus proche du chenal, les contraintes hydrauliques sont supposées plus importantes. Par ailleurs, de nombreux sillons se trouvent dans l'axe d'un écoulement secondaire empruntant une rupture dans le front du seuil en période de hautes eaux. En bord de chenal, la densité est modérée mais relativement homogène à l'inverse de la partie centrale. Le nombre moins important de formes peut s'expliquer par le fait que ce secteur ne se trouve pas directement dans l'axe d'un écoulement, malgré une altitude plus faible et des contraintes hydrauliques potentiellement plus élevées. En rive droite, une similarité dans la répartition spatiale des formes ainsi qu'une certaine symétrie de situation par rapport au secteur en rive gauche, sont observées. Ainsi, trois secteurs peuvent être distingués à l'image de la partie en rive gauche avec un secteur en bord de chenal où la densité est modérée, un secteur central où la densité est plus importante et un secteur en bord de berge où la densité est plus faible.

La caractérisation du type de distribution des formes donne pour chaque site un indice de dispersion (I_D) supérieur à 1, ce qui indique une répartition de type agrégative (tab. 2). Les résultats des tests du X^2 et Z_D indiquent des valeurs significativement supérieures aux valeurs seuils au risque α 0,05 pour Portet-sur-Garonne ($X^2 = 5{,}76 \times 10^3 > 21{,}03$; 12 d.d.l, $p < 0{,}05$ et $Z_D = 4{,}54 > 1{,}96$), Grenade ($X^2 = 1{,}32 \times 10^7 > 25{,}00$; 15 d.d.l, $p < 0{,}05$ et $Z_D = 5{,}29 > 1{,}96$) et Beauzelle ($X^2 = 33{,}7 < 15{,}51$; 8 d.d.l, $p < 0{,}05$ et $Z_D = 0{,}90 < 1{,}96$). Cependant pour Beauzelle, Z_D ne permet pas de rejeter l'hypothèse H_o d'après ce test. Les résultats de l'indice de Morisita (I_M) vont dans le même sens avec des valeurs significativement supérieures à 1 pour l'ensemble des sites indiquant une distribution spatiale agrégative (tab. 2). Les valeurs du test du X^2 confirment la distribution et permettent de rejeter l'hypothèse H_o. Cette dernière est donc rejetée à partir des résultats des indices pour les trois sites, confirmant la distribution agrégative des formes d'érosion et une liaison entre forme et hydro-dynamisme local.

4.3. Morphométrie des trous d'eau

4.3.1. Paramètres géométriques

Les trous d'eau échantillonnés montrent une géométrie hétérogène avec une variation importante de leur dimension, tant sur le plan horizontal que vertical, pouvant aller de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres (tab. 3, fig. 6). Les valeurs moyennes sont respectivement de 15,53 cm et 15,71 cm à Portet-sur-Garonne et Grenade pour le diamètre ainsi que de 15,07 cm et 10,41 cm pour la profondeur. Les distributions des valeurs de diamètre et de profondeur présentent une dissymétrie positive avec des coefficients d'asymétrie compris entre 1,77 et 1,98. Les résultats du rapport D_1/D_2 indiquent que les trous d'eau ont généralement une ouverture elliptique avec des valeurs moyennes de 1,17 à Portet-sur-Garonne et 1,32 à Grenade, une valeur de 1 représentant une ouverture parfaitement circulaire. Le rapport D/Z présente des valeurs moyennes de 1,09 à Portet-sur-Garonne et 1,53 à Grenade.

Variables	Statistiques	Portet-sur-Garonne (n = 201)	Grenade (n = 129)
Rapport d'ouverture (R_O)	M (*min - max*)	1.17 (*1.00 - 2.17*)	1.32 (*1.00 - 3.36*)
	Mo	1.00	1.00
	Me	1.11	1.18
	SD	0.20	0.37
Diamètre (D)	M (*min - max*)	15.53 (*5.25 - 51.50*)	15.71 (*4.50 - 61.00*)
	Mo	12.00	13.00
	Me	13.25	13.00
	SD	8.01	9.29
Profondeur (Z)	M (*min - max*)	15.07 (*3.00 - 51.50*)	10.41 (*4.00 - 33.00*)
	Mo	10.00	9.00
	Me	12.50	9.00
	SD	8.62	5.35
Diamètre/Profondeur (D/Z)	M (*min - max*)	1.09 (*0.49 - 1.91*)	1.53 (*0.84 - 2.75*)
	Mo	1.00	1.25
	Me	1.08	1.47
	SD	0.30	0.45

Tab. 3 – Caractéristiques géométriques des trous d'eau pour chaque site d'étude.

Tab. 3 – Geometrical characteristics of potholes for each study site.

n : taille de l'échantillon, M : moyenne, Mo : mode, Me : médiane, SD : écart-type.

n: sample size, M: mean, Mo: mode, Me: median, SD: standard deviation.

article sous presse

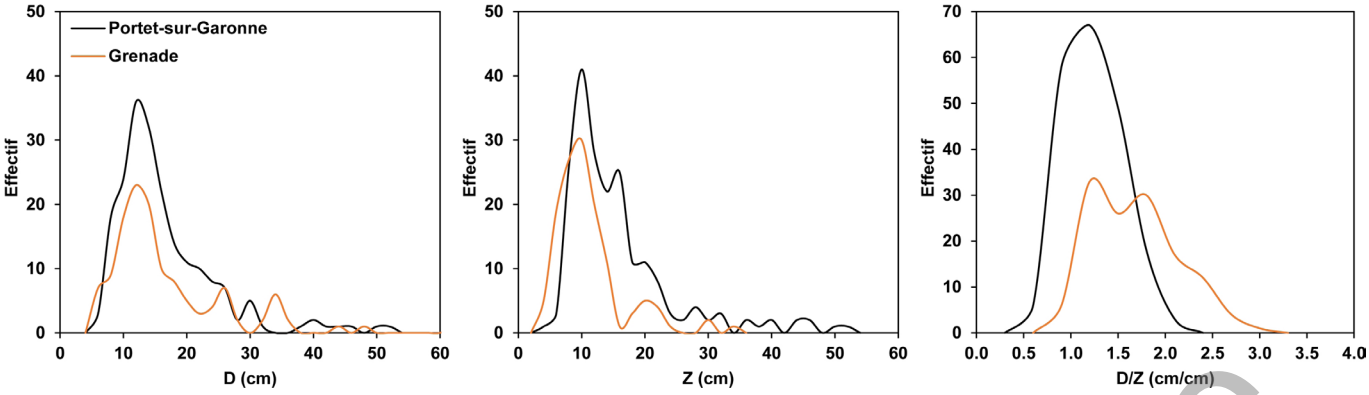

Fig. 6 – Fréquence d'occurrence des paramètres géométriques pour chaque site.
Z : profondeur, D : diamètre.

Fig. 6 – Frequency of occurrence of geometrical parameters for each site.
Z: depth, D: diameter.

Ces résultats indiquent, que pour le second site, le développement latéral semble plus important que le développement vertical tandis que, pour le premier site, les dynamiques d'incision et d'érosion des parois sont comme similaires.

4.3.2. Relation entre diamètre et profondeur

L'analyse des données géométriques sur les deux sites met en évidence une forte corrélation entre le diamètre (*D*) et la profondeur (*Z*) (fig. 7), se traduisant par une relation de type linéaire pouvant être décrite par :

$$D = \beta Z + \varepsilon \quad [3]$$

ou

$$Z = \beta D + \varepsilon \quad [4]$$

Les résultats montrent dans les deux cas un bon ajustement avec des valeurs R^2 de 0,66 à Portet-sur-Garonne et 0,75 à Grenade, confirmant l'observation graphique (fig. 7). Le coefficient ε correspond à l'amplitude du diamètre pour une profondeur donnée tandis que β correspond au taux d'augmentation du diamètre en fonction de la profondeur. Les valeurs β obtenues à partir des régressions sont pour chaque site inférieures à 1, ce qui signifie que la profondeur augmente plus vite que le diamètre. Ainsi, plus β est faible, plus l'allongement des formes dans leur composante verticale est important par rapport au développement de leur ouverture. C'est ce qui est traduit graphiquement (fig. 7) avec une pente de régression se démarquant d'une droite de régression où le diamètre et la profondeur augmenteraient au même rythme. Il est à noter que comparé à Portet-sur-Garonne (β = 0,88), la profondeur augmente plus rapidement que le diamètre à Grenade (β = 0,50).

4.3.3. Facteurs initiateurs

L'observation de trous d'eau en présence d'irrégularités de surface (fractures, micro-dépressions, écaillage, schistosité, etc.) met en évidence une assez bonne corrélation avec, à Portet-sur-Garonne, 75 % des trous d'eau qui s'inscrivent sur une surface irrégulière et 91 % à Grenade (fig. 8). Ces irrégularités peuvent ainsi représenter des faiblesses dans la roche, favorisant la formation de cavités. 42 % des trous d'eau du premier site et 43 % du second site présentent des fractures visibles.

4.3.4. Caractéristiques des sédiments

Le relevé des sédiments dans les trous d'eau indique que 56 % à Portet-sur-Garonne et 83 % à Grenade piègent des sédiments. La granulométrie des particules les plus grosses se caractérise par un diamètre de grain médian de 58,2 mm pour le premier site et de 40,8 mm pour le second site (tab. 4). La relation entre le diamètre des plus grosses particules et la géométrie des trous d'eau ne permet

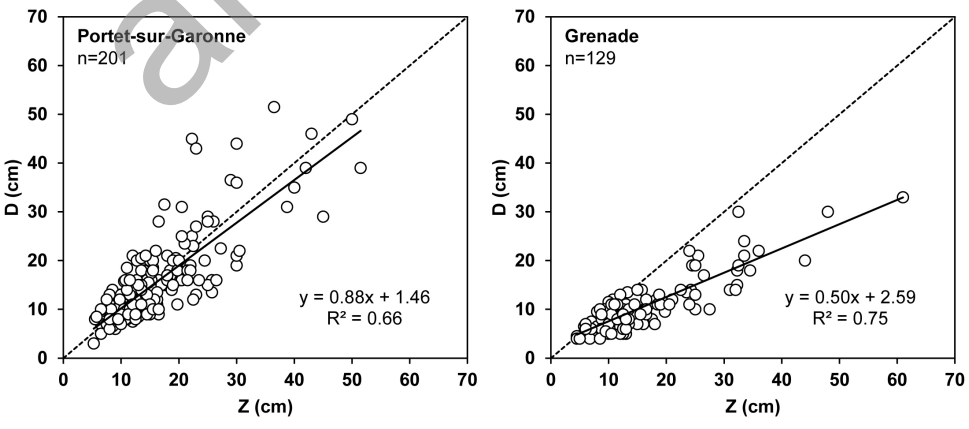

Fig. 7 – Diagramme du diamètre (D) des trous d'eau en fonction de leur profondeur (Z).

Fig. 7 – Plots of potholes diameter (D) versus depths (Z).

article sous presse

pas de mettre en évidence une corrélation que cela soit pour le diamètre ou la profondeur (fig. 9A). À l'inverse, la répartition des effectifs montre que les formes avec des diamètres et des profondeurs inférieurs à environ 22 m présentent la plus grande quantité de sédiments piégés (fig. 9B). Il est à noter cependant que la distribution du nombre de particules en fonction de *D*/*Z* est plus importante pour un ratio d'environ 1,1 ± 0,2, et que les particules de plus grande taille s'observent pour un ratio d'environ 1,4 ± 0,5. De plus, la taille moyenne ne montre pas de tendance, cette dernière étant homogène sur l'ensemble de la gamme *D*/*Z* (fig. 9C).

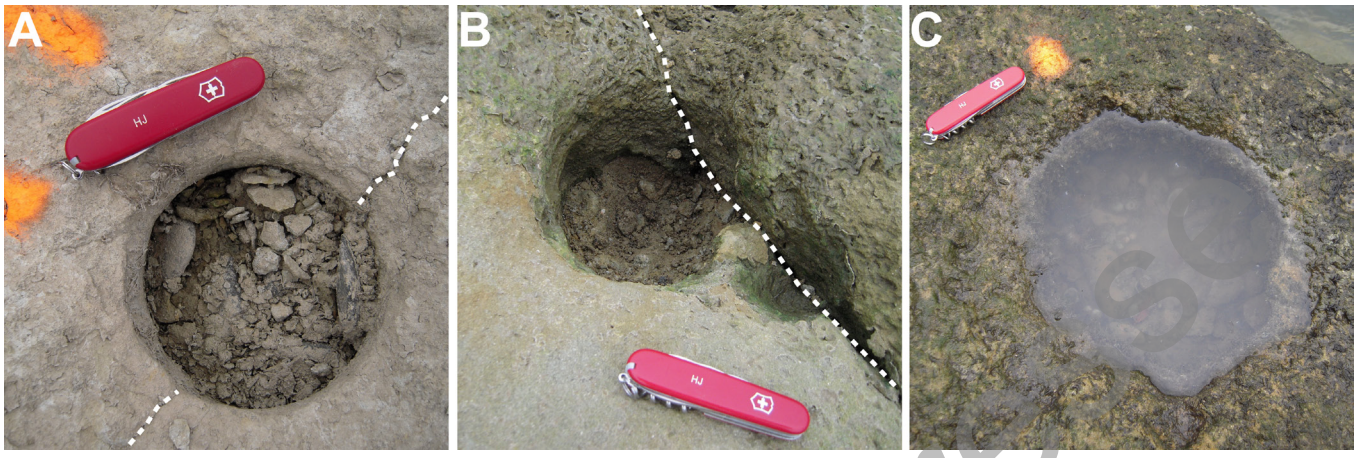

Fig. 8 – Photographies montrant des trous d'eau formés à l'intersection de fissures (A-B) et sur surface irrégulière (A-B-C).
Les pointillés blancs représentent des fissures.

Fig. 8 – Photographs showing potholes developed at joint intersection (A-B) and on an irregular surface (A-B-C).
The white dotted lines represent cracks.

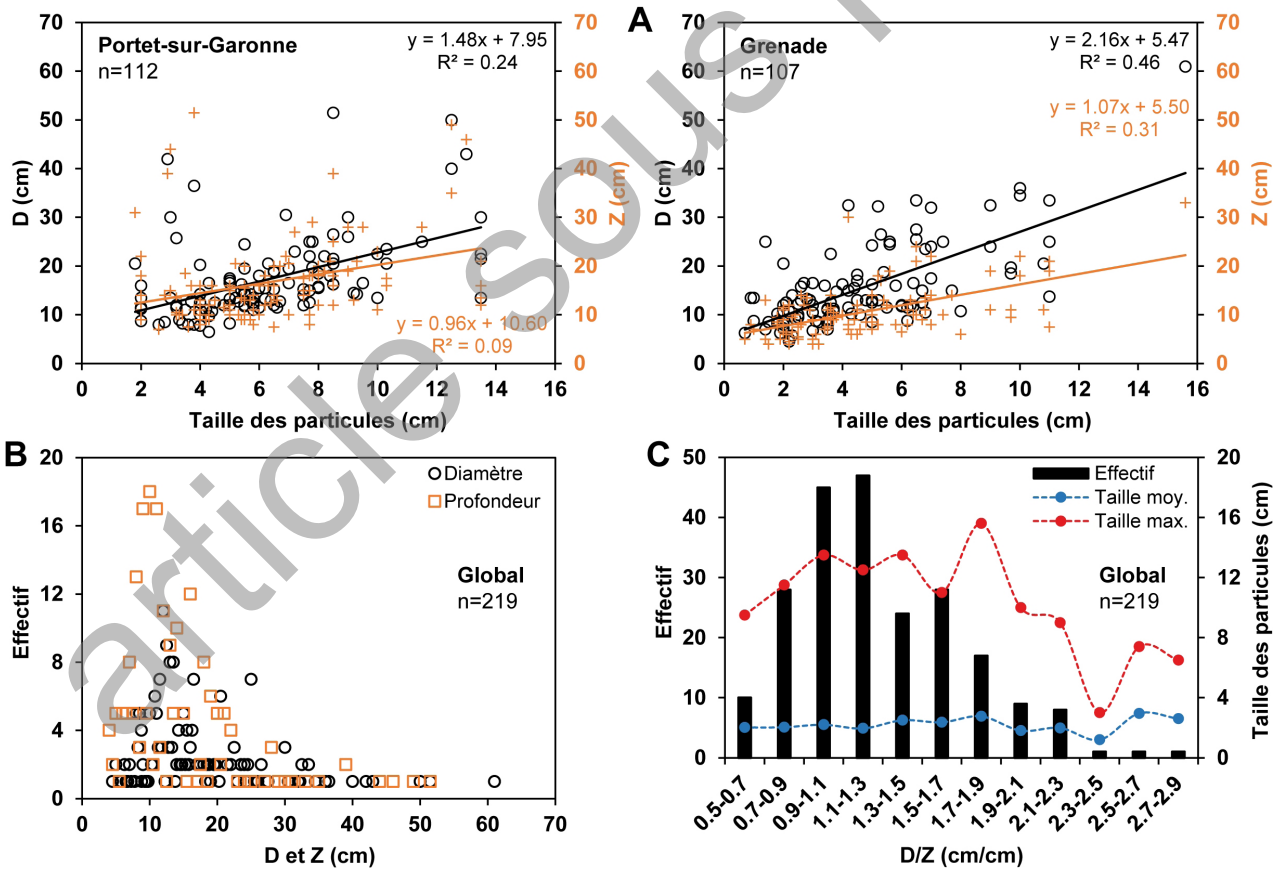

Fig. 9 – Caractéristiques sédimentologiques.
A : Graphique de la taille des particules en fonction du diamètre et de la profondeur. B : Graphique des effectifs des particules en fonction du diamètre et de la profondeur des trous d'eau pour les deux sites. C : Graphique de la répartition des effectifs, de la taille moyenne et maximale des particules en fonction de D/Z pour les deux sites.

Fig. 9 – Sedimentological characteristics.
A: Graph of particle size versus diameter and depth for each site. B: Graph of particle size as a function of diameter and depth of potholes for both sites. C: Graph of the distribution of count, average and maximum particle size according to D/Z for both sites.

article sous presse

Tab. 4 – Caractéristiques de la granulométrie des sédiments les plus gros.

Tab. 4 – Characteristics of the largest grain size for each site.

Statistiques	Portet-sur-Garonne (n = 112)	Beauzelle (n = 107)
M (*min - max*)	6.27 (*1.80-13.50*)	4.66 (*0.70-15.60*)
Mo	4.00	2.00
Me	5.80	4.20
SD	2.77	2.74
D_{50}	58.20	40.80

n : taille de l'échantillon, M : moyenne, Mo : mode, Me : médiane, SD : écart-type, D_{50} : diamètre médian.

n: sample size, M: mean, Mo: mode, Me: median, SD: standard deviation, D_{50}: median diameter.

5. Discussion

5.1. Organisation spatiale des formes et processus d'érosion associés

L'inventaire des formes d'érosion a permis d'identifier 10 groupes et 52 sous-groupes de formes différentes. Cela traduit une diversité morphologique importante ainsi que des processus d'érosion et de contrôle impliqués dans l'évolution de ces formes.

L'analyse de la distribution spatiale des formes d'érosion a mis en évidence pour chaque site une répartition agrégative, soit une distribution non homogène avec des densités contrastées selon les secteurs. Ce résultat suggère que certaines zones présentent une probabilité plus importante d'occurrence de formes avec une distribution pouvant être mise en relation avec la situation hydro-géomorphologique (relief, rugosité de surface, organisation spatiale des seuils, hauteur d'eau, vitesse d'écoulement, etc.). Globalement, il apparaît que les fortes densités de formes en creux s'observent préférentiellement à proximité du chenal d'écoulement principal et en tête de seuil, où les contraintes hydrauliques sont potentiellement les plus élevées (hauteur d'eau et vitesse d'écoulement importantes en crue), tandis que les secteurs les moins denses se localisent préférentiellement en bordure de berges et en queue de seuil, où les conditions hydrauliques sont moins favorables au développement de formes en raison de contraintes plus faibles. Les conditions locales d'écoulement (flux secondaires, rugosité de surface, etc.), en lien avec la micro-topographie, jouent également un rôle important pouvant expliquer la présence très localisée de « noyau » à forte concentration de formes au sein d'un espace faiblement dense. L'analyse par catégorie de formes montre également une localisation préférentielle selon le type, en lien avec le contexte hydro-géomorphologique et pouvant être associés à des processus d'érosion (dissolution, abrasion, etc.) différenciés.

Les *trous d'eau*, se présentent généralement dans des zones de convergence d'écoulements et/ou dans des secteurs où la topographie présente des irrégularités marquées par une rugosité importante favorable à la formation de courants turbulents. La présence de sédiments dans ces cavités est également courante. Ainsi, il peut être suggéré que les trous d'eau sont entretenus principalement par l'action de flux tourbillonnants, leur morphologie favorisant le phénomène et l'action des sédiments par abrasion.

Les *sillons*, coïncident majoritairement avec la présence d'un écoulement secondaire. C'est le cas notamment sur les sites de Portet-sur-Garonne et Grenade. Ces formes ont pour effet, à faible niveau d'eau, de canaliser l'écoulement avec une hauteur d'eau plus importante et une vitesse plus élevée par rapport à l'écoulement sur les surfaces adjacentes, accentuant l'effet érosif de l'écoulement. Par ailleurs, les sillons s'accompagnent très fréquemment de sédiments grossiers suggérant également une érosion par abrasion.

Les *flaques et dépressions*, sont essentiellement localisées dans les secteurs au relief faiblement disséqué, où de l'eau stagnante est présente régulièrement. Par ailleurs, on note une absence de piégeage sédimentaire dans le cas des flaques. De forme étalée, à la surface peu rugueuse et de faible profondeur, les flaques semblent se développer essentiellement sous l'effet de la dissolution. Il peut en être de même pour les dépressions, dont on peut penser qu'elles correspondent à un stade d'évolution plus avancé de flaques.

Les *échancrures*, sont principalement observées au niveau de rebords d'érosion qui correspondent à des ruptures de pentes abruptes, à l'interface entre deux niveaux pouvant être une alternance entre un faciès dure et tendre. Les échancrures se forment généralement dans le sens de l'écoulement et peuvent traduire un processus d'érosion régressive. Cela s'observe notamment sur le site de Beauzelle.

Ainsi, les facteurs locaux semblent déterminants dans l'apparition, l'évolution et la morphologie des formes mineures d'érosion du lit.

5.2. Morphologie et dynamique des trous d'eau

L'analyse morphométrique des trous d'eau cylindriques sur les sites de Portet-sur-Garonne et de Grenade, a mis en évidence une forte corrélation de type linéaire entre le diamètre et la profondeur dans les deux cas. Cette relation traduit une tendance à une augmentation plus rapide de la profondeur par rapport au diamètre d'ouverture. Néanmoins, le taux d'augmentation (β) du diamètre en fonction de la profondeur diffère sensiblement entre les sites (0,88 à Portet-sur-Garonne, 0,50 à Grenade). Cette augmentation plus rapide de la profondeur par rapport à la largeur sur le site de Grenade, peut s'expliquer par une présence moindre de calcaires indurés, les trous d'eau s'inscrivant principalement dans les faciès marno-sableux tendres. De plus, Springer et al. (2006), montrent que la perte de matériaux des trous d'eau lors de leur croissance est plus importante sur la paroi que sur le fond, lorsque β est supérieur à 0,5. Pour ces auteurs, cela indique le rôle principal des sédiments en suspension comme agent d'érosion agissant au-dessus du fond, par rapport aux galets retenus au fond des formes. Les valeurs de β dans la présente étude, suggèrent donc pour le site de Portet-sur-Garonne, *(i)* une érosion plus importante de la paroi par rapport au fond et *(ii)* un rôle prépondérant des sédiments en suspension dans l'érosion des trous d'eau par rapport au site de Grenade. Cependant, si les observations sur le terrain semblent aller dans ce sens (cf. infra), cela reste toutefois à confirmer quantitativement.

La corrélation entre diamètre et profondeur a également été mis en évidence antérieurement par de multiples auteurs (Abbott et Pottratz, 1969 ; Lorenc, 1994 ; Springer et al., 2005, 2006 ; Wang et al., 2009 ; Álvarez-Vázquez et Uña-Álvarez, 2017 ; Dhali et Biswas, 2017 ; Ji et al., 2019). Le Tableau 5 reprend à titre de comparaison des résultats de travaux précédents par rapport à ceux obtenus dans

article sous presse

cette étude pour des trous d'eau formés en rivière.

Selon Springer et al. (2005, 2006), une corrélation importante entre le diamètre et la profondeur suggère que les trous d'eau peuvent être amenés à évoluer sous l'effet d'un processus de coalescence, un phénomène fréquemment observé sur les deux sites (fig. 10A). Pour ces auteurs, si les trous d'eau étaient amenés à s'effacer par l'incision du lit, le diamètre et la profondeur montreraient une dispersion. En effet, en l'absence d'incision la profondeur et le diamètre tendent à augmenter. A l'inverse, en cas d'incision du lit, la profondeur diminuerait tandis que le diamètre continuerait à augmenter pendant le processus d'effacement de la forme, amenant à une réduction de la relation diamètre *vs.* profondeur (fig. 10B).

Les constatations visuelles suggèrent également une corrélation entre la présence de trous d'eau et celle d'irrégularités de surface (fractures, micro-dépressions, écaillage, schistosité, etc.). Cette corrélation est vérifiée par une correspondance de 75 à 91 % entre trous d'eau et irrégularités de surface. Dans le sud du Brésil, sur substrat basaltique, Lima et Binda (2015) font la même observation avec une corrélation entre formes d'érosion et irrégularités de surface. Springer et Wohl (2002) et Richardson et Carling (2005) notent le rôle fondamental des petites irrégularités dans la formation des formes et leur développement. La présence de fractures joue un rôle similaire dans la présence des trous d'eau, 42 % des formes montrant cette liaison en moyenne pour chacun des deux sites. L'importance des fractures dans l'initiation des écoulements turbulents et une érosion différentielle (Lima et Binda, 2015), est aussi mise en évidence sur des basaltes par Sengupta et Kale (2011) et Lima et Binda (2015), sur des granites par Lorenc (1994) et Ortega et al. (2014), sur des shales sableux par Wang et al. (2009) ou encore sur des quartzites et des gneiss par Springer et al. (2005, 2006).

Le piégeage des sédiments, s'effectue majoritairement dans les formes aux dimensions inférieures à environ 22 cm en largeur et en profondeur. Ceci va à l'encontre des observations faites par Ji et al. (2019) pour lesquels les sédiments sont majoritairement présents dans des trous d'eau plus larges et profonds. Ji et al. (2019), ainsi que Pelletier et al. (2015), font également le constat d'une relation linéaire entre la taille des plus gros sédiments et le diamètre des trous d'eau, traduisant un piégeage épisodique de sédiments dont la taille est comparable à la moitié du diamètre. Dans notre cas, les résultats ne permettent pas de mettre en évidence une telle relation entre la taille maximale des sédiments et le diamètre (R^2 = 0,24 à Portet-sur-Garonne ; R^2 = 0,46 à Grenade). Cela suggère, d'une part, que les sédiments les plus gros ne sont pas plus piégés lorsque les trous d'eau sont larges et profonds, et d'autre part, qu'ils ne sont pas un agent d'abrasion plus efficace. Sklar et Dietrich (2001) ont ainsi montré, à partir d'une expérimentation, que le taux d'érosion par rapport à la taille des sédiments présente une dépendance non linéaire, et que l'abrasion est plus efficace pour des particules de taille intermédiaire. En effet, les sédiments doivent être, d'une part, suffisamment petits pour être mis en mouvement, et d'autre part, suffisamment grands pour se déplacer en contact avec le fond.

Le taux d'occurrence des sédiments dans les trous d'eau est nettement différent entre Portet-sur-Garonne (56 %) et Grenade (83 %). Cela peut suggérer qu'à Grenade l'érosion des trous d'eau par les sédiments grossiers pourrait être prépondérante, à l'inverse de Portet-sur-Garonne. Pour ce dernier site, l'action des sédiments fins en suspension pourrait jouer un rôle important dans le développement des formes en l'absence de charge grossière. La

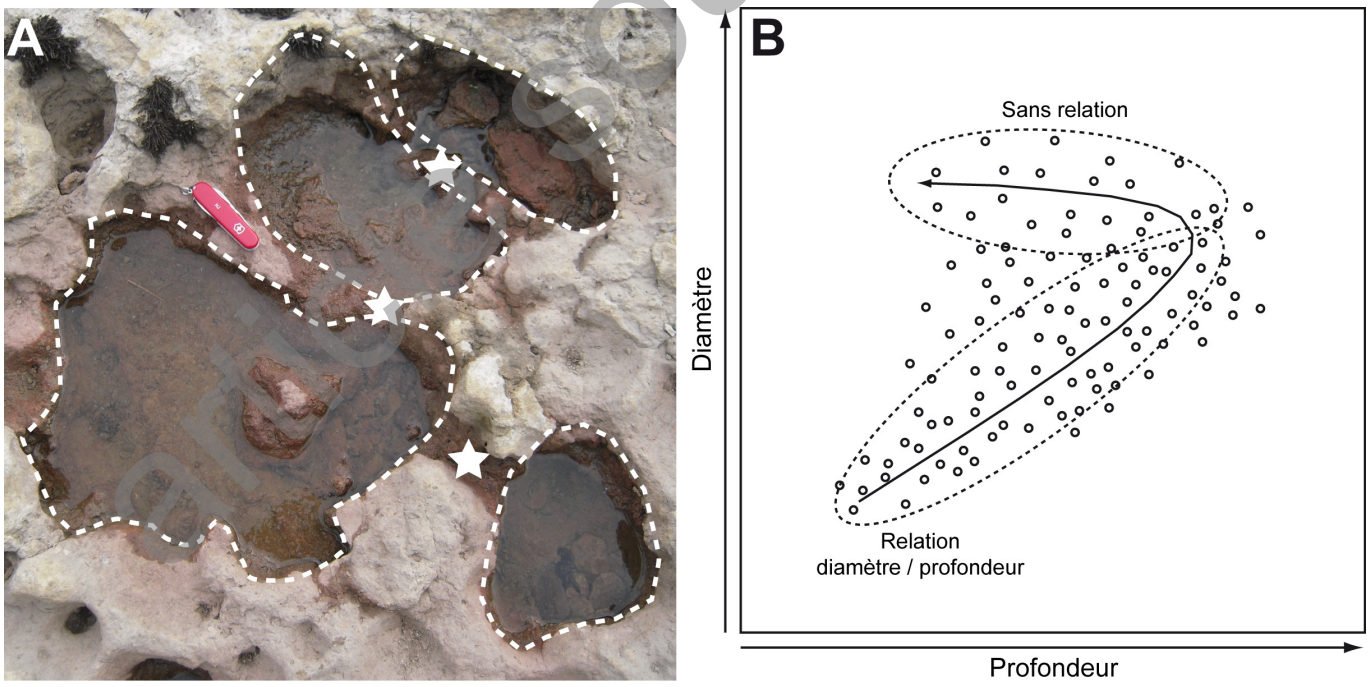

Fig. 10 – Caractéristiques morphométriques de formes coalescentes.

A : Forme coalescente résultant de la fusion de plusieurs trous d'eau (ligne en pointillés blancs) à la suite de la rupture de leurs parois (étoiles blanches) durant leur développement latéral. B : Schéma théorique de la relation entre le diamètre et la profondeur si les trous sont amenés à disparaitre par incision du chenal (modifié d'après Springer et al., 2006).

Fig. 10 – Morphometric characteristics of the coalescent shape forms.

A: Coalescent shape resulting from the fusion of several potholes (dotted lines) following the rupture of their walls (white stars) during their lateral development. B: Theoritical diagram of the relationship between diameter and depth if the potholes were removed by channel incision (Modified from Springer et al., 2006).

article sous presse

Tab. 5 – Exemples de données rapportées pour les trous d'eau suivant une relation linéaire entre le diamètre et la profondeur selon Ji et al. (2018).
Tab. 5 – Examples of reported data for stream potholes following a linear trend between diameter and depth according to Ji et al. (2018).

Localisation (rivière, *région*)	Lithologie	D (cm)	Z (cm)	D/Z	β	ε (cm)	R^2	Références
Indrayani *Maharashtra, Inde*	Basalte	24.0	24.0	1.00	0.80	18.54	0.52	Kale and Shingade, 1987
Kurokawa *Shikoku, Japon*	Métabasalte	87.9	87.4	1.13	0.83	15.13	0.55	Sato et al., 1987
Orange (Kakamas) *Cap-Nord, Afrique du Sud*	Phyllitis quartzite	68.7	56.3	1.33	0.84	14.18	0.75	Springer et al., 2005
Orange (Boegoebeg) *Cap-Nord, Afrique du Sud*	Métasédiment	35.8	27.2	1.56	0.92	10.91	0.70	Springer et al., 2005
Orange (Augrabies) *Cap-Nord, Afrique du Sud*	Gneiss granitique	73.6	73.6	1.15	0.46	20.83	0.53	Springer et al., 2005
Wubu *Chongqing, Chine*	Mudstone et grès	-	-	1.13	0.50	19.71	0.56	Ren et al., 2015
Miño *Péninsule ibérique, Espagne*	Granite et granodiorite	56.7	55.0	1.13	0.61	23.32	0.79	Álvarez-Vázquez and Uña-Álvarez, 2017
Kharsoti *Tetuldanga, Inde*	Granite	75.4	69.1	1.27	0.7	26.70	0.64	Dhali and Biswas, 2017
Gatineau *Québec, Canada*	Roche felsique et gneiss	36.5	40.7	0.96	0.76	5.71	0.68	Ji et al., 2018
Deerfield River *Massachusetts, USA*	Roche felsique et gneiss	91.7	85.0	1.58	0.71	31.31	0.54	Ji et al., 2018
Sunxi *Chongqing, Chine*	Grès	33.5	36.5	1.06	0.72	7.22	0.67	Ji et al., 2019
Garonne *Portet, France*	Molasse	15.5	15.1	1.09	0.88	1.46	0.66	Présente étude
Garonne *Grenade, France*	Molasse	15.7	10.4	1.53	0.50	2.59	0.75	Présente étude

D : diamètre, Z : profondeur, β : taux d'augmentation du diamètre en fonction de la profondeur, ε : l'amplitude du diamètre pour une profondeur donnée, R^2 : coefficient de détermination.

D: diameter, Z: depth, β: diameter increase rate as a function of depth, ε: diameter magnitude for a given depth R^2: coefficient of determination.

présence de charge grossière dans les trous d'eau ne serait donc pas une condition à leur développement. En effet, s'il a été mis en évidence par certains auteurs que les sédiments grossiers sont plus efficaces que les sédiments fins en suspension dans l'érosion d'un substrat rocheux (Sklar et Dietrich, 2001 ; Wohl, 2015), d'autres ont montré l'importance de l'action des sédiments en suspension dans le développement des trous d'eau (Tinkler, 1993 ; Zen et Prestegaard, 1994 ; Hancock et al., 1998 ; Whipple et al., 2000). Toutefois, ce constat est à nuancer car il s'agit de l'observation d'un état final. En effet, l'analyse de la mobilité de la charge grossière, à l'aide de PIT tags (*Passive Integrated Transponder*), a montré que même piégés dans des formes d'érosion (sillon, trou d'eau, etc.), le piégeage des galets pouvait être temporaire (Jantzi, 2018). À Portet-sur-Garonne, 38 % des particules injectées dans des formes ont été éjectées hors de la forme et 52 % à Grenade. Il est ainsi possible que le taux d'occurrence des sédiments dans les trous d'eau soit plus important en raison de conditions de décrue plus favorables au piégeage.

6. Conclusion

Les résultats de l'étude des formes d'érosion sur substrat molassique en moyenne Garonne peuvent être synthétisés de la manière suivante :

(i) Les formes d'érosion sur substrat molassique présentent une grande diversité morphologique (10 groupes et 52 sous-groupes différents). Toutefois, ce recensement n'est pas exhaustif en raison de la méthode d'échantillonnage. La répartition des formes montre que tous les types ne sont pas présents dans chaque site, à l'image des échancrures et des flûtes présentes uniquement à Beauzelle et à Portet-sur-Garonne respectivement, ou alors de manière marginale comme les flaques à Grenade et les buttes à Portet-sur-Garonne (fig. 3A). A l'inverse, les trous d'eau et les sillons représentent les formes les plus communément observées sur l'ensemble des sites.

(ii) La distribution spatiale des formes d'érosion montre une répartition de type agrégative (fig. 4, tab. 2) suggérant que certains secteurs présentent une plus forte probabilité d'occurrence de forme par rapport à d'autres. Cette observation a été mise en relation avec les conditions hydrodynamiques stationnelles qui semble déterminantes dans l'apparition et l'organisation spatiale des formes. Cependant, cette relation devra être précisée par des travaux complémentaires sur les dynamiques d'écoulements dans ces zones lors des hautes eaux. La lithologie représente également un facteur important avec la présence d'irrégularités de surface (fractures, micro-dépressions liée à l'impact des sédiments, schistosité, etc.) qui affaiblissent la roche et favorisent la formation de formes.

(iii) La formation des seuils dans les années 1960, à la suite de l'évacuation de la charge alluviale sous l'effet de l'incision, suggère des vitesses d'évolution rapides des formes même s'il n'est pas exclu que certaines puissent être héritées. De plus, en raison de différents processus érosifs (abrasion, dissolution, etc.) intervenant dans l'évolution des formes, des caractéristiques lithologiques de la roche (fractures, couche calcaire induré vs. couche marno-sableuse

article sous presse

tendre, etc.) et des conditions hydrodynamiques, il est probable que les vitesses soient contrastées. Cela confirme les observations sur les dynamiques d'évolution des seuils qui sont hétérogènes.

(iv) La morphométrie des trous d'eau tend à montrer que l'érosion des affleurements rocheux n'est pas uniquement due à un processus d'incision du lit. La relation entre le diamètre et la profondeur des trous d'eau (fig. 7) suggère que la fusion des formes entre elles (coalescence) est un facteur important de l'érosion des seuils (fig. 10A). L'observation de nombreuses formes issues d'une coalescence entre des formes de types différents (trous d'eau avec des sillons, etc.) conforte les résultats de l'analyse morphométrique.

Si l'étude des formes d'érosion a permis d'apporter des éléments de compréhension dans la dynamique d'évolution des seuils rocheux en moyenne Garonne, certains points restent néanmoins à éclaircir concernant les facteurs d'érosion. Des études complémentaires devront ainsi s'attacher à (1) préciser l'influence des conditions d'écoulement, et (2) quantifier le rôle respectif entre charge de fond et charge en suspension.

Remerciements

Cette étude a bénéficié d'un financement de la région Occitanie et de l'Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées. Les auteurs remercient Johann Blanpied et Tiberiu Groparu pour leur aide lors de l'inventaire de terrain. Sont également remerciés les deux relecteurs anonymes pour leurs suggestions ayant contribué à l'amélioration du manuscrit.

Références

Abbott A.T., Prottratz S.W. (1969) – Marine pothole erosion, Oahu, Hawaii. Pacific Science, 23, 276-290.

Alexander H.S. (1932) – Pothole Erosion. The Journal of Geology, 40 (4), 305-337.
DOI : 10.1086/623954

Allen J.R.L. (1971) – Transverse erosional marks of mud and rock: their physical basis and geological significance. Sedimentary Geology, 5 (3), 167-385.
DOI : 10.1016/0037-0738(71)90001-7

Allen J.R.L. (1982) – Sedimentary structures, their character and physical basis. Elsevier Scientific, Volume 30B, Oxford, 663 p.

Álvarez-Vázquez M.Á., de Uña-Álvarez E. (2017) – Growth of sculpted forms in bedrock channels (Miño River, northwest Spain). Current Science 112 (5), 996-1002.
DOI : 10.18520/cs/v112/i05/996-1002

Beaudelin P. (1989) – Conséquences de l'exploitation des granulats dans la Garonne. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 60 (4), 603-616.
DOI : 10.3406/rgpso.1989.3182

Bradwell T. (2005) – Bedrocks megagrooves in Assynt, NW Scotland. Geomorphology, 65, 195-204.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2004.09.002

Büdel J. (1982) – Climatic Geomorphology. Princeton, New Jersey, 443 p.

Calle M., Alho P., Benito G. (2017) – Channel dynamics and geomorphic resilience in an ephemeral Mediterranean river affected by gravel mining. Geomorphology, 285, 333-346.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2017.02.026

Carling P.A., Herget J., Lanz J.K., Richardson K., Pacifici A. (2009) – Channel-scale erosional bedforms in bedrock and in loose granular material: character, processes and implications. In Burr D.M., Carling P.A., Baker V.R. (Eds.): Megaflooding on Earth and Mars. Cambridge University Press, 13-32.
DOI : 10.1017/CBO9780511635632.002

Chatanantavet P., Parker G. (2009) – Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 114, F04018.
DOI : 10.1029/2008JF001044

David M., Carozza J.-M., Valette P., Llubes M., Py V., Groparu T. (2015) - Évolution de la dynamique fluviale de la moyenne Garonne toulousaine : apport d'une approche multi-sources cartes historiques, stratigraphie et géophysique sur le site Grenade-Ondes. Géomorphologie: relief, processus, environnement, 21 (1), 21-44.
DOI : 10.4000/geomorphologie.10834

David M., Labenne A., Carozza J.-M., Valette P. (2016) – Evolutionary trajectory of channel planforms in the middle Garonne River (Toulouse, SW France) over a 130-year period: Contribution of mixed multiple factor analysis (MFAmix). Geomorphology, 258, 21-39.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2016.01.012

Delmouly L., Moreau N., Croze N., Le Barthe R. (2007) – Cartographie du substrat de la Garonne (de la retenue de St-Nicolas-De-La-Grave à Toulouse) et influence sur le comportement de saumons atlantiques en remontée. Agence de l'eau Adour Garonne, Rapport GHAAPPE RA07.05, 111 p.

Dhali M.K., Biswas M. (2017) – Geo-hydrological response to pothole formation : a quantitative study of Kharsoti River, India. Modeling Earth Systems and Environment, 3 (32), 11.
DOI : 10.1007/s40808-017-0280-5

Dubinski I.M., Wohl E. (2013) – Relationships between block quarrying, bed shear stress, and stream power: a physical model of block quarrying of a jointed bedrock channel. Geomorphology, 180-181, 66-81.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2012.09.007

Gob F., Houbrechts G., Hiver J.M., Petit F. (2005) – River dredging, channel dynamics and bedload transport in an incised meandering river (The River Semois, Belgium). River Research and Applications, 21, 791-804.
DOI : 10.1002/rra.883

Gomez-Heras M., Ortega-Becerril J.A., Garrote J., Fort R., Lopez-Gonzalez L. (2019) – Morphometric measurements of bedrock rivers at different spatial scales and applications to geomorphological heritage research. Progress in Earth and Planetary Science, 6-29, 1-18.
DOI : 10.1186/s40645-019-0275-0

Hall K., Thorn C., Sumner P. (2012) – On the persistence of "weathering". Geomorphology, 149-150, 1-10.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2011.12.024

Hancock G.S., Anderson R.S., Whipple K.X. (1998) – Beyond power: bedrock river incision process and form. In Tinkler K.J., Wohl E.E. (Eds.): Rivers Over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels. American Geophysical Union, Washington, 35-60.
DOI : 10.1029/GM107p0035

article sous presse

Howard A. D. (1994) – A detachment-limited model of drainage basin evolution. Water Resources Research, 30, 2261-2285. DOI : 10.1029/94WR00757

Inoue T., Yamaguchi S., Nelson J.M. (2017) – The effect of wet-dry weathering on the rate of bedrock river channel erosion by saltating gravel. Geomorphology, 285, 152-161. DOI : 10.1016/j.geomorph.2017.02.018

Jantzi H., Carozza J.-M., Probst J.-L., Valette P. (2017a) – Ajustements géomorphologiques du chenal de la moyenne Garonne en aval de Toulouse au cours des 200 dernières années (sud-ouest, France). Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement, 23 (2), 139-153. DOI : 10.4000/geomorphologie.11692

Jantzi H., Carozza J.-M., Probst J.-L., Valette P. (2017b) – Les extractions de granulats dans le lit mineur de la moyenne Garonne toulousaine durant la seconde moitié du XXe siècle. Sud-Ouest Européen, 44, 83-96. DOI : 10.4000/soe.3418

Jantzi H. (2018) – Incision fluviale et transition d'une rivière alluviale vers une rivière à fond rocheux : formation et évolution des seuils molassiques de la moyenne Garonne toulousaine au cours du 20e siècle. Thèse de doctorat, Université Toulouse II Jean Jaurès, 336 p.

Ji S., Li L., Zeng W. (2018) – The relationship between diameter and depth of potholes eroded by running water. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10, 818-831. DOI : 10.1016/j.jrmge.2018.05.002

Ji S., Zeng W., Li L., Ma Q., Feng J. (2019) – Geometrical characterization of stream potholes in sandstone from the Sunxi River (Chongqing, China) and implications for the development of bedrock channels. Journal of Asian Earth Sciences, 173, 374-385. DOI : 10.1016/j.jseaes.2019.01.037

Kale V.S., Shingade B.S. (1987) – A morphological study of potholes of Indrayani knick point (Maharashtra). In Datye V.S., Diddee J., Jog S.R., Patil C. (Eds.): Explorations in the Tropics. K. R. Dikshit Felicitation Committee, Pune, 206-214.

Lamb M.P., Fonstad M.A. (2010) – Rapid formation of a modern bedrock canyon by a single flood event. Nature Geoscience, 3 (7), 477-481. DOI : 10.1038/NGEO894

Lambert R. (1989) – La moyenne Garonne aval : géomorphologie et dynamique des crues. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 60 (4), 555-567. DOI : 10.3406/rgpso.1989.3178

Lima A.G. Binda A.L. (2015) – Differential control in the formation of river potholes on basalts of the Parana a Volcanic Province. Journal of South American Earth Sciences, 59, 86-94. DOI : 10.1016/j.jsames.2015.02.004

Lorenc M.W., Barco P.M., Saavedra J. (1994) – The evolution of potholes in granite bedrock, W Spain. Catena, 22 (4), 265-274. DOI : 10.1016/0341-8162(94)90037-X

Montgomery D.R., Abbe T.B., Buffington J.M., Peterson N. P. Schmidt K. M., Stock J.D. (1996) – Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins. Nature, 381, 587-589. DOI : 10.1038/381587a0

Mouline M.-P. (1989) – Sédimentation continentale en zone cratonique. Le Castrais, l'Albigeois au Tertiaire. Thèse de doctorat, Université Bordeaux III Montaigne, 878 p.

Ortega J.A., Gómez-Heras M., Perez-López R., Wohl E.E. (2014) – Multiscale structural and lithologic controls in the development of stream potholes on granite bedrock rivers. Geomorphology, 204, 588-598. DOI : 10.1016/j.geomorph.2013.09.005

Pardé M. (1928) – Périodicité des grandes inondations et crues exceptionnelles. Revue de géographie alpine, 16 (2), 499-519. DOI : 10.3406/rga.1928.4457

Pelletier J.D., Baker V.R. (2011) – The role of weathering in the formation of bedrock valleys on Earth and Mars: a numerical modeling study. Journal of Geophysical Research, 116, E11007. DOI : 10.1029/2011JE003821

Pelletier J.D., Sweeney K.E., Roering J.J., Finnegan N.J. (2015) – Controls on the geometry of potholes in bedrock channels. Geophysical Research Letters, 42 (3), 797-803. DOI : 10.1002/2014GL062900

Ren H.Q., Yuan X.Z., Liu H, Yue J.S., Wang XF., Liu S.S., Qi J. (2015) – Shape and benthic invertebrate community features of the potholes in Wubu River, Chongqing. Chinese Journal of Ecology, 34 (12), 3402-3408.

Richardson K., Carling P.A. (2005) – A Typology of Sculpted Forms in Open Bedrock Channels. Special Paper 392, Geological Society of America, Boulder, 108 p. DOI : 10.1130/SPE392

Rinaldi M., Wyżga B., Surian N. (2005) – Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. River Research and Applications, 21, 805-828. DOI : 10.1002/rra.884

Sato S., Matsuura H., Miyazaki M. (1987) – Potholes in Shikoku, Japan, Part 1. Potholes and their hydrodynamics in Kurakawa River, Ehime. Memoirs of the Faculty of Science, Ehime University, Natural Science, 7, 127-190.

Seiffert F., Bandow N., Kalbe U., Milke R., Gorbushina A.A. (2016) – Laboratory tools to quantify biogenic dissolution of rocks and minerals: a model rock biofilm growing in percolation columns. Frontiers in Earth Science, 4 (31), 10 p. DOI : 10.3389/feart.2016.00031

Sengupta, S. Kale V.S. (2011) – Evaluation of the role of rock properties in the development of potholes: a case study of the Indrayani knickpoint, Maharashtra. Journal of Earth System Science, 120 (1), 157-165. DOI : 10.1007/s12040-011-0005-5

Sklar L., Dietrich W.E. (1998) – River longitudinal profiles and bedrock incision models: stream power and the influence of sediment supply. In Tinkler K.J., Wohl E.E. (Eds.): Rivers Over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels. American Geophysical Union, Washington, 237-260. DOI : 10.1029/GM107p0237

Sklar L.S., Dietrich W. E. (2001) – Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock. Geology, 29, 1087-1090. DOI : 10.1130/0091-7613(2001)029<1087:SARSCO>2.0.CO;2

Springer G.S., Wohl E.E. (2002) – Empirical and theoretical investigations of sculpted forms in Buckeye Creek Cave, West Virginia. Journal of Geology, 110, 469-481.

article sous presse

DOI : 10.1086/340442

Springer G.S., Tooth S., Wohl E.E. (2005) – Dynamics of pothole growth as defined by field data and geometrical description. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 110, F04010.
DOI : 10.1029/2005JF000321

Springer G.S., Tooth S., Wohl E.E. (2006) – Theoretical modeling of stream potholes based upon empirical observations from the Orange River, Republic of South Africa. Geomorphology, 82 (1-2), 160-176.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2005.09.023

Steiger J., James M., Gazelle F. (1998) – Channelization and consequences on floodplain system functioning on the Garonne River, SW France. Regulated Rivers : Research & Management, 14, 13-23.
DOI : 10.1002/(SICI)1099-1646(199801/02)14 :1<13 : :AID-RRR473>3.0.CO ;2-B

Steiger J., Corenblit D., Vervier P. (2000) – Les ajustements morphologiques contemporains du lit mineur de la Garonne, France et leurs effets sur l'hydrosystème fluvial. Zeitschrift für Geomorphologie, 122, 227-246.

Sunyach J. (1984) – Formation molassiques du Bassin aquitain : cartographie géologique à l'aide des images prises par satellites. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 55 (1), 29-48.
DOI : 10.3406/rgpso.1984.4603

Taylor P.J. (1977) – Quantitative methods in Geography: an introduction to spatial analysis. Houghton Mifflin, Boston, 386 p.
DOI : 10.1111/j.1538-4632.1978.tb00012.x

Tinkler K.J. (1993) – Fluvially sculpted bedforms in Twenty Mile Creek, Niagara Peninsula, Ontario. Canadian Journal of Earth Sciences, 30, 945-953.
DOI : 10.1029/GM107p0261

Valette P., Carozza J.-M., Salles D., David M., Simonet G. (2014) – Construction géohistorique du « sauvage » de la Garonne toulousaine : quelle part de naturalité dans les paysages fluviaux ? Développement Durable & Territoires, 5 (3), 1-22.
DOI : 10.4000/developpementdurable.10628

Wang W., Liang M., Huang S. (2009) – Formation and development of stream potholes in a gorge in Guangdong. Journal of Geographical Sciences, 19 (1), 118-28.
DOI : 10.1007/s11442-009-0118-9

Whipple K.X., Hancock G.S., Anderson R.S. (2000) – River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. Geological Society of America Bulletin, 112 (3), 490-503.
DOI : 10.1130/0016-7606(2000)112<490:RIIBMA>2.0.CO;2

Wieler N., Ginat H., Gillor O., Angel R. (2019) – The origin and role of biological rock crusts in rocky desert weathering. Biogeosciences, 16, 1133-1145.
DOI : 10.5194/bg-2018-442

Wohl E. E. (1993) – Bedrock channel incision along Picanniny Creek, Australia. Journal of Geology, 101 (6), 749-761.
DOI : 10.1086/648272

Wohl E.E. (2015) – Particle dynamics: the continuum of bedrock to alluvial river segments. Geomophology, 241, 192-08.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.04.014

Zen E., Prestegaard K.L. (1994) – Possible hydraulic significance of two kinds of potholes: Examples from the paleo-Potomac River. Geology, 22 (1), 47-50.
DOI : 10.1130/0091-7613(1994)022<0047:PHSOTK>2.3.CO;2

Abridged English Version

As with many European rivers, the River Garonne (SW France) has significantly changed its morphology and hydro-sedimentary dynamics during the 20th century as a result of the narrowing and incision of its riverbed, especially from the 1950s onwards (Jantzi et al., 2017a). In fact, this period corresponds to a big increase of human interference in the channel, with an intensification of in-stream mining in almost the entire channel (Beaudelin, 1989; Jantzi et al., 2017b). In parallel, this has been the subject of heavy bank protections to stabilize the river (Valette et al., 2014). During this time, the channel was also significantly incised, leading to an outcrop of the bedrock. In many places the sediment has been completely evacuated and reveals a molassic bedrock representing about 51% of the substrate of the minor bed (Delmouly et al., 2007).

If the channel incision has been reported since the early 1980s (Lambert, 1989; Beaudelin, 1989; Steiger et al., 1998, 2000), knickpoints and sculpted forms have been very poorly studied (Jantzi et al., 2017a; Jantzi, 2018). Until today, few studies have been carried out on stratified sedimentary rocks such as molasses. The aim of this work therefore is to study the sculpted forms developed on a molassic substrate in the middle course of the River Garonne. The interest of this study area is multiple: (i) the sculpted forms are exposed in limited areas and knickpoints can be easily accessible at the low water stage; (ii) these knickpoints are recent mesoforms, identified since the 1960s, providing an idea of the formation rates of these sculpted forms; (iii) their role in channel incision is a question that has not yet been discussed at this time scale and in this context. Therefore, this work must lead to: (i) determine a typology of sculpted forms from a field inventory and morphometric survey; (ii) characterization of their spatial distribution from a GIS and statistical approach; (iii) statistically analyze the geometric characteristics of potholes that are one of the most common forms.

Approximately 900 forms were collected using a systematic sampling. The method consisted of a survey of the forms along cross sections perpendicular to the channel axis and materialized by a stretched wire every 10 m. For each intersected form, several measurements were carried out such as the location using a dGPS, the orientation, the presence of cracks and their orientation, the size of the largest sediment and the geometry (width, length, depth). Each form has also been identified. Then the location of the forms was integrated into ArcGis software to analyze their spatial distribution. To characterize the latter, density maps were produced using the kernel and quadrat methods. To complete this statistical approach, the Dispersion Index and Morisita Index were calculated from the quadrat analysis to determine the distribution type (random, homogeneous or aggregated). Geometrical parameters of the potholes were analyzed using standard statistics.

Field inventory highlighted a significant number of different sculpted forms (52 in total), reflecting a large morphological diversity of forms as well as erosion and control processes involved in their formation and evolution. Results of the spatial distribution of forms obtained from the density maps show an aggregated distribution for

article sous presse

each site, that is confirmed by the Dispersion Index ($I_D \geq 1.7$) and Morisita Index ($I_M \geq 1.3$). This suggests that according to the sectors, the probability of occurrence of the forms is not the same. From observations, spatial distribution can be correlated with the hydro-geomorpholical situation (topography, surface roughness, spatial organization of knickpoints, water level, flow velocity, etc.), both at the knickpoint scale and locally. It appears that high densities are more frequently observed near the main flow channel and at the upstream part of the knickpoint, where the hydraulic stresses are potentially the highest. Conversely, the less dense sectors are located close to the banks and at the downstream part of the knickpoint. Local flow conditions in relation to the micro-topography also play an important role in explaining the localized concentrated forms within a low density area. Preferential distributions have been shown according to the type of forms, in relation to local hydro-geomorphological conditions. Also, with some forms being associated with specific erosion processes, it was observed that the development of knickpoint is not homogeneous, with a topography evolving preferentially to certain erosion processes. Local factors are therefore determinant in the nature of channel erosion.

Concerning the study of potholes, the results lead to three main observations. Firstly, potholes are correlated with surface irregularities (81% of forms are related to joints, pits generated by hitting rock fragments, etc.) weakening the rock and leading to the initiation of potholes. Secondly, potholes with diameter (D) and depth (Z) less than ≈ 22 cm entrap the most sediments. The distribution of the number of particles as a function of diameter-to-depth ratio is bigger for $D/Z \approx 1.1 \pm 0.2$ while the larger particles are observed at a ratio of ≈1.4 ±0.5. Thirdly the diameter and the depth have a significant correlation with $D = \beta Z + \varepsilon$ ($R^2 \geq 0.66$). Observed $\beta < 1$ (ratio of diameter expanding speed to deepening speed) indicates that depth increases faster than diameter. This relationship tends to suggest that during their growth, potholes are brought to merge with other potholes (coalescence) leading to their decay as an individual form. Thus, the process of coalescence of potholes and sculpted forms in general would be an important factor of knickpoint erosion, suggesting that vertical erosion (incision) would not be the only factor to the development of knickpoint.

article sous presse