

**UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE**

Ecole Doctorale SESAM - Laboratoire Préhistoire, Géomorphologie, Quaternaire

**UNIVERSITÉ DE BUCAREST**

Ecole Doctorale Simion Mehedinți - Département de Géomorphologie et Pédologie

Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Géographie

**LA DYNAMIQUE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE  
DE LA RIVIÈRE PRAHOVA (ROUMANIE) :**

**fonctionnement actuel, évolution récente et conséquences géographiques**



présentée et soutenue par

**Gabriela IOANA-TOROIMAC**

le 25 novembre 2009

Jury :

**Yvonne BATTIAU-QUENEY**, Professeur émérite à l'Université de Lille 1 (Directrice)

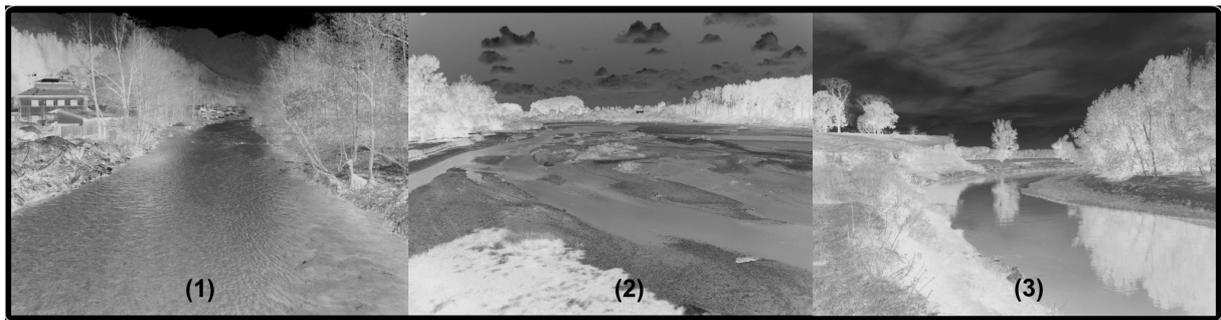
**Florina GRECU**, Professeur à l'Université de Bucarest (Co-directrice)

**Gilles ARNAUD-FASSETTA**, Professeur à l'Université de Paris 12 (Rapporteur)

**Gérard BELTRANDO**, Professeur à l'Université de Paris 7

**Dănuț PETREA**, Professeur à l'Université Babeș-Bolyai

**Liliana ZAHARIA**, Professeur à l'Université de Bucarest (Rapporteur)



Photos en couverture :1) rivière Prahova à Sinaia, dans les Carpates - chenal unique et sinueux (28.04.2007) ; 2) rivière Prahova à Stăncești, dans la Plaine de Ploiești - chenaux tressés (24.08.2006) ; 3) rivière Prahova à Brazii, dans la Plaine de Gherghița - chenal unique à méandres (18.10.2007).



## REMERCIEMENTS

Ma thèse est le résultat d'une collaboration franco-roumaine. Tout a commencé par une bourse Erasmus que l'Université de Bucarest m'a accordé pour étudier à l'Université de Lille 1 en 2003-2004. Suite à mes premières rencontres françaises, j'ai souhaité revenir à Lille 1 pour suivre les cours du Master de Milieux Naturels et Anthropisés (2004-2005). Ensuite les deux universités m'ont accordé la confiance et le soutien financier, qui m'ont permis de continuer mes recherches géographiques par une thèse de doctorat en co-tutelle.

A présent ma thèse s'achève et je voudrais remercier toutes celles et tous ceux qui ont été à côté de moi durant cette aventure franco-roumaine.

Tout d'abord je voudrais exprimer ma gratitude à mes directrices de thèse, Mesdames Yvonne Battiau-Queney et Florina Grecu, qui ont accepté de diriger ma thèse, qui m'ont fait découvrir des nouveaux champs de recherche, qui m'ont aidée à progresser et à achever ma thèse.

Je tiens également à remercier Monsieur Gérard Beltrando, qui a souhaité s'impliquer dans ce projet franco-roumain et qui a co-encadré ma thèse ; ses corrections et ces conseils ont permis d'améliorer mon travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury, Madame Liliana Zaharia, Messieurs Gilles Arnaud-Fassetta et Dănuț Petrea, d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Un rôle très important dans ma formation scientifique revient à mes directeurs de mémoire de Master, Madame Liliana Zaharia et Monsieur Sylvain Bigot. Sans eux, cette aventure franco-roumaine n'aurait pas été possible ! C'est pour tout cela que je tiens à les remercier.

Je souhaite faire mention de ma reconnaissance à Monsieur Pierre-Gil Salvador, qui a eu l'amabilité de lire une partie de ma thèse et qui m'a donné des suggestions qui m'ont permis d'améliorer mon travail ; à Monsieur Olivier Planchon et à Madame Virginie Vergne pour leur collaboration qui m'a fait découvrir les situations météorologiques et les zones humides.

Mes recherches n'auraient pas été possibles sans la collaboration de quelques institutions que je tiens à remercier : l'Administration Nationale de Météorologie ; l'Administration Nationale des Eaux Roumaines ; l'Institut National d'Hydrologie et de la Gestion des Eaux ; la Société de Gestion des Eaux Prahova ; la Station hydrologique de Ploiești ; la Direction

Topographique Militaire ; la Bibliothèque de l'Académie Roumaine et en particulier Madame Mariana Radu ; le Fond National Géodésique.

Un grand merci à mes amis de Bucarest, de Lille et de Paris pour leurs conseils scientifiques, administratifs et pour leur soutien moral : Elodie Castex, Laura Comănescu, Salem Dahech, Robert Dobre, Alexandru Drăghici, Luc Florent, Magalie Franchomme, Dragoș Găitănar, Cristina Ghiță, Cătălina Gheorghe, Emilie Goval, David Herisson, Bertrand Lefèvre, Sorin Oprea, Johan Oszwald, Răzvan Săcrieru, Guillaume Schmitt, Ionuț Șandric, Ioana Valentir, Mircea Vișan. Un merci tout à fait spécial à ma famille d'accueil en France (familles Lacoste et Belval) pour tout ce qu'elle a fait pour moi. Merci Céline, merci Marie Do, merci Emilie !

Je voudrais dédier ma thèse à mes parents qui m'ont donné confiance en moi-même et qui m'ont toujours soutenue dans mes projets.

# RÉSUMÉ

## **La dynamique hydrogéomorphologique de la rivière Prahova (Roumanie) : fonctionnement actuel, évolution récente et conséquences géographiques**

Le but de cette thèse est de contribuer à la compréhension de la dynamique des rivières carpatiques par une approche hydrogéomorphologique, qui se base essentiellement sur l'analyse des documents cartographiques, sur des observations de terrain et sur des séries de débits liquides. La thèse prend pour cadre de réflexion la rivière Prahova (Roumanie). En 1900, la Prahova formait : un secteur à chenal unique et à ébauches de tresses dans les Carpates, un secteur en tresses dans les Subcarpates et dans la Plaine de piémont de Ploiești qui se transformait en un secteur divagant sur les derniers kilomètres de cette plaine et un secteur à méandres dans la Plaine de subsidence de Gherghița-Sărata. Entre 1900 et 2005, la bande active de tressage a migré latéralement, s'est rétrécie et incisée localement surtout après 1980, favorisant la mise en place de la ripisylve. Ces processus mettent en danger les voies de transport qui longent la Prahova carpatique et subcarpatique. Les méandres recoupés entre 1855 et 1980 portent à présent des marais ; après 1980, les méandres libres et ancrés de la Prahova sont devenus moins actifs. Dans le secteur à méandres, la récurrence du débit à pleins bords est supérieure à 3 ans et ces inondations décennales mettent en danger des zones résidentielles. Cette évolution a été déterminée par des modifications environnementales et par des interventions anthropiques dans le bassin de la Prahova surtout après 1960. En conclusion il est nécessaire de préserver l'espace de liberté de la Prahova et de tenir compte du principe de connectivité longitudinale afin de prévenir le risque associé à la dynamique de la rivière et de préserver la diversité des paysages fluviaux et le bon fonctionnement des zones humides alluviales.

**Mots-clés :** rivière, approche hydrogéomorphologique, chenaux tressés, chenaux à méandres, espace de liberté de la rivière, zones humides alluviales, débit à pleins bords, Carpates.



## REZUMAT

### **Dinamica hidrogeomorfologică a râului Prahova (România): funcționare actuală, evoluție recentă și consecințe geografice**

Scopul acestei teze este de a contribui la înțelegerea dinamicii râurilor carpatice dintr-o perspectivă hidrogeomorfologică, care se bazează pe analiza de documente cartografice, observații de teren și serii de debit lichide. Aceasta problematică este aplicată pe râul Prahova (România). La 1900, râul Prahova forma: un sector cu albie unică și început de împletiri în Carpați, un sector cu albie împletită în Subcarpați și în Câmpia de piemont a Ploieștiului, care se transformau în albie divagante pe ultimii kilometri din aceeași câmpie și un sector cu meandre în Câmpia de subsidență Gherghița-Sărata. Între 1900 și 2005, suprafața activă de împletire a migrat lateral, s-a restrâns și s-a degradat local mai ales după 1980, ceea ce a favorizat apariția și dezvoltarea unei păduri riverane. Aceste procese pun în pericol căile de transport care urmează cursul Prahovei în Carpați și în Subcarpați. Belciugele formate prin autocaptarea meandrelor între 1855 și 1980 păstrează mlaștini; după 1980, meandrele libere și ancorate ale Prahovei au devenit mai puțin active. În sectorul cu meandre, frecvența debitului la maluri pline depășește 3 ani, iar inundațiile decenale pun în pericol zonele rezidențiale. Această evoluție a fost determinată de modificările de mediu și de intervențiile antropice din bazinul Prahovei de după 1970. În concluzie, este necesar să se păstreze spațiul de libertate al râului Prahova și să se țină cont de principiul conectivității longitudinale pentru a prevedea riscul asociat dinamicii fluviale și pentru a asigura diversitatea peisajelor fluviale și o bună funcționare a zonelor umede aluviale.

**Cuvinte cheie:** râu, perspectivă hidrogeomorfologică, albie împletite, albie meandrate, spațiu de libertate al râului, zone umede aluviale, debit la maluri pline, Carpați.



## ABSTRACT

### **The hydrogeomorphological dynamics of Prahova River (Romania): current functioning, recent evolution and geographical consequences**

The purpose of this paper is to contribute to a better knowledge of the Carpathian rivers' dynamics using a hydrogeomorphological approach, based on the analysis of cartographic documents, field observations and discharge data series. This approach is applied to the Prahova River. In 1900, Prahova River was creating: a sector of sinuous channel with braiding tendency in the Carpathians, a sector of braided channels in the Subcarpathians and in the piedmont Plain of Ploiești which were turning into wandering channels on the last kilometres of the same plain and a sector of meandering channels in the subsidence Plain of Gherghița-Sărata. Between 1900 and 2005, the braidplain migrated laterally, narrowed and incised locally, thus favouring the emergence and development of a riparian forest. These processes endanger the transport infrastructure following Prahova valley in the Carpathians and in the Subcarpathians. The meanders which were cut-off between 1855 and 1980 keep inside oxbow swamps; after 1980, the free and anchored meandering channel became less active. In the meandering sector, the frequency of the bankfull discharge exceeds 3 years and the decennial floods endanger the residential areas. This evolution is the consequence of the environmental changes and of the human interventions in the Prahova catchment after 1970. In conclusion, it is necessary to protect the Prahova River's freedom space and to take into account the principle of longitudinal connectivity in order to prevent the river dynamics risk and to preserve the fluvial landscape diversity and the alluvial wetlands.

**Key-words:** river, hydrogeomorphological approach, braided channels, meandering channels, river's freedom space, alluvial wetlands, bankfull discharge, Carpathians.



# TABLE DE MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	3
RÉSUMÉ .....	5
REZUMAT .....	7
ABSTRACT .....	9
TABLE DE MATIÈRES.....	11
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	15
<b>1. Cadre thématique .....</b>	<b>17</b>
1.1. La rivière en tant que système : connectivité longitudinale, connectivité latérale et perturbations .....	18
1.2. Styles fluviaux .....	21
<b>2. Problématique et structure de la thèse .....</b>	<b>29</b>
<b>3. Cadre méthodologique .....</b>	<b>30</b>
<b>4. Cadre géographique : la Prahova - une rivière carpatique .....</b>	<b>32</b>
<b>PREMIÈRE PARTIE.....</b>	<b>39</b>
<b>FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DE LA PRAHOVA .....</b>	<b>39</b>
<b>1.1. Introduction : fonctionnement de la rivière dans son bassin versant .....</b>	<b>41</b>
<b>1.2. Régime hydrologique et crues de la Prahova .....</b>	<b>43</b>
1.2.1. Introduction .....	43
1.2.2. Démarche méthodologique .....	44
1.2.2.1. Données climatiques et hydrologiques.....	44
1.2.2.2. Méthodes appliquées.....	45
1.2.3. Contraintes climatiques - prémisses pour l'analyse du régime hydrologique.....	50
1.2.4. Prahova - un régime hydrologique nivo-pluvial .....	52
1.2.5. Variations mensuelles des débits de pointe de la Prahova .....	56
1.2.6. Crues de référence de la Prahova.....	58
1.2.6.1. La crue de juillet 1975 .....	58
1.2.6.2. La crue de septembre 2001 .....	60
1.2.6.3. Les crues de l'années 2005 .....	61
1.2.6.4. La crue de mars 2007.....	65
1.2.7. Conclusions .....	70
<b>1.3. Débit à pleins bords et puissance fluviale de la Prahova : détermination et signification hydrogéomorphologique .....</b>	<b>71</b>
1.3.1. Introduction .....	71
1.3.2. Démarche méthodologique .....	72
1.3.2.1. Détermination du niveau à pleins bords - travail de terrain.....	72
1.3.2.2. Calcul du débit à pleins bords par la formule de Manning-Strickler .....	75
1.3.2.3. Calcul de la fréquence du débit à pleins bords.....	78
1.3.2.4. Calcul de la puissance fluviale .....	81
1.3.3. Variations du débit à pleins bords et de la puissance fluviale de la Prahova .....	81
1.3.3.1. Aperçu des dimensions du chenal fluvial / bande active.....	81
1.3.3.2. Variations spatiales du débit à pleins bords et de la puissance fluviale.....	83
1.3.3.3. Temps de retour du débit à pleins bords .....	92

1.3.4. Conclusions .....	94
<b>1.4. Conclusions de la première partie.....</b>	<b>95</b>
<b>DEUXIÈME PARTIE.....</b>	<b>97</b>
<b>ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA PRAHOVA SOUS L'INFLUENCE DES FACTEURS NATURELS ET ANTHROPIQUES.....</b>	<b>97</b>
<b>2.1. Introduction : le contexte de l'évolution récente des rivières montagneuses européennes ....</b>	<b>99</b>
<b>2.2. Démarche méthodologique : analyse réalisée à partir d'une étude cartographique diachronique.....</b>	<b>103</b>
2.2.1. Documents utilisés.....	103
2.2.2. Mise en place de l'étude diachronique.....	107
2.2.3. Interprétation des résultats.....	110
2.2.3.1. Détermination du style fluvial.....	110
2.2.3.2. Reconstitution de chenal fluvial à partir des documents utilisés .....	114
<b>2.3. Evolution récente de la Prahova.....</b>	<b>117</b>
2.3.1. Le style fluvial - prémisses de sectorisation de la Prahova .....	117
2.3.2. Evolution de la bande active de tressage de la Prahova.....	125
2.3.2.1. Rétrécissement de la bande active à la fin du 19 <sup>ème</sup> siècle.....	125
2.3.2.2. Le rétrécissement de la bande active continue au 20 <sup>ème</sup> siècle .....	127
2.3.2.3. Le rétrécissement de la bande active s'intensifie après 1980.....	132
2.3.2.4. Incision du chenal de la Prahova essentiellement après 1980 : études de cas .....	134
2.3.2.4.1. Incision du chenal subcarpatique de la Prahova .....	134
2.3.2.4.2. Incision du tronçon Piatra-Pisculești .....	138
2.3.2.5. Métamorphose fluviale de la Prahova .....	140
2.3.3. Evolution des méandres de la Prahova .....	144
2.3.3.1. Evolution active avant 1955 versus évolution lente après 1955 .....	147
2.3.3.2. Prahova - méandres ancrés .....	157
<b>2.4. Facteurs responsables de l'évolution de la Prahova .....</b>	<b>159</b>
2.4.1. Variations climatiques .....	159
2.4.1.1. La fin du Petit Âge Glaciaire .....	159
2.4.1.2. Diminution du cumul de précipitations depuis la fin du 19 <sup>ème</sup> siècle.....	163
2.4.1.3. Diminution de la magnitude des événements hydropluviométriques extrêmes ? .....	167
2.4.2. Rôle des facteurs anthropiques .....	170
2.4.2.1. Effets de l'exploitation des graviers et des sables.....	170
2.4.2.2. Effets des barrages-réservoirs .....	173
2.4.2.3. Impact de l'endiguement du chenal de la Prahova.....	178
<b>2.5. Conclusions de la deuxième partie .....</b>	<b>181</b>
<b>TROISIÈME PARTIE.....</b>	<b>185</b>
<b>CONSÉQUENCES DE LA DYNAMIQUE DE LA PRAHOVA DANS SON ESPACE DE LIBERTÉ.....</b>	<b>185</b>
<b>3.1. Introduction : le contexte de la nécessité de préserver l'espace de liberté de la rivière .....</b>	<b>187</b>
<b>3.2. Délimitation de l'espace de liberté de la Prahova .....</b>	<b>190</b>
3.2.1. Introduction .....	190
3.2.2. Démarche méthodologique .....	191
3.2.3. Espace de liberté de la Prahova. Etudes de cas pour des tronçons à dynamiques différentes.....	195
3.2.3.1. L'exemple d'un tronçon carpatique .....	196
3.2.3.2. L'exemple d'un tronçon subcarpatique.....	198
3.2.3.3. L'exemple des deux tronçons tressés dans la Plaine de Ploiești.....	201
3.2.3.4. L'exemple de deux tronçons à méandres dans la Plaine de Gherghița .....	207
3.2.4. Discussions et conclusions.....	215

<b>3.3. Les enjeux liés à la dynamique de la Prahova.....</b>	<b>218</b>
3.3.1. Introduction .....	218
3.3.2. Démarche méthodologique.....	219
3.3.3. Les enjeux liés aux processus de dynamique fluviale (érosion des berges, incision, aggradation) .....	221
3.3.3.1. <i>Les problèmes récents des voies de transport</i> .....	221
3.3.3.1.1. Les problèmes de la route DN1/E60 .....	221
3.3.3.1.2. Ponts routiers et ferroviaires traversants la Prahova .....	224
3.3.3.2. <i>Etat des ouvrages de protection des zones industrielles de Comarnic et de Poiana Cămpina</i> .....	228
3.3.3.3. <i>Recul de la terrasse de la Prahova menaçant les localités de Piatra et de Stejaru</i> .....	230
3.3.4. Les enjeux liés aux inondations par débordement de la Prahova.....	232
3.3.4.1. <i>Sinaia : l'exemple de l'inondation de mars 2007</i> .....	232
3.3.4.2. <i>Gherghița : exemples des inondations de juillet 1975, de septembre 2005 et de mars 2007</i> .....	234
3.3.4.3. <i>La pollution de l'eau de la Prahova – un danger supplémentaire</i> .....	239
3.3.5. Conclusions .....	243
<b>3.4. Les zones humides alluviales de la Prahova et leur gestion .....</b>	<b>244</b>
3.4.1. Introduction .....	244
3.4.2. Démarche méthodologique.....	246
3.4.2.1. <i>Calcul des indices de végétation par la télédétection</i> .....	246
3.4.2.2. <i>Valorisation de l'étude cartographique diachronique</i> .....	249
3.4.3. Mosaïque des zones humides alluviales de la Prahova.....	249
3.4.3.1. <i>Ripisylves</i> .....	251
3.4.3.2. <i>Mares et marais</i> .....	252
3.4.3.3. <i>Près et pâtures</i> .....	254
3.4.4. Quelle gestion des zones humides alluviales de la Prahova ?.....	267
3.4.4.1 <i>Ripisylve du tronçon en tresses - conservation de cette zone-tampon</i> .....	267
3.4.4.2. <i>Les marais de la Prahova - logiques multiples de gestion</i> .....	271
3.4.4.3. <i>Pâtures utilisées pour l'élevage du bétail</i> .....	278
3.4.5. Conclusions et perspectives de l'usage des zones humides alluviales.....	279
<b>3.5. Conclusions de la troisième partie.....</b>	<b>281</b>
<b>CONCLUSIONS GÉNÉRALES .....</b>	<b>283</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>289</b>
<b>LISTE DES SIGLES .....</b>	<b>309</b>
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>311</b>
<b>TABLE DES FIGURES .....</b>	<b>313</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX.....</b>	<b>319</b>
<b>TABLE DES PHOTOS .....</b>	<b>321</b>
<b>TABLE DES ANNEXES.....</b>	<b>323</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>325</b>
<b>Annexe 1. Caractérisation du bassin versant de la Prahova par des cartes.....</b>	<b>327</b>
<b>Annexe 2. Localités de la vallée de la Prahova : situation administrative territoriale, nombre d'habitants, attestation historique, toponymie.....</b>	<b>335</b>



## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**



## 1. Cadre thématique

Le but de la thèse est de contribuer à une meilleure connaissance de la dynamique des rivières ayant leurs sources dans des régions de montagne (essentiellement de la zone de moyennes latitudes) par une approche hydrogéomorphologique. Ces rivières et ce type d'approche ont été choisis comme cadre thématique de recherche pour quatre raisons principales : 1) le milieu de montagne est susceptible de subir facilement l'impact des variations du climat, qui pourraient se ressentir au niveau des sources d'alluvions et du régime hydrologique des rivières ; 2) les particularités de la dynamique de ces rivières de montagnes favorisent certains axes socio-économiques ; leur puissance est utilisée pour obtenir de l'énergie hydraulique ; leurs alluvions sont exploitées... ; ces pratiques pourraient avoir des effets sur leur équilibre sédimentaire et sur leur régime hydrologique ; 3) en conséquence, par leur position, ces rivières peuvent subir des ajustements significatifs à une échelle temporelle récente ; elles ressentent aussi bien l'impact des activités humaines, que les variations du climat ; 4) ces ajustements peuvent avoir des conséquences sur le fonctionnement des milieux riverains et sur les enjeux socio-économiques.

Par le cadre thématique de recherche, la thèse s'inscrit dans les travaux de recherches antérieurs qui portent sur les rivières carpatiques roumaines (Ichim *et al.*, 1989 ; Tetelea, 2005 ; Petrea *et al.*, 2006, 2007 ; Rădoane *et al.*, 2007, 2008, 2009), sur les rivières carpatiques polonaises (Wyzga, 1996, 2001 ; Maruszczak, 1997 ; Starkel, 2005, 2006 ; Lach et Wyzga, 2002 ; Malik, 2005 ; Korpak, 2007 ; Zawiejska et Wyzga, sous presse), sur les rivières sudètes tchèques et polonaises (De Roo, 2001 ; Zielinski, 2003 ; Klimeck et Latocha, 2007 ; Latocha, 2009), sur les rivières alpines et apennines italiennes (Surian, 1999, 2002 ; Gurnell *et al.*, 2000 ; Rinaldi, 2003 ; Spaliviero, 2003 ; Surian et Rinaldi, 2003 ; Rinaldi *et al.*, 2005 ; Surian et Cisotto, 2007 ; Bertoldi *et al.*, 2009), sur les rivières alpines et celles du Massif central françaises (Peiry, 1987 ; Bravard, 1991, 2009 ; Piégay, 1995, 1996 ; Marston *et al.*, 1995 ; Bravard *et al.*, 1997, 1999 ; Landon et Piégay, 1994, 1999 ; Petit *et al.*, 1996 ; Piégay et Bravard, 1997 ; Landon *et al.*, 1998 ; Miramont *et al.*, 1998 ; Malavoi *et al.*, 1998 ; Gautier *et al.*, 2000 ; Bendjoudi *et al.*, 2002 ; Kondolf *et al.*, 2002, Liébault et Piégay, 2001 ; 2002 ; Marston *et al.*, 2003 ; Piégay *et al.*, 2003, 2005 ; Taillefumier et Piégay, 2002 ; Arnaud-Fassetta, 2003 ; Arnaud-Fassetta et Fort, 2008).

Afin de comprendre l'évolution de la rivière, on considère nécessaire de mettre l'accent sur quelques principes généraux concernant la dynamique des rivières.

## 1.1. La rivière en tant que système : connectivité longitudinale, connectivité latérale et perturbations

L'ensemble du réseau hydrographique et de son bassin versant est synthétisé par le concept de système fluvial (Schumm, 1977). Les systèmes fluviaux fonctionnent selon le principe des flux unidirectionnels, centrés sur le transfert spatial des sédiments au sein du bassin versant. En ce sens Schumm (1977) propose le découpage des bassins versants élémentaires et donc des cours d'eau en trois parties distinctes (Figure 1A) : 1) la zone de production, qui se trouve dans la partie supérieure du bassin versant et dont la fonction est de produire des sédiments ; cette zone se distingue par de fortes connexions latérales entre les versants et le chenal ; 2) la zone de transfert, qui correspond à la partie moyenne du bassin versant et dont la fonction est le transport des sédiments vers l'aval ; 3) la zone de stockage, située dans la partie inférieure du bassin versant et dont la fonction est l'accumulation des sédiments. Dans cette approche, est privilégiée la dimension longitudinale, que ce soit du bassin versant vers le chenal ou de l'amont vers l'aval.

En réalité il existe aussi des flux latéraux (Figure 1B) qui prennent une importance particulière dans les plaines alluviales et dont la prise en considération est à l'origine du concept d'hydrosystème fluvial (Amoros et Petts, 1993). En ce sens les débordements ont un rôle important, parce qu'ils assurent la connectivité latérale de l'hydrosystème. Les hydrosystèmes fluviaux ont aussi une dimension verticale qui concerne la superposition des écosystèmes superficiels et souterrains et leurs échanges, comme par exemple les relations entre les cours d'eau et les aquifères.

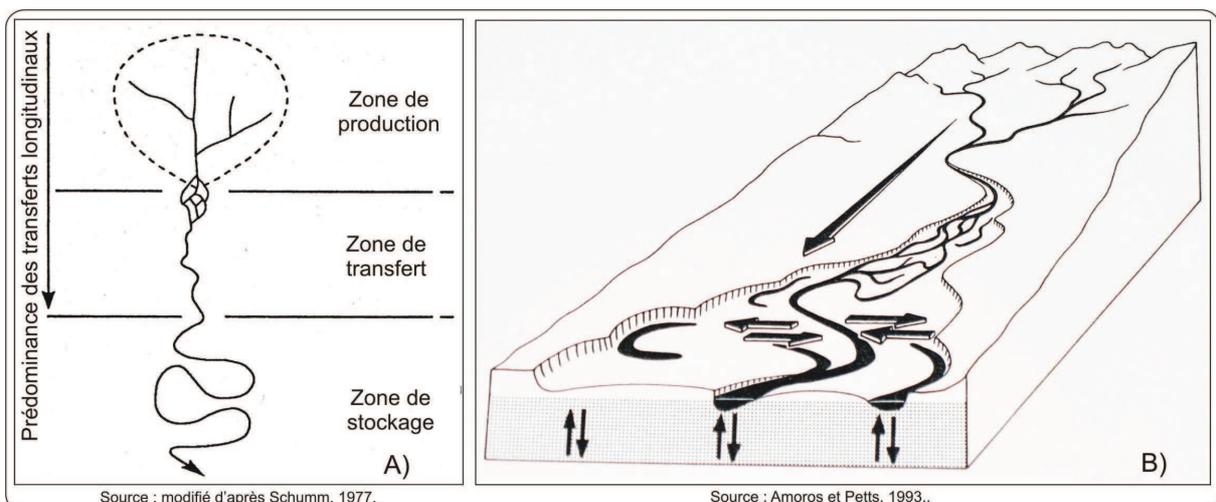
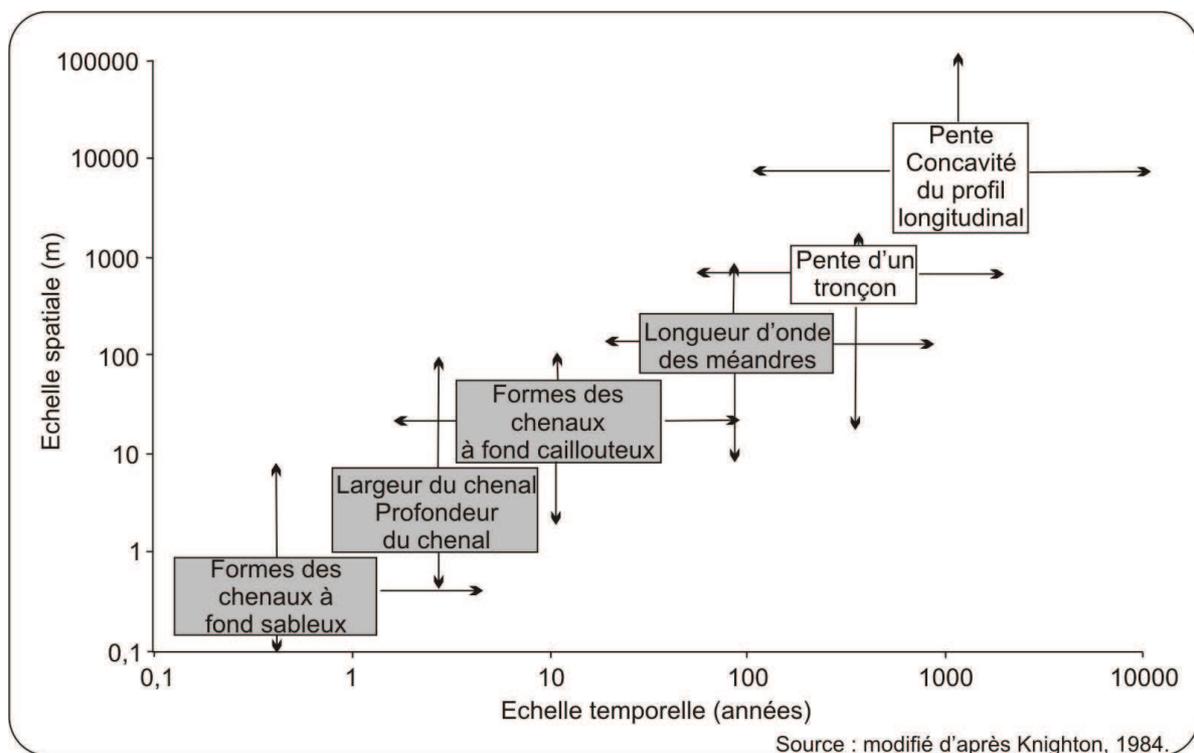


Figure 1. Directions des flux de matière et d'énergie (A) dans un système fluvial et (B) dans un hydrosystème fluvial.

Etant donné le fait que les rivières fonctionnent comme des systèmes à processus réponse, elles enregistrent les modifications qui se produisent dans leurs bassins versants. La réponse d'un système à des perturbations (modifications des variables de contrôle : climat, occupation du sol...) se fait en trois phases (Brunsdén, 1980 cité par Rollet, 2007) : 1) la phase de réaction, nécessaire à la mise en œuvre de l'ajustement ; 2) la phase de relaxation, nécessaire au rétablissement de conditions d'équilibre dynamique ; 3) et la troisième phase, qui se caractérise par la persistance des nouvelles conditions. Cela implique une quatrième dimension pour les hydrosystèmes fluviaux, qui est la dimension temporelle. L'équilibre dynamique est l'état moyen autour duquel le système fluctue et au sein duquel un certain degré de stabilité est établi (Knighton, 1984). Ce concept d'équilibre dynamique explique ainsi le principe selon lequel les hydrosystèmes fluviaux sont capables de retrouver un état proche de l'état d'origine après une perturbation. Cette capacité de rétablir des conditions proches de l'état initial s'appelle résilience. Dans certains cas, si les modifications des variables de contrôle sont durables, le nouvel état d'équilibre intervient après une transformation. Par exemple des événements rares de forte magnitude peuvent être responsables de changements catastrophiques de la morphologie des chenaux. Quand cette transformation implique le style fluvial, elle s'appelle métamorphose fluviale (Schumm, 1969).



**Figure 2. Echelle spatio-temporelle des modifications du chenal fluvial. Les modifications associées à l'échelle centennale sont notées en gris.**

En relation avec ces perturbations ou simplement comme résultat de la dynamique naturelle du cours d'eau, les chenaux fluviaux évoluent à des échelles de temps de  $10^1$ - $10^2$  ans (cf. Figure 2).

Par exemple la géométrie en long (pente) et en travers (largeur et profondeur) des chenaux fluviaux, ainsi que le style fluvial pourraient se transformer par rapport à un état initial si les flux en transit connaissent des modifications à longue durée ou subissent des épisodes de crise exceptionnels (Schumm, 1977 ; Knighton, 1984) :

$$Q_l^+ \text{ et } Q_s^+ = w^+, d^\pm, (w/d)^+, \lambda^+, S^\pm, I_s^-;$$

$$Q_l^- \text{ et } Q_s^- = w^-, d^\pm, (w/d)^-, \lambda^-, S^\pm, I_s^+;$$

$$Q_l^+ \text{ et } Q_s^- = w^\pm, d^+, (w/d)^\pm, \lambda^\pm, S^-, I_s^+;$$

$$Q_l^- \text{ et } Q_s^+ = w^\pm, d^-, (w/d)^\pm, \lambda^\pm, S^+, I_s^-;$$

où  $Q_l$  = débit liquide ;  $Q_s$  = débit solide (charge de fond) ;  $w$  = largeur du chenal ;  $d$  = profondeur du chenal ;  $\lambda$  = longueur d'onde des méandres ;  $S$  = pente du chenal ;  $I_s$  = sinuosité du chenal.

Starkel (1983) prend en compte dans ce système la tendance de l'évolution des variables de contrôle. Les équations qui en résultent sont :

$$Q_l^- > Q_s^- = w^-, d^-, \lambda^-, S^-, I_s^+ (A_m);$$

$$Q_l^- < Q_s^- = w^-, d^+, \lambda^-, S^-, I_s^+ (E_m).$$

La diminution de l'écoulement induit une réduction de la largeur du chenal, de la pente, de la longueur d'onde des sinuosités et l'augmentation de la sinuosité des méandres (m pour méandres). Si la réduction du débit liquide est moins importante que celle du débit solide, les processus d'aggradation sont dominants et inversement.

$$Q_l^+ < Q_s^+ = w^+, d^-, \lambda^+, S^+, I_s^- (A_t);$$

$$Q_l^+ > Q_s^+ = w^+, d^+, \lambda^+, S^+, I_s^- (E_t).$$

L'augmentation du débit liquide se manifeste par l'augmentation de la largeur du chenal, de la pente, de la longueur d'onde des sinuosités, mais par une diminution de l'indice de sinuosité. C'est la situation typique pour l'apparition des tresses (t). Si l'augmentation du débit liquide est moins importante que celle du débit solide, la compétence de la rivière diminue et le chenal est soumis à l'aggradation et inversement.

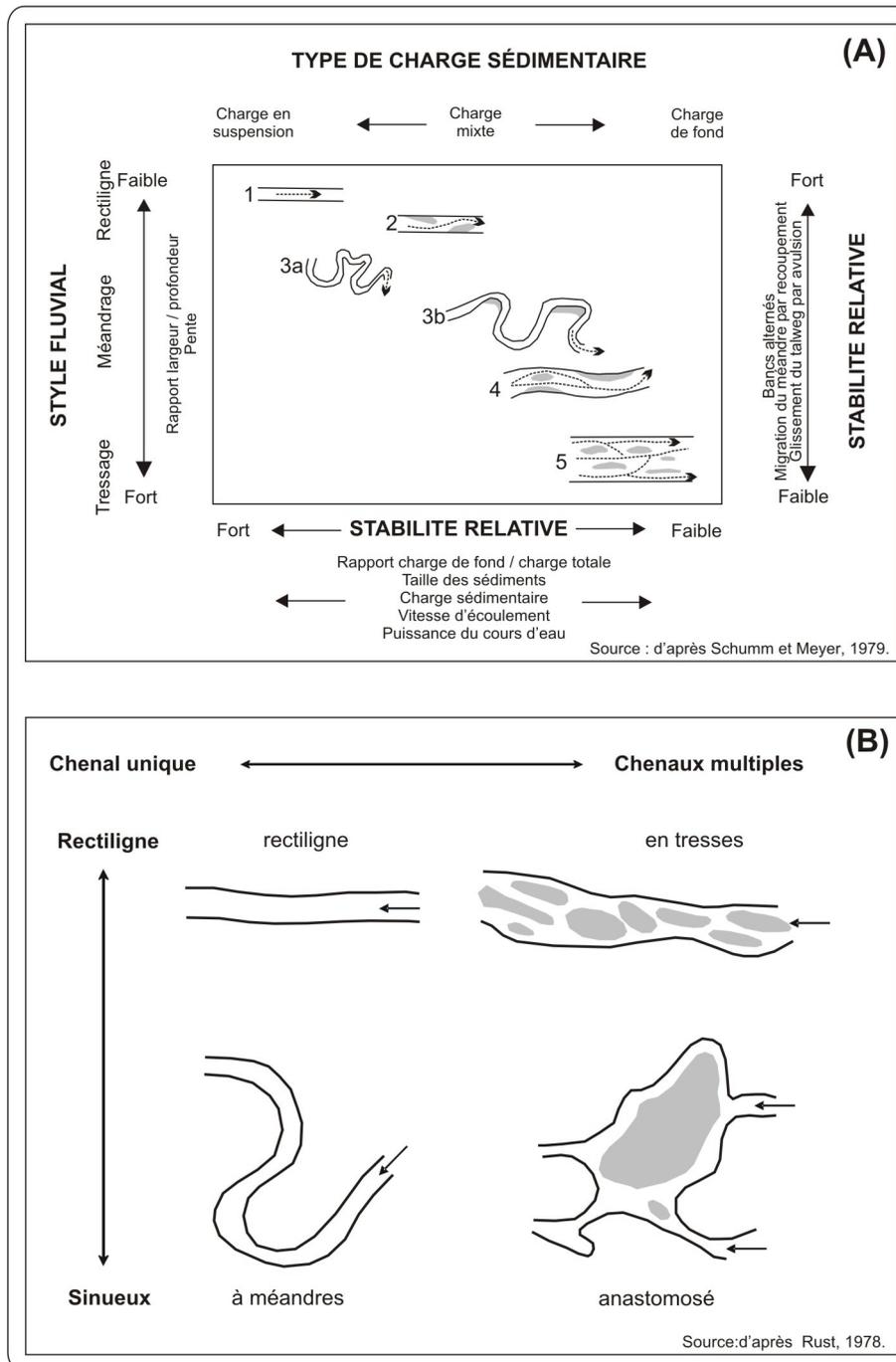
## 1.2. Styles fluviaux

Le chenal fluvial représente la composante d'un cours d'eau, constituée d'un lit et délimitée par des berges, qui peuvent être constituées d'alluvions ou/et de la roche en place. Du point de vue hydrologique, le chenal fluvial est soumis au régime hydrologique du cours d'eau. En situation de basses eaux, l'eau s'écoule par le talweg ou la ligne des plus grandes profondeurs, qui appartient au chenal fluvial. En situation de moyennes eaux et jusqu'à l'atteinte du niveau à pleins bords, l'eau occupe le chenal fluvial proprement dit. En situation de hautes eaux et de crue, dont le niveau est supérieur à celui à pleins bords, l'eau déborde dans le lit d'inondation. Du point de vue géomorphologique, dans le chenal fluvial se manifestent des processus d'érosion et d'accumulation qui affectent son lit ou/et ses berges, dont l'intensité varie dans l'espace et dans le temps.

Le style fluvial représente la forme en plan des chenaux fluviaux. Il est le résultat des apports combinés d'eau et de sédiments. En conséquence il dépend, d'une part, de caractéristiques naturelles du bassin versant (géologie, relief, climat, végétation, sol) et, d'autre part, de l'occupation du sol. Le style fluvial est considéré comme caractéristique de la physionomie d'un cours d'eau et, en général, il est démonstratif de sa dynamique.

Des contributions importantes dans le développement de cet axe de recherche concernant le style fluvial ont été apportées par Leopold et Wolman (1957), Brice (1964, 1984), Schumm (1968, 1985), Rust (1978), Knighton et Nanson (1993), Nanson et Knighton (1996), Neill (1973). Leopold et Wolman (1957) proposent la première classification des styles fluviaux selon les critères de sinuosité et de multiplicité des chenaux. Ils distinguent les styles fluviaux **rectilignes**, à **méandres** et **en tresses**. Contrairement aux cours d'eau rectilignes, les méandres se caractérisent par un taux de sinuosité supérieur à 1,5. Les cours d'eau en tresses se caractérisent par la division de l'écoulement en deux ou plusieurs bras entourant des îles. Schumm (1968) propose une classification fondée sur la charge solide (charge de fond, charge « mixte » et charge en suspension) et sur le nombre de chenaux (unique, multiples) (cf. Figure 3 A). Le type 1 est un chenal rectiligne dont la largeur est presque uniforme. Il se caractérise par une charge en suspension. Le rapport largeur/profondeur est faible. Les bancs d'alluvions créés se déplacent à l'intérieur du chenal sans créer d'instabilités latérales ; ce sont les chenaux les plus stables. Le type 2 est un chenal rectiligne dont le talweg est sinueux. Ces cours d'eau se caractérisent une charge mixte qui favorise la formation de bancs latéraux ; leur déplacement peut déterminer l'instabilité latérale du chenal. Les types 3a et 3b

représentent des chenaux à méandres, dont l'organisation diffère en fonction du type de charge. Le type 3b, qui se caractérise par une charge mixte et la présence de bancs alluviaux latéraux, est moins stable ; il est favorable à la migration latérale. Le type 4 est une forme de transition entre les chenaux à méandres et les chenaux en tresses. Le type 5 représente les chenaux tressés. Ils se caractérisent par une charge de fond qui favorise l'apparition de bancs peu stables et l'érosion des berges. L'ensemble de ces chenaux est favorable à l'évolution latérale. En conséquence le rapport largeur/profondeur est important. Les chenaux en tresses sont les moins stables. En conclusion l'instabilité des chenaux augmente du type 1 au type 5, donc des chenaux rectilignes aux chenaux tressés. A partir de recherches effectuées sur plusieurs rivières australiennes, le même auteur propose un nouveau type de style fluvial qui se caractérise par des chenaux multiples et une charge en suspension : le style **anastomosé**. Rust (1978) propose une classification des styles fluviaux selon la sinuosité et la multiplicité des chenaux (cf. Figure 3 B). Il définit les chenaux anastomosés comme des chenaux multiples et sinueux. Brice (1984) et Schumm (1985) distinguent les cours d'eau formant des **anabranches**, qui représente des chenaux, séparés par des îles stables et végétalisées. Bien que, dans un premier temps, les cours d'eau présentant des anastomoses et des anabranches soient confondus, Nanson et Knighton (1996) expliquent la différence par la nature des sédiments de la plaine alluviale : les cours d'eau anastomosés se forment dans des sédiments cohésifs et ils ont une énergie faible, tandis que les cours d'eau en anabranches se forment dans d'autres types de sédiments (sables, graviers). Neill (1973) distingue les cours d'eau **divagants**. Ils se caractérisent par plusieurs chenaux séparés par des îles couvertes par la forêt. Ils sont très mobiles latéralement, érodent leurs bancs et rendent mobiles les sédiments de la plaine alluviale. Ward *et al.* (2001) proposent un autre type de style fluvial : le style **tressé avec des îles** qui se caractérisent par plusieurs chenaux fluviaux séparés par des îlots couverts par la forêt.



**Figure 3. Classifications des styles fluviaux selon la charge solide (A) et selon la sinuosité et la multiplicité des chenaux fluviaux (B).**

En préfigurant les résultats de la thèse, cette analyse se focalise sur quatre styles fluviaux : rectilignes et sinueux, à méandres et en tresses. Les informations qui se retrouvent ci-dessus forment la base de la compréhension des styles fluviaux de la rivière Prahova.

La condition de base de la formation des chenaux rectilignes est la résistance élevée à l'écoulement, en raison de la résistance à l'érosion des parois ou de leur rugosité faible, par exemple (Leopold *et al.*, 1964). Ils se forment d'habitude dans la partie supérieure des bassins

versants (Beechie *et al.*, 2006), ou en relation avec la géologie et la géomorphologie locales (failles, gorges) selon Twidale (2004), ou encore en relation avec les travaux hydrauliques. Les chenaux rectilignes sont les moins fréquents. Le plus souvent les chenaux rectilignes se transforment en chenaux sinueux, qui, si l'extension du lit majeur le permet, se transforment en chenaux à méandres. Cette transformation consiste dans la modification des variables hydrauliques – variations de la vitesse en profil transversal sous l'influence de la force centrifuge, qui conduit à l'apparition des seuils et des mouilles (Leopold *et al.*, 1964) ; la mouille se forme au pied de concavité où se concentre la vitesse du courant ; le seuil se forme là où le courant est faible et les sédiments érodés s'accumulent ; le seuil se prolonge en aval par un banc latéral (banc de convexité dans le cas des méandres). Cette transformation est un mécanisme d'auto-organisation des cours d'eau, qui ont la tendance à consommer le minimum d'énergie, en cherchant à trouver un état d'équilibre, ce qui se manifeste par l'allongement du tracé conduisant à une réduction de la pente (Hooke, 2007a). Leopold *et al.* (1964) considèrent que les chenaux sinueux, voir à méandres, sont les plus proches de la situation d'équilibre. Selon les mêmes auteurs, le rôle de la charge solide dans l'apparition et le développement des méandres est secondaire ; à vrai dire aussi bien les cours d'eau supraglaciaires, que le Gulf Stream forment des méandres. Par rapport aux résultats de la thèse, il faut savoir que les méandres sont de plusieurs types : 1) selon leurs possibilités d'évoluer latéralement, ils peuvent être encaissés, libres et ancrés ; 2) selon leur degré de confinement et de mobilité, les méandres libres peuvent être actifs dans des alluvions grossières, confinés dans des alluvions fines et fixes avec des chenaux incisés dans les plaines deltaïques soumises à une surrection tectonique (Ikeda, 1989). La relation des méandres avec leur morphométrie est mise en évidence par les recherches de Hickin (1978), Allen (1982), Richards (1982).

A partir des premières classifications des styles fluviaux, présentées ci-dessus, les cours d'eau en tresses se caractérisent par des chenaux fluviaux multiples, séparés par des bancs alluviaux peu stables et constitués d'alluvions grossières ; en général les bancs alluviaux ne sont pas couverts de végétation, ce qui montre qu'ils peuvent être submergés plusieurs fois durant l'année. Les conditions de base du tressage sont (selon Leopold *et al.*, 1964 ; Knighton, 1984 ; Morisawa, 1985) : 1) la charge de fond abondante du cours d'eau, mais il faut également que la taille du matériau puisse, au moins localement, dépasser la compétence de façon à amorcer un dépôt ; ceci peut résulter d'une rupture de pente ou être fonction du matériau de recharge ; 2) la pente prononcée, qui donne au cours d'eau la puissance

nécessaire pour transporter sa charge de fond ; 3) les variations hydrologiques, qui favorisent l'instabilité des chenaux et le remaniement des bancs alluviaux ; 4) l'érodibilité des berges, qui permet l'extension en largeur du système de tresses. Les tresses sont un thème de recherches important (Best *et al.*, 1993 ; Klingeman *et al.*, 1998 ; Sambrook Smith *et al.*, 2006).

Afin de mieux comprendre la dynamique spécifique à chaque style fluvial, trois exemples sont proposés.

La rivière Pilchuck (Etats-Unis d'Amérique, Etat de Washington) est démonstrative pour la dynamique de son chenal rectiligne. La rivière prend sa source dans les montagnes des Cascades, à environ 650 m d'altitude. Elle se dirige vers l'ouest, puis elle change de direction, en se dirigeant vers le sud, en aval de la ville de Granite Falls. Le Pilchuck se jette dans la rivière Snohomish à environ 2 m d'altitude. Elle forme un bassin hydrographique de 329 km<sup>2</sup> qui correspond entièrement à une région de montagne d'origine magmatique, constituée essentiellement de granites. La rivière a une longueur de 64 km et un débit moyen annuel de 13 m<sup>3</sup>/s (United States Geology Survey, 2009). Son chenal a des tronçons rectilignes, formés d'une succession de mouilles et de seuils (Department of Natural Resource of Tulalip Tribes, 2009). Nous avons choisi cette rivière, parce qu'elle traverse une région de montagne, constituée de roches résistantes à l'érosion et occupée par des forêts, ainsi que pour ses dimensions ; tous ces aspects rappellent le secteur carpatique de la Prahova, dont les caractéristiques seront présentées dans le chapitre 2 de la thèse. Beechie *et al.*, (2006) ont mené une recherche sur les chenaux d'écoulement et la dynamique des lits d'inondation de sept bassins hydrographiques situés dans l'état de Washington, parmi lesquels celui de Snohomish ; un des sites pris en compte se trouve sur la rivière Pilchuck. Cette recherche met en évidence que le chenal rectiligne de cette rivière est relativement peu dynamique. Il évolue peu latéralement par érosion. En conséquence la partie médiane de son lit d'inondation n'a pas été renouvelée depuis d'environ 65 ans. Les mêmes auteurs estiment que le lit d'inondation est renouvelé tous les 10<sup>1</sup>-10<sup>2</sup> ans, en fonction de sa position par rapport au chenal. Ainsi la relation entre le chenal d'écoulement et le lit d'inondation est faible. De plus les débordements épisodiques sont susceptibles de contribuer à l'aggradation du lit d'inondation et à l'incision du chenal, ce qui contribue à la diminution de l'intensité de la relation à long terme entre les deux composantes du cours d'eau. Cette situation a une conséquence écologique : le lit d'inondation est colonisé par la végétation, mais les écotopes sont peu variés. En conclusion la dynamique hydrogéomorphologique relativement lente de ce

chenal rectiligne est déterminée, d'une part, par la résistance à l'érosion des roches dans lesquelles le chenal est sculpté, et, d'autre part, par le débit peu élevé et donc la puissance fluviale réduite du cours d'eau.

La rivière Prut est démonstrative (Roumanie) pour son chenal à méandres. La rivière prend ses sources dans les Carpates, en Ukraine, puis traverse le plateau de la Moldavie, constituant la frontière naturelle entre la Roumanie à l'ouest, l'Ukraine et la République Moldave à l'est, et se jette dans le Danube. La rivière a une longueur de 1181 km et une superficie du bassin hydrographique de 28463 km<sup>2</sup>. Son débit moyen annuel, en amont de la confluence avec le Danube, est de 85,3 m<sup>3</sup>/s. Le secteur présenté se trouve en aval de la localité d'Oroftiana (kilomètre 235 de la rivière), qui coïncide avec l'entrée du Prut en Roumanie, et il s'étend jusqu'à la confluence avec le Danube. Le choix de présenter ce secteur de la rivière dans la problématique de la thèse, réside dans la complexité des phénomènes et processus qui affectent cet hydrosystème à méandres ; de plus la pente faible (0,2‰) et la constitution lithologique du chenal rappellent le secteur à méandres de la rivière Prahova, présenté dans le chapitre 2 de la thèse. Le long de ce secteur de la rivière, le chenal, formé dans des matériaux friables (argiles, marnes, sables), crée des méandres, parmi lesquels 90% sont des méandres libres (Rădoane *et al.*, 2008a) ; en aval du barrage-réservoir de Stâncă-Costești, l'indice de sinuosité des méandres atteint localement la valeur 7. Dans ces méandres libres la berge concave est érodée et la sur la berge convexe il y a accumulation et inondation ; l'accumulation de la berge convexe se reflète dans l'apparition d'un banc alluvial latéral (Rădoane *et al.*, 2006b). A long terme (1915-2000), Rădoane *et al.* (2008a) montrent que les méandres ont évolué par migration vers l'aval et par des mécanismes de recouplement, en essayant de redresser son cours ; ces deux processus naturels ont eu une évolution progressive entre les années de l'analyse. De même Rădoane *et al.* (2008b) estiment que les rivières, et surtout celles à méandres, sont susceptibles de subir des processus d'avulsion lors des inondations ; en ce sens les auteurs prennent l'exemple des rivières roumaines affectées par les inondations de 2005. On précise que l'avulsion représente la séparation d'une portion de terrain de la rive d'un cours d'eau suite à la formation d'un nouveau chenal d'écoulement. Mais en 1978, un barrage-réservoir a été construit sur la rivière Prut dans la localité de Stâncă-Costești, au kilomètre 350 de la rivière. Suite à sa construction, le débit liquide s'est régularisé (débit assuré de 35 m<sup>3</sup>/s) et le débit solide d'alluvions en suspension diminue en aval du barrage (Rădoane *et al.*, 2006a). D'une part la dynamique fluviale naturelle et d'autre part l'intervention anthropique ont déterminé des changements importants dans la géométrie

du chenal d'écoulement. Rădoane *et al.* (2008a) montrent que, localement, le type de chenal d'écoulement a changé, en passant de tresses à méandres et d'un style sinueux à un style à méandres ; les méandres présentant des îlots ont évolué vers des méandres sans îlots ; suite aux recoupements des méandres, le chenal du cours d'eau est devenu sinueux sur des tronçons peu longs. Néanmoins cette évolution n'est pas prévisible ! En ce qui concerne l'évolution verticale, en amont du lac, le fond du chenal d'écoulement a enregistré un processus d'aggradation, tandis qu'en aval, le processus dominant est celui de dégradation. Selon les mêmes auteurs les principaux types de risques associés à la dynamique de la rivière Prut sont le risque d'inondation et le risque de forte érosion en cas d'événement hydrologique exceptionnel ; le risque est déterminé également par la présence des enjeux socio-économiques (localités, terrains agricoles) dans le lit d'inondation de la rivière. En ce sens, localement, des digues ont été construites ; elles sont susceptibles de résister à un débit dont la récurrence est inférieure à 0,5%. Effectivement des inondations se sont produites sur la rivière Prut en juillet 2008, en amont du lac de Stânca-Costești. Toutefois les inondations sont susceptibles d'être bénéfiques pour l'environnement. En ce sens, le secteur inférieur de la rivière est protégé pour sa biodiversité dans le cadre d'un parc naturel (Parcul Natural Lunca Joasă a Prutului Inferior, 2009).

Les rivières de la Nouvelle Zélande sont représentatives pour leurs chenaux tressés. A la sortie des montagnes, ces rivières sont généralement tressées en chenaux multiples ; le tressage est dû essentiellement à la charge alluviale abondante (de fond et en suspension), en tant que conséquence des processus intenses d'érosion (Mosley et Duncan, 1992, cités de Battiau-Queney, 1999). La puissance de l'érosion s'explique par la conjonction de plusieurs facteurs (selon Battiau-Queney, 1999) : 1) des précipitations abondantes de plus de 1000 mm par an et intenses ; il serait tombé jusqu'à 648 mm en 24 h dans les Alpes du Sud ; des volumes de plus de 180 mm par 24 h ne sont pas exceptionnels ; 2) de larges affleurements de matériaux peu résistants mécaniquement ; 3) la forte énergie de relief, la forte pente en relation avec la surrection crustale. Etant donné l'histoire de la Nouvelle Zélande, ses rivières se confrontent toujours avec des processus de tressage actifs, contrairement aux rivières européennes (Liébault *et al.*, 2005). Les plus importants systèmes tressés de la Nouvelle Zélande se trouvent dans les régions de Canterbury et Malborough (Department of Conservation of New Zealand, 2009), sur les versants orientaux des Alpes du Sud. Au nord de la région de Canterbury se trouve la rivière Ashley. Elle traverse les montagnes Puketeraki, la vallée de Lees, la gorge d'Ashley, puis la plaine de Canterbury du Nord et se jette dans la

l'Océan Pacifique, dans le golfe de Pegasus, au nord de la ville de Christchurch. Elle a un bassin hydrographique hétérogène, une longueur d'environ 90 km et un débit moyen annuel de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  ; son débit de pointe a atteint  $426 \text{ m}^3/\text{s}$  ; en aval de la gorge d'Ashley, pour les derniers 55 km de longueur, la rivière homonyme forme des tresses (Glova, 1988). La rivière Ashley est représentative des rivières de montagne de la Nouvelle Zélande, qui se caractérisent par des relations bien développées entre leurs éléments de géométrie hydraulique, malgré la tectonique active, ce qui montre que les processus qui les déterminent sont très intenses (Molnar et Ramirez, 2002 ; Wohl et Wilcox, 2005). Les interventions anthropiques dans le bassin de l'Ashley sont peu importantes, donc sa dynamique est quasi-naturelle. Depuis les années 1850, les pâturages du bassin de la rivière sont utilisés pour l'élevage des moutons. Et les seuls travaux de rectification du cours d'eau se résument à la construction d'un gabion dans les années 1930. L'intérêt de cette rivière pour notre recherche réside aussi dans le fait que l'hétérogénéité géomorphologique de son bassin et ses dimensions correspondent aux caractéristiques du secteur en tresses de la Prahova, telle qu'elles sont présentées dans le Chapitre 2 de la thèse. Warburton *et al.* (1993) mettent en évidence les principaux processus qui affectent cet hydrosystème en tresses. La bande active est constituée de plusieurs chenaux et bancs alluviaux. Parmi eux, quelques uns sont très mobiles, tandis que d'autres perdurent pendant 10 ans. Les plus importants changements de la physionomie de la bande de tressage ont lieu lors des crues, quand des chenaux anciens peuvent être réoccupés. A l'intérieur de la bande active, les chenaux sont affectés par des processus d'aggradation. En géomorphologie fluviale, l'aggradation correspond à l'exhaussement du fond du chenal d'écoulement. Dans le cas de la rivière Ashley, ce processus affecte les piliers du pont qui la traverse entre les affluents Whistler et Towshend, où l'aggradation a été de 1,5 m en 60 ans (1930-1990). La bande active a été affectée par des processus d'érosion des berges ; en conséquence la bande de tressage de la rivière migre, en se déplaçant vers le nord. De plus la largeur de la bande de tressage a évolué d'environ 80 m entre 1950 et 1992, sa tendance générale étant de s'élargir au détriment du lit d'inondation. Le lit d'inondation est affecté aussi par des processus d'avulsion. Ce processus est le plus souvent associé aux crues et aux inondations. Pour le tronçon analysé par Warburton *et al.* (1993), l'avulsion ne représente pas une menace pour la société étant donné le caractère naturel de l'hydrosystème Ashley ; mais, dans d'autres situations, ce processus pourrait être catastrophique. En ce qui concerne les crues et les inondations dans les hydrosystèmes en tresses, Morisawa (1985) mentionne que, lors d'inondations, ces cours d'eau se comportent comme les cours d'eau rectilignes.

## 2. Problématique et structure de la thèse

Dans le cadre thématique général de la dynamique des rivières de montagne, la thèse se focalise sur l'évolution récente et le fonctionnement actuel d'une rivière et, en second lieu, sur ses causes et sur ses conséquences.

- L'analyse de l'**évolution** du cours d'eau privilège les caractéristiques du chenal fluvial ; cette évolution permet de comprendre son **fonctionnement actuel**.
- La notion de « récente » se réfère à l'échelle temporelle des 150 dernières années ; elle a été choisie afin de pouvoir comptabiliser, parmi les **causes** de l'évolution et du fonctionnement du cours d'eau, aussi bien l'influence des facteurs naturels, que l'influence de l'Homme.
- Les **conséquences** portent sur l'espace utilisé par la rivière durant la période de temps analysée et à la manière dont l'Homme le gère et l'utilise en s'adaptant à ces caractéristiques naturelles.

La thèse est organisée en trois parties.

La première partie permet de mieux connaître le terrain d'étude et de passer de précipitations qui tombent aux caractéristiques du chenal fluvial. Cette première partie représente la base de la compréhension des parties ultérieures. Les phénomènes présentés dans cette partie, ainsi que les paramètres calculés se retrouveront, sous différentes formes (par exemple des comparaisons), ultérieurement dans la thèse. Cette partie de la thèse contribue à la compréhension du fonctionnement actuel de la Prahova.

La deuxième partie se focalise sur le chenal fluvial et son évolution durant les 150 dernières années en relation avec les changements environnementaux et les interventions anthropiques dans l'hydrosystème.

A partir des ajustements latéraux du chenal fluvial mis en évidence dans la partie antérieure, la troisième partie propose tout d'abord de délimiter l'espace utilisé par la rivière. Puis, cet espace est analysé afin de mettre en évidence : 1) les enjeux socio-économiques, qui se trouvent dans cet espace, affectés par la dynamique de la rivière ; 2) sur les zones humides - conséquence des ajustements latéraux du cours d'eau – et leur gestion.

### 3. Cadre méthodologique

Dans ce travail de recherche, il s'agit de donner le point de vue d'un géographe sur la dynamique d'une rivière, raison pour laquelle la thèse fait une synthèse de plusieurs types de données et de méthodes. **Le fil conducteur de la thèse est assuré par l'approche hydrogéomorphologique, qui se réfère à la relation entre l'eau chargée de sédiments et les formes de relief créées.** La notion d'hydrogéomorphologie s'impose après l'élaboration d'une méthode de délimitation des zones inondables (méthode hydrogéomorphologique), qui se base sur la structure des fonds des vallées – lit mineur, lit moyen, lit majeur exceptionnel (Masson, 1983).

Les données et les méthodes utilisées dans la thèse sont énumérées ci-dessous.

- **Documents cartographiques intégrés et analysés dans une étude cartographique diachronique.** Les données utilisées sont : des iconographies (cartes de Szathmary) faites d'après des levés de terrain de 1854-1855 ; des plans militaires faites d'après des levés de terrain des années 1897-1902 ; deux séries de cartes topographiques faites d'après des levés de terrain des années 1954-1955 et 1977-1980 ; photos aériennes des années 2003-2005. Ces données proviennent de la Bibliothèque de l'Académie Roumaine (BAR), de la Direction Topographique Militaire (DTM) et du Fond National Géodésique (FNG). Elles ont été choisies afin de couvrir entièrement la longueur de la rivière. Les données ont été intégrées dans un Système d'Informations Géographiques et analysées en comparaison, par superposition. L'exception est faite par les cartes de Szathmary, qui ne peuvent pas être géoréférencées ; elles ont été utilisées comme des iconographies afin de pouvoir pousser l'analyse plus longtemps en arrière. L'analyse critique de ces données et de la méthode utilisée se retrouve dans le chapitre 2.2. de la thèse.
- **Séries de données hydrologiques (débit) et de données climatiques (précipitations) analysées par des méthodes statistiques.** Les données hydrologiques utilisées sont : le débit (liquide) moyen mensuel (et annuel), le débit (liquide) de pointe mensuel (et annuel) et le débit de matières en suspension moyen mensuel (et annuel). Ces données couvrent la période 1960-2007, avec des différences d'une station hydrométrique à l'autre (Poiana Țapului, Câmpina, Prahova et Adâncata sur la Prahova, ainsi que quelques stations situés sur les affluents de la

Prahova). Les données proviennent de l'Institut National d'Hydrologie et de la Gestion des Eaux (INHGA) ; en effet la période analysée dépend de la disponibilité de la base de données de son gestionnaire. On a choisi dans la thèse de prendre en compte chaque fois la plus longue période de temps disponible, bien que la longueur des séries chronologiques ne coïncide pas pour tous les paramètres. Les données hydrologiques utilisées, ainsi que les méthodes sont présentées dans la première partie de la thèse (voir §1.2.2.1. et §2.4.1.2.). Les données pluviométriques consistent dans des séries chronologiques de précipitations mensuelles (et annuelles) de la période 1961-2005 des stations météorologiques situées dans le bassin de la Prahova (Predeal, Mont Omu, Sinaia, Câmpina, Ploiești) et d'autres stations situées dans la région de la Courbure des Carpates. Ces données proviennent de l'Administration Nationale de Météorologie (ANM) ; comme dans le cas des données hydrologiques, la longueur de la période d'analyse dépend du gestionnaire de la base de données. L'accès à autres types de données climatiques utiles pour la thèse n'a pas été possible à cause de contraintes administratives liées à la politique menée par le gestionnaire de la base de données. La présentation de ces données et méthodes se retrouvent dans la première partie de la thèse (voir §1.2.2.1. et §2.4.1.2.).

- **Données de terrain (profils en travers, largeur, profondeur du chenal, observations) analysées par une méthode morpho-hydraulique.** Les profils en travers (5) proviennent de la Société pour la Gestion des Eaux (SGA) du département de la Prahova (4) et de mesures personnelles (1). Ces profils, ainsi que la méthode utilisée pour leur analyse, se retrouvent dans la première partie de la thèse (voir §1.2.2. et §1.2.3). Les mesures personnelles effectuées en 24 sites réparties tout le long de la rivière ont envisagé l'obtention de données sur la largeur et la profondeur du chenal fluvial à pleins bords, qui sont ultérieurement analysés par une méthode statistique (voir §1.2.2. et §1.2.3.). Les autres observations faites sur le terrain d'étude sont essentielles pour la compréhension des phénomènes et des processus analysés et se retrouvent sous forme de photos tout le long de la thèse.
- **Images satellite analysées par des techniques de télédétection.** Les images satellites sont de type Landsat. Les caractéristiques de ces images, ainsi que les méthodes utilisées sont expliquées ultérieurement dans la thèse (voir §3.4.2.1.).
- **Documents administratifs soumis à une analyse critique** afin de mettre en évidence les logiques de gestion de la rivière et d'aménagement de l'espace fluvial.

#### 4. Cadre géographique : la Prahova - une rivière carpatique

Ce travail de recherche prend pour cadre de réflexion la rivière Prahova, affluent de deuxième ordre du Danube, qui se trouve dans la partie centrale-sud de la Roumanie (cf. Figure 4). La rivière Prahova a une longueur de 193 km, une superficie du bassin versant de 3754 km<sup>2</sup> (1,57% du territoire national) et un débit avant l'exutoire de 26,4 m<sup>3</sup>/s. Les coordonnées géographiques extrêmes de son bassin versant sont : 45°32'17"N au nord, 44°42'20"N au sud, 25°27'14"E à l'ouest et 26°27'6"E à l'est. En conséquence il s'étend dans un climat tempéré caractérisé par une température moyenne annuelle qui varie entre -2,4°C sur le sommet carpatique Mont Omu, à 2505 m d'altitude, et 10,5°C dans la Plaine roumaine, à 177 m d'altitude, à la station de Ploiești. Les cumuls annuels de précipitations varient entre 625 mm à la station de Ploiești (177 m d'altitude) et 1028 mm à la station de Sinaia (1510 m d'altitude).

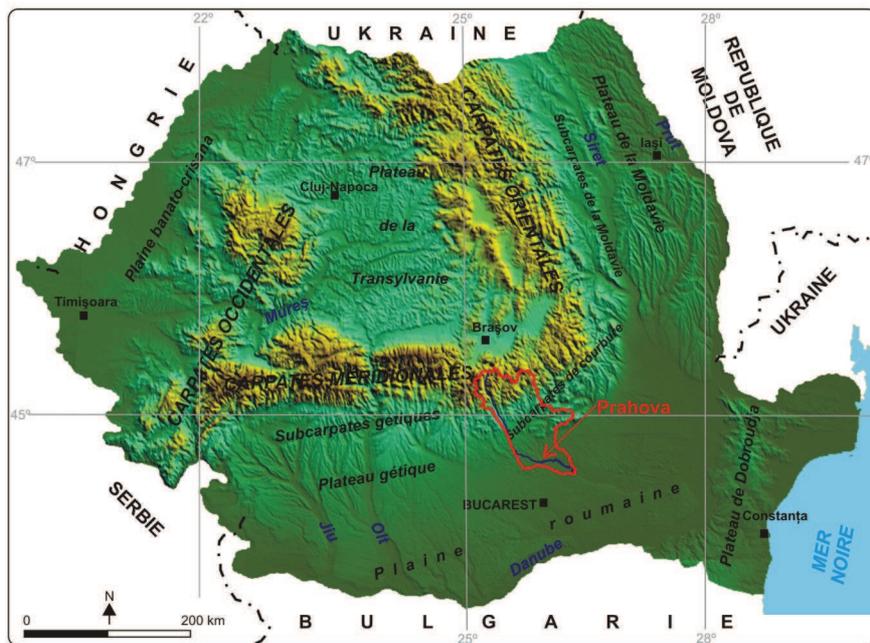


Figure 4. Position géographique de la rivière Prahova et de son bassin hydrographique en Roumanie.

La Prahova prend ses sources dans les Carpates et plus précisément dans les montagnes de Clăbucetele Predealului, à environ 1100 m d'altitude. Elle traverse la chaîne carpatique du nord au sud, représentant la limite géographique entre les Carpates orientales à l'est et les Carpates méridionales à l'ouest. Puis elle traverse les Subcarpates de courbure du nord-nord-ouest au sud-sud-est. Plus en aval, la Prahova s'écoule dans la Plaine roumaine ; après environ 100 km de longueur, elle change brusquement la direction et se dirige de l'ouest à l'est ; en effet ce changement de direction est la conséquence de l'existence d'une zone de subsidence

vers laquelle la Prahova se dirige (Niculescu, 1960). La Prahova se jette dans l'Ialomița, à environ 56 m d'altitude.

Le bassin de la Prahova s'étend dans les Carpates, dans les Subcarpates et dans la Plaine roumaine, ayant la forme d'un amphithéâtre et une altitude moyenne de 541 m. Il est fortement asymétrique : la rive gauche représente 88% de la superficie totale du bassin hydrographique (Pișota et Zaharia, 1994). L'asymétrie du bassin versant est le résultat du développement de son cône de déjection à la sortie de Subcarpates. Par rapport à l'axe de son cône de déjection, la Prahova s'est déplacé à l'ouest (Vâlsan, 1915). Le même auteur considère que le cône de la Prahova est « *le plus beau cône de déjection se trouvant en bordure de la Plaine roumaine* » et qu'il s'est formé au moment quand la rivière avait une compétence plus élevée que celle actuelle. Dans son bassin versant, la Prahova s'écoule près de la limite occidentale, parce que la plupart du réseau hydrographique qui se trouve entre l'Ialomița et la Prahova se dirige vers l'Ialomița.

**On considère que la Prahova est une rivière carpatique parce que : 1) les unités de relief qu'elle traverse se sont formées en relation avec les Carpates ; 2) son régime hydrologique est lié, en partie, à la présence des Carpates (voir §1.2.4.) ; 3) les localités qui longent la vallée de la Prahova, ainsi que certaines branches socio-économiques se sont développées en relation avec son rôle de vallée transcarpatique.**

En préfigurant les particularités du chenal fluvial de la Prahova, la présentation du cadre naturel est organisée selon les unités de relief traversées par la rivière (cf. Figure 5).

Les Carpates de la Courbure, unité orogénique, sont constituées essentiellement de flysch d'âge crétacée dans la zone interne et d'âge paléogène dans la zone externe (Mutihac, 1990) et plus précisément : de complexes lithologiques du Néocomien (marnes, marno-calcaires et microconglomérats), des complexes lithologiques du Barrémien-Aptien (schistes argilo-marneux et intercalations de grès et de calcaires), et de schistes noirs, marnes et grès d'âge crétacé-paléogène. Les Carpates se caractérisent par des altitudes supérieures à 1000 m ; sur la limite nord-ouest du bassin de la Prahova, elles atteignent 2505 m d'altitude sur le sommet de Mont Omu dans les montagnes de Bucegi. Les plus hautes valeurs de l'énergie de relief sont dans le secteur de l'abrupt des montagnes de Bucegi ; dans ce secteur les sommets carpatiques dépassent 2000 m d'altitude, tandis que le fond de la vallée de Prahova, dans le bassin de Sinaia, se trouve à environ 800 m d'altitude. En traversant les Carpates, la Prahova a créé trois terrasses, qui sont localement recouvertes par les cônes de déjection de ses affluents (Velcea,

1961). Velcea (1961) identifie des formes de relief glaciaire<sup>1</sup> des montagnes de Bucegi ; l'auteur mentionne que les formes ne sont pas bien conservées à cause de la composition lithologique des montagnes (roches peu résistantes à l'érosion, comme les conglomérats et les grès). Urdea (2004) explique que, malgré leur altitude de 2505 m, dans les montagnes de Bucegi les glaciers de la phase glaciaire Riss II se sont développés moins bien par rapport aux massifs montagneux carpatiques situés plus à l'ouest étant donné le caractère continental du climat. Les plus importants glaciers en tant que dimensions occupaient le versant septentrional et occidental<sup>2</sup>. Les langues glaciaires descendaient jusqu'à 1500 m en moyenne.

Les Subcarpates de la Courbure, unité orogénique du point de vue géologique et collinaire du point de vue morphologique, sont constituées de dépôts de molasse : marnes, argiles, grès, graviers, sables, diapirs du Miocène-Pliocène. Les Subcarpates de la Courbure se caractérisent par la présence de deux alignements de collines séparées par deux rangées de bassins. C'est une structure typique pour les Subcarpates Roumaines. La première rangée de collines se trouve à la base des Carpates qui les dominent par des altitudes relatives de 200-250 m. Les bassins intra-collinaires sont d'origine érosive. Les collines de la deuxième rangée sont moins hautes. Les bassins extérieurs s'ouvrent largement vers la plaine. L'altitude s'abaisse, du nord au sud, d'environ 800 m à environ 400 m. A l'entrée dans les Subcarpates, l'énergie de relief peut dépasser 500 m ; elle est moins forte à la sortie des Subcarpates. En ce qui concerne les terrasses, Hummel (1927) (cité par Niculescu, 1984) a identifié quatre terrasses de la Prahova dans le secteur subcarpatique ; Popp (1939) et Niculescu (1960) ont identifié cinq terrasses ; les villes de Breaza et de Câmpina se situent sur une terrasse, à 75 m d'altitude à Breaza et à 55-65 m à Câmpina. Les fronts de ces terrasses sont affectés par des glissements de terrain (Greco *et al.*, 2001 ; Armaş *et al.*, 2003).

Dans le bassin de la Prahova, la Plaine roumaine est formée de deux sous-unités à caractéristiques différentes : la Plaine de piémont de Ploieşti et la Plaine de subsidence de Gherghiţa-Sărata (Coteţ, 1976).

---

<sup>1</sup> Pour les Carpates, Reuther *et al.* (2007) rappelle les deux théories qui sont proposées pour la glaciation dans les Carpates : 1) les Carpates ont été affectées par les deux dernières glaciations, théorie soutenue par la morphostratigraphie (succession des dépôts glaciaires et fluviaux dans une section stratigraphique) - Riss et Würm ; 2) les Carpates ont été affectées par la plus récente glaciation (26 995±360 <sup>14</sup>CyrBP) - Würm, théorie qui résulte de la datation au radiocarbone.

<sup>2</sup> Glacier de l'Ialomiţa 8,02 km<sup>2</sup> et 4,2 km de longueur ; glacier de Gaura (2,47 km<sup>2</sup> et 4,1 km de longueur) selon Urdea (2004).

La Plaine de Ploiești représente une zone de piémont à la base de l'unité orogénique et elle est constituée essentiellement de dépôts quaternaires fluviaux (graviers, sables, argiles). La Plaine de Ploiești, plaine de piémont, a été créée par les cônes de déjection de la Prahova et de son affluent, le Teleajen. Selon le même auteur, dans le piémont, les terrasses ont été couvertes les dépôts fluviaux. Seulement une terrasse du Pléistocène supérieur-Holocène borde la Prahova en aval de la localité de Piatra et elle atteint localement 10 m de hauteur ; cette terrasse suit le cours d'eau, sur sa droite, jusqu'à l'embouchure. Le piémont s'abaisse en altitude du nord au sud, d'environ 300 m à environ 100 m. À la sortie des Subcarpates, l'énergie de relief dans la vallée de la Prahova est d'environ 30 m et elle baisse jusqu'à quelques mètres à la sortie de cette plaine. Dans la Plaine de Ploiești, la pente est en moyenne de 5‰.

La Plaine de Gherghița- Sărata est constituée de dépôts quaternaires fluvio-lacustres et de dépôts loessiques. La Plaine de Gherghița correspond à une région de subsidence géologique, d'où sont type génétique de plaine de subsidence. L'altitude de la plaine s'abaisse du nord-ouest au sud-est, d'environ 100 m à 56 m à l'embouchure de la Prahova. L'énergie de relief ne dépasse pas 3 m ; la pente est en moyenne de 0,5‰.

L'annexe 2 contient des cartes présentant la géologie, les pentes et l'énergie de relief du bassin versant de la Prahova.

Les Carpates et les Subcarpates de courbure sont affectées par des mouvements néotectoniques qui ont une amplitude entre +0,5 mm/an et 2 mm/an (Dinu, Cioacă, 1987). De plus la Courbure de l'orogène Carpatique est affectée par l'activité sismique affecte de la rencontre des quatre microplaques tectoniques (Est Européenne, Pannonique, Moesienne, de la Mer Noire qui avance plus vite que les autres). Au contraire la Plaine de Gherghița est soumise à des mouvements épirogéniques négatifs de 0-2 mm/an, ce qui favorise les processus d'accumulation (Grigore et Marin, 1982).

En conclusion, la plupart des matériaux qui forment le bassin de la Prahova sont peu résistants mécaniquement à l'érosion ; par exemple les conglomérats et les grès peuvent former la charge de fond de la rivière dans les Carpates et dans les Subcarpates ; plus en aval, par désagrégation mécanique, ils peuvent contribuer aux matières en suspension de la rivière. La charge solide de la rivière est aussi l'expression de l'intensité des processus d'érosion sur les versants subcarpatique (Zaharia et Ioana-Toroimac, 2007) ; des torrents et des glissements de terrain affectent surtout les versants des vallées subcarpatiques. Les caractéristiques morphométriques surtout de la partie supérieure du bassin versant, ainsi que la tectonique

active sont des facteurs favorables de la charge solide de fond et en suspension. En fait cela est une caractéristique des Subcarpates de courbure, où on enregistre le plus important taux d'érosion en Roumanie, de 10-25 t/ha/an (Zaharia, 1998).

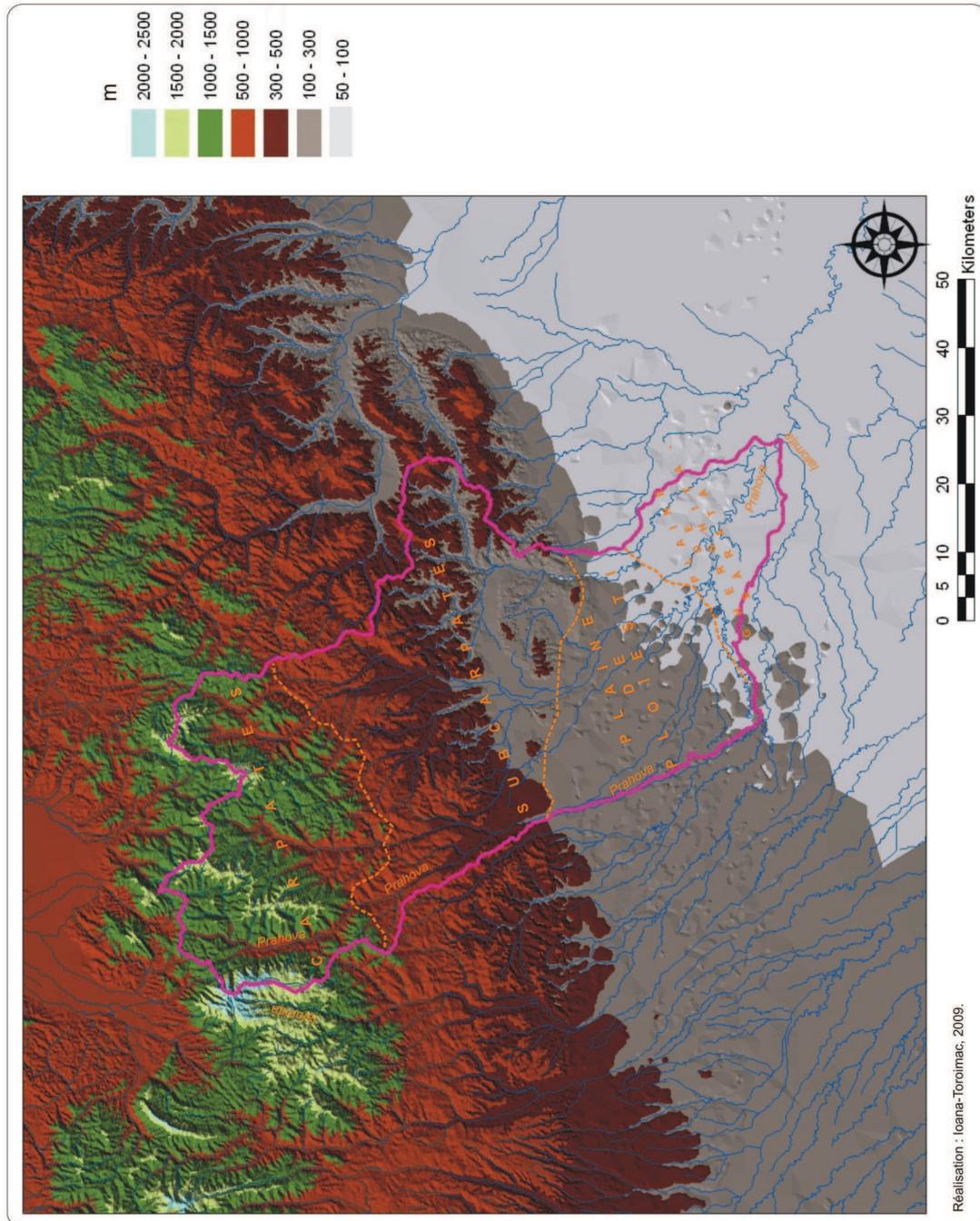


Figure 5. Carte des unités de relief et des étages d'altitude du bassin versant de la Prahova. La carte est réalisée à partir des courbes de niveau des cartes topographiques 1 : 100 000 couvrant la région. Le contour du bassin versant provient de l'ANAR (contour rose). Les unités de relief sont délimitées d'une façon approximative (tireté orange), selon les courbes de niveau de 1000 m entre les Carpates et les Subcarpates, de 300 m entre les Subcarpates et la Plaine roumaine et de 100 m entre les deux sous-unités de la Plaine roumaine.

Jusqu'au 15<sup>ème</sup> siècle, les principales routes qui traversaient les Carpates de la Courbure longeaient les vallées voisines de Buzău, de Teleajen, de l'Ialomița. Le changement de la capitale de la Valachie, de Târgoviște à Bucarest au 15<sup>ème</sup> siècle, ainsi que l'insécurité de la route de Bran, ont été les prémisses de l'apparition d'un nouvel axe de communication transcarpatique qui suivait la vallée de la Prahova et qui été utilisée pour le commerce et pour la transhumance (Popp, 1929 ; Stăncioiu et Breaza, 1989). En fait la route de la vallée de la Prahova est la plus directe et donc la plus courte entre Bucarest, la capitale, et la ville de Brașov, importante cité médiévale commerciale. Il est nécessaire de rappeler qu'au moment de l'apparition de ce nouvel axe de communication, la Valachie et la Transylvanie étaient deux provinces indépendantes. L'histoire moderne de la vallée de la Prahova commence avec la construction de la route moderne entre 1846 et 1852, qui facilite encore plus le commerce entre la Valachie et la Transylvanie. Un deuxième moment important dans le développement de cet axe de transport est l'union entre la Valachie et la Moldavie (1856) et le changement de la capitale des Principautés Unies de Iași à Bucarest (1862). Plus tard, entre 1876 et 1897, un chemin de fer est construit dans la vallée de la Prahova, ce qui a permis le développement ultérieur de l'industrie dans cette vallée (Macovschi, 1946). Actuellement, la vallée carpatique et subcarpatique de la Prahova est traversée par la route nationale et européenne DN1/E60 et par la voie ferrée Bucarest-Brașov ; étant donné le fait qu'elles lient la capitale de centre et l'ouest du pays et du reste de l'Europe, ces voies de transport sont les plus circulées de Roumanie (Dobre, 2007). L'annexe 1 contient deux cartes présentant l'infrastructure routière et l'occupation du sol du bassin versant de la Prahova.

La Prahova a 18 affluents directs dont la longueur dépasse 5 km : 8 sur la rive droite et 10 sur la rive gauche (cf. Figure 6). Les trois principaux affluents, en tant que superficie du bassin hydrographique, se trouvent sur la rive gauche. Le Teleajen (122 km de longueur ; 1663,6 km<sup>2</sup> superficie du bassin hydrographique) prend ses sources dans les Carpates, traverse les Subcarpates et la Plaine de Ploiești et se jette dans la Prahova, dans la Plaine de Gherghița, en amont de la localité homonyme. Le Cricovu Sărat (94 km de longueur ; 610,8 km<sup>2</sup> superficie du bassin hydrographique) est une rivière subcarpatique. Il conflue avec la Prahova en amont de la localité d'Adâncata, dans la Plaine de Gherghița. La Doftana (51 km de longueur ; 416,4 km<sup>2</sup> superficie du bassin hydrographique) s'écoule par les Carpates, par les Subcarpates et conflue avec la Prahova à Bănești, à la sortie des Subcarpates. Le plus grand affluent en tant que débit d'eau est le Teleajen, qui lui apporte environ 9 m<sup>3</sup>/s. Les autres affluents apport des débits inférieurs à 3 m<sup>3</sup>/s.

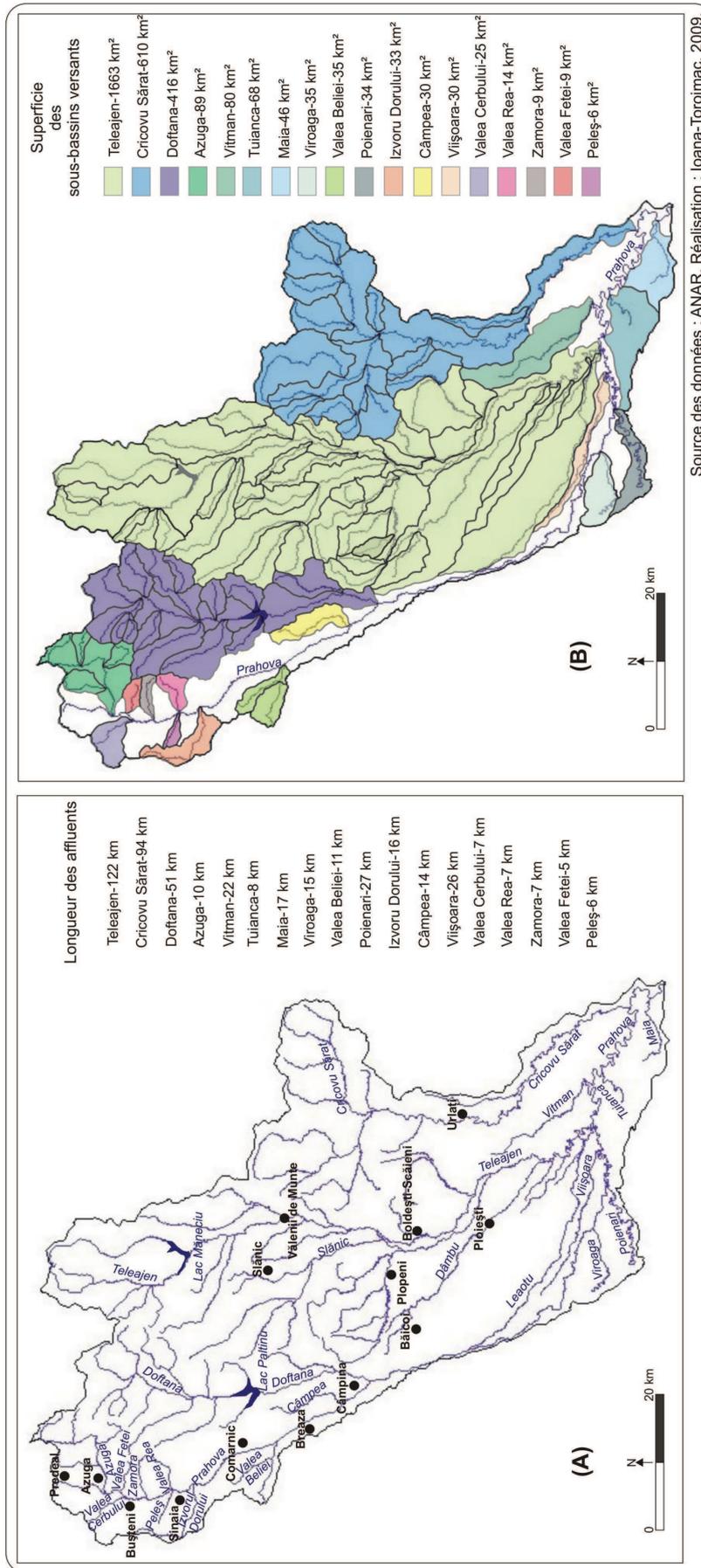


Figure 6. Affluents de la Prahova : (A) longueur ; (B) superficie de leurs bassins versants.

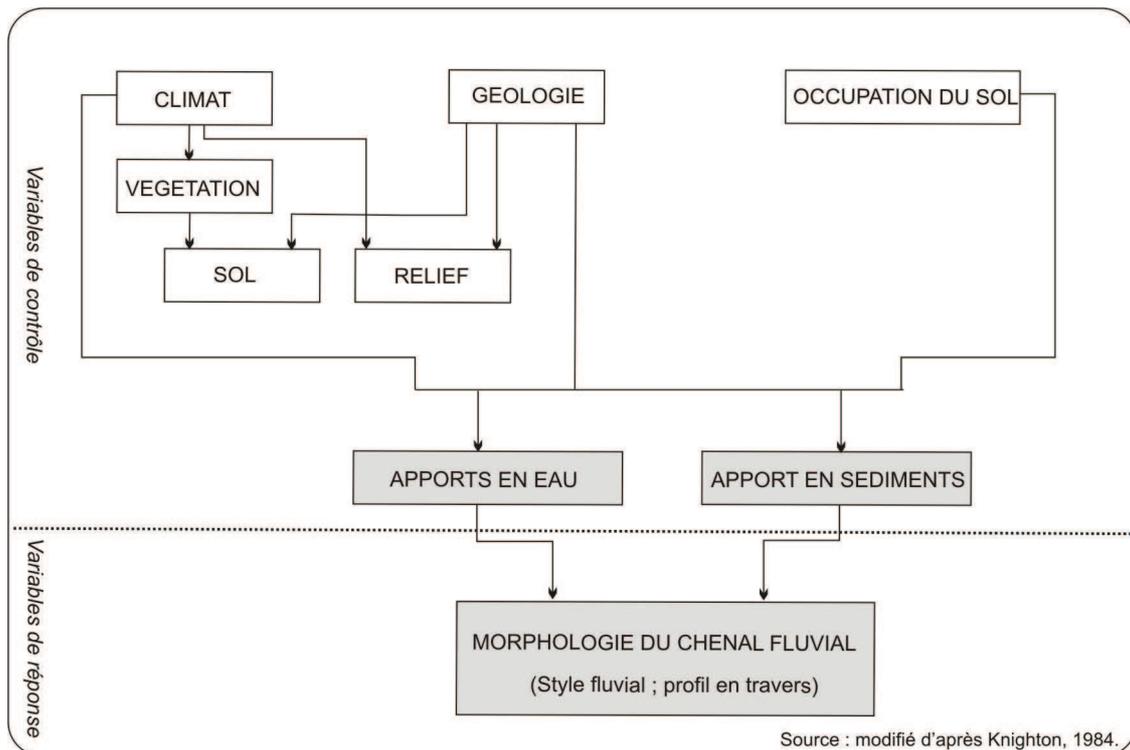
**PREMIÈRE PARTIE.**

**FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET  
HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DE LA PRAHOVA**



## 1.1. Introduction : fonctionnement de la rivière dans son bassin versant

Les hydrosystèmes fluviaux fonctionnent dans leurs bassins versants sous l'influence des variables de contrôle (géologie, relief, climat, végétation, occupation du sol), qui déterminent leurs flux liquides et solides. La réponse aux phénomènes et aux processus déterminés par les variables de contrôle se reflète dans les variables de réponse (morphologie du chenal fluvial) (cf. Figure 7).



**Figure 7. Relations entre les variables de contrôle et les variables de réponse dans un hydrosystème fluvial. Les cadres représentés en gris font l'objet des recherches menées dans la thèse.**

On considère que le fonctionnement de la Prahova se manifeste par la morphologie du chenal fluvial, déterminé par les flux liquides et solides de l'hydrosystème. Après avoir constaté les caractéristiques générales du bassin versant de la Prahova, les deux premières parties de la thèse portent sur les variations hydrologiques de l'écoulement de la Prahova et sur les caractéristiques morphologiques de son chenal fluvial.

**La première partie de la thèse est organisée en deux chapitres. Ces deux chapitres étudient le fonctionnement de la Prahova par deux approches. Dans le premier chapitre l'approche privilégiée est hydrologique. Le deuxième chapitre est construit selon une approche hydrogéomorphologique. Cette partie porte sur quelques éléments ponctuels du cadre hydrologique et hydrogéomorphologique (régime hydrologique, crues, débit à**

**pleins bords, puissance fluviale), qui sont des preuves du fonctionnement de l'hydrosystème Prahova et qui représentent, en même temps, la base des recherches menées ultérieurement dans la thèse.** Les flux solides sont pris en compte à plusieurs reprises dans la première et dans la deuxième partie de la thèse – analyse des variations mensuelles et pluriannuelles du débit solide des matières en suspension et analyse de la granulométrie du lit fluvial pour plusieurs sites d'observations. Bien qu'on parte de l'hypothèse que les variations de la charge solide de fond transportée aient un rôle essentiel dans la dynamique de l'hydrosystème, elles ne font pas l'objet d'une analyse particulière par faute de données. Le style fluvial, démonstratif pour le fonctionnement du cours d'eau, est intégré dans la problématique de la deuxième partie de la thèse. **Les résultats obtenus dans les deux premières parties de la thèse renvoient au cadre géographique du bassin versant afin de souligner les relations complexes qui existent dans un hydrosystème fluvial.**

## 1.2. Régime hydrologique et crues de la Prahova

### 1.2.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'écoulement de la Prahova, comme prémisses de ses caractéristiques hydrogéomorphologiques. Etant donné leur importance morphogénétique, ce chapitre se focalise sur les variations moyennes et extrêmes (maximales) de l'écoulement de la Prahova.

Les variations moyennes de la Prahova sont mises en évidence par son **régime hydrologique**. Selon Musy (2005), le régime hydrologique résume l'ensemble des caractéristiques hydrologiques d'un cours d'eau et son mode de variation. En général, il montre des variations saisonnières systématiques (hautes eaux et basses eaux) en fonction de principaux facteurs influençant l'écoulement : le régime des températures et des précipitations, les caractéristiques géologiques et morphologiques du bassin versant... (Musy, 2005). Par exemple, dans les régions de moyenne latitude, les fluctuations thermiques entre la saison froide et la saison chaude sont importantes pour le régime hydrologique, parce qu'elles règlent l'évaporation et l'évapotranspiration ainsi que la rétention nivale (Cosandey, 2003).

Les **crues** représentent des phénomènes hydrologiques extrêmes, qui se caractérisent par la remontée rapide et la baisse, souvent moins rapide, du niveau et du débit d'un cours d'eau. Cette rapidité, brutalité des crues les distinguent de hautes eaux, phase du régime hydrologique. En géomorphologie, les crues intéressent aussi pour la charge solide transportée. Les crues sont capables de modifier la forme et les dimensions des chenaux fluviaux. Les crues (et les débordements du cours d'eau) déterminent aussi le fonctionnement des milieux riverains.

Afin de comprendre le régime hydrologique de la Prahova et de connaître les caractéristiques de ses crues, ce chapitre porte sur quatre aspects principaux : 1) des variations pluviométriques mensuelles dans le bassin de la Prahova, qui représentent des prémisses pour la compréhension de son fonctionnement hydrologique ; 2) les caractéristiques du régime hydrologique de la Prahova et de ses affluents ; 3) les variations mensuelles du débit de pointe de la Prahova ; 4) l'analyse des crues de la Prahova (origine et paramètres).

## 1.2.2. Démarche méthodologique

### 1.2.2.1. Données climatiques et hydrologiques

Ce chapitre repose sur l'utilisation des données climatiques et hydrologiques.

Les **données climatiques** utilisées consistent dans des séries chronologiques de température moyenne mensuelle et de cumuls quotidiens/mensuels/annuels de précipitations (cf. Figure 8, Tableau 1, Tableau 2) aux stations météorologiques du bassin versant de la Prahova (stations météorologiques de Predeal, Mont Omu, Sinaia, Câmpina, Ploiești). Ces stations sont distribuées dans toutes les unités de relief du bassin versant de la Prahova (Predeal, Mont Omu et Sinaia dans les Carpates ; Câmpina dans les Subcarpates ; Ploiești dans la Plaine roumaine). Pourtant quatre de ces stations (Predeal, Mont Omu, Sinaia, Câmpina) sont concentrées dans la partie du nord-ouest du bassin versant, dans la vallée proprement dite de la Prahova. Les cumuls de précipitations proviennent uniquement d'enregistrements des pluviomètres. La station de Mont Omu fait des enregistrements automatiques. Les précipitations quotidiennes correspondent à un intervalle de 24 heures de 17.30 GMT le jour précédent à 17.30 GMT le jour concerné. Ce type de mesure prend très peu en compte la couche de neige fondue (Réménieras, 1999), pour laquelle on ne dispose pas de séries de données. Ces données climatiques proviennent de l'ANM. Les stations météorologiques, les paramètres et la période d'analyse ont été choisis selon les disponibilités du gestionnaire de la base de données et en conformité avec le droit d'accéder à certains types de données.

Les **données hydrologiques** utilisées sont les séries chronologiques de débit (liquide, solide des matières en suspension) aux stations hydrométriques de la Prahova (Bușteni, Poiana Țapului, Câmpina, Prahova, Adâncata) et de ses affluents (cf. Figure 8, Tableau 3, Tableau 4). On utilise également des données horaires de débit liquide des douze crues de la Prahova (deux à la station de Bușteni, quatre à la station de Câmpina, trois à la station de Prahova ; trois à la station d'Adâncata). Ces stations hydrométriques sont réparties dans toutes les unités de relief traversées par la Prahova. Ces stations hydrométriques sont des stations de jaugeage à échelle limnimétrique. A chaque station hydrométrique, la hauteur d'eau est lue deux fois par jour sur une échelle limnimétrique. Le débit est mesuré quelques fois par mois à chaque station hydrométrique. Les autres valeurs de débit sont extraites de la courbe de tarage en fonction de la hauteur d'eau correspondante. En situation de crue, la hauteur d'eau est lue plusieurs fois par jour ; pour certaines crues, afin de connaître le débit, la vitesse de l'eau est

estimée en utilisant un flotteur. Les débits utilisés pour l'analyse des régimes hydrologiques sont des débits moyens. Au contraire les débits de pointe sont des débits instantanés. La mesure du débit solide des matières en suspension nécessite de prélever, de filtrer et de peser un échantillon d'alluvions. Ces données proviennent de l'INHGA. Les stations hydrométriques, les paramètres et la période d'analyse ont été choisis selon les disponibilités du gestionnaire de la base de données et en fonction de la possibilité d'accéder à certains types de données.

Le caractère simple et aléatoire de ces séries de données, ainsi que la présence des ruptures statistiques des séries de données pluviométriques et hydrologiques ont été vérifiées (voir §1.3.2.3. et §2.4.1.2.).

Afin de comprendre l'origine des crues, on utilise des **cartes de reanalyse** (au géopotential de 500 dam et de la température au géopotential du 850 dam) et des **cartes des champs de pression en surface**. Ces cartes couvrent l'ensemble de l'Europe et elles sont représentatives pour la situation météorologique à 0 h GMT. Ces cartes sont disponibles sur le site de la Météo Allemande.

#### *1.2.2.2. Méthodes appliquées*

Dans le contexte général de l'analyse des variations mensuelles des précipitations et des débits, plusieurs méthodes sont utilisées afin de répondre à l'objectif de ce chapitre.

Tout d'abord le débit module est calculé. Il représente la moyenne arithmétique des valeurs de la série de données. En effet, en général, le régime hydrologique est représenté à partir du débit module. Afin de faciliter les comparaisons régionales entre les régimes hydrologiques, on utilise le **coefficient mensuel de débit**. Ce paramètre représente le rapport entre le débit module mensuel et le débit module annuel (Musy, 2005) :

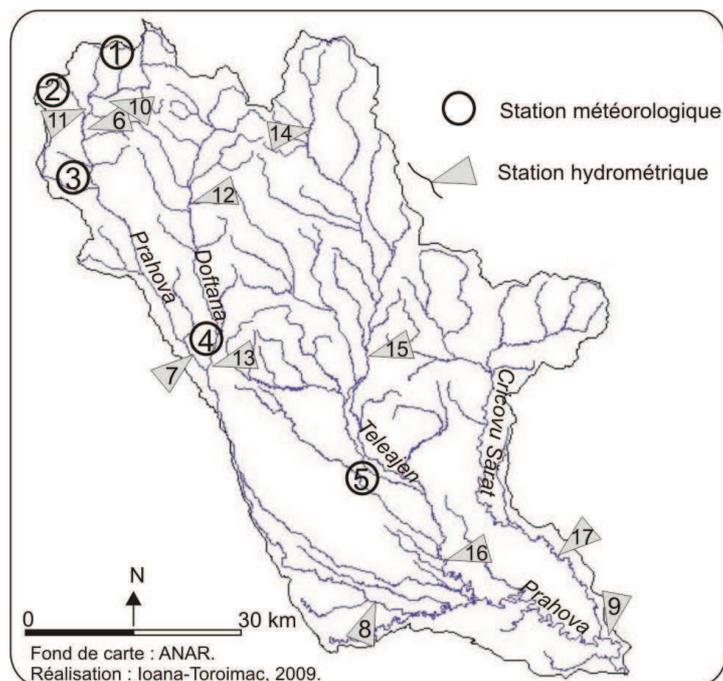
$$C_m = Q_{m0}/Q_0,$$

où  $C_m$  est le coefficient mensuel de débit, le  $Q_{m0}$  est le débit module mensuel et  $Q_0$  est le débit module annuel.

Les crues sont analysées par leurs paramètres : débit de base, temps de crue, temps de décrue, temps total, volume d'eau, lame d'eau (Musy, 2005 ; Pişota *et al.*, 2005). Le **débit de base** (en  $m^3/s$ ) représente le débit roulé dans des conditions normales d'écoulement, avant et après la crue (Musy, 2005). Les hydrologues statisticiens considèrent que le débit de base d'une crue est égal à 2 fois le débit module (Pişota *et al.*, 2005) ou à 3-5 fois le débit module

(Réménieras, 1974). Pour autres hydrologues, la crue correspond à un débit de fréquence faible (de 1-5%) (Réménieras, 1999). Les hydrologues praticiens préfèrent le temps de crue en tant que paramètre définitoire pour ces phénomènes hydrologiques. Réménieras (1999) considère que la notion de crue laisse place à quelques ambiguïtés, raison pour laquelle il propose de caractériser les crues par les éléments suivants. Le **débit de pointe** (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) représente le débit maximum atteint par le cours d'eau en crue. Le **temps de crue** (en heures) représente la durée du début de la crue jusqu'à l'enregistrement du débit de pointe. Le **temps de décrue** (en heures) représente la durée correspondant à la courbe de décrue. Le **temps total** (en heures) de la crue représente la durée totale de la crue, respectivement la somme entre le temps de crue et le temps de décrue. Le **volume d'eau** de la crue (en  $\text{m}^3$ ) représente la quantité d'eau roulée durant la crue. Sur l'hydrogramme de la crue, on considère que la superficie comprise entre le débit de base et la courbe de crue / décrue représente le volume ruisselé (Pişota *et al.*, 2005); selon les mêmes auteurs, ce paramètre est calculé comme produit entre la superficie délimitée par le débit de base et les deux courbes, et les deux échelles (verticale, horizontale). La **lame d'eau** (en mm) écoulee estime l'épaisseur de la couche uniforme d'eau; elle est égale au rapport entre le volume d'eau de la crue et la superficie du bassin versant en amont de la section considérée. Cet élément est utilisé surtout pour les synthèses hydrologiques régionales. Le **temps de retour du débit de pointe** de la crue est estimé selon la méthode de Pearson III, présentée et appliquée dans le §1.3.2.3. et le §1.3.3.3.

Les situations météorologiques associées aux crues de la Prahova sont analysées visuellement à partir des cartes de reanalyse et des cartes des champs de pression en surface, en utilisant la **méthode dite de Hess-Brezowsky**. Cette méthode identifie sur l'Europe trois groupes de circulations divisés en 29 sous-types (Gerstengarbe et Werner, 2005). Cette classification des situations météorologiques est basée essentiellement sur la position des grands centres d'action influençant la direction des flux dominants sur l'Europe centrale à 0 heures GMT. Cette méthode met en évidence : 1) la direction des flux : ouest, nord-ouest, nord, nord-est, est, situation sur l'Europe centrale, sud ; 2) le caractère cyclonique et anticyclonique.



**Figure 8. Position des stations météorologiques et hydrologiques dans le bassin de la Prahova. 1 = Predeal ; 2 = Mont Omu ; 3 = Sinaia ; 4 = Câmpina ; 5 = Ploiești ; 6 = Prahova à Poiana Țapului ; 7 = Prahova à Câmpina ; 8 = Prahova à Prahova ; 9 = Prahova à Adâncata ; 10 = Azuga à Azuga ; 11 = Valea Cerbului à Bușteni ; 12 = Doftana à Teșila ; 13 = Doftana à Bănești ; 14 = Teleajen à Cheia ; 15 = Teleajen à Gura Vîtioarei ; 16 = Teleajen à Moara Domnească ; 17 = Cricovu Sărat à Cioranii de Sus.**

Station météorologique	Latitude	Longitude	Unité de relief de la station météorologique	Altitude (m)
Predeal	45°30'	25°35'	Carpates	1090
Mont Omu	45°27'	25°27'	Carpates	2504
Sinaia	45°23'	25°30'	Carpates	1510
Câmpina	45°08'	25°45'	Subcarpates	461
Ploiești	44°57'	26°00'	Plaine roumaine	177

**Tableau 1. Stations météorologiques du bassin versant de la Prahova. Source des données : ANM.**

Station météorologique	Cumul mensuel et annuel de précipitations (mm) (période)	Cumul quotidien de précipitations (période)	Température moyenne mensuelle et annuelle (°C) (période)
Predeal	946 / an (1961-2005)	1970-2005	4,1 / an (1981-2001)
Mont Omu	981 / an (1961-2005)	1970-2005	-2,4 / an (1961-1989)
Sinaia	1028 / an (1961-2005)	1970-2005	3,7 / an (1971-2005)
Câmpina	720 / an (1961-2005)	1970-2005	8,9 / an (1971-2005)
Ploiești	625 / an (1961-2000)	-	10,5 (1971-2001)

**Tableau 2. Paramètres climatiques utilisés dans ce chapitre. Source des données : ANM ; les données de température aux stations de Predeal et de Ploiești proviennent du site de la Météo Espagnole.**

Station hydrométrique	Unité de relief de la station hydrométrique	Longueur de la rivière (km) Source : ANAR.	Altitudes maximale et minimale du bassin versant (m)	Altitude moyenne du bassin versant (m) Source : ANAR.	Superficie du bassin versant (km <sup>2</sup> ) Source : ANAR.
Prahova à Bușteni	Carpates	12,2	Entre ~2450 m et ~800 m	1315	141
Prahova à Poiana Țapului	Carpates	17,1	Entre ~2450 m et ~800 m	1355	205
Prahova à Câmpina	Subcarpates	54,8	Entre ~2450 m et ~350 m	1124	486
Prahova à Prahova	Plaine roumaine	105,3	Entre ~2450 m et ~100 m	1017	984
Prahova à Adâncata	Plaine roumaine	180,8	Entre ~2450 m et ~60 m	554	3695
Azuga à Azuga	Carpates	19,7	Entre ~1600 et ~950	1403	81
Valea Cerbului à Bușteni	Carpates	5,9	Entre ~2450 m et ~800 m	1533	25
Doftana à Teșila	Carpates	26,5	Entre ~1700 m et ~650 m	1183	290
Doftana à Bănești	Subcarpates	50	Entre ~1700 m et ~350 m	-	416
Teleajen à Cheia	Carpates	11,3	Entre ~1900 m et ~850 m	1275	42
Teleajen à Gura Vitioarei	Subcarpates	53	Entre ~1900 m et ~300 m	905	497
Teleajen à Moara Domnească	Plaine roumaine	101,8	Entre ~1900 m et ~100 m	557	1409
Cricovu Sărat à Cioranii de Sus	Plaine roumaine	83,8	Entre ~700 m et ~60 m	293	594

**Tableau 3. Caractéristiques des bassins versants de la Prahova et de ses affluents aux stations hydrométriques analysées.**

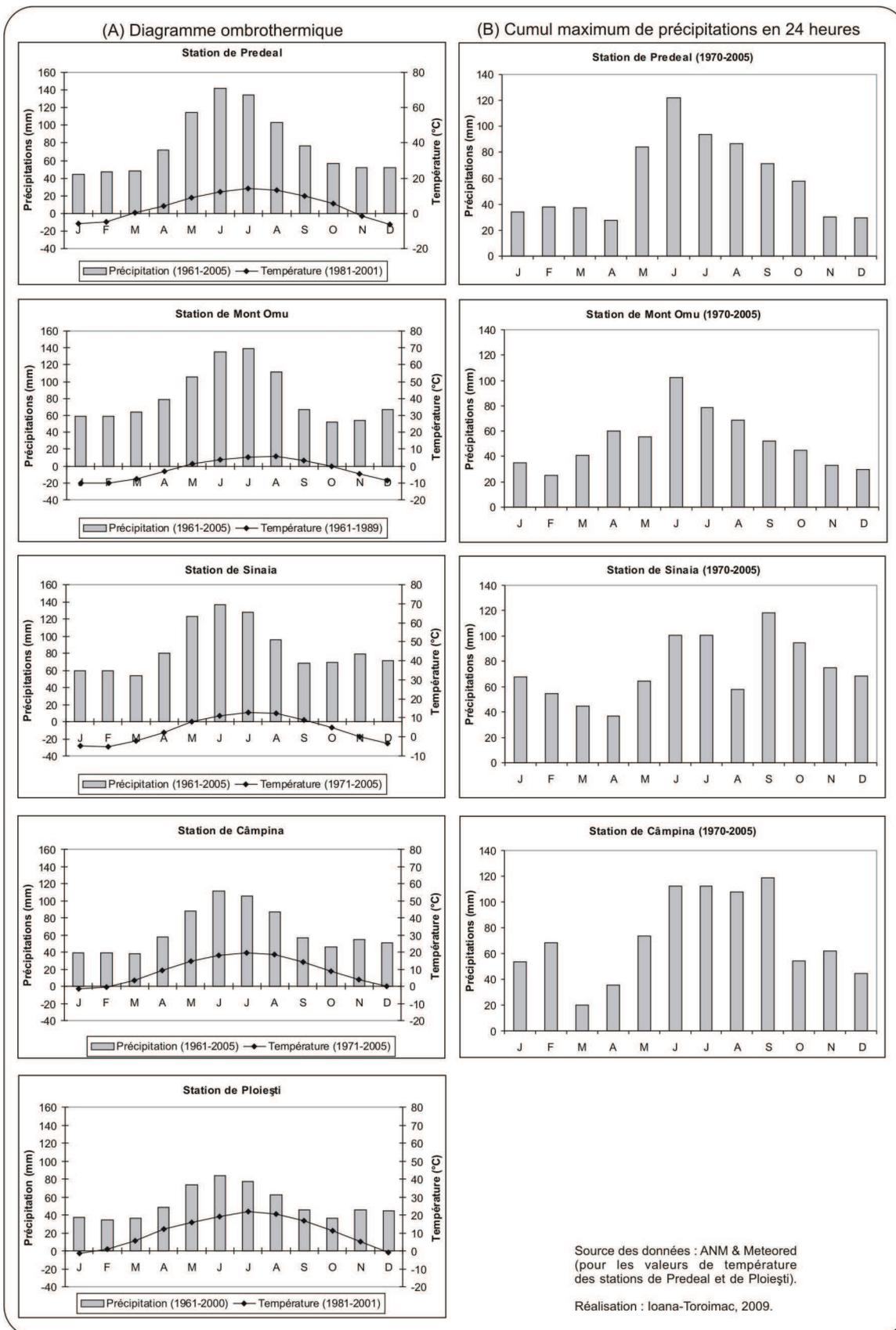
<b>Station hydrométrique</b>	<b>Débit moyen mensuel et annuel (m<sup>3</sup>/s) (période) Source : INHGA.</b>	<b>Débit moyen spécifique (l/s·km<sup>2</sup>)</b>	<b>Débit de pointe mensuel et annuel (m<sup>3</sup>/s) (période) Source : INHGA.</b>	<b>Débit solide des matières en suspension (kg/s) (période) Source : INHGA.</b>
Prahova à Bușteni	2,8 (1960-1998)	19,9 (1960-1998)	-	-
Prahova à Poiana Țapului	4,9 (1964-1992)	23,9 (1964-1992)	165 (1964-1992)	-
Prahova à Câmpina	8,2 (1961-2002)	16,9 (1961-2002)	399 (1962-2007)	5,1 (1962-1995)
Prahova à Prahova	12,8 (1961-2002)	13,0 (1961-2002)	766 (1961-2007)	-
Prahova à Adâncata	26,4 (1961-2002)	7,1 (1961-2002)	1220 (1961-2007)	107,4 (1961-1995)
Azuga à Azuga	1,9 (1961-1998)	23,5 (1961-1998)	94 (1961-2000)	-
Valea Cerbului à Bușteni	0,5 (1961-1998)	20 (1961-1998)	54,2 (1961-2000)	-
Doftana à Teșila	4,5 (1961-1998)	15,5 (1961-1998)	218 (1961-2000)	-
Doftana à Bănești	2,9 (1961-1995)	7,0 (1961-1995)	-	-
Teleajen à Cheia	0,8 (1961-1998)	19,0 (1961-1998)	85 (1961-2000)	-
Teleajen à Gura Vitioarei	5,6 (1961-1998)	11,3 (1961-1998)	540	-
Teleajen à Moara Domnească	9,1 (1961-1999)	6,5 (1961-1999)	850	-
Cricovu Sărat à Cioranii de Sus	1,8 (1961-1998)	3,0 (1961-1998)	450	-

**Tableau 4. Paramètres hydrologiques utilisés dans ce chapitre de la thèse. Le débit module spécifique représente le rapport entre le débit module annuel et la superficie du bassin versant à la station hydrométrique analysée.**

### 1.2.3. Contraintes climatiques - prémisses pour l'analyse du régime hydrologique

Les contraintes climatiques de son bassin versant, et en particulier la pluviométrie, permettent de comprendre le régime hydrologique de la Prahova et de ses affluents.

- Le régime thermique se caractérise par un maximum en juillet (et en août à Mont Omu) et par un minimum en janvier. La température moyenne mensuelle maximale varie entre 21,7°C à la station de Ploiești et 5,7°C à la station de Mont Omu. En janvier et en décembre, la température moyenne mensuelle est négative à toutes les stations météorologiques (cf. Figure 9 A).
- Le régime pluviométrique se caractérise par deux maxima, en juin (et en juillet à la station de Mont Omu) et un autre en novembre aux stations de Mont Omu, de Sinaia, de Câmpina et de Ploiești ; le deuxième maximum est faible et il ne se produit pas à la station de Predeal. Le cumul mensuel maximum de précipitations varie entre 141 mm à la station de Predeal et 83 mm à la station de Ploiești. Le régime pluviométrique a deux minima, en janvier/février et en octobre, le deuxième étant est très faible ; à Predeal, le deuxième minimum ne se produit pas (cf. Figure 9A). Les cumuls maxima de précipitations en 24 heures se produisent en juin à Predeal et à Mont Omu et en septembre à Sinaia et à Câmpina (cf. Figure 9B) (voir aussi §§1.2.6.1. à 1.2.6.4.).
- Dans les Carpates, les premières neiges tombent, en moyenne, dans la première décade de septembre à Mont Omu et dans la deuxième décade d'octobre à Sinaia et à Predeal ; quant aux dernières chutes de neige, elles se produisent en général vers le milieu du mois d'avril (Pehoiu *et al.*, 2007). Selon les mêmes auteurs, la couche de neige résiste en moyenne 124 jours par an à ces stations météorologiques et plus précisément entre le début du mois de novembre et la fin du mois de mars (ou le début du mois d'avril) ; cette moyenne est calculée pour la période 2000-2005. Les mêmes auteurs estiment que l'épaisseur de la couche de neige varie fortement d'une année à l'autre ; par exemple, l'hiver 2001-2002 est caractérisé par une couche de neige de 50-80 cm, tandis que l'hiver 2005-2006 est caractérisé par 130-150 cm de neige. Dans la Plaine roumaine, la couche de neige persiste entre décembre et février pour environ 50 jours par an (Atlas R. S. Romania, 1975).



**Figure 9. Caractéristiques climatiques du bassin versant de la Prahova : (A) diagrammes ombrothermiques ; (B) cumuls maxima de précipitations.**

#### 1.2.4. Prahova - un régime hydrologique nivo-pluvial

Une des classifications des régimes hydrologiques propose trois types distinctes et plusieurs sous-types (Pardé, 1933 ; Réménieras, 1999 ; Musy, 2005).

- Les régimes simples se caractérisent par une seule alternance annuelle de hautes et de basses eaux (un maximum et un minimum mensuels au cours de l'année hydrologique) et, en général, par un seul mode d'alimentation. Les sous-types sont : le régime glaciaire, le régime nival, le régime pluvial pur (océanique), le régime pluvial tropical.
- Les régimes mixtes se caractérisent par deux maxima et deux minima, par an, qui correspondent à plusieurs modes d'alimentation. Les sous-types sont : le régime nivo-glaciaire, nivo-pluvial, pluvio-nival.
- Les régimes complexes se caractérisent par plusieurs extrêmes et modes d'alimentation.

Le régime hydrologique de la Prahova se caractérise par (cf. Figure 11) :

- des hautes eaux en mai à toutes les stations hydrométriques et un deuxième maximum (très faible) en décembre ; les hautes eaux de mai sont probablement la conséquence de la fonte des neiges ; le deuxième maximum correspond à une augmentation de la quantité de précipitations en novembre ;
- des basses eaux en janvier aux stations de Poiana Țapului, de Câmpina, de Prahova et en septembre à la station d'Adâncata ; un deuxième minimum se produit en novembre aux stations de Poiana Țapului et de Câmpina, en septembre à la station de Prahova et en janvier à la station d'Adâncata. En effet les minima hydrologiques correspondent aux minima pluviométriques. On remarque le décalage d'un mois entre le deuxième minimum pluviométrique (octobre) et le deuxième minimum hydrologique (novembre).
- le débit module mensuel des matières en suspension a des valeurs élevées en juillet et en juin à la station de Câmpina, et en juillet et en mai à la station d'Adâncata, ce qui correspond aux variations mensuelles des cumuls de précipitations en 24 heures (cf. Figure 12).

Les affluents de la Prahova se caractérisent par des hautes eaux entre mars et juin et par des basses eaux en janvier-février et en septembre-octobre.

Ce type de régime hydrologique est caractéristique pour les rivières sud-carpatiques selon Pişota et Zaharia (2001).

Dans le contexte des données peu nombreuses concernant la couche de neige (persistance, épaisseur, fonte), les caractéristiques du régime hydrologique de la Prahova sont comparés avec les types de régime hydrologique proposés par Musy (2005). Il résulte que **la Prahova et la plupart de ses affluents ont un régime de type nivo-pluvial**. Selon Musy (2005), le régime nivo-pluvial se caractérise par :

- deux maxima, un en avril-mai déterminé par la fonte des neiges et un deuxième, plus faible, en automne en relation avec les pluies d'automne ;
- deux minima, en automne (d'habitude en octobre) et en janvier ;
- une amplitude annuelle importante ;
- des variations importantes d'une année à l'autre.

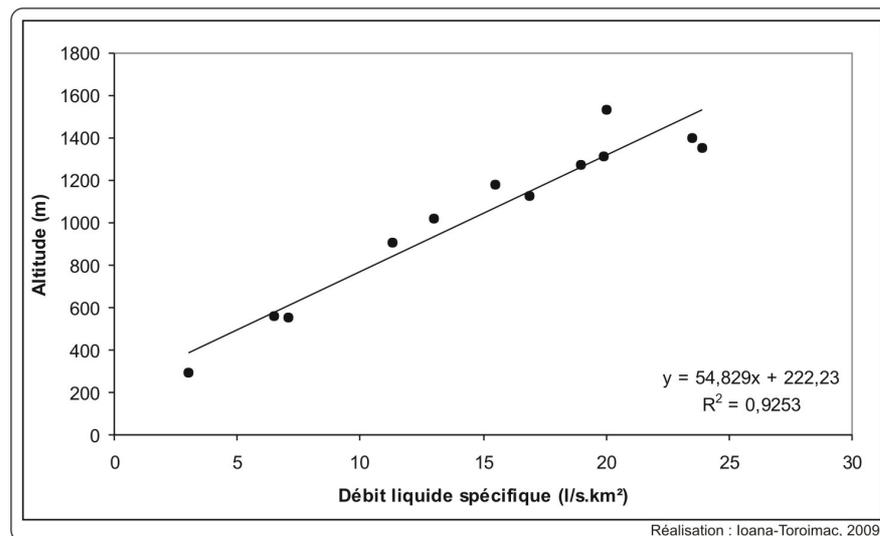
L'exception est faite par la rivière Valea Cerbului, qui a un régime simple, de type nival, qui est une conséquence de la persistance de la couche de neige dans son bassin versant, ayant l'altitude la plus élevée du bassin versant de la Prahova (altitude moyenne du bassin de la Valea Cerbului 1429 m et altitude maximale ~2450 m).

Les résultats obtenus indiquent des différences entre les moments de production des hautes eaux et des basses eaux selon l'altitude ; l'extension altitudinale des bassins versants est notée dans le Tableau 3.

- Les bassins versant de la Prahova et ses affluents Azuga et Valea Cerbului ont un développement important en altitude (jusqu'à 2450 m), en conséquence les hautes eaux se produisent en mai ou même en juin pour la Valea Cerbului.
- Les bassins versants des affluents Doftana et Teleajen s'étendent jusqu'à des altitudes de 1700/1900 m, donc les hautes eaux se produisent plus tôt, en avril.
- L'affluent Cricovu Sărat, dont les sources sont dans les Subcarpates, se caractérise par des hautes eaux encore plus tôt, en mars.
- Les basses eaux se produisent en février pour les bassins versants dont d'altitude moyenne dépasse 1300 m (Valea Cerbului, Azuga).

- La plupart des rivières dont les sources sont carpatiques et l'extension et essentiellement carpatique et subcarpatique se caractérisent par des basses eaux en janvier.
- Dans la Plaine roumaine, les rivières ont des basses eaux en septembre (avec un deuxième minimum en hiver) ; c'est le cas des stations d'Adâncata sur la Prahova et de Cioranii de Sus sur le Cricovu Sărat.

De plus l'analyse statistique des données utilisées met en évidence la relation entre le débit liquide spécifique et l'altitude moyenne du bassin versant en amont de la station hydrométrique prise en compte. Cette figure prend en compte l'ensemble des stations hydrométriques du bassin de la Prahova. Cette relation statistiquement significative est expliquée par la forme d'amphithéâtre du bassin versant de la Prahova et de ses affluents, dont les altitudes descendent du nord au sud dans le même sens que la direction du réseau hydrographique.



**Figure 10. Relation entre le débit liquide spécifique et l'altitude moyenne du bassin versant pour les stations hydrométriques du bassin versant de la Prahova. Les données utilisées se retrouvent dans le Tableau 3 et dans le Tableau 4.**

Ces résultats sont confirmés par les synthèses réalisées dans l'ouvrage Géographie de Roumanie (Badea *et al.*, 1983). Selon cet même ouvrage 1) la zone carpatique d'altitude se caractérise par des crues d'été ; 2) la zone carpatique de moyenne altitude se caractérise par des crues d'été et d'hiver suite à l'arrivée des masses d'air méditerranéen ; 3) la zone subcarpatique se caractérise par des crues d'été et d'automne ; 4) dans la zone de plaine, des crues peuvent se produire tout le long de l'année.

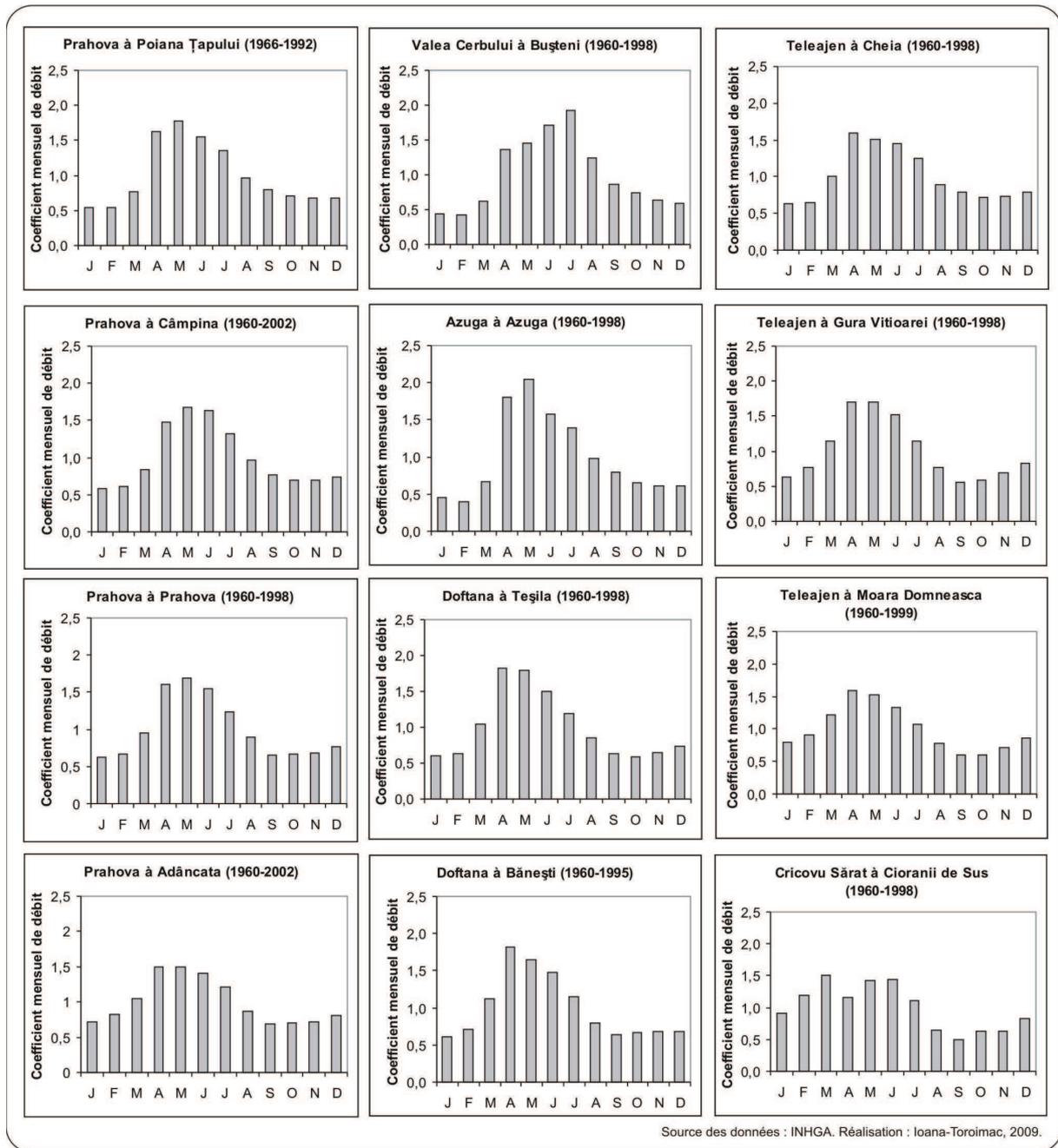


Figure 11. Variations mensuelles des débits modules de la Prahova et de ses affluents.

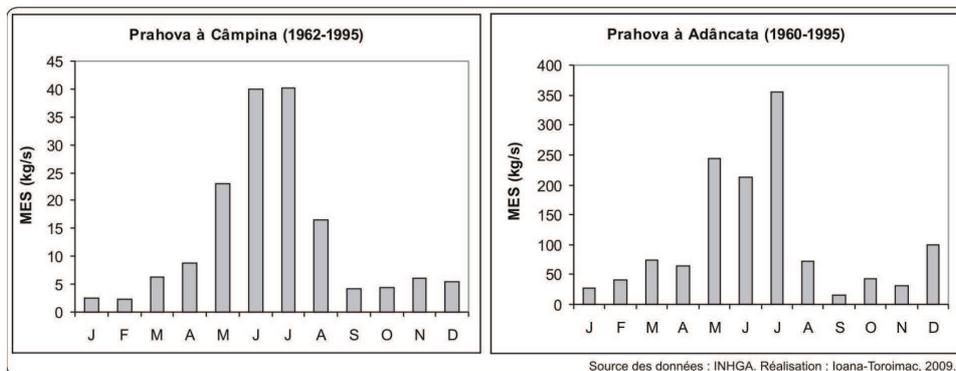


Figure 12. Variations mensuelles des débits modules des matières en suspension de la Prahova.

### 1.2.5. Variations mensuelles des débits de pointe de la Prahova

Les débits mensuels de pointe de la Prahova se produisent en juillet à toutes les stations hydrométriques (cf. Figure 13). Des débits de pointe élevés se produisent également en juin et en décembre aux stations de Poiana Țapului et de Câmpina, en juin et en août à la station de Prahova, et en juin et en octobre à la station d'Adâncata. Le débit de pointe de la Prahova à la station de Poiana Țapului est de  $165 \text{ m}^3/\text{s}$  et il a été atteint le **2 juillet 1975**. A la station de Câmpina, le débit de pointe de la Prahova est de  $399 \text{ m}^3/\text{s}$  et il a été atteint le **12 juillet 2005**. A la station de Prahova, le débit de pointe de la Prahova est de  $766 \text{ m}^3/\text{s}$  et il a été atteint le **12 juillet 2005**. A la station d'Adâncata, le débit de pointe de  $1220 \text{ m}^3/\text{s}$  a été atteint le **3 juillet 1975**. Cette dominance des débits de pointe de la Prahova dans la saison chaude est confirmée par Oprea (2006).

Le Tableau 5 confirme ces résultats. Il met en évidence la distribution mensuelle des débits annuels de pointe aux stations hydrométriques de la Prahova. Par exemple :

- à Poiana Țapului, en 7 ans sur 37, le débit de pointe annuel s'est produit en juillet ;
- à Câmpina, en 10 ans sur 46, le débit annuel de pointe s'est produit en juin et en 10 ans en juillet ;
- à Prahova, en 9 ans sur 47, le débit annuel de pointe s'est produit en juin et dans 8 ans en juillet ;
- à Adâncata, en 9 ans sur 47, le débit annuel de pointe s'est produit en mai ; le débit de pointe s'est produit en juillet en 6 cas sur 47.

Ce tableau confirme la régionalisation proposée dans l'ouvrage de synthèse sur la Géographie de Roumanie (Badea *et al.*, 1983) : dans les Carpates et dans les Subcarpates, les débits de pointe se produisent essentiellement durant la saison chaude, tandis que, dans la Plaine roumaine, les débits de pointe sont « mieux » distribués entre tous les mois de l'année.

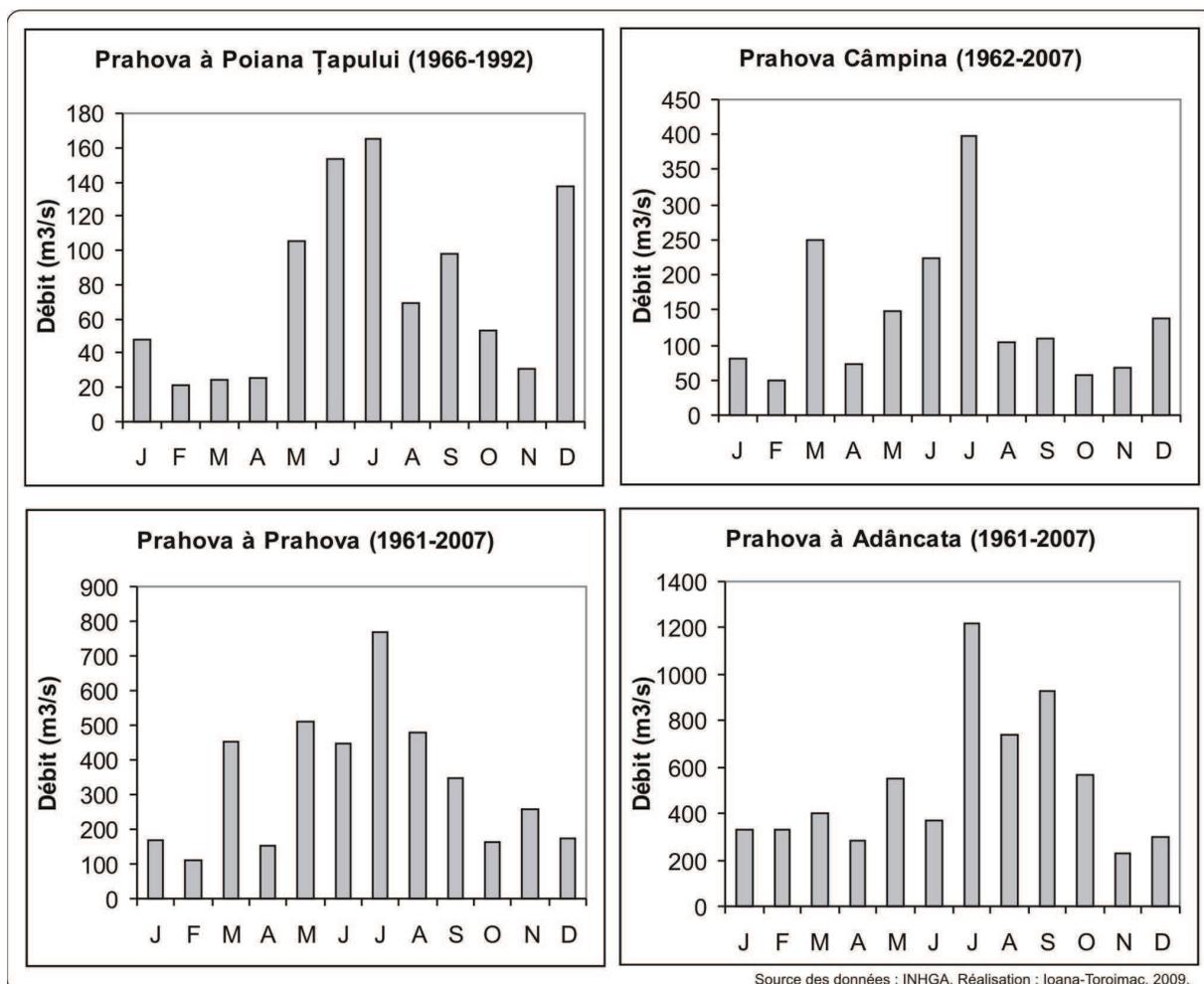


Figure 13. Variations mensuelles des débits de pointe de la Prahova.

Station hydrométrique	Nombre d'années (période d'analyse)	Nombre d'années quand le débit de pointe s'est produit en...											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Poiana Țapulului sur la Prahova	27 (1966-1992)	0	0	1	1	5	4	7	3	2	2	1	1
Câmpina sur la Prahova	46 (1962-2007)	1	1	1	2	6	10	10	6	4	1	2	2
Prahova sur la Prahova	47 (1961-2007)	4	1	2	2	6	9	8	6	2	2	3	2
Adâncata sur la Prahova	47 (1961-2007)	5	2	2	5	9	5	6	2	2	2	3	4

Tableau 5. Débits annuels de pointe de la Prahova analysés selon leur mois de production. Réalisation : à partir des données de l'INHGA.

## 1.2.6. Crues de référence de la Prahova

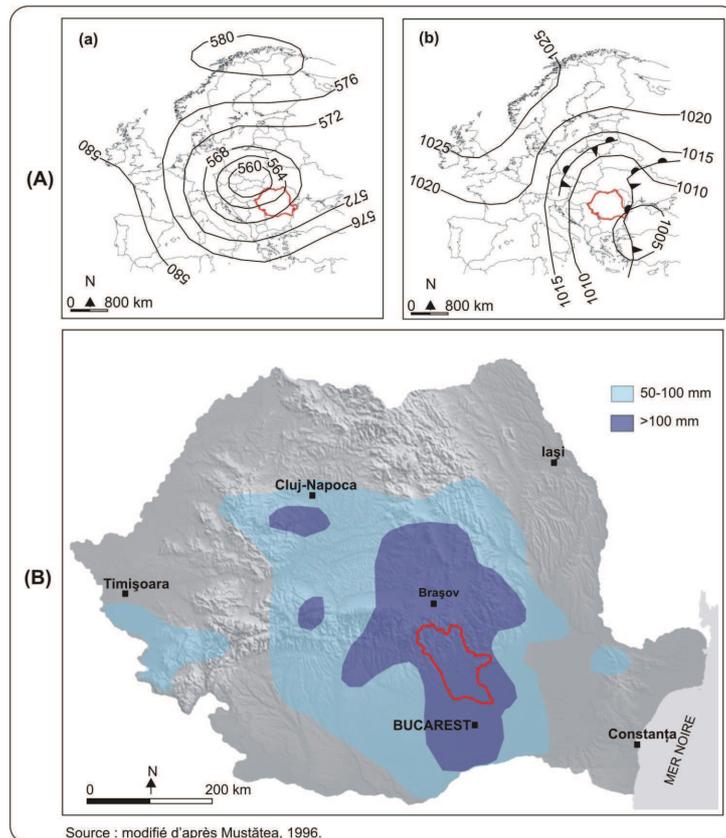
Dans ce paragraphe, la notion de « crue de référence » se réfère à l'importance des débits de pointe des crues analysées. En ce sens on revoit au Tableau 23 de la deuxième partie de la thèse qui montre le temps de retour des débits annuels de pointe de la Prahova. Les crues analysées sont : la crue de juillet 1975, la crue de septembre 2001, la crue de mai 2005, la crue de juillet 2005, la crue d'août 2005, la crue de septembre 2005 et la crue de mars 2007. De plus on revoit plusieurs fois dans la thèse à ces exemples, raison pour laquelle on a considéré nécessaire de les accorder une attention spéciale.

### 1.2.6.1. La crue de juillet 1975

Après un mois de mai et de juin assez humides<sup>3</sup>, des précipitations abondantes sont tombées le 1<sup>er</sup> et le 2 juillet 1975 dans la partie centrale-sud de la Roumanie (cf. Figure 14 B). Les cumuls de précipitations tombées durant ces deux jours ont été de : 179 mm à la station de Predeal, de 95 mm à la station de Mont Omu, de 157 mm à la station de Sinaia, et de 144 mm à la station de Câmpina. Le maximum quotidien a été atteint le 2 juillet 1975 et il a été de 94 mm à Predeal, de 106 mm à Sinaia et de 112 mm à Câmpina. Ces cumuls de précipitations sur deux jours sont parmi les plus importants enregistrés depuis 1961 ; ils occupent la première place dans la série chronologique de Predeal et la deuxième place dans les séries chronologiques de Sinaia et de Câmpina (les premières valeurs caractérisent l'intervalle du 19-20 septembre 2005). Mustătea (1996) explique la situation météorologique déterminant les précipitations abondantes de cette période. Selon cet auteur, les masses d'air froid de provenance nord ont déterminé l'apparition d'une goutte froide en altitude (au géopotentiel de 500 dam) à l'ouest de la Roumanie (cf. Figure 14A). En même temps, une dépression se forme en surface ; cette dépression est favorisée par l'arrivée des masses d'air chaud de provenance sud-sud-ouest et par l'effet orographique des Carpates. Mustătea (1996) considère que c'est une situation de blocage, étant donné le fait que l'ouest et le sud de l'Europe se caractérisaient par une pression élevée.

---

<sup>3</sup> A Sinaia : 188 mm en mai 1975 par rapport à la moyenne de 122 mm de la période 1961-2005 ; 180 mm en juin 1975 par rapport à la moyenne de 137 mm de la période 1961-2005. A Câmpina : 135 mm en mai 1975 par rapport à la moyenne de 87 mm de la période 1961-2005 ; 156 mm en juin 1975 par rapport à la moyenne de 111 mm de la période 1961-2005.



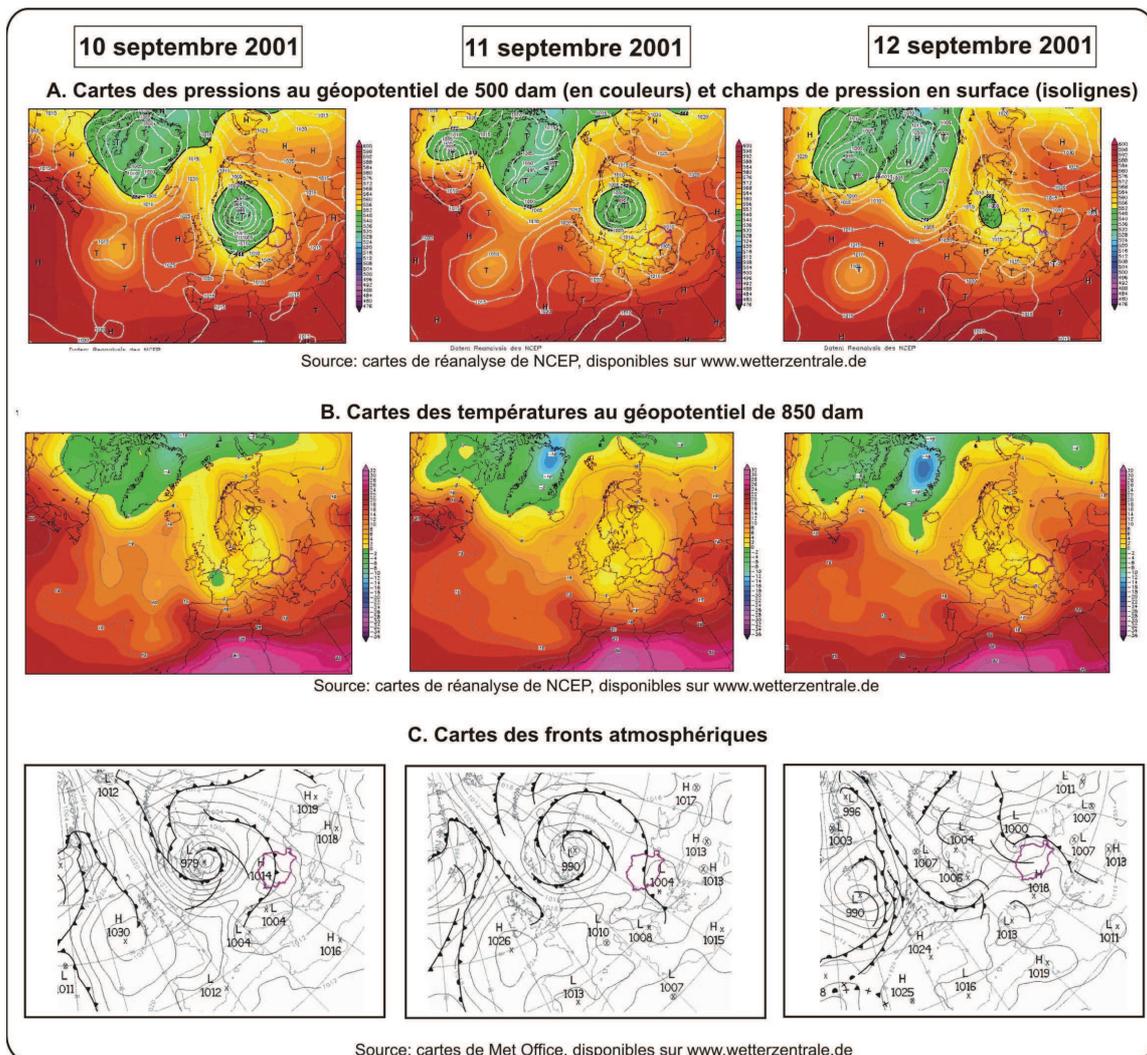
**Figure 14. (A) Carte des pressions au géopotiel de 500 dam (a) et champs de pression en surface (b) sur l'Europe le 2 juillet 1975 à 0 heures GMT ; la Roumanie est représentée en trait rouge. (B) Pluies tombées sur la Roumanie durant la période 1-4 juillet 1975 ; le bassin de la Prahova est représenté en trait rouge.**

La crue du début juillet 1975 est la plus importante crue que la Prahova a subie depuis le début des enregistrements hydrométriques. Les débits de cette crue sont reconstitués. Le débit de pointe du 2 juillet 1975 a été de  $1220 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station d'Adâncata, de  $512 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Prahova, de  $340 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Câmpina et de  $135 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Poiana Țapului. A la station d'Adâncata, le temps de retour du débit de pointe de cette crue dépasse 99 ans (cf. Tableau 23). Des crues se sont produites aussi sur les affluents de la Prahova, ainsi que sur son collecteur, l'Ialomiţa ; le 2 juillet 1975, le Teleajen à la station de Moara Domnească a enregistré un débit de  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  et l'Ialomiţa, en aval de la confluence avec la Prahova (à Coşereni) a enregistré un débit de  $1440 \text{ m}^3/\text{s}$ . En effet les inondations de juillet 1975 ont été parmi les plus importantes que la Roumanie a subies<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> A l'échelle de la Roumanie, les inondations de juillet 1975 ont été parmi les plus importantes en tant que débit d'eau et dégâts produits. Elles sont responsables de la morte de 60 personnes ; elles ont affecté 1 000 000 de personnes et 270 petites et moyennes entreprises ; 800 000 ha de terrains agricoles ont été inondés ; presque 3,2 millions d'animaux (et de volailles) se sont noyés.

### 1.2.6.2. La crue de septembre 2001

Le 11 septembre 2001, le bassin de la Prahova a reçu 71 mm de précipitations à la station de Predeal, 21 mm à la station de Mont Omu, 67 mm à la station de Sinaia et 13 mm à la station de Câmpina. Ces précipitations ont été déterminées par une situation météorologique du nord-ouest et plus précisément par le passage d'un front chaud (cf. Figure 15). Ces cumuls quotidiens de précipitations du septembre 2001 représentent : le troisième pic à Predeal, le deuxième pic à Sinaia (par rapport à la série chronologique de la période 1970-2005). Suite à ces précipitations abondantes, la Prahova a enregistré une élévation de son niveau et de son débit, qui a atteint 123 m<sup>3</sup>/s à la station de Bușteni, 110 m<sup>3</sup>/s à la station de Câmpina, 221 m<sup>3</sup>/s à la station de Prahova et 103 m<sup>3</sup>/s à la station d'Adâncata. Le débit enregistré à la station de Bușteni représente le pic de la série chronologique des débits de pointe de cette station hydrométrique (1996-2007).



**Figure 15. Situation météorologique sur l'Europe : le 10-12 septembre 2001, à 0 heures GMT.**

### 1.2.6.3. Les crues de l'années 2005

Durant l'année 2005, la plupart du territoire de la Roumanie a été affectée à plusieurs reprises, qui se sont succédées à peu près tous les mois, par de forts événements météorologiques et hydrologiques dommageables. La Prahova a subi des crues en mai, en juillet, en août et en septembre. Ceux de septembre qui se sont manifestés principalement dans la partie centrale-sud du pays ont été particulièrement dommageables (Zaharia *et al.*, 2006).

Le **7 mai 2005**, les pluviomètres ont enregistré 51,2 mm de précipitations à la station de Predeal, 35,1 mm à la station de Mont Omu, 64,4 mm à la station de Sinaia, 16,2 mm à la station de Câmpina et 29,8 mm à la station de Ploiești. Ces précipitations sont associées à une situation du nord (cf. Tableau 7). Les précipitations quotidiennes enregistrées le 7 mai 2005 représentent : le premier pic à la station de Sinaia et le troisième pic à la station de Predeal des séries chronologiques de la période 1970-2005. Les précipitations abondantes tombées dans la partie amont du bassin versant ont provoqué une crue sur la Prahova ; dans la Subcarpatés, à Câmpina, son débit de pointe a été de 147 m<sup>3</sup>/s et, dans la Plaine roumaine, à Prahova, son débit a été de 509 m<sup>3</sup>/s (temps de retour d'environ 19 ans).

En **juillet 2005**, dans le bassin de la Prahova, les cumuls de précipitations ont été deux fois supérieurs à la moyenne de la période 1961-2000 (cf. Figure 17). Le 12 juillet 2005, les cumuls de précipitations tombées ont été de 52,3 mm à Predeal, de 23 mm à Mont Omu, de 52,8 mm à Sinaia, de 81,8 mm à Câmpina et de 29,6 mm à Ploiești. Ces cumuls de précipitations sont abondants, mais pas exceptionnels pour le bassin de la Prahova. Par exemple, à la station de Câmpina, le cumul quotidien de précipitations a dépassé le seuil de 80 mm le 2 juillet 1975 (112 mm) et le 12 juillet 1982 (102,7 mm). Pourtant les débits enregistrés le même jour ont été de 399 m<sup>3</sup>/s à la station de Câmpina et de 766 m<sup>3</sup>/s à la station de Prahova, les premiers pics des séries de données de la période 1960-2007. Ces débits correspondent à un temps de retour d'environ 36 ans à Câmpina et d'environ 95 ans à Prahova (cf. Tableau 23).

Les cumuls de précipitations tombées le **14 août 2005** ont atteint 107,5 mm à la station de Câmpina ; aux autres stations météorologiques, les précipitations ont été moins abondantes : 7 mm à la station de Predeal, 4,2 mm à la station de Mont Omu, 4,5 mm à la station de Sinaia, et 16,7 mm à la station de Ploiești. La quantité mensuelle de précipitations en août 2005 à la station de Câmpina (260,4 mm) a dépassé de trois fois la moyenne de la période 1961-2004

(82,4 mm). Elles ont déterminé la remontée des eaux à Câmpina, en provoquant une crue dont le débit de pointe a été de 105 m<sup>3</sup>/s.

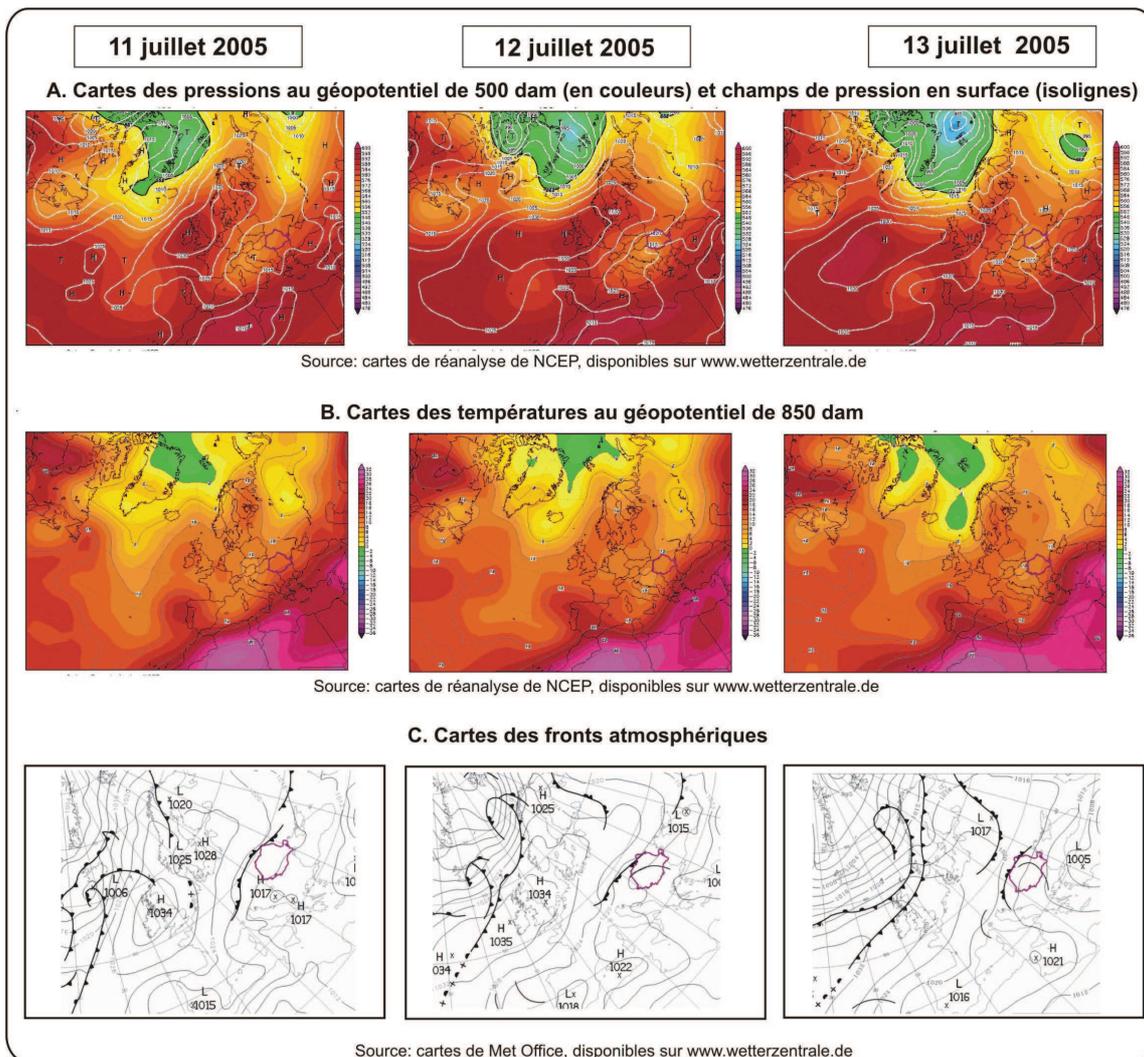
En effet, les pluies d'été sont habituelles en Europe centrale et orientale (frontales et/ou thermo-convectives) (Planchon, 2005). L'effet orographique des Carpates peut être déterminant pour amplifier localement l'abondance des pluies de début de saison chaude (Suffert, 1972 ; Apostol et Amăriucăi, 2005).

En **septembre 2005**, les écarts pluviométriques à la moyenne (1961-1990) dans le bassin versant de la Prahova, ont été 2,5 fois supérieurs à la normale (1960-2000) pour à peu près 2/3 de sa superficie (cf. Figure 19). Le secteur inférieur a reçu jusqu'à 200-250 mm de précipitations, tandis que la normale pour ce mois est inférieure à 60 mm. Le 19 et le 20 septembre, les cumuls de précipitations tombées ont été de 157,4 mm à Predeal, de 194 mm à Sinaia, de 43,6 mm à Mont Omu, de 226 mm à Câmpina, de 134 mm à Ploiești. Le 19 septembre, le cumul quotidien a été de 118,4 mm à Sinaia. Le 20 septembre, le cumul de précipitations a été de 118,4 mm à Câmpina. Ces précipitations abondantes ont été déterminées par le passage des perturbations provenant de la Méditerranée orientale et par l'arrivée d'un front froid lié à une dépression située sur le nord de l'Europe. (cf. Figure 18). La rivière Prahova et ses affluents principaux ont atteint de forts débits maximums le 19 et le 20 septembre 2005<sup>5</sup>. A la station de Prahova, le débit a enregistré 660 m<sup>3</sup>/s, valeur qui représente le deuxième pic après celui du 12 juillet 2005. A la station d'Adâncata, le débit a atteint 927 m<sup>3</sup>/s, deuxième pic de la série chronologique après celui du 3 juillet 1975. Etant donné le fait que les précipitations de septembre sont habituellement peu abondantes et que les débits d'eau sont en général faibles surtout dans la partie aval du bassin versant, le mois de septembre 2005 peut être considéré « atypique » pour le bassin versant de la Prahova (Ioana-Toroimac *et al.*, 2006).

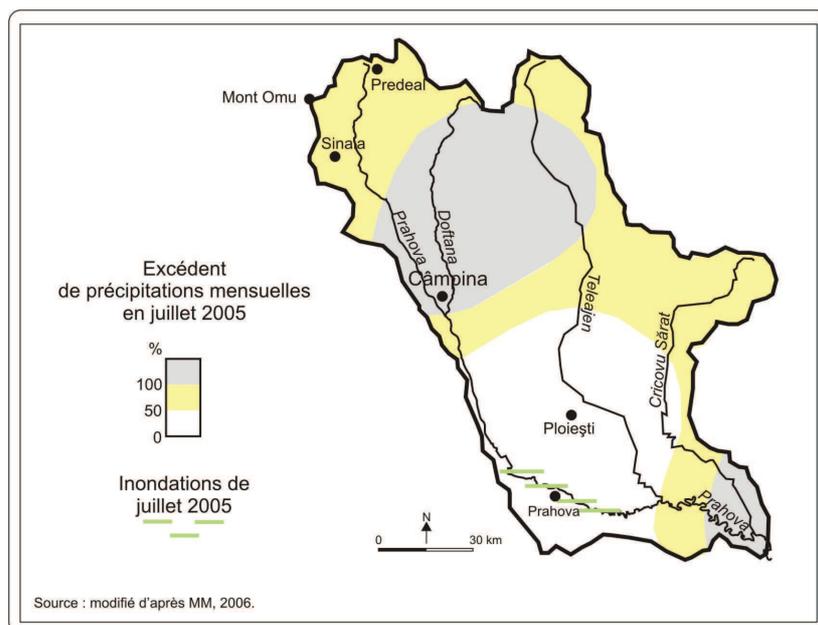
Zaharia *et al.* (2006) concluent que, par ses caractéristiques hydrologiques et météorologiques, l'année 2005 est une «année extrême» et «atypique» qui renforce l'idée d'une tendance d'intensification des aléas météorologiques et hydrologiques (en terme de fréquence et d'intensité) en Roumanie.

---

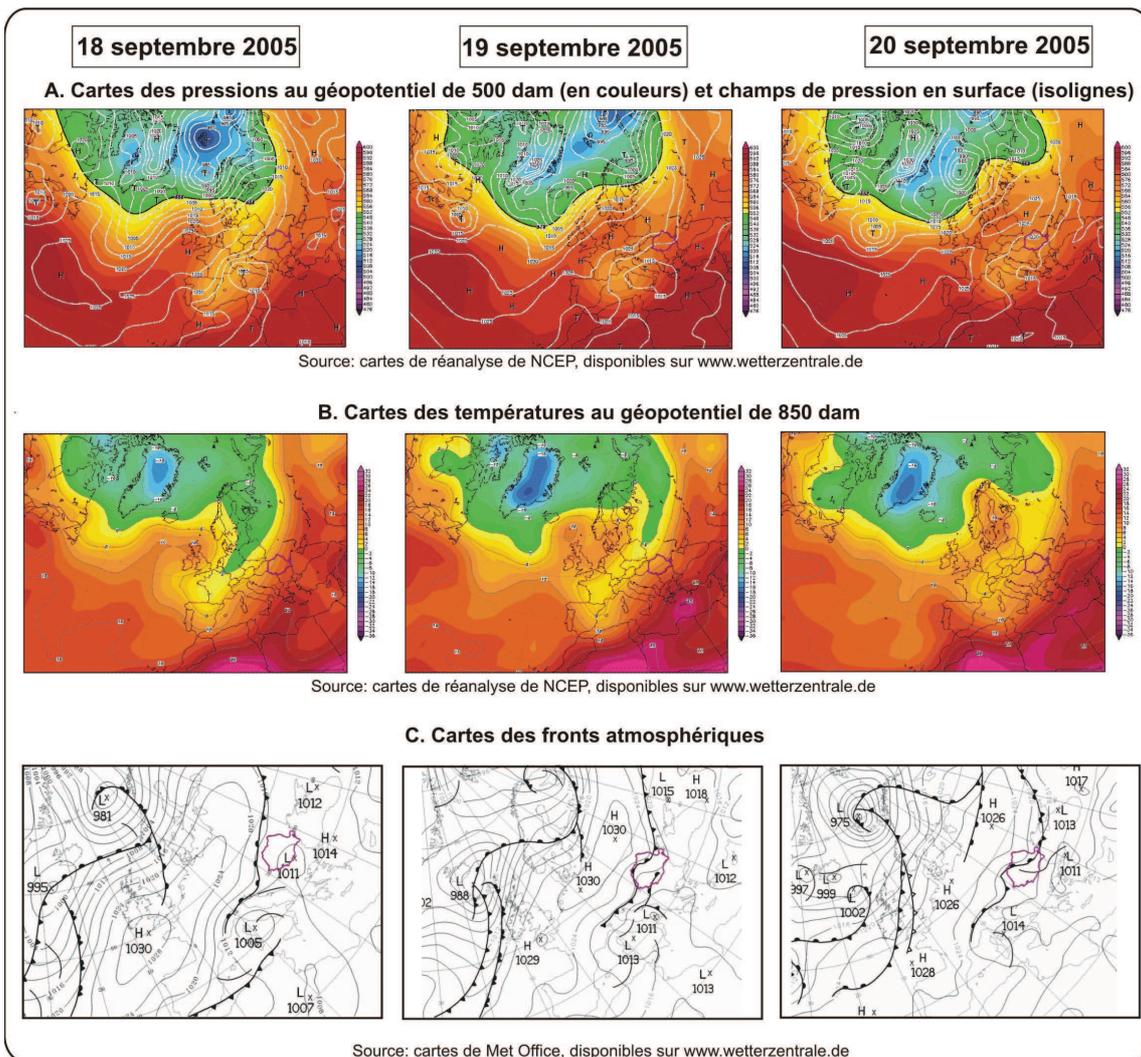
<sup>5</sup> Ces débits très élevés ont été à l'origine des inondations qui ont affecté les localités situées le long de la vallée de la Prahova et, en particulier, celles situées dans la région de plaine. Les inondations du 21-30 septembre 2005 de la confluence Ialomița-Prahova ont affecté 33 villages et 745 maisons, environ 95 000 ha de terrains agricoles et une partie importante du réseau de transport a subi des détériorations (MM, 2006).



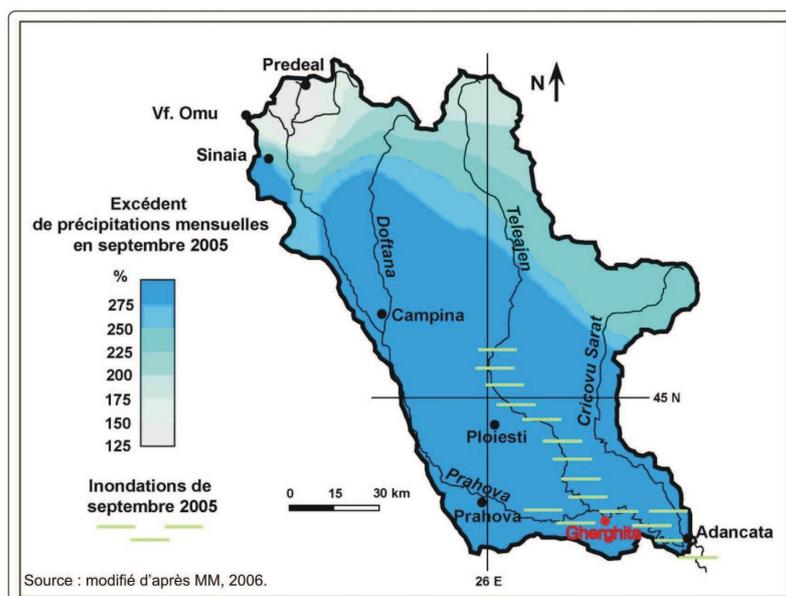
**Figure 16. Situation météorologique sur l'Europe : le 11-13 juillet 2005, à 0 heures GMT.**



**Figure 17. Excédent de précipitations mensuelles en juillet 2005 (par rapport à la moyenne de 1961-2000) et zone affectée par des inondations.**



**Figure 18. Situation météorologique sur l'Europe : le 18-20.09.2005, à 0 heures GMT.**



**Figure 19. Excédent de précipitations mensuelles en septembre 2005 (par rapport à la moyenne de 1961-2000) et zone affectée par des inondations.**

#### 1.2.6.4. La crue de mars 2007

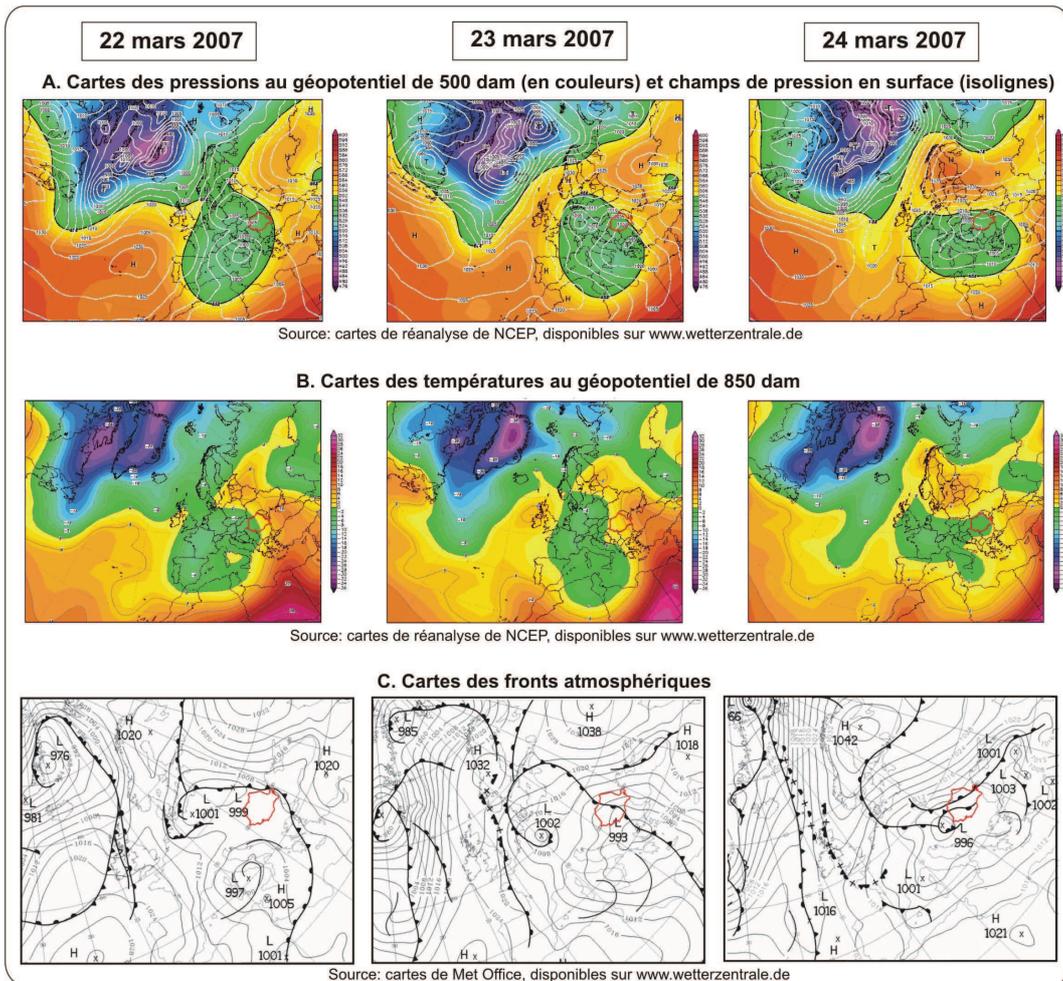
Les enregistrements météorologiques du mois de mars 2007 indiquent que des précipitations abondantes sont tombées entre le 21 et le 25 mars. Dans les Carpates, les cumuls de précipitations tombées durant cette période ont dépassé 150 mm (cf. Figure 21). Dans les Subcarpates, 100 à 150 mm de précipitations ont été enregistrés durant cette période, tandis que dans la Plaine roumaine les cumuls de précipitations ont été moins importants (moins de 100 mm). Par exemple, les pluviomètres ont enregistré durant cette période 172 mm à Bușteni, 120 mm à Comarnic et 61 mm à Potigrafu. Les précipitations les plus abondantes ont été enregistrées le 24 mars (82 mm à Bușteni, 86 mm à Comarnic). De telles valeurs sont considérées comme « exceptionnelles » pour le mois de mars dans le bassin de la Prahova où les quantités de précipitations en 24 heures n'ont jamais dépassé 40 mm durant ce mois (cf. Figure 9B). Le rapport de cette crue (Consiliul Județean pentru Situații de Urgență CJSU, 2007) ne donne aucune précision concernant la contribution de la fonte des neiges carpatiques à la naissance de cette crue.

Les précipitations abondantes tombées durant cette période ont été déterminées par le passage d'un front froid lié à une dépression située sur le nord de l'Europe (cf. Figure 20). Le 24 mars 2007, la dépression arrive dans l'ouest de la Roumanie. En même temps, des masses d'air chaud arrivent du sud (Ioana-Toroimac, 2008).

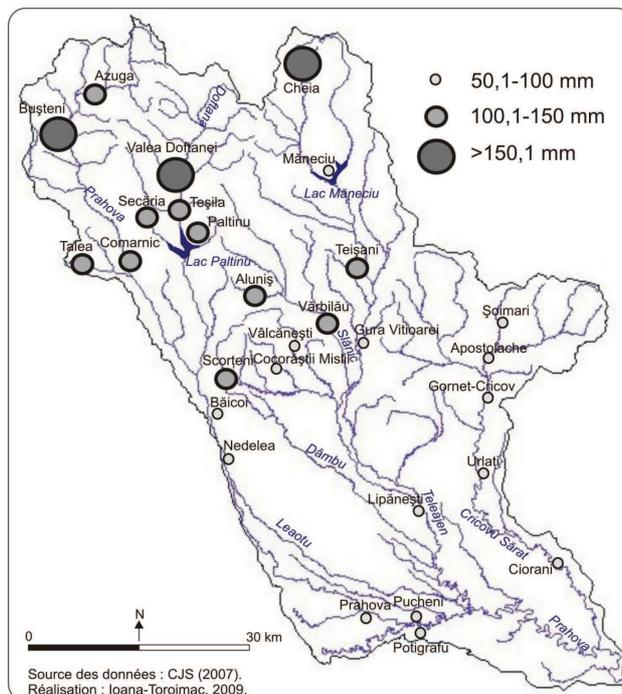
Les précipitations abondantes tombées à la fin du mois de mars 2007 sont responsables de la crue de la Prahova. La Prahova a atteint des débits de pointe de 96,7 m<sup>3</sup>/s à la station de Bușteni, de 250 m<sup>3</sup>/s à la station de Câmpina, de 451 m<sup>3</sup>/s à la station de Prahova et de 458 m<sup>3</sup>/s à la station d'Adâncata. Le temps de retour du débit de pointe de la Prahova à la station homonyme est de 13,3 ans (cf. Tableau 23). Dans les Carpates, la remontée des eaux a été très rapide ; le temps de remontée des eaux à Bușteni a été de 4 heures. C'est pour cette raison que Mădălin Mihailovici, le directeur de l'ANAR (Administrația Națională Apele Române) en 2007, a déclaré que la crue carpatique de la Prahova a été de type crue-éclair. Cette crue a provoqué le débordement de la Prahova et des dégâts dans les Carpates<sup>6</sup>. Les affluents Doftana et Teleajen ont enregistré des débits élevés aussi, qui ont provoqué des débordements (Doftana à Teșila 249 m<sup>3</sup>/s ; Teleajen à Moara Domnească 511 m<sup>3</sup>/s).

---

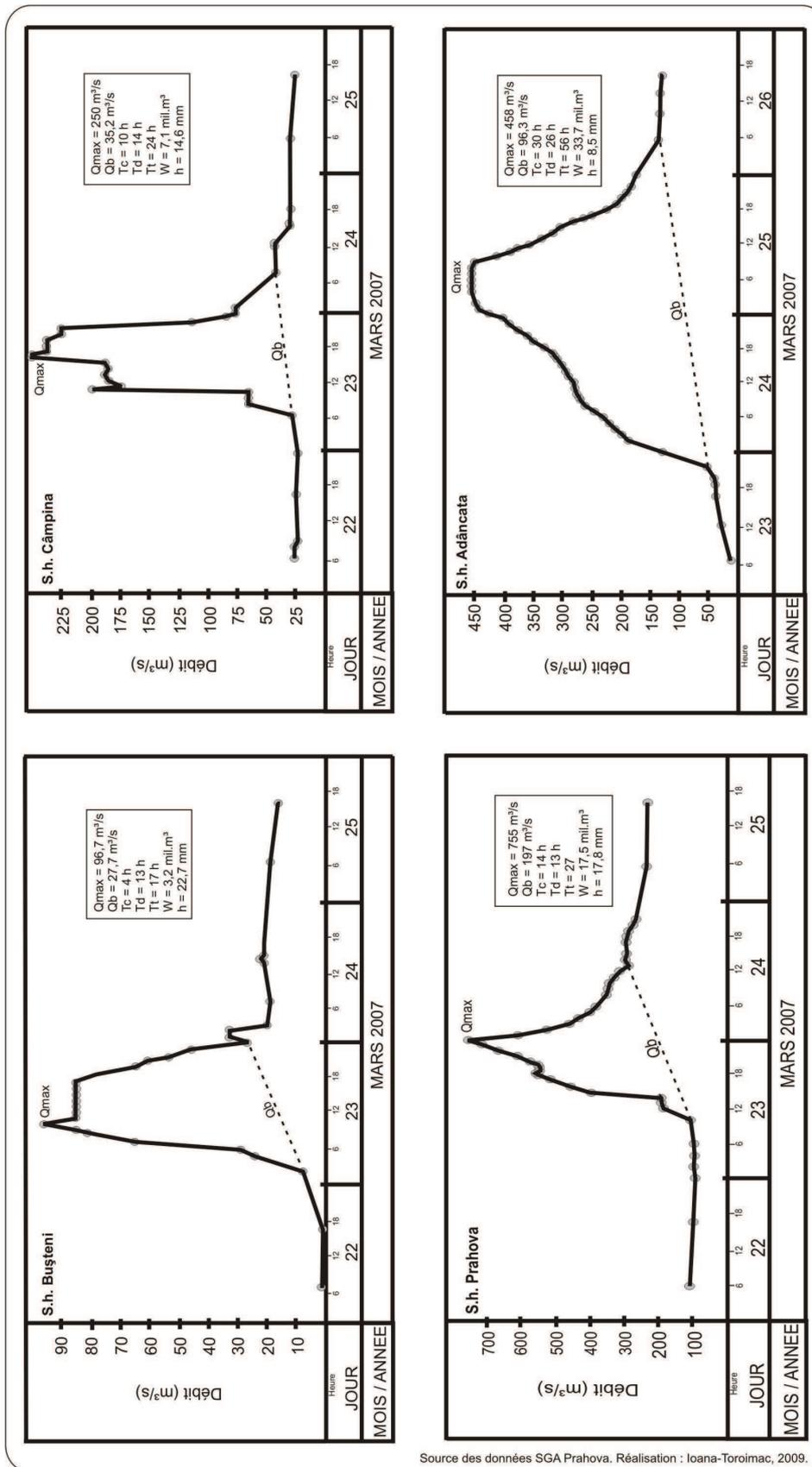
<sup>6</sup> La crue de la Prahova a affecté plusieurs ponts traversant la rivière dans les Carpates ; le débordement de la Prahova a affecté un quartier résidentiel à Sinaia et des terrains agricoles dans la région de plaine.



**Figure 20. Situation météorologique sur l'Europe : le 22-24.03.2007, à 0 heures GMT.**



**Figure 21. Variations spatiales de la quantité de précipitations tombées dans le bassin versant de la Prahova entre le 21 et le 25 mars 2007.**



Source des données SGA Prahova. Réalisation : Ioana-Toroimac, 2009.

Figure 22. L'hydrogramme de la crue du mars 2007 aux stations hydrométriques de la Prahova.  $Q_{max}$  = débit de pointe ;  $Q_b$  = débit de base ;  $T_c$  = temps de crue ;  $T_d$  = temps de décrue ;  $T_t$  = temps total ;  $W$  = volume ;  $h$  = lame d'eau.

En conclusion les crues de la Prahova peuvent se propager tout le long de la rivière ou elles peuvent se produire seulement sur un tronçon. Leurs paramètres (débit de base, temps) varient d'une crue à l'autre (cf. Tableau 6). Par exemple, à Bușteni, le temps de crue varie entre 4 heures pour la crue éclair du mars 2007 et 16 heures pour la crue de septembre 2001. A la station de Prahova, la crue de mars 2007 a un débit de base de 197 m<sup>3</sup>/s, tandis que la crue de mai 2005 a un débit de base de 79,3 m<sup>3</sup>/s.

Crue (station, période)	Temps de crue	Temps de décrue	Temps total	Débit de base (m <sup>3</sup> /s)	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	Temps de retour (ans)
<b>Station hydrométrique de Bușteni</b>						
10-12.09.2001	16 heures	21 heures	37 heures	9	123	-
22-23.03.2007	4 heures	13 heures	17 heures	27,7	96,7	-
<b>Station hydrométrique de Câmpina</b>						
07.05.2005	3 heures	7 heures	10 heures	31,6	147	~3
12.07.2005	2 heures 30 minutes	10 heures	12 heures 30 minutes	26,5	399	~36
13-14.08.2005	12 heures	13 heures 30 minutes	25 heures 30 minutes	24	105	~2
~19-20.09.2005	-	-	-	-	350	~22
22-24.03.2007	10 heures	14 heures	24 heures	35,2	250	~8
<b>Station hydrométrique de Prahova</b>						
07-10.05.2005	6 heures 10 minutes	67 heures 20 minutes	73 heures 30 minutes	79,3	509	~19
12-13.07.2009	1 heure 30 minutes	10 heures 30 minutes	12 heures	95,9	766	~95
23-24.03.2007	14 heures	13 heures	27 heures	197	755	~13
<b>Station hydrométrique d'Adâncata</b>						
08-11.05.2005	14 heures	43 heures	57 heures	201	482	~6
23-26.09.2005	25 heures 30 minutes	29 heures 30 minutes	55 heures	159	400	~4
23-26.03.2007	30 heures	26 heures	56 heures	96,3	458	~4

**Tableau 6. Caractéristiques principales des crues de la Prahova de la période 2001-2007. Réalisation : à partir des données de l'INHGA.**

Les crues présentées ci-dessus sont parmi les plus importantes que la Prahova a subies. Afin de comptabiliser les causes climatiques déterminant les fortes crues de la Prahova, les situations météorologiques associées sont analysées selon la classification de Hess-Brezowski. On considère que les fortes crues de la Prahova ont un débit de pointe dont le

temps de retour est supérieur à 10 ans à au moins une des stations hydrométriques de la Prahova (cf. Tableau 23) ; en préfigurant les résultats de la thèse, on précise que ces crues provoquent des inondations par débordements et des dégâts matériels. Les résultats obtenus montrent que les crues de la Prahova sont associées à des situations d'ouest, de nord-ouest et de nord dans 5 cas sur 12 ; des situations de nord-est et d'est dans 3 cas sur 12 ; des situations sur l'Europe centrale dans 2 cas sur 12 ; par des situations du sud dans 2 cas sur 12 (cf. Tableau 7). Pourtant la méthode appliquée sur les cartes de reanalyse et sur les cartes des champs de pression en surface de la Météo Allemande ne permet pas de comprendre, dans certains cas, la cause précise des précipitations tombées ; cela est dû à l'échelle (régionale) des documents et de la méthode utilisés.

<b>Date</b>	<b>Situation météorologique selon la classification de Hess-Brezowski</b>	<b>Direction dominante selon la classification de Hess-Brezowski</b>
Le 6 mai 1969	HNFZ	Est
Le 2 juillet 1971	NEA	Nord-est
Le 2 juillet 1975	NEZ	Nord-est
Le 19 juin 1981	NZ	Nord
Le 17 juillet 1988	TM	Situation sur l'Europe centrale
Le 12 décembre 1990	TM	Situation sur l'Europe centrale
Le 2 août 1997	WZ	Ouest
Le 11 septembre 2001	NWZ	Nord-ouest
Le 7 mai 2005	HB	Nord
Le 12 juillet 2005	SA	Sud
Le 19 septembre	HB	Nord
Le 23 mars 2007	SZ	Sud

**Tableau 7. Situations météorologiques associées aux forts débits de la Prahova. Les situations météorologiques sont définies selon le catalogue Katalog der Grosswetterlagen Europas. Les situations notées en gris sont extraites de ce catalogue ; les situations notées en gris sont estimées selon les cartes proposées par le même catalogue. WZ = situation d'ouest, cyclonique ; NWZ = situation du nord-ouest, cyclonique ; HB = anticyclone sur les Îles Britanniques ; NEA = situation du nord-est, anticyclonique ; NEZ = situation du nord-est, cyclonique ; HNFZ = anticyclone sur Mer du Nord-Scandinavie, anticyclonique ; SA = situation du sud, anticyclonique ; SZ = situation du sud, cyclonique.**

Ces résultats confirment les observations antérieures (Ioana-Toroimac *et al.*, 2007 ; Beltrando et Zaharia 2009), qui ont constaté que les forts épisodes pluvieux du bassin de la Prahova (cumul quotidien de précipitations supérieur à 50 mm) sont associés à des situations météorologiques variées ; ces auteurs expliquent que l'analyse des situations météorologiques associées à des forts épisodes pluvieux à l'échelle locale nécessite un examen des types de

circulation tenant compte de la position de l'espace étudié par rapport aux centres d'action régionaux.

En tenant compte de leur date et du fait que des quantités importantes de précipitations s'enregistrent simultanément, il est possible de conclure que la Prahova se caractérise par des crues d'averses, conformément à la classification proposée par Réménieras (1999) (d'averses, de fonte de neige, d'embâcle et de débâcle de glace).

### **1.2.7. Conclusions**

Ce chapitre de la thèse a eu deux objectifs principaux, l'analyse du régime hydrologique et des crues importantes de la Prahova. La Prahova a un régime hydrologique nivo-pluvial, qui se caractérisent par des hautes eaux à la fin du printemps (en mai) et par des basses eaux en hiver (janvier). Un deuxième maximum se produit à la fin de l'automne, et un deuxième minimum se produit au début de cette saison. A travers la bibliographie, on a pu constater le rôle des Carpates pour le régime hydrologique de la Prahova et de ses affluents : 1) les rivières qui ont des sources à plus de 2000 m d'altitude ont la phase de hautes eaux en mai ou même en juin ; 2) les rivières qui ont des sources dans les Carpates, mais à moins de 2000 m d'altitude, ont la phase de hautes eaux en avril ; 3) les rivières qui ont des sources dans les Subcarpates ont la phase de hautes eaux en mars ; 4) l'affluent Valea Cerbului, dont le bassin versant est essentiellement carpatique et il s'étend jusqu'à environ 2500 m d'altitude, a un régime simple, nival. Les débits de pointe de la Prahova se produisent essentiellement durant la saison chaude. La Prahova a subi sa crue centennale le 12 juillet 2005 à la station de Prahova (766 m<sup>3</sup>/s) et le 2 juillet 1975 à la station d'Adâncata (1220 m<sup>3</sup>/s). Ces crues de la Prahova sont associées à des situations météorologiques du nord et du nord-est, conformément à la classification de Hess-Brezowski. Les autres événements hydrologiques extrêmes, bien qu'ils se produisent durant la saison chaude sont associés à des situations météorologiques variées. Ce chapitre laisse ouvertes plusieurs directions de recherche. Quel est le rôle de la neige dans ce régime hydrologique nivo-pluvial ? Quel est le seuil de précipitations situé à l'origine des crues ? Quelles sont les causes déterminant les précipitations abondantes du bassin de la Prahova ? Quelle charge solide transporte la Prahova en crue et comment les crues contribuent au façonnage du chenal fluvial ?

## **1.3. Débit à pleins bords et puissance fluviale de la Prahova : détermination et signification hydrogéomorphologique**

### **1.3.1.. Introduction**

Du point de vue hydrologique, on a souligné dans le chapitre précédent que plusieurs débits sont considérés caractéristiques pour le cours d'eau : le débit module annuel, le débit spécifique module annuel, le débit de base d'une crue considéré de 2 à 5 fois supérieur au débit module annuel, le débit récurrent de 1% ou de 5%...

Du point de vue géomorphologique, c'est le débit à pleins bords qui est considéré caractéristique. Le niveau à « pleins bords » d'un cours d'eau correspond à l'élévation du niveau de l'eau jusqu'aux bords de ses berges. Le concept de « niveau à pleins bords » apparaît dans le travail de Leopold et Maddock (1953) qui porte sur les corrélations entre les paramètres de la section mouillée d'un chenal fluvial naturel. En relation avec ce niveau du cours d'eau et les paramètres caractéristiques, une année plus tard, Leopold (1954) utilise la notion de « débit à pleins bords », qui représente le débit correspondant au niveau à pleins bords. Mais c'est la publication de Leopold et Wolman (1957), qui concerne les styles fluviaux, qui assurent la diffusion de ce concept. Selon certains auteurs, le débit à pleins bords est considéré comme proche du débit dominant pour le transport de la charge de fond ; il représente ainsi le point optimum d'efficacité pour les modifications géomorphologiques du chenal fluvial (Leopold *et al.*, 1964 ; Dury, 1969 ; Richards, 1982). Le débit à pleins bords représente aussi le débit au-delà duquel la plaine alluviale peut évoluer soit par la migration latérale du chenal fluvial, soit par décantation des sédiments et accrétion verticale. Donc le débit à pleins bords pourrait être intéressant du point de vue hydrologique aussi, pour l'étude des inondations par débordement. Ces arguments montrent l'intérêt de connaître la valeur du débit à pleins bords, ainsi que sa récurrence. Le débit à pleins bords peut être utilisé pour le calcul d'un autre paramètre, démonstratif pour le fonctionnement hydrogéomorphologique d'un cours d'eau : la puissance fluviale. La puissance fluviale exprime l'énergie de l'écoulement et quantifie la capacité de travail d'un cours d'eau (Gregory, 1987). Ce paramètre a été utilisée pour l'analyse du transport des sédiments (Allen, 1977), pour la caractérisation des crues (Baker et Costa, 1987), pour l'étude de l'instabilité du chenal et de l'érosion des berges (Brookes, 1987), pour la caractérisation des plaines alluviales (Nanson et Croke, 1992 ; Bravard et Peiry, 1999), pour l'analyse de la morphologie des chenaux fluviaux

(Ferguson, 1981, Ferguson, 1987). Mais la puissance fluviale est aussi un indicateur du cadre géographique traversé par le cours d'eau (Gregory, 1987), raison pour laquelle elle est à la base de l'élaboration des typologies hydrogéomorphologiques (Newson *et al.*, 1998 ; Schmitt, 2001, 2007).

**Ce chapitre de la thèse propose de calculer le débit à pleins bords et la puissance fluviale de la Prahova dans le but de connaître le fonctionnement hydrogéomorphologique de cette rivière, ce qui représente la base des recherches menées tout le long de la thèse.**

### **1.3.2. Démarche méthodologique**

Afin de répondre à ces objectifs, la démarche méthodologique consiste en trois étapes : 1) la détermination du niveau à pleins bords ; 2) la détermination du débit à pleins bords ; 3) la détermination de la récurrence du débit à pleins bords ; 4) la détermination de la puissance fluviale.

#### *1.3.2.1. Détermination du niveau à pleins bords - travail de terrain*

Dans la littérature scientifique, le niveau à pleins bords est déterminé par différentes méthodes.

Wolman (1955) considère que le niveau de pleins bords correspond au minimum du rapport entre la largeur et la profondeur moyenne de chaque section. Riley (1972) montre que cette méthode est efficace surtout pour les sections rectangulaires qui se caractérisent par une augmentation de la profondeur qui est plus importante que la baisse de la largeur. Richards (1982) souligne que cette méthode est efficace pour les tronçons à chenal rectiligne, donc points de convexité.

Navratil (2005) explique que chaque berge a deux niveaux caractéristiques : le bord de berge et le haut de berge. Ces deux niveaux définissent la transition entre le chenal et le lit d'inondations. Le bord de berge caractérise la limite du chenal, lorsque l'inclinaison de la berge décroît significativement. L'espace situé entre le bord et le haut de la berge représente un espace de transition, avant le lit d'inondation, caractérisé en général, par une pente faible. Le même auteur estime que la délimitation du chenal et du lit d'inondation reste ambiguë et que les méthodes utilisées devraient être adaptées aux particularités du terrain d'étude.

Ces deux méthodes ont le désavantage de nécessiter un grand nombre de profils en travers du chenal fluvial. D'autres méthodes sont basées sur la détection des changements dans la végétation et la composition des sédiments. Par exemple Woodyer (1968) propose les critères de la végétation et sédimentologique pour la détermination des bords des berges. Speight (1965), Nunally (1967) et Woodyer (1968) proposent même des espèces spécifiques au milieu riverain, susceptibles de se retrouver sur les bords des berges. Nunally (1967) considère que la limite entre le chenal fluvial et le lit d'inondation correspond à la transition sédimentologique entre les alluvions du chenal et les alluvions décantées suite aux débordements. Richards (1982) estime que ces derniers critères sont efficaces pour les tronçons à méandres et pour les tronçons incisés. Ces méthodes ont le désavantage d'être subjectives et de dépendre aussi du moment de l'analyse (par exemple la saison et la phase du régime hydrologique pour le développement de la végétation).

Dans le cas de la rivière Prahova, on a décidé de délimiter le niveau à pleins bords selon deux critères : topographique et de végétation. Ce choix est adapté aux particularités du terrain d'étude et aux données disponibles, qui consistent essentiellement dans des observations de terrain (cf. Figure 23). Selon le critère topographique, la limite du chenal correspond à la décroissance de l'inclinaison de la berge. Mais étant donné le fait qu'il est difficile de distinguer sur le terrain le haut et le bord de la berge, le critère de la végétation est également pris en compte. Ainsi la limite du chenal correspond à l'apparition de la végétation. Ce deuxième critère dépend des phases de hautes eaux et de crues, mais on a eu l'occasion d'observer les berges de la Prahova aussi bien en phase de hautes eaux au printemps qu'en phase de basses eaux en automne. En préfigurant les résultats de la thèse, on a observé que les berges du secteur en tresses sont en général soumises à l'érosion, ce qui rend plus facile l'identification de leur limite supérieure selon le critère de la végétation. Les bancs latéraux du secteur à méandres, qui ne sont pas couverts de végétation, font partie du chenal, parce que l'absence de la végétation indique leur fonctionnalité.

Trois situations particulières ont été rencontrées lors des observations de terrain : 1) la situation des tronçons tressés ; dans ce cas, la section transversale correspond à l'intégralité de chenaux et bancs alluviaux qui les séparent, donc à la bande active de tressage<sup>7</sup> ; cela va dans le même sens que l'idée de Leopold (1954) qui explique que, dans le cas des cours d'eau tressés, la notion de « pleins bords » correspond à la largeur du cours d'eau quand l'eau

---

<sup>7</sup> La notion de bande active est définie dans le chapitre 2.2.

s'écoule par un chenal unique ; 2) la situation des berges protégées par des ouvrages hydrauliques ; dans ce cas, les deux niveaux à pleins bords sont estimés – en état naturel et en état aménagé ; 3) la situation quand les berges n'ont pas la même hauteur ; dans ce cas, on a considéré que le niveau à pleins bords correspond à la hauteur de la berge la moins haute, étant donné l'importance du débit à pleins bords dans la gestion du risque inondation.



**Figure 23. Niveau à pleins bords de la Prahova à : (A) Bușteni ; (B) Stăncești ; (C) Adâncata.**

Après avoir déterminé le niveau à pleins bords, l'analyse continue dans deux directions :

1) La largeur et la profondeur du chenal fluvial / de la bande active sont mesurées sur le terrain. La largeur est mesurée au moyen d'une station LEICA TCR 407, à précision millimétrique. La profondeur est estimée au moyen d'un fil à plomb (goutte et plomb plat pour les eaux courantes) ; on a fait plusieurs essais successifs afin d'obtenir la profondeur maximale sur le profil en travers. Ces observations et mesures de terrain ont été faites pour 24 sites, distribués tout le long de la rivière, dans les unités principales de relief que la Prahova traverse et dont le choix dépend de l'accessibilité sur le terrain (routes d'accès, moyens de traverser la rivière). Cela permet d'avoir une vision d'ensemble sur les dimensions du chenal fluvial et de la bande active.

2) Le débit à pleins bords est calculé pour cinq profils en travers, dont le choix est expliqué dans le paragraphe suivant.

#### *1.3.2.2. Calcul du débit à pleins bords par la formule de Manning-Strickler*

Leopold (1954) considère que le débit à pleins bords est le produit entre la largeur, la profondeur du chenal et la vitesse moyenne de l'eau, estimée d'après la formule de Manning-Strickler :

$$Q_b = A \cdot k \cdot (R^{2/3} \cdot S^{1/2}) / n,$$

où  $Q_b$  ( $m^3/s$ ) est le débit à pleins bords,  $v_m$  (m/s) représente la vitesse moyenne de l'eau,  $R$  (m) est le rayon hydraulique,  $A$  ( $m^2$ ) est la superficie de la section mouillée,  $P$  (m) est le périmètre de la section mouillée,  $S$  (‰) est la pente de ligne d'eau,  $n$  est le coefficient de rugosité calculé selon la formule de Strickler et  $k$  est la constante de conversion (égale à 1 pour le Système international d'unités de mesure).

Cette méthode a le désavantage de prendre en compte la vitesse moyenne de l'eau, considérée uniforme pour toute la largeur du chenal fluvial, ce qui ne reflète pas la réalité. Pourtant elle a l'avantage de pouvoir être appliquée dans tous les endroits où on peut lever un profil en travers. Les travaux ultérieurs reprennent cette modalité de calcul et proposent d'autres relations entre les paramètres de la section mouillée, adaptés à l'échelle régionale. Par conséquent, il y a une multitude de relations entre les paramètres de la section mouillée qui incluent le débit à pleins bords. Williams (1978), cité par Richards (1982), propose une relation entre le débit à pleins bords, la superficie de la section mouillée et la pente du lit du

chenal fluvial. Cette relation a été déterminée, à l'échelle régionale, à partir de 233 sites de mesures.

$$Q_b = 4 \cdot A^{1,21} \cdot S^{0,28},$$

où  $Q_b$  est le débit à pleins bords (en  $m^3/s$ ),  $A$  est la superficie de la section mouillée à pleins bords ( $m^2$ ),  $S$  est la pente du chenal fluvial.

Williams (1978), cité par Nolan *et al.* (1987), propose aussi une autre méthode de détermination du débit à pleins bords ; elle consiste à l'extraction du débit correspondant au niveau à pleins bords à partir de la courbe de tarage. Bien que cette méthode soit relativement rapide, elle a le désavantage de pouvoir être appliquée uniquement aux stations de jaugeage pour lesquelles existent une longue série d'enregistrements hydrologiques.

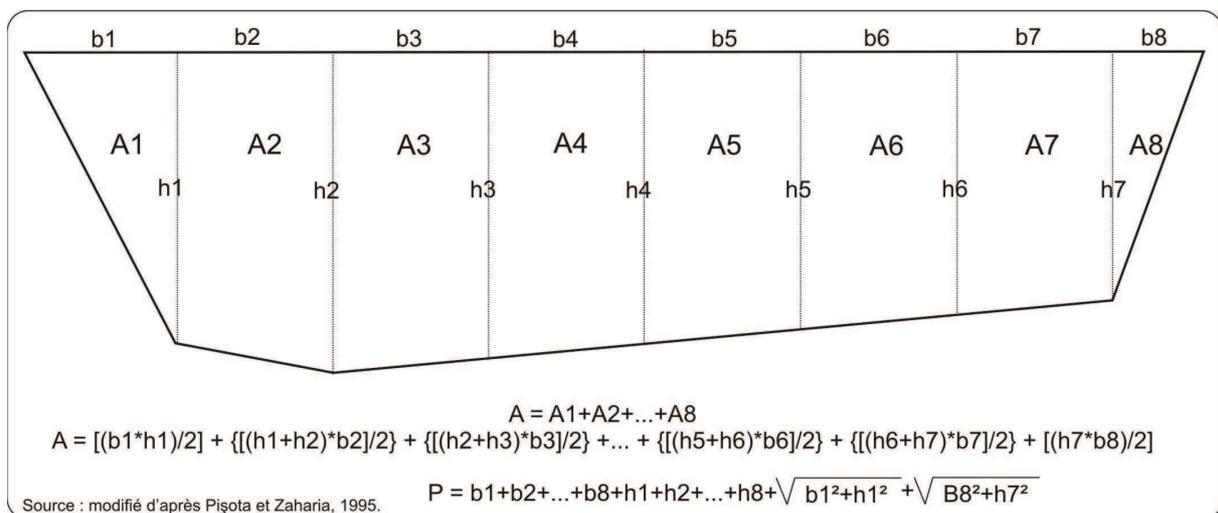
Dans la thèse, on a opté pour l'application de la méthode morpho-hydraulique expliquée ci-dessus qui prend en compte le calcul de la vitesse de l'eau selon l'équation de Manning-Strickler. Ce choix est expliqué par la position des stations de jaugeage sur la Prahova et par leur rapport avec l'intérêt scientifique de la recherche. Les stations de jaugeage se trouvent à Bușteni dans les Carpates, à Câmpina dans les Subcarpates, à Prahova dans la Plaine de Ploiești et à Adâncata dans la Plaine de Gherghița. Bien que ces quatre stations hydrométriques se trouvent dans les quatre unités de relief traversées par la rivière Prahova, elles ne sont représentatives que pour des tronçons à chenal unique, sinueux et à méandres. De fait, conformément au guide des stations hydrométriques en Roumanie, elles ne sont jamais positionnées dans un tronçon en tresses, dont la dynamique très active et l'instabilité rendraient les mesures aléatoires. Mais l'intérêt scientifique de la démarche nous a conduits à tenter de calculer le débit à pleins bords dans un tronçon en tresses.

Ainsi, la démarche méthodologique consiste en :

1) **La réalisation des profils en travers.** Des levées de terrain aux stations de jaugeage de la Prahova (profils en travers du chenal, pente de la ligne d'eau) sont effectuées lors de la mesure du débit liquide et elles proviennent donc de la SGA Prahova. Afin de pouvoir calculer le débit à pleins bords dans un tronçon en tresses, un profil en travers a été levé dans un tronçon en tresses, au kilomètre 99 de la rivière, à proximité de la localité de Stăncești. Les levés de terrain ont été réalisés au moyen d'une station Leica TCR 407, à précision millimétrique, en période de basses eaux, afin de pouvoir traverser le cours d'eau. Ce profil en travers couvre toute la largeur de la bande active de tressage. La pente utilisée pour déterminer le débit à pleins bords correspond à la pente du chenal principal, sur une longueur

de 100 m, longueur choisie en fonction de la visibilité sur le terrain. L'absence d'autres levés de terrain personnels est expliquée par le fait que, dans les tronçons en tresses et à méandres, la profondeur de l'eau dans le talweg est trop importante, ce qui empêche la traversée à pied de la rivière. Or la réalisation et l'utilisation des plusieurs profils en travers en amont, en ignorant la partie aval, n'auraient pas servi à la thèse qui porte sur l'ensemble de la Prahova.

2) **Le calcul des paramètres de la section mouillée à pleins bords.** Après avoir déterminé le niveau à pleins bords selon les critères expliqués ci-dessus, les paramètres calculés sont : la superficie, le périmètre et le rayon hydraulique. La méthode appliquée pour leur calcul est celle proposée par Pişota et Zaharia (1995). Elle consiste dans le découpage de la section transversale en plusieurs figures géométriques : deux triangles à l'extérieur du profil et une multitude de trapèzes à l'intérieur. Ce découpage se fait tous les mètres ou tous les cinq mètres en fonction des dimensions du profil en travers. La superficie de la section mouillée à pleins bords représente la somme des superficies de ces figures géométriques. Le périmètre représente la somme de la longueur du fond du chenal et du miroir de l'eau en profil transversal ; il est calculé, lui aussi, à partir de ces figures géométriques. Le rayon hydraulique est le rayon du cercle circonscrit à la section transversale et il est calculé comme rapport entre sa superficie et son périmètre.



**Figure 24. Schéma de calcul de la superficie et du périmètre de la section mouillée. A = superficie totale ; A1...A8 = superficies des figures géométriques ; b1...b8 = distances entre les points de mesure ; h1...h8 = profondeurs de la section ; P = périmètre.**

3) **Le calcul de la rugosité des profils en travers.** La rugosité quantifie le caractère rugueux d'une surface, caractéristique liée en général à la lithologie, à la granulométrie du

substrat et à la végétation. Les valeurs du coefficient de rugosité sont calculées selon la formule de Strickler (1923) :

$$n = d_{50}^{1/6}/21,1,$$

où  $n$  représente le coefficient de rugosité et  $d_{50}$  (m) représente le diamètre équivalent permettant de séparer 50% en poids des particules.

La granulométrie a été mesurée sur un cadrat d'un mètre carré situé à proximité du chenal principal, ayant une profondeur de 10 cm. La mesure des dimensions des galets et des graviers a été faite au moyen d'un pied à coulisse. Sur le terrain, les particules de sables et de limons ont été séparées au moyen d'une maille et ces particules ont été analysées ensemble. Le poids des galets, des graviers et des autres particules a été estimé sur le terrain à l'aide d'une balance. Pour plus de précision, ultérieurement, les échantillons de sables et de limons ont été transportés et analysés séparément en laboratoire afin de déterminer leurs granulométries et leurs poids.

4) **Le calcul de la vitesse moyenne de l'eau selon la formule de Manning.** Cette valeur de la vitesse est considérée uniforme pour toute la superficie de la section mouillée.

$$V_m = k \cdot (R^{2/3} \cdot S^{1/2}) / n,$$

$$R = A/P,$$

où  $v_m$  (m/s) représente la vitesse moyenne de l'eau,  $R$  (m) est le rayon hydraulique,  $A$  (m<sup>2</sup>) est la superficie de la section mouillée,  $P$  (m) est le périmètre de la section mouillée,  $S$  (‰) est la pente de la ligne d'eau,  $n$  est le coefficient de rugosité calculé selon la formule de Strickler et  $k$  est la constante de conversion (égale à 1 pour le Système international d'unités de mesure).

5) **Le calcul du débit à pleins bords.** Le débit à pleins bords est calculé en tant que produit entre la superficie de la section mouillée à pleins bords et la vitesse moyenne de l'eau.

$$Q_b = A \cdot v_m,$$

où  $Q_b$  (m<sup>3</sup>/s) est le débit à pleins bords et  $v_m$  (m/s) est la vitesse moyenne de l'eau selon la formule de Manning.

#### *1.3.2.3. Calcul de la fréquence du débit à pleins bords*

En ce qui concerne la fréquence du débit à pleins bords, Leopold (1954) et puis Leopold et Wolman (1956) proposent un intervalle de 1-2 ans. Plus tard les mêmes auteurs reviennent sur

cet aspect et précisent que la fréquence du débit à pleins bords peut dépasser ces valeurs, en fonction des conditions locales, comme c'est le cas des chenaux incisés par rapport à une terrasse ou dans un tronçon de gorge (Wolman et Leopold, 1957). Dury *et al.* (1963) propose une fréquence du débit à pleins bords de 1,58 ans ; puis il revient et propose une relation entre les deux paramètres :  $Q_b = 0,97 \cdot Q_{1,58}$ , où  $Q_b$  représente le débit à pleins bords et  $Q_{1,58}$  représente le débit dont la récurrence est de 1,58 ans (Dury, 1973).

Dans la thèse, on a choisi de calculer la fréquence du débit à pleins bords aux stations de jaugeage à partir d'un modèle fréquentiel appliqué sur les séries chronologiques de débits annuels de pointe.

Les étapes nécessaires à ce type d'analyse sont (selon Musy, 2005) : 1) la constitution d'une série de valeurs ; 2) le contrôle de la série de valeurs ; 3) le choix du modèle fréquentiel ; 4) l'ajustement du modèle fréquentiel ; 5) l'analyse des incertitudes ; 6) l'exploitation du modèle fréquentiel.

1) Les séries analysées sont les débits annuels de pointe aux stations hydrométriques situées sur la Prahova. La période d'analyse représente la plus longue période d'enregistrements des débits de pointe, disponible dans les archives de l'INHGA. Ainsi les débits annuels de pointe sont analysés à Poiana Țapului pour la période 1966-1992, à Câmpina pour la période 1962-2007, à Prahova pour la période 1961-2007 et à Adâncata pour la période 1961-2007.

2) En ce qui concerne le contrôle des données, malgré le fait que ces séries sont utilisées dans la pratique hydrologique, pour la gestion et pour l'aménagement de la rivière Prahova, on ne peut pas se prononcer ni sur leur véracité, ni sur leur consistance. Par contre leur longueur les rend fiables pour l'application des tests statistiques. Ces séries de données sont aléatoires et simples<sup>8</sup> ; les deux dernières caractéristiques résultent de l'application des tests d'autocorrélogramme et de corrélation sur le RANG (logiciel Khronostat 1.01).

3) Le modèle fréquentiel est choisi en fonction de son applicabilité pour les séries de valeurs non-symétriques, comme c'est le cas des extrêmes hydrologiques. En ce sens on a

---

<sup>8</sup> Le caractère aléatoire et simple d'une série d'observations est une hypothèse fondamentale pour l'analyse statistique. *Un échantillon aléatoire* signifie que tous les individus de la population ont la même probabilité d'être prélevés. *Un échantillon simple* signifie que le prélèvement d'un individu n'influe pas la probabilité d'apparition des individus suivants. Autrement dit, si toutes les observations de la série sont issues de la même population et qu'elles sont indépendantes entre elles, la série est alors aléatoire et simple (Musy, 2005).

choisi le modèle de Pearson III. Ce choix repose sur l'expérience et la coutume de l'utiliser en Roumanie. Ainsi nos résultats peuvent être comparés à des résultats obtenus pour une autre période de temps. Le même modèle est utilisé aux Etats-Unis d'Amérique ; mais il est parfois contesté dans la littérature scientifique, parce qu'il n'y a pas d'argument d'ordre statistique qui fasse une différence majeure entre ce modèle et celui de Gumbel (double exponentielle) selon Hubert (2005).

L'application de la loi de **Pearson III** se fait en plusieurs étapes (selon Diaconu et Şerban, 1994) :

- La distribution de Pearson III est définie par l'équation :

$$Q_{p\%} = Q_0 * [C_v * \varphi(p\%, C_s) + 1]$$

- Afin d'appliquer cette méthode, les temps de retour  $i$  sont choisis (5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans, 200 ans 1000 ans) ; en général les débits récurrents associés à ces temps de retour sont considérés comme caractéristiques pour un cours d'eau.
- Le coefficient d'asymétrie  $C_s$  est calculé ou adopté. Pour la Prahova, il est adopté à :

$$C_s = 4 \cdot C_v \text{ (selon Diaconu et Şerban, 1994),}$$

où  $C_s$  = coefficient d'asymétrie ;  $C_v$  = coefficient de variation.

Le coefficient de variation  $C_v$  représente le rapport entre l'écart type et la moyenne de la série de données analysée.

- Puis le facteur  $\varphi_i$  est recherché dans les tables préexistantes pour les valeurs obtenues du  $C_s$ .
- Les coefficients modules  $K_i$  sont calculés selon l'équation :

$$K_i = \varphi_i \cdot C_v + 1 ;$$

- Les débits  $Q_i$  correspondant aux temps de retour sont calculés selon l'équation :

$$Q_i = Q_0 \cdot K_i ,$$

où  $Q_0$  = débit module.

4) La courbe de répartition des couples de valeurs  $Q_i - i$  est tracée de manière automatique sur Excel ; la courbe de régression est de type logarithmique. Le logiciel propose aussi la formule de la courbe tracée.

5 et 6) La formule de la courbe de régression logarithmique permet de valider les résultats. Plusieurs valeurs de temps de retour sont calculées pour des débits donnés à partir de cette formule. Les valeurs obtenues sont comparables aux valeurs ponctuelles calculées par la méthode proprement dite. Le temps de retour du débit à pleins bords est estimé de la même façon.

#### *1.3.2.4. Calcul de la puissance fluviale*

La puissance fluviale (en W/m) est dépendante des dimensions du chenal fluvial, de la masse volumique de l'eau et de la gravité. Elle est calculée selon l'équation :

$$\Omega = (\rho \cdot g \cdot Q_b \cdot S) \text{ (Bagnold, 1960),}$$

où  $\Omega$  = puissance fluviale (W/m) ;  $\rho$  = masse volumique de l'eau ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1000  $\text{kg/m}^3$  ;  $g$  = gravitation ( $\text{m/s}^2$ ) = 9,81  $\text{m/s}^2$  ;  $Q_b$  = débit à pleins bords ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ;  $S$  = pente de la ligne d'eau (m/m).

Bagnold (1977) propose de calculer cette énergie pour l'unité de surface du chenal fluvial ; on obtient ainsi la puissance fluviale spécifique (en  $\text{W/m}^2$ ), qui est calculée selon la formule :

$$\omega = \Omega/w,$$

où  $\Omega$  = puissance fluviale (W/m) ;  $\omega$  = puissance fluviale spécifique ( $\text{W/m}^2$ ) ;  $w$  = largeur de la section mouillée à pleins bords (m).

C'est en général la puissance fluviale spécifique qui est utilisée pour des comparaisons régionales (Kondolf *et al.*, 2003).

### **1.3.3. Variations du débit à pleins bords et de la puissance fluviale de la Prahova**

#### *1.3.3.1. Aperçu des dimensions du chenal fluvial / bande active*

Les mesures de terrain mettent en évidence quelques particularités de la Prahova.

La largeur du chenal fluvial ou de la bande active augmente d'amont en aval, entre 6 m au site S1, situé à proximité des sources de la Prahova, et 92,5 m au site S24, situé juste en amont de l'embouchure. Mais aux sites d'observations S13-S16, la largeur atteint 150-200 m, donc elle est plus importante que celle du site S24 (cf. Figure 25).

La profondeur du chenal fluvial ou de la bande active augmente généralement d'amont en aval, de 0,5 m au site S2 à 5,6 m au site S24. Pourtant on remarque quelques exceptions : les

sites S8, S10, S17 se caractérisent par une profondeur importante du chenal fluvial, d'environ 10-11 m (cf. Figure 25).

Ces variations des dimensions du chenal fluvial / de la bande active de la Prahova sont les premiers indicateurs des variations hydrogéomorphologiques de la rivière. En effet la largeur importante de la bande active observée aux sites S13-S16 correspond à un tronçon tressé de la Prahova. La profondeur importante du chenal de la Prahova aux sites S8, S10, S17 correspond à des tronçons incisés du chenal de la Prahova. Ces deux aspects (le tressage et l'incision) sont développés dans la deuxième partie de la thèse (à voir les chapitres 2.3 et 2.4).

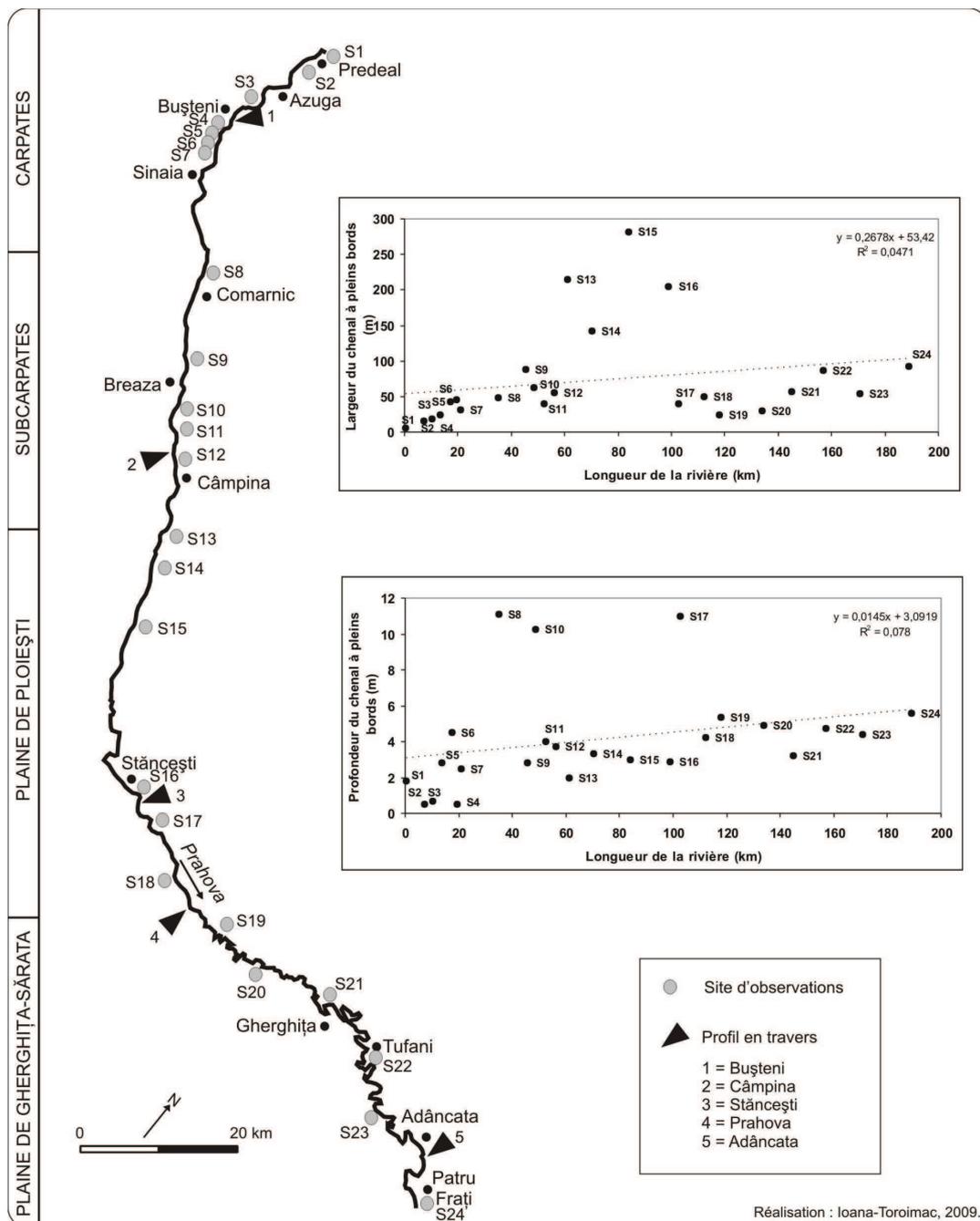


Figure 25. Sites d'observations et de mesures de la largeur et de la profondeur du chenal à pleins bords.

### 1.3.3.2. Variations spatiales du débit à pleins bords et de la puissance fluviale

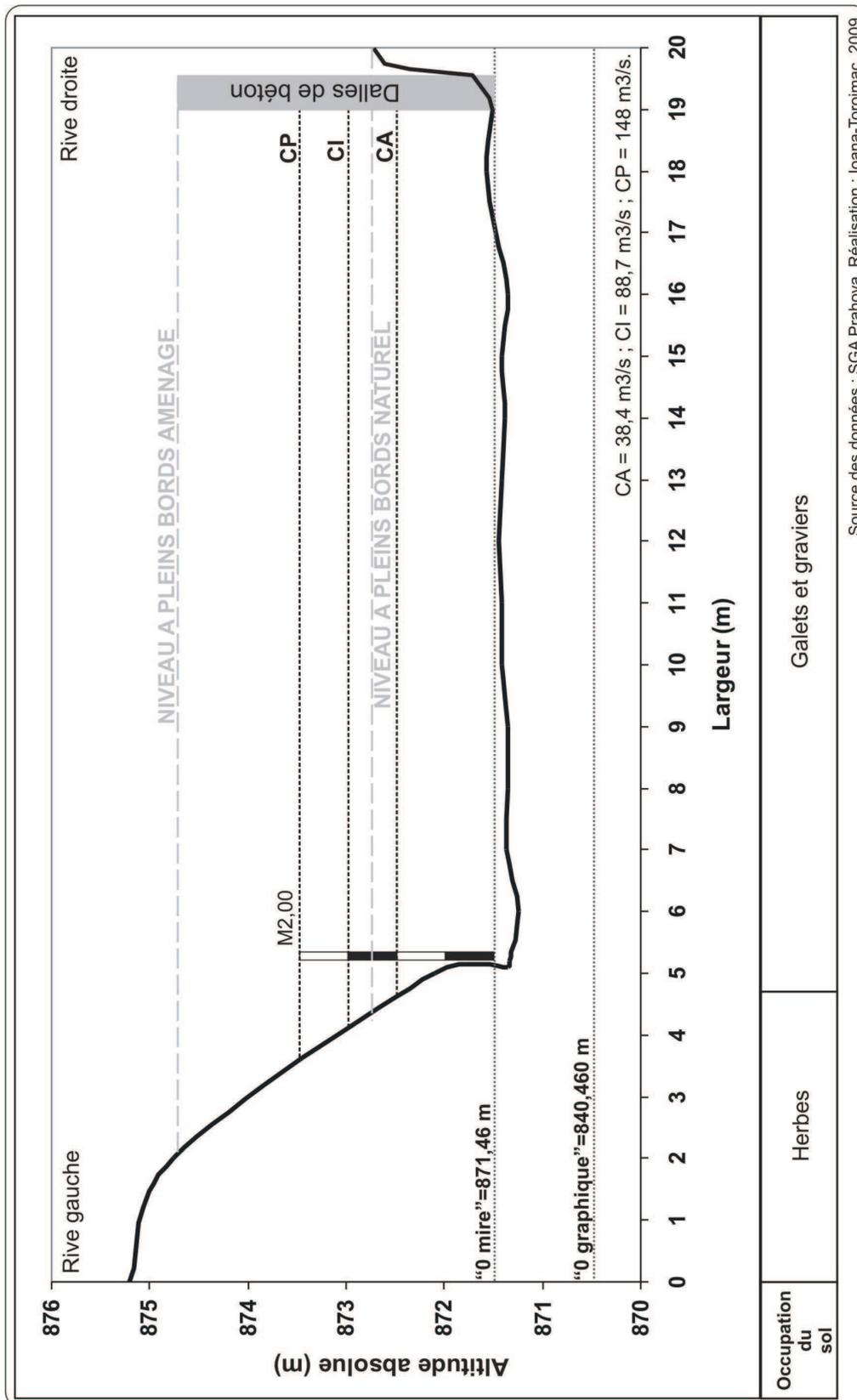
Les cinq profils en travers utilisés pour le calcul du débit à pleins bords sont représentés sur les figures Figure 26, Figure 27, Figure 28, Figure 29, Figure 30. La démarche méthodologique présentée ci-dessus a permis l'obtention des résultats notés dans le Tableau 8 dans le Tableau 9.

Section analysée	A (m <sup>2</sup> )	P (m)	R (m)	S (‰)	D <sub>50</sub> (m)	n	v <sub>m</sub> (m/s)	Q <sub>b</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Prahova à Bușteni (état naturel)	23,25	31,8	0,73	7,6	0,1	0,032	2,18	50
Prahova à Bușteni (état aménagé)	53,10	39,40	1,35	7,6	0,1	0,032	3,30	175
Prahova à Câmpina	102,50	97,28	1,05	5,5	0,13	0,033	2,27	233
Prahova à Stăncești	358,98	529,04	0,68	3,5	0,035	0,027	1,68	606
Prahova à Prahova	164,50	95,45	1,72	0,8	0,013	0,023	1,77	290
Prahova à Adâncata	166,40	117,62	1,41	0,5	0,002	0,017	1,67	278

**Tableau 8. Valeurs des paramètres intermédiaires et du débit à pleins bords aux sections transversales prise en compte sur la Prahova. A = superficie de la section mouillée à pleins bords (m<sup>2</sup>) ; P = périmètre de la section mouillée à pleins bords (m) ; R = rayon hydraulique (m) ; S = pente de la ligne d'eau (‰) ; D50 = granulométrie ; n = coefficient de rugosité de Strickler ; v<sub>m</sub> = vitesse moyenne de l'eau (m/s) selon Manning ; Q<sub>b</sub> = débit à pleins bords (m<sup>3</sup>/s). Réalisation : à partir des profils en travers des figures Figure 26-Figure 30.**

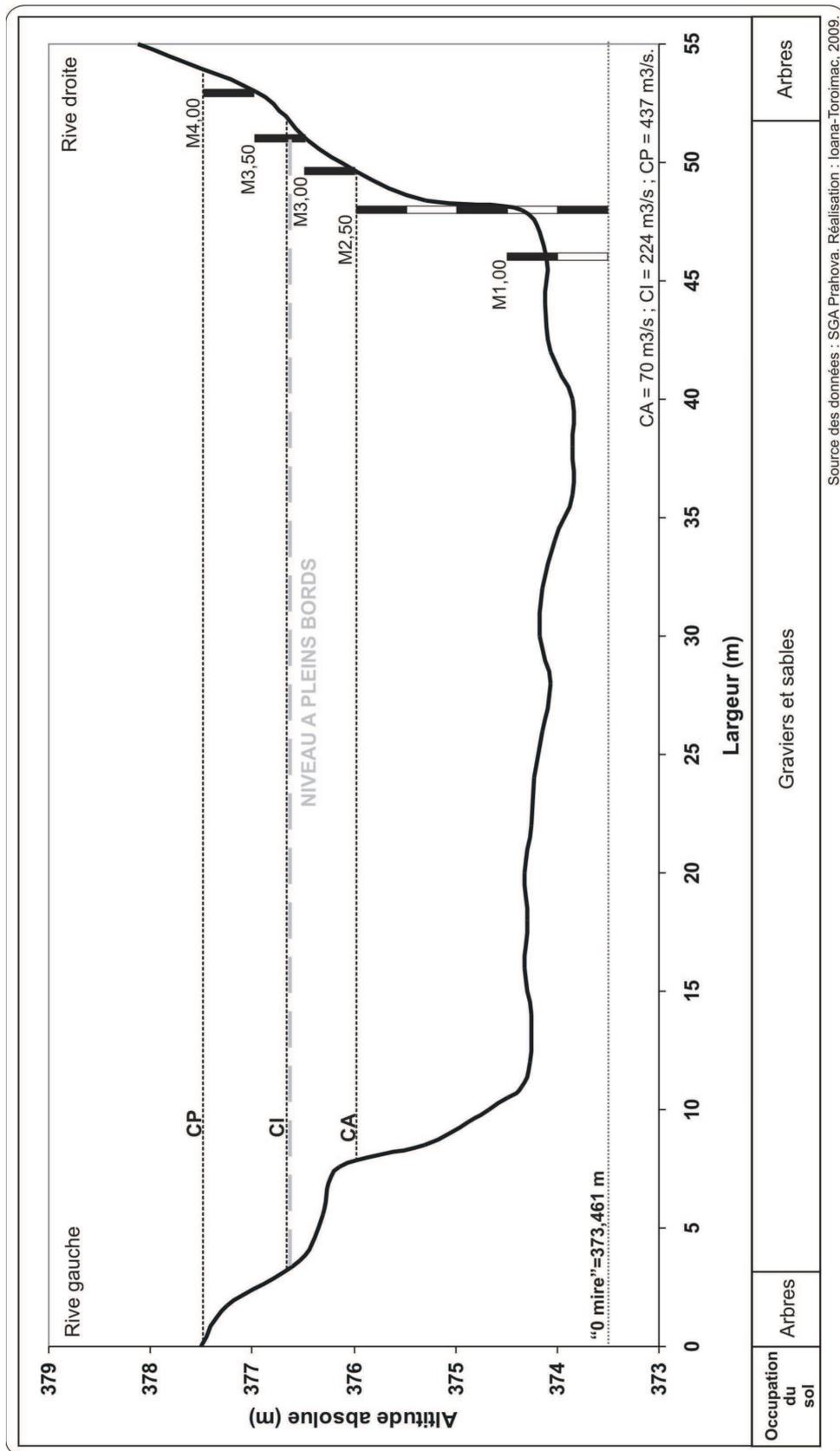
Section analysée	w (m)	Ω <sub>b</sub> (W/m)	ω <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )
Prahova à Bușteni (état naturel)	15,9	3790	238
Prahova à Bușteni (état anthropisé)	17	13043	767
Prahova à Câmpina	50	12548	251
Prahova à Stăncești	193	20781	108
Prahova à Prahova	48	2279	47
Prahova à Adâncata	58	1362	23

**Tableau 9. Valeurs de la puissance fluviale et de la puissance fluviale spécifique aux sections transversales prise en compte sur la Prahova. w = largeur de la section mouillée à pleins bords (m) ; Ω<sub>b</sub> = puissance fluviale correspondant au débit à pleins bords (W/m) ; ω<sub>b</sub> = puissance fluviale spécifique correspondant au débit à pleins bords (W/m<sup>2</sup>). Réalisation : à partir des profils en travers des figures Figure 26 – Figure 30.**



Source des données : SGA Prahova. Réalisation : Ioana-Toroimac, 2009.

Figure 26. Profil en travers de la Prahova du 29 mars 2006 à Bușteni, niveau à pleins bords et cotes de protection contre les inondations. Les valeurs indiquées sur la mire hydrométrique représentent l'altitude relative par rapport au repère de la mire (« 0 mire »).



Source des données : SGA Prahova. Réalisation : Ioana-Toroimac, 2009.

Figure 27. Profil en travers de la Prahova du 19 janvier 2006 à Câmpina, niveau à pleins bords et cotes de protection contre les inondations. Les valeurs indiquées sur la mire hydrographique, représentent l'altitude relative par rapport au repère de la mire (« 0 mire »).

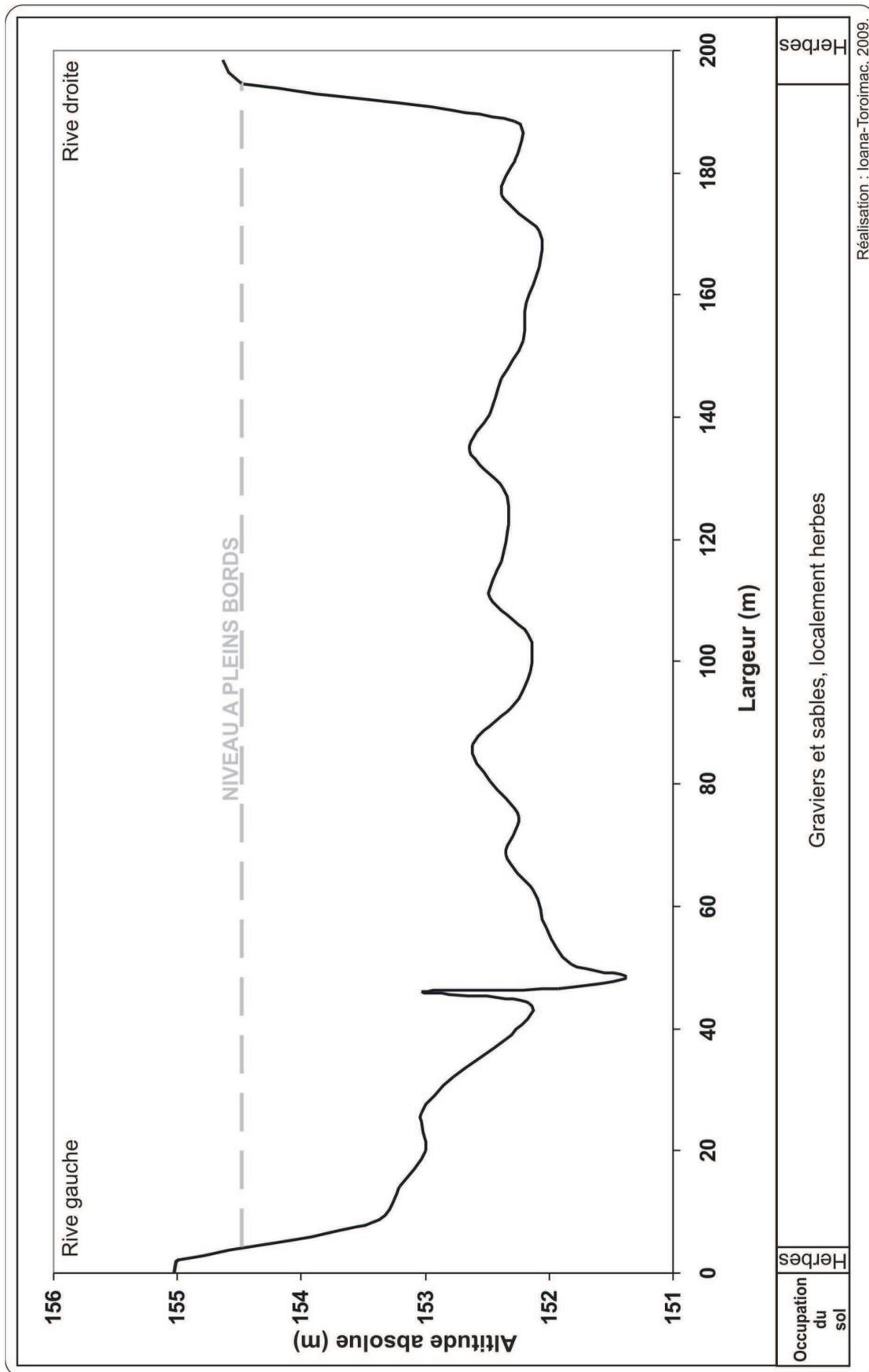
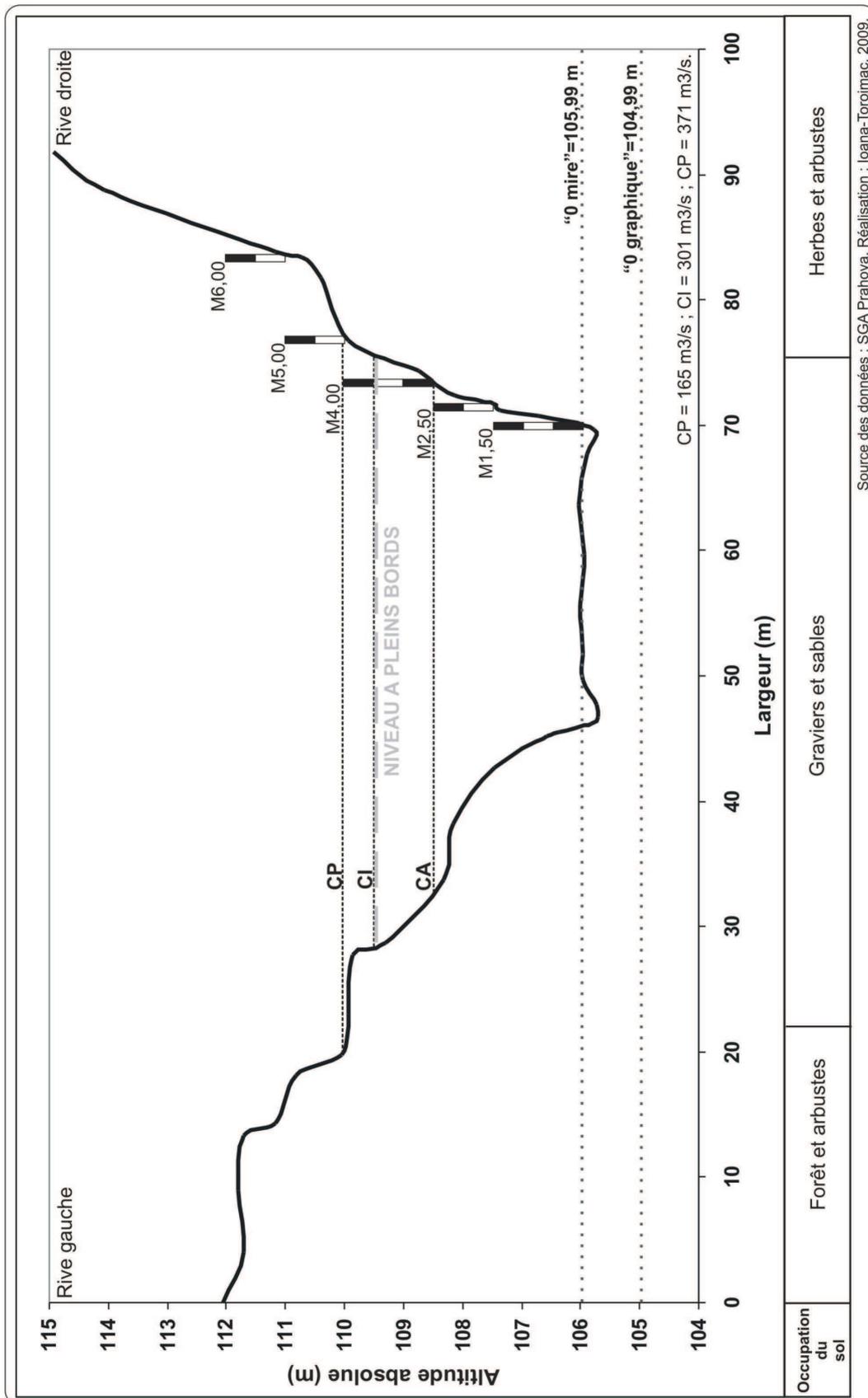
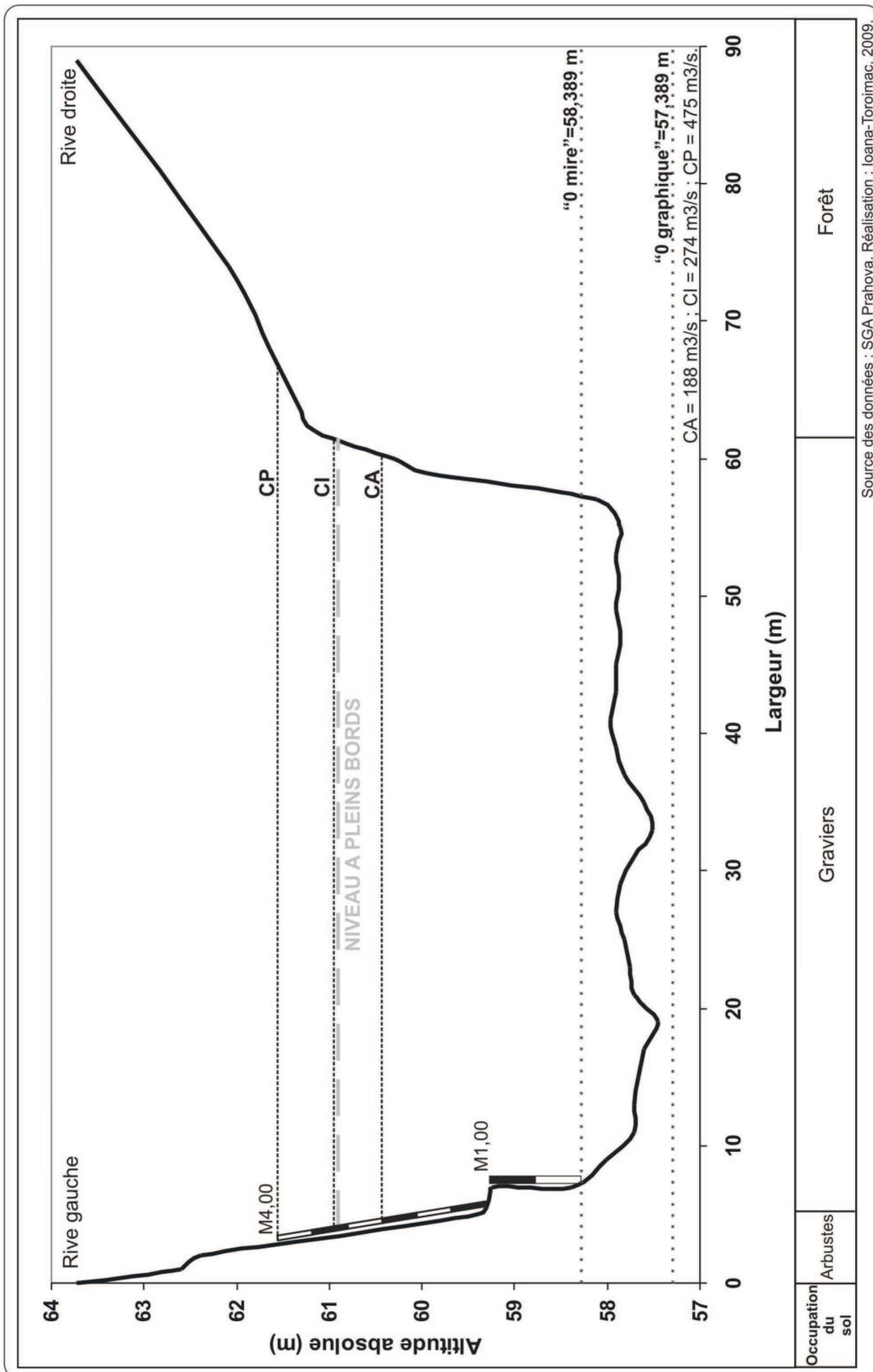


Figure 28. Profil en travers de la Prahova du 27 octobre 2007 à Stăncești et niveau et débit à pleins bords de la bande active.



Source des données : SGA Prahova. Réalisation : Ioana-Toroimac, 2009.

Figure 29. Profil travers de la Prahova du 27 février 2006 à Prahova, niveau à pleins bords et cotes de protection contre les inondations. Les valeurs indiquées sur la mire hydrographique, représentent l'altitude relative par rapport au repère de la mire (« 0 mire »).



Source des données : SGA Prahova. Réalisation : Ioana-Toroimac, 2009.

Figure 30. Profil en travers de la Prahova du 5 janvier 2006 à Adâncata, niveau à pleins bords et cotes de protection contre les inondations. Les valeurs indiquées sur la mire hydrométrique, représentent l'altitude relative par rapport au repère de la mire (« 0 mire »).

Les modèles théoriques estiment que le débit liquide des cours d'eau augmente d'amont en aval, situation valable pour les bassins versants homogènes (Petts, 1977) et elle est confirmée pour le débit module annuel de la Prahova. Mais le débit à pleins bords dépend d'une multitude de facteurs déterminant les caractéristiques morphologiques du chenal fluvial / de la bande active, raison pour laquelle ses variations sont plus compliquées.

Pour la station de Bușteni, deux niveaux à pleins bords ont été pris en compte : le niveau naturel et le niveau anthropique imposé par l'existence d'un ouvrage de génie civil de type dalles de béton qui protègent la rive droite de la Prahova contre l'inondation. Le technicien hydrologue de la station de Bușteni explique que les trois cotes CA (cote d'attention), CI (cote d'inondation), CP (cote de péril) sont établies pour les conditions naturelles du cours d'eau en aval de cet ouvrage de protection. Dans des conditions naturelles, le niveau à pleins bords de la Prahova sur ce tronçon est de 50 m<sup>3</sup>/s. Les travaux hydrauliques font que le débit à pleins bords de la Prahova soit de 175 m<sup>3</sup>/s. Par contre, cette valeur doit être prise en compte avec une certaine précaution, parce que la valeur du coefficient de rugosité (estimé dans des conditions naturelles) pourrait être modifiée les caractéristiques de l'ouvrage hydraulique (dalles de béton). En situation naturelle, la puissance fluviale spécifique est de 238 W/m<sup>2</sup>. Par contre, en situation aménagée, elle est beaucoup plus importante (767 W/m<sup>2</sup>).

A Câmpina, le débit à pleins bords est de 233 m<sup>3</sup>/s, valeur comparable avec celle d'Adâncata par exemple, bien que le débit module soit trois fois inférieur. Cela s'explique probablement par les dimensions importantes du chenal fluvial ; en effet le chenal fluvial a 50 m de largeur et environ 3,5 m de profondeur, valeurs comparables avec celles de la station d'Adâncata. A Stăncești, la Prahova a le débit à pleins bords le plus élevé (606 m<sup>3</sup>/s) des cinq études de cas prises en compte. Cela est expliqué par les dimensions importantes de la bande active de tressage. A la station de Prahova, le débit à pleins bords est de 290 m<sup>3</sup>/s. Le profil en travers indique la présence de plusieurs petites « terrasses » sur la gauche de la Prahova, par rapport auxquelles le chenal fluvial s'est incisé (cf. Figure 29). Les « terrasses » supérieures ont été colonisées par la forêt. Cette forêt confirme les changements que la Prahova a subis sur ce tronçon (rétrécissement et végétalisation de la bande active), présentés dans la deuxième partie de la thèse. A la station d'Adâncata, le débit à pleins bords est de 278 m<sup>3</sup>/s. La puissance fluviale spécifique diminue de Câmpina à Adâncata, de 251 W/m<sup>2</sup> à 23 W/m<sup>2</sup>.

Actuellement, pour les gestionnaires roumains, les inondations sont définies selon « la cote d'inondation ». Cette notion fait partie d'un ensemble de concepts qui envisage la protection contre les inondations : cote d'alerte, cote d'inondation, cote de danger. La cote d'alerte (CA)

représente la hauteur d'eau située à 0,5-1 m au-dessous de la cote d'inondation des enjeux socio-économiques, dans des conditions météorologiques favorables à la remontée des eaux. La cote d'inondation (CI) représente la hauteur d'eau au-delà de laquelle commence l'inondation du premier enjeu socio-économique. La cote de péril (CP) représente la hauteur d'eau qui exige la mise en place d'actions d'évacuation des habitants et des biens matériels, de restrictions de la circulation routière et ferroviaire et d'actions d'exploitation efficace des ouvrages hydrotechniques destinés à diminuer l'onde de crue. Ces cotes sont calculées pour chaque station hydrométrique ; puis les débits correspondants sont extraits de la courbe de tarage. Ces valeurs sont actualisées tous les ans à cause de changements survenus dans le chenal fluvial ou en relation avec les changements dans l'occupation du sol. Les figures ci-dessus montrent que le débit à pleins bords est en général comparable avec le débit correspondant à la cote d'inondation. Effectivement les trois cotes, ainsi que les profils en travers sont caractéristiques pour le début de l'année 2006.

Le débit à pleins bords et la puissance fluviale permettent d'intégrer la Prahova dans des synthèses régionales. Selon le diagramme de Leopold et Wolman (1957) qui tient compte du débit à pleins bords et de la pente du chenal fluvial (cf. Figure 31), la Prahova à Bușteni et à Câmpina a un style fluvial de transition entre rectiligne et tressé. A Stăncești, la Prahova forme des tresses. A Prahova, le chenal de la Prahova a une forme de transition entre le type rectiligne et le type à méandres. A Adâncata, la Prahova forme un chenal à méandres. Ces variations du style fluvial de la Prahova sont confirmées dans le chapitre 2.3. de la thèse. Ferguson (1981) a mis en évidence un fort contraste entre les cours d'eau de montagne et les cours d'eau de plaine ; les premiers tendent à tresser pour des valeurs de la puissance fluviale comprises entre 100 et 150  $W/s^2$ , ce qui confirme les résultats obtenus pour la Prahova. Ferguson (1987), à partir du modèle de Leopold et Wolman (1957), propose une relation entre le débit à pleins bords, la pente et la granulométrie des alluvions du lit fluvial (cf. Figure 32). Cette relation confirme que la Prahova se caractérise par une énergie et une compétence importante à Bușteni, à Câmpina et à Stăncești, où le lit fluvial est constitué essentiellement de graviers. La relation entre le débit à pleins bords, la largeur du chenal et sa pente, proposée par Brookes (1988), confirme les résultats obtenus antérieurement concernant la puissance fluviale de la rivière Prahova (cf. Figure 33). Selon le même auteur, les cours d'eau qui ont une puissance fluviale inférieure à 35  $W/s^2$  réagissent très lentement (une trentaine d'année) à la mise en place des ouvrages de protection (récalibrage, seuils de stabilisation...) ; les cours d'eau ayant une puissance fluviale supérieure à 35  $W/s^2$  réagissent plus rapidement à ce type

d'interventions anthropiques (une dizaine d'année) (Wasson *et al.*, 1998). En préfigurant les résultats de la deuxième partie de la thèse, on souligne que les cours d'eau en tresses sont donc plus sensibles aux modifications anthropiques.

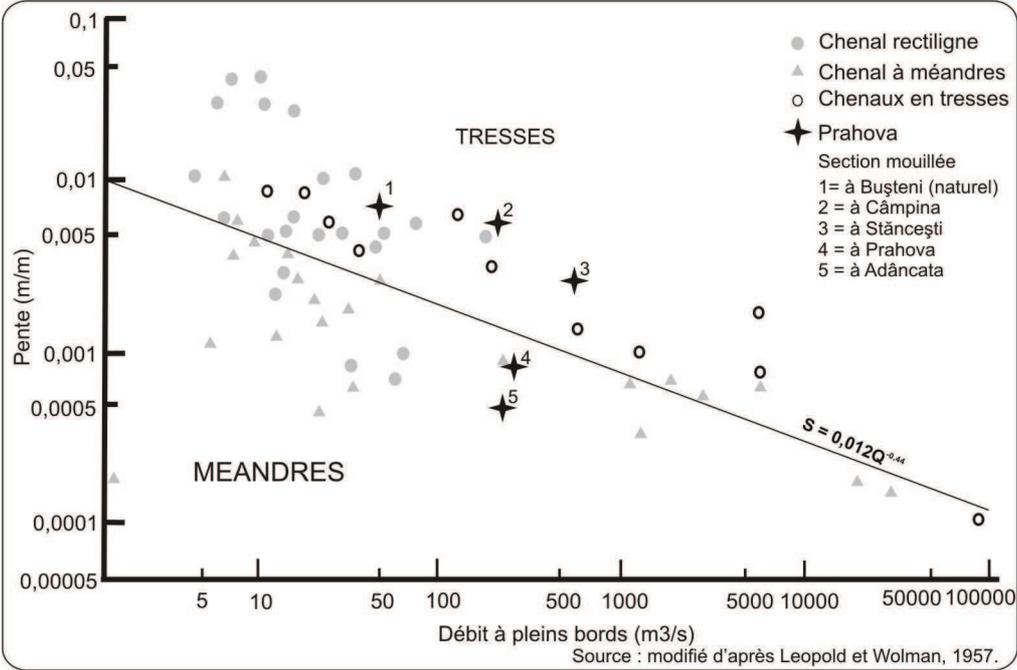


Figure 31. Relation entre le débit à pleins bords, la pente de la ligne d'eau et le style fluvial selon Leopold et Wolman (1957) et la place de la Prahova dans cette relation.

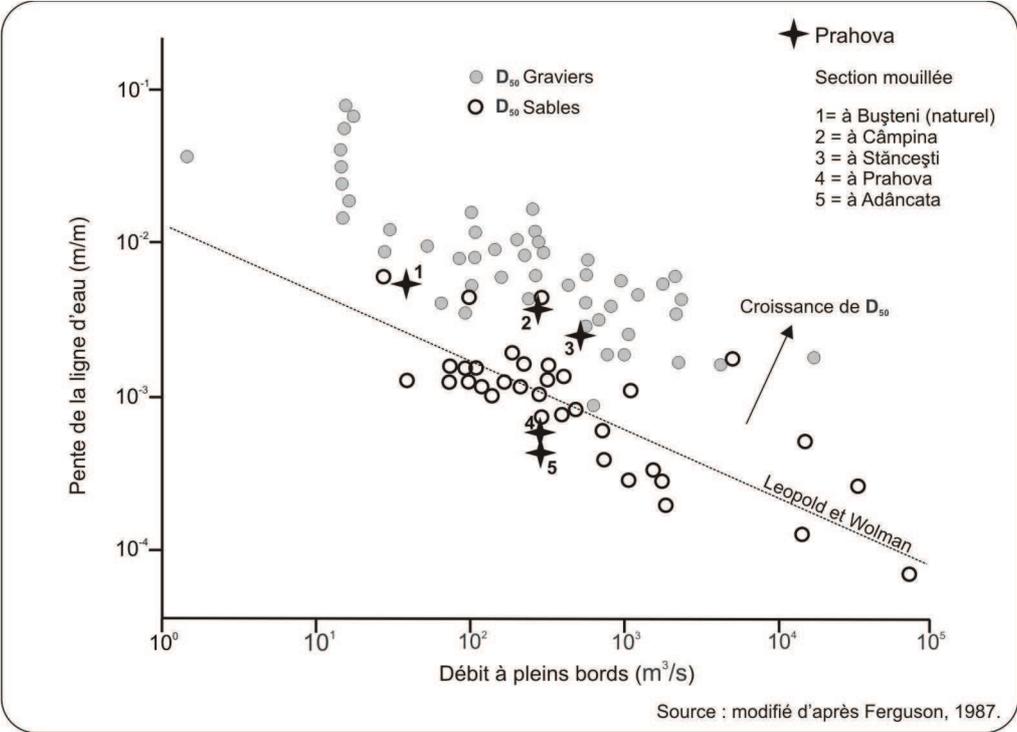
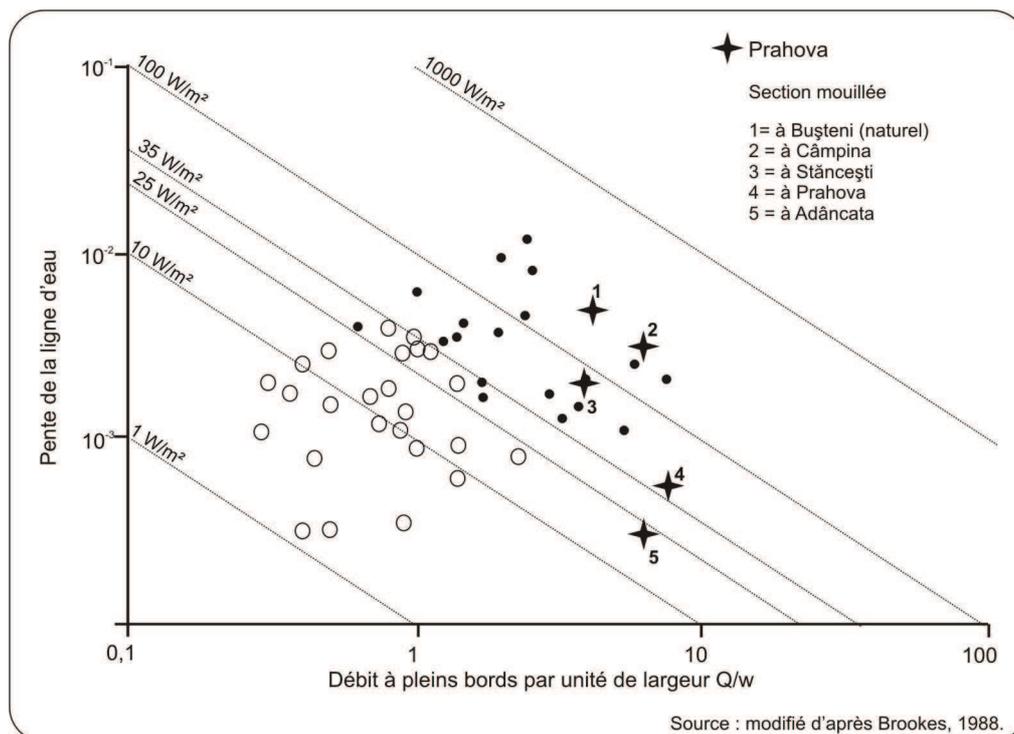


Figure 32. Relation entre le débit à pleins bords, la pente de la ligne d'eau et la granulométrie du lit fluvial selon Ferguson (1987) et la place de la Prahova dans cette relation.



**Figure 33. Relation entre le débit à pleins bords, la largeur du chenal et la pente de la ligne d'eau selon Brookes (1988) et la place de la Prahova dans cette relation.**

### 1.3.3.3. Temps de retour du débit à pleins bords

Le Tableau 10 met en évidence des débits à temps de retour caractéristiques en hydrologie, calculés d'après le modèle fréquentiel de Pearson III.

Station hydrométrique (période)	T 1,0101 ans	T 2 ans	T 5 ans	T 10 ans	T 20 ans	T 25 ans	T 50 ans	T 100 ans	T 200 ans	T 1000 ans
Prahova à Poiana Țapului (1966-1992)	34	52	90	122	156	168	203	239	275	353
Prahova à Câmpina (1962-2007)	73	110	190	258	328	353	427	502	578	743
Prahova à Prahova (1961-2007)	103	145	265	374	490	530	654	780	909	1165
Prahova à Adâncata (1961-2007)	153	215	397	565	756	822	1013	1214	1418	1893

**Tableau 10. Débits de pointe ( $m^3/s$ ) de la Prahova pour différents temps de retour (méthode utilisée : modèle fréquentiel de Pearson III). Réalisation : à partir des données de l'INHGA.**

Le temps de retour du débit à pleins bords de la Prahova extrait de la distribution de Pearson III (cf. Figure 34) a des valeurs de : 6,8 ans à la station de Câmpina, de 4,9 ans à la station de Prahova, 2,6 ans à la station d'Adâncata. En absence de la série chronologique des débits de pointe pour le profil en travers de Stăncești, on a utilisé la série de données de la station de Prahova. Ce choix se base sur le fait que les deux sections mouillées se trouvent à 8 km l'une de l'autre et que la Prahova ne reçoit aucun affluent important sur ce tronçon. Le temps de retour du débit à pleins bords de la Prahova à Stăncești est estimé à 35 ans. La même démarche méthodologique ne peut pas être appliquée pour les stations de Bușteni et de Poiana Țapului, parce que la Prahova reçoit, entre ces deux stations, des affluents carpatiques (dont le plus important est la Valea Cerbului), susceptibles de modifier son débit de pointe. Ces valeurs sont assez élevées par rapport aux valeurs proposées initialement par Leopold et Wolman (1956) de 1-2 ans et de Dury *et al.* (1963) de 1,58 ans. Cela indique que les débordements de la Prahova sont relativement peu fréquents (cf. Tableau 23). Cet aspect sera expliqué ultérieurement dans la thèse.

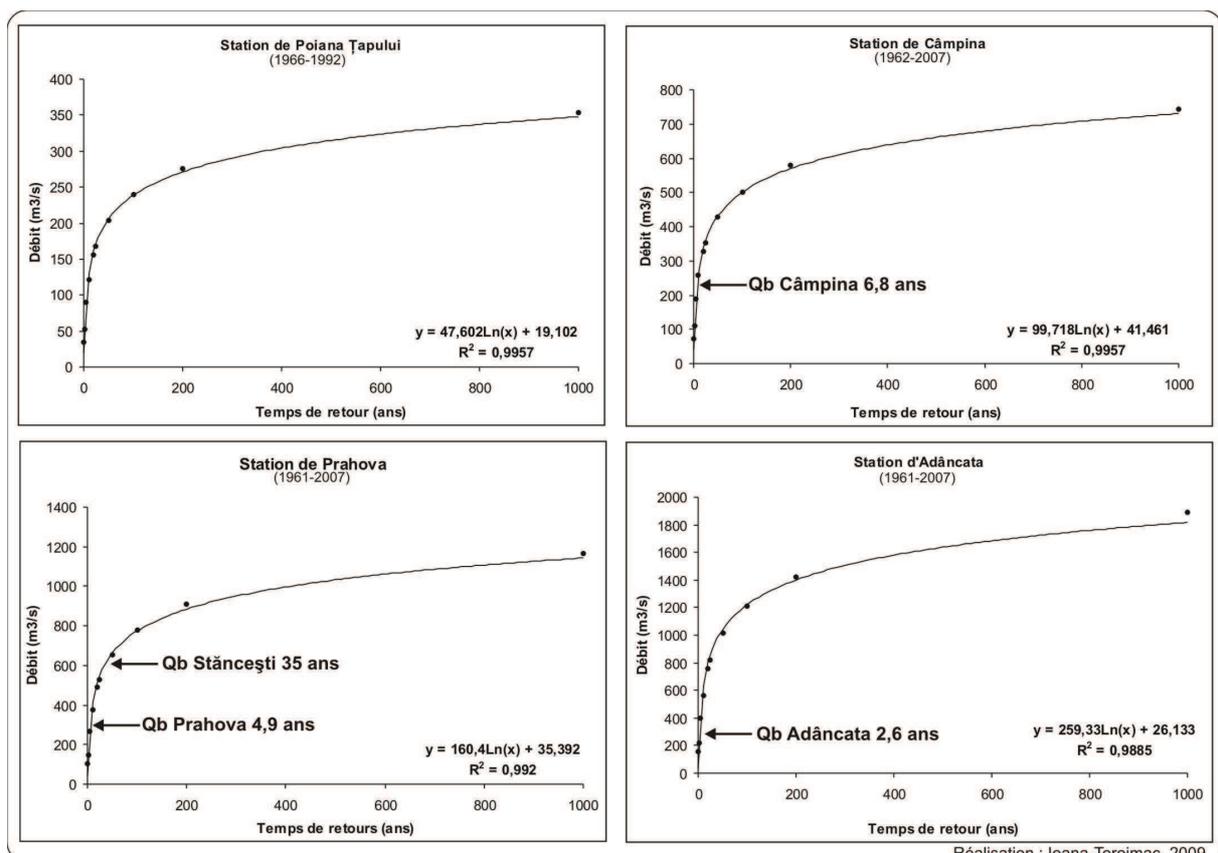


Figure 34. Régression logarithmique adaptée au modèle fréquentiel de Pearson III et estimation du temps de retour du débit à pleins bords de la Prahova. Le temps de retour du débit à pleins bords à Stăncești est approximé à partir de la série chronologique des débits de pointe de la station de Prahova.  $Q_b$  = débit à pleins bords ( $m^3/s$ ).

### 1.3.4. Conclusions

Le but de ce chapitre a été de comprendre le fonctionnement hydrogéomorphologique de la rivière Prahova. En ce sens, le débit à pleins bords et la puissance fluviale ont été calculés à partir des paramètres de la section mouillée pour cinq profils en travers du cours d'eau. Le débit à pleins bords de la Prahova est de 50 m<sup>3</sup>/s dans les Carpates (à Bușteni), de 233 m<sup>3</sup>/s dans les Subcarpates (à Câmpina), de 606 m<sup>3</sup>/s dans la Plaine de Ploiești (à Stăncești), de 290 m<sup>3</sup>/s dans la Plaine de Ploiești (à Prahova) et de 278 m<sup>3</sup>/s dans la Plaine de Gherghița (à Adâncata). Son temps de retour varie entre 2,6 ans à Adâncata et 35 ans à Stăncești, ce qui indique que les débordements de la Prahova sont relativement peu fréquents. En préfigurant les résultats de la deuxième partie de la thèse, on précise que le débit à pleins bords de la Prahova est un paramètre représentatif pour les débordements de la rivière uniquement à l'échelle du temps actuel ; cela est dû au fait que la Prahova se caractérise par des problèmes d'incision de son chenal fluvial. En conséquence il est nécessaire d'actualiser périodiquement le débit à pleins bords.

Les résultats de ce chapitre indiquent que la Prahova est une rivière énergique dans les Carpates, dans les Subcarpates et dans la Plaine de Ploiești (puissance fluviale de 100-250 W/m<sup>2</sup>). Elle perd son énergie en passant vers la Plaine de Gherghița.

En conclusion, la Prahova se caractérise par des variations de forme, de dimensions et d'énergie d'amont en aval, des Carpates à la Plaine de Gherghița, aspect qui sera développé dans la deuxième partie de la thèse. En préfigurant les résultats de la deuxième partie de la thèse, les relations entre les paramètres de la géométrie du chenal fluvial / des chenaux fluviaux, indiquent que la Prahova, en amont de la station de Prahova, est plus sensible aux modifications anthropiques par rapport au tronçon situé en aval.

## 1.4. Conclusions de la première partie

Le but de la première partie de la thèse a été de comprendre le fonctionnement de la rivière Prahova. En ce sens on a analysé le régime hydrologique de la Prahova et de ses affluents, les crues de la Prahova (paramètres et origine), le débit à pleins bords et la puissance fluviale de la Prahova.

Du point de vue hydrologique, dans les Carpates et dans les Subcarpates, le régime hydrologique de la Prahova se caractérise par des hautes eaux en mai (en relation avec la fonte des neiges) et par des basses eaux en janvier ; dans la Plaine roumaine, les basses eaux se produisent en septembre. Des crues se produisent surtout durant la saison chaude comme conséquences des précipitations abondantes. Contrairement aux Carpates et aux Subcarpates, dans la Plaine roumaine, la Prahova a enregistré sa crue centennale le 12 juillet 2005 à la station de Prahova (766 m<sup>3</sup>/s) et le 2 juillet 1975 à la station d'Adâncata (1120 m<sup>3</sup>/s) (la période de calcul des débits de pointe à différents temps de retour est 1960-2007).

Du point de vue hydrogéomorphologique, les variations de la Prahova sont considérables ; en amont de Stăncești (dans les Carpates, les Subcarpates et une partie de la Plaine de Ploiești), la Prahova est une rivière dynamique (puissance fluviale spécifique supérieure à 100 W/m<sup>2</sup>) ; en aval de Stăncești, elle est peu active (dans une partie de la Plaine de Ploiești et dans la Plaine de Gherghița). On a observé aussi que la Prahova se caractérise par de fortes variations spatiales du débit à pleins bords et de sa récurrence.

L'ensemble de ces résultats indique que, selon les particularités de son fonctionnement, la Prahova pourrait être segmentée en plusieurs secteurs qui respectent les grandes unités de relief traversées. A partir de ces conclusions, la deuxième partie de la thèse propose d'expliquer ces variations hydrogéomorphologiques spatiales de la Prahova.



**DEUXIÈME PARTIE.**

**ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA PRAHOVA SOUS  
L'INFLUENCE DES FACTEURS NATURELS ET  
ANTHROPIQUES**



## **2.1. Introduction : le contexte de l'évolution récente des rivières montagneuses européennes**

La première partie de la thèse a présenté le fonctionnement de la rivière Prahova et a donné un aperçu de ses variations hydrogéomorphologiques d'amont en aval. Cette partie de la thèse propose de développer la problématique des variations hydrogéomorphologiques spatiales du chenal fluvial de la Prahova.

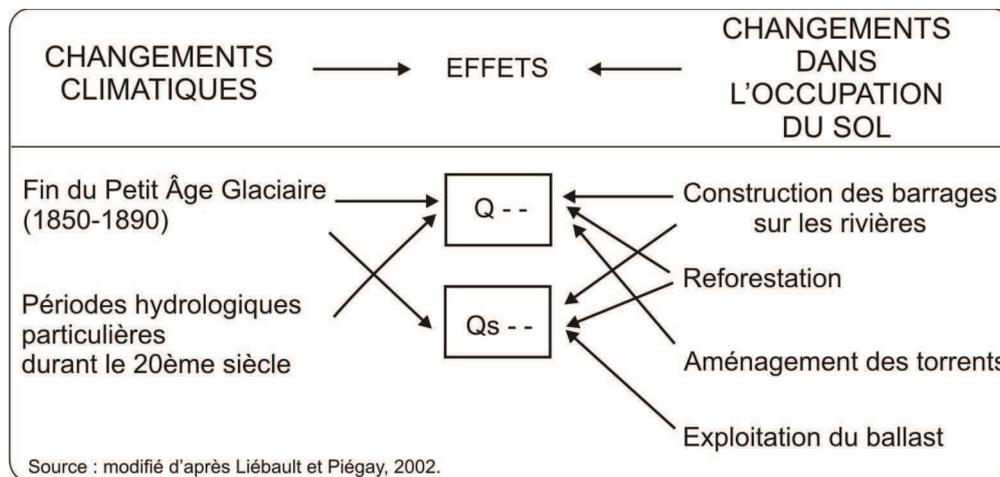
Cette partie de la thèse prend pour point de départ l'évolution des rivières montagneuses européennes. Ces exemples de rivières ont été choisis pour leurs caractéristiques communes avec la Prahova : elles prennent leurs sources dans des régions montagneuses tempérées. Cela permet également d'encadrer l'évolution de la Prahova dans le cadre général de l'évolution récente des rivières montagneuses européennes.

Un premier exemple est celui des rivières carpatiques polonaises. Prenons le cas du bassin versant de la Vistule, qui s'étend dans les Carpates, dans les Subcarpates et dans la Plaine Mazovienne et qui a une disponibilité importante de sédiments étant donné son extension dans la zone carpatique de flysch. Après le 14<sup>ème</sup> siècle, la Vistule s'est caractérisée par une activité fluviale intense, caractérisée par des processus d'aggradation et par le développement de la bande de tressage (Maruszczak, 1997) ; cette évolution a été déterminée par l'apport important de sédiments sur le fond du Petit Âge Glaciaire (PAG), effet accentué par les déforestations carpatiques et subcarpatiques (Starkel, 2005, 2005). Jusqu'au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle ou même jusqu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les affluents de la Vistule se caractérisaient par un style fluvial en tresses (Korpak, 2007) ; depuis la bande active s'est rétrécie ou même disparue. La Wisloka est un affluent de la Vistule, qui descend de Carpates ; elle a 164 km de longueur et une superficie du bassin versant de 4110 km<sup>2</sup>. Le chenal de cette rivière a enregistré une incision de 3,2-3,8 m durant le 20<sup>ème</sup> siècle, processus plus accentué après 1950 (Wyzga, 1996 ; Lach et Wyzga, 2002). Les mêmes auteurs considèrent que les causes déterminantes sont, à la fois, anthropiques et naturelles. Le bassin de la Wisloka a été confronté à un processus de dépopulation vers le milieu des années 1940, ce qui a eu pour conséquence la reforestation du bassin versant de cette rivière ; cela aurait pu diminuer la quantité d'alluvions transportées. De plus après 1965, le débit moyen annuel a enregistré une tendance croissante, résultat des quantités abondantes de précipitations tombées pendant la période 1965-1980. Étant donné la simultanéité de ces deux actions, la diminution de la charge solide et l'augmentation des débits pourraient être considérées responsables de

l'incision du chenal de la rivière Wisloka. Un autre exemple est celui des petites rivières Mszanka (19,5 km de longueur) et Porebianka (15,4 km de longueur), affluents de la Raba (affluent de la Vistule). Leurs chenaux se sont incisés de 21% (pour la Mszanka) et 14% (pour la Porebianka) durant les 30 dernières années. En même temps la bande de tressage s'est rétrécie de 70% (Korpak, 2007). Le même auteur considère que les activités anthropiques sont responsables de cette évolution. L'exploitation intense des granulats dans les années 1950-1970 et la régularisation des rivières, qui ont déterminé la diminution de la charge solide, pourraient être responsables de cette évolution. Mais la chute du communisme en 1989 a entraîné d'autres changements dans le paysage polonais : l'agriculture de subsistance est devenue peu profitable, raison pour laquelle certains terrains ont été abandonnés ; ils sont actuellement occupés par des prairies ou par des forêts (Balon *et al.*, 2001 cités par Koplack, 2007). Il reste à voir quels changements vont entraîner ces modifications !

Un autre exemple est celui des rivières françaises, descendantes de Alpes et du Massif central français. Des tronçons des rivières Doubs, Ain, Arve, Isère, Drôme, Roubion, Eygues, Ouvèze, Durance, tributaires au Rhône et de leurs affluents (Giffre - affluent de l'Ain ; Drac - affluent de l'Isère ; Buëch, Ubaye et Bleone - affluents de la Durance), ainsi que des tronçons de la Loire et de son affluent Allier se caractérisent par l'incision et le rétrécissement de leurs chenaux depuis la fin du PAG et surtout depuis 1950. Entre 1850 et 1950, le rétrécissement de la bande active de tressage est interprété comme la stabilisation des hydrosystèmes après les fortes crues qui les avaient affectés dans la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle ; ce processus a été intensifié par les activités de reforestations des bassins torrentiels de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle ; cela a déterminé la diminution de la charge sédimentaire. Entre 1950 et 1970, le rétrécissement des bandes actives s'est intensifié sous l'influence des activités humaines (exemples : reforestation des rives des cours d'eau et l'abandon des lits d'inondation qui étaient utilisés intensément en agriculture, la construction des barrages-réservoirs, l'exploitation des granulats) (cf. Figure 35). Par exemple la bande active de la Drôme s'est rétrécie de 25% entre 1946 et 1970 et de 24% entre 1970 et 1991. La bande active de l'Ouvèze s'est rétrécie de 31% entre 1947 et 1973 et de 16% entre 1973 et 1991. La Loire a rétréci sa bande active de 24% entre 1957 et 1993 et l'Allier de 21% durant la même période. La Durance se caractérise elle aussi par le rétrécissement de sa bande active ; par exemple la bande active de la Durance moyenne s'est rétrécie de 1200 m à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et à moins de 400 m en 1980-1986. Les mêmes causes ont déterminé l'incision des chenaux fluviaux : la Drôme s'est incisé de 4-5 m au 20<sup>ème</sup> siècle, l'Arve de 10 m, l'Isère moyenne et

le Drac inférieur de 3-4 m depuis l'année 1950. Ces résultats reposent sur les travaux de Peiry, 1988 ; Bravard *et al.*, 1997, 1999 ; Landon et Piégay, 1994, 1999 ; Landon *et al.*, 1998 ; Miramont *et al.*, 1998 ; Kondolf *et al.*, 2002, Liébault et Piégay, 2002 ; Taillefumier et Piégay, 2002.



**Figure 35. Causes principales du rétrécissement des chenaux fluviaux.**

Un autre exemple est celui des rivières italiennes. La rivière Piave se trouve dans le nord-est de l'Italie. Elle prend ses sources dans les Alpes Orientales, traverse la plaine de Vénète et se jette dans la mer Adriatique après 220 km de longueur. Son bassin versant a une superficie de 4100 km<sup>2</sup> et son débit module avant l'embouchure est de 135 m<sup>3</sup>/s. La rivière Piave est caractérisée par un rétrécissement de sa bande active et même par la disparition des tresses au 20<sup>ème</sup> siècle. Par exemple, dans le tronçon aval de cette rivière, en 1991 le chenal d'écoulement mesurait 35% de la largeur du chenal alluvial en 1894 ; l'indice de tressage a diminué, en moyenne, de 3,0 à 1,5 ; la dégradation du chenal a été dix fois plus accentuée que celle estimée pour l'Holocène (Surian, 1999). L'auteur explique que les facteurs anthropiques sont les principaux responsables de cette évolution : les barrages et les dérivations d'eau, l'exploitation des sédiments, la protection contre l'érosion. De plus les débits liquides moyens et d'étiage annuels ont diminué après 1928, année du début des séries hydrologiques chronologiques, suite à la régularisation de la rivière. Le même type d'évolution a été enregistré par la rivière Brenta ; cette rivière prend ses sources dans les Alpes, puis traverse la plaine de Vénète et se jette dans la mer Adriatique après environ 160 km de longueur. L'évolution hydrogéomorphologique de cette rivière a été très dynamique ces 30 dernières années : son chenal s'est incisé de 8-9 m et sa bande active s'est rétrécie de jusqu'au 60%, en perdant ses tresses (Surian et Cisotto, 2007). Surian et Rinaldi (2003) estime que cette rivière occupe la première place parmi les rivières italiennes pour l'intensité élevée de son incision.

Cette incision est due aux aménagements hydrauliques du bassin versant (barrages, aménagement des torrents) et à l'extraction des granulats. Le débit liquide n'a pas enregistré une évolution significative, donc il n'est pas considéré comme responsable de l'incision et du rétrécissement de cette rivière. Dans ce contexte, Surian et Cisotto (2007) proposent d'entretenir l'érosion des bancs alluviaux pour assurer une valeur élevée du débit solide de la rivière et donc diminuer la vitesse d'incision et de rétrécissement. Rinaldi (2003) estime que les rivières de la région de Toscane, qui descendent du versant occidental des montagnes Apennins se caractérisent par l'incision du chenal d'écoulement et par le rétrécissement de la bande de tressage après la Deuxième guerre mondiale. De plus le rétrécissement est corrélé à une diminution de la superficie des bancs alluviaux (Zanoni *et al.*, 2008). Rinaldi (2003) explique que les causes de ce processus sont : la réduction de la charge sédimentaire due à la construction des barrages sur la rivière même ou sur les rivières tributaires, et la reforestation.

Dans le contexte de l'évolution des rivières montagneuses européennes, **le but de cette partie de la thèse est de comprendre la dynamique de la rivière Prahova en analysant l'évolution récente de son style fluvial.** Cette partie est structurée en trois chapitres : 1) la présentation de la démarche méthodologique choisie, qui repose essentiellement sur une étude cartographique diachronique ; 2) la présentation des résultats de cette étude ; 3) des discussions concernant les facteurs responsables de cette évolution.

## 2.2. Démarche méthodologique : analyse réalisée à partir d'une étude cartographique diachronique

### 2.2.1. Documents utilisés

Ce chapitre repose essentiellement sur des documents cartographiques. Ces documents sont de plusieurs types : plan militaires, cartes topographiques, photos aériennes (cf. Tableau 11). Un autre type de documents complète l'analyse effectuée dans ce chapitre : les lithographies.

Caractéristiques	Carte de la Roumanie Méridionale (lithographie)	Plans Militaires	Cartes topographiques	Cartes topographiques	Photos aériennes
<b>Date</b>	Première édition 1855	Levés de terrain 1895-1902	Levés de terrain 1953-1957	Levés de terrain 1977, 1980	2003, 2004, 2005
<b>Couleur</b>	Couleurs	Noir et blanc et Sépia	4 couleurs (sépia, bleu, vert, noir)	4 couleurs (sépia, bleu, vert, noir)	Couleurs
<b>Echelle</b>	1 / 57 600	1 / 20 000	1/25 000	1 / 25 000	1 / 5 000
<b>Système de projection initiale</b>	-	Lambert	Gauss-Krüger	Gauss-Krüger	Stéréo 70
<b>Origine</b>	Réalisée par Carol Popp de Szathmary sur l'ordre du souverain Alexandru Ioan Cuza, d'après la carte de 1854 du général autrichien Flighely	Service Militaire de l'Armée	Direction Topographique Militaire	Direction Topographique Militaire	Commandé de l'ANCPI
<b>Source des données</b>	Bibliothèque de l'Académie Roumaine	Direction Topographique Militaire	Direction Topographique Militaire	Bureau de Documents de la Faculté de Géographie (Université de Bucarest) ; Direction Topographique Militaire	Fond National de Géodésie

Tableau 11. Caractéristiques principales des documents utilisés.

La Carte de la Roumanie Méridionale (Charta României Meridionale) représente une série de cartes en couleurs à une échelle de 1/57600. Ces documents se basent sur des levés de terrain réalisés par le Service Topographique Militaire lors du début de la Guerre de la Crimée (1853-1856). Ces levées de terrain débutent en 1855 (échelle initiale 1/28800) et les cartes (des provinces Valachie et Dobroudja) sont réalisées sous la direction du maréchal général autrichien Flighely en 1857 (Rus, 2008). Après l'union des Principautés Unies de la Moldavie et de la Valachie (1856), le souverain Alexandru Ioan Cuza demande au graphiste Carol Popp de Szathmary de refaire ces cartes afin de mieux connaître le territoire de son pays. C'est pour cette raison qu'elles se retrouvent parfois dans la littérature avec le nom de cartes Szathmary. Elles sont utilisées dans la thèse en tant que lithographies étant donné l'impossibilité de les géoréférencer à cause de leurs erreurs par rapport aux rigueurs actuelles. Elles apportent des informations concernant l'état de l'hydrosystème Prahova au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle. Ces lithographies ont été utilisées dans des études cartographiques antérieures (Radu, 2008), raison pour laquelle, nous les considérons qualitativement fiables.

Les plans militaires (Planuri Directoare de Tragere) représentent les premiers documents topographiques de précision, réalisées à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle à partir de levés de terrain (Osaci-Costanche, 2000). Les Plans militaires utilisent les levés de terrain des années 1895-1902 (cf. Tableau 12). Les levés de terrain ont été réalisés en respectant le système de projection pseudoconique équivalente de Bonne ; le point central est situé au carrefour de la parallèle de 50<sup>g</sup> (45°) avec le méridien de l'Observatoire Astronomique Militaire de Bucarest. Ce type de projection ne déforme pas la superficie, donc elle était utile pour la réalisation des plans cadastraux. Les instruments utilisés pour les mesures des bases géodésiques ont été la règle bimétallique et le fil d'invar. Selon les besoins de l'Armée, le système de projection cartographique a été changé afin qu'il ne déforme pas les angles. Ainsi le système de projection Lambert a été adopté ; l'origine de ce système de référence se trouve au carrefour du méridien de 2<sup>g</sup> ouest par rapport à l'Observatoire Astronomique Militaire de Bucarest (27<sup>g</sup>01<sup>c</sup>38<sup>cc</sup>, 843 E Greenwich) avec le parallèle de 50<sup>g</sup>. Le passage d'un système de projection cartographique à l'autre s'est fait par moyen graphique en utilisant le réseau kilométrique sans réaliser de nouveaux levés de terrain. Par contre les Plans Militaires ont été complétés avec des déterminations géodésiques des coordonnées de certains enjeux militaires et actualisés en ce qui concerne les détails planimétriques au moyen des observations de terrain et des photos aériennes (Osaci-Costache, 2000 ; Iftimoaie, 2004). Les Plans militaires ont été édités au début de la Première guerre mondiale (Osaci-Costache, 2000). Ces

documents sont les premières cartes qui utilisent la même projection et qui couvrent entièrement le territoire de la Roumanie en utilisant la même projection (Rus *et al.*, 2009). Ces plans ont été réédités au début de la Deuxième guerre mondiale et puis entre 1954-1959 ; les plans réédités respectent les levés de terrain initiales ; seulement les noms des localités ont été actualisées et certains signes conventionnels. En effet certains éléments représentés sur la première édition ont été omis sur les autres éditions. Les dimensions des plans militaires sont 75 cm X 50 cm (Osaci-Costache, 2000).

Feuille de carte	Levés de terrain	Edition	Rééditée
Predeal – 3955	?	1927	1941
Bușteni – 3954	1896-1897	1931	1940
Sinaia – 3953	1897-1902	1931	1940
Teșila	1897-1902	1943	-
Comarnic – 4052	1987-1902	1931	1940
Câmpina – 4051	1897-1900	1931	1940
Băicoi	1897-1898	-	1957
Filipeștii de Pădure	?	1928	?
Mănești – 4148	1897-1899	1930	-
Brazi – 4248	1897-1899	1930	1943
Țigănești – 4247	1895-1897	1941	-
Drăgănești – 4348	1896-1897	1930	1943
Turbați – 4347	1896-1899	1930	-
Maia – 4447	1896-1898	-	1957

**Tableau 12. Plans militaires - feuilles utilisées.**

Deux séries de **cartes topographiques** 1/25000 ont été réalisées en Roumanie : la première série date des années 1950 et la deuxième des années 1977-1980. Elles sont réalisées en système de projection Gauss-Krüger (cylindrique transversale, système de coordonnées 1942).

Les cartes topographiques des années 1950 ont deux origines possibles (cf. Tableau 13) : 1) certaines feuilles de cartes ont été réalisées à partir des levés topographiques de terrain de la période 1896-1902, actualisées à partir des photos aériennes ou 2) certaines feuilles de cartes ont été réalisées à partir des levés topographiques de terrain (et des photos aériennes) de la période 1953-1957. Dans notre travail, nous prenons en compte les deux types de cartes, sauf que nous ne faisons pas des comparaisons altimétriques sur les cartes qui sont actualisées d'après des photos aériennes.

Feuille de carte	Levés de terrain	Actualisation d'après des photos aériennes	Edition
L-35-88-C-a, c	1957	-	1959
L-35-100-A-a	1899	1955	1956
L-35-100-A-d	1900	1955	1956
L-35-100-C-b	1899	1955	1956
L-35-100-D-a, c	1899	1955	1956
L-35-112-B-a	1954	-	1955
L-35-112-B-c	1897	1954	1955
L-35-112-B-d	1897	1954	1955
L-35-113-C-a, b	1953	-	1954
L-35-113-D-a, b, d	1954	-	1955

**Tableau 13. Cartes topographiques des années 1950 – feuilles utilisées.**

Les cartes topographiques de la deuxième série sont faites essentiellement à partir de levés de terrain des années 1977-1980 (cf. Tableau 14). Elles sont les documents topographiques de ce type les plus récents pour le territoire de la Roumanie.

Feuille de carte	Levés de terrain	Edition
L-35-88-C-a, c	1980	1980
L-35-100-A-a, d	1980	1980
L-35-100-C-b	1980	1980
L-35-100-D-a, c	1980	1980
L-35-112-B-a, c, d	1980	1980
L-35-113-C-a, b	1980	1980
L-35-113-D-a, b, d	1977	1978

**Tableau 14. Cartes topographiques des années 1970/1980 – feuilles utilisées.**

Nous précisons également que l'emplacement et les dimensions (50 cm X 50 cm) des feuilles des deux séries de cartes topographiques sont identiques.

Les **photos aériennes** utilisées dans la thèse ont été commandés par l'Agence Nationale pour Cadastre et Publicité Immobilière (ANCPI) dans le cadre d'un programme financé à 50% par l'Union Européenne et à 50% par l'État roumain. Le but principal de leur réalisation a été l'analyse de l'occupation du sol. C'est pour cela que les vols ont été effectués pendant la saison végétale, ce qui rend difficile l'analyse de certains éléments. Par exemple parfois il est difficile de déterminer correctement les berges du cours d'eau étant donné le fait que leurs bords sont occupés par des arbres. De plus les vols ont été faits par plusieurs compagnies, entre avril 2003 et septembre 2005 (cf. Tableau 15), d'où la qualité différente des images,

surtout en tant que couleurs. Les photos aériennes sont réalisées en système de projection cartographique Stéréo 70, à l'échelle de 1/5000. Ces photos aériennes représentent les plus récents documents de ce type couvrant le territoire de la Roumanie.

Ces photos aériennes sont de type orthophotoplan ; elles ont été traitées pour éliminer des déformations dues au relief et à la perspective ; elles sont superposables aux cartes.

<b>Photos aériennes</b>	<b>Date de la prise de vue</b>
Photos aériennes des Carpates	Avril-juin 2004
Photos aériennes des Subcarpates	Avril-juin 2004
Photos aériennes de la Plaine de Ploiești	Avril 2003, Avril-mai 2004, Septembre 2005
Photos aériennes de la Plaine de Gherghița	Avril-mai 2004, mai-septembre 2005

**Tableau 15. Date de la prise de vue des photos aériennes.**

### **2.2.2. Mise en place de l'étude diachronique**

L'étude diachronique se base sur l'analyse des documents cartographiques présentés ci-dessus. Toutefois, cette démarche exige un certain nombre de précautions. En premier lieu, les documents doivent être superposés pour pouvoir être comparés ; donc ces documents doivent être au préalable calibrés, géoréférencés et corrigés afin d'avoir le même référentiel géographique et d'éliminer, dans la mesure possible, les distorsions géométriques. En second lieu, il est important d'estimer les risques d'imprécision. Pour arriver à une interprétation rigoureuse des résultats, la détermination d'une marche d'erreur est donc indispensable. Cela permet d'éviter les conclusions trop hâtives.

Les **photos aériennes** sont en préalable géoréférencées et corrigées par l'organisme qui les met à la disposition du public, donc par l'ANCPI. Par contre elles ne sont pas utilisées en tant que documents repères pour les autres documents à géoréférencer, parce qu'elles ne couvrent pas entièrement la superficie prise en compte dans la thèse.

Les **cartes topographiques** (années 1950 et années 1977-1980) sont géoréférencées à partir de coordonnées cartographiques notées sur les feuilles de cartes. En ce sens les points extrêmes des cartes ont été utilisés en tant qu'amers (12 points au total pour chaque feuille de carte). Nous avons fait ce choix afin de diminuer les distorsions ; il est estimé que la zone située en dehors des points d'amer présente une erreur plus importante (Durand, 2000). Nous précisons que chaque feuille de carte a été géoréférencée, puis, pour vérification, un

assemblage des feuilles de cartes a été réalisé. Suite à ce choix nous pouvons travailler sur des fichiers moins lourds, donc il facilite l'analyse.

La difficulté consiste dans le géoréférencement des **plans militaires**. En ce sens, nous avons cherché des points d'amers sur ces plans et sur la deuxième série de cartes topographiques (années 1977-1980). Des points communs ont été trouvés avec difficulté, étant donné les nombreux changements auxquels la région a été soumise. Finalement, en s'adaptant à la réalité du terrain, les points communs choisis sont des églises, des coins de rues et/ou des sommets pour la région de montagne. Ces points se trouvent dans le voisinage de la rivière, d'où résulte qu'il est fort possible que la zone extérieure puisse avoir des distorsions importantes. Cette fois aussi, chaque feuille de carte est traitée séparément, puis elles sont assemblées.

Après avoir fait ce travail, nous digitalisons de façon manuelle certains éléments représentés. La digitalisation se fait séparément pour l'ensemble des photos aériennes, pour chaque série de cartes topographiques et finalement pour l'ensemble des plans militaires.

Mais toute cette démarche peut générer des erreurs (cf. Tableau 16).

1) Un premier type d'erreur dérive de la prise de vue de la photo aérienne (distorsions des objectifs et balancement de l'appareil au moment de réalisation du cliché, papier photogrammétrique et même le relief du terrain photographié, qui, à lui seul, peut induire un déplacement des objets sur les clichés de plusieurs dizaines de mètres par rapport à leur position réelle) et de l'imprécision planimétrique pour une carte (Durand, 2000). Alexei (2005) estime que l'erreur des cartes topographiques 1/25000 provenant de la Direction Topographique Militaire (DTM) est de 10 m sur le terrain. A cela il faut rajouter l'erreur liée au repérage des amers. La résolution et le zoom de ces documents peuvent déterminer des erreurs d'identification correcte des points d'amers. Pour les cartes topographiques et pour les plans militaires, le zoom est de 7 fois par rapport à la taille de l'écran afin de pouvoir travailler à l'échelle du pixel. Donc nous estimons que la résolution de ces images est bonne et que l'erreur est de maximum 1 pixel ; cela est équivalent à  $\pm 3$  m pour les cartes topographiques et à  $\pm 2,5$  m pour les plans militaires. Ce type d'erreur ne concerne pas les photos aériennes qui sont déjà calibrées, géoréférencées et corrigées ; nous mentionnons quand même que le zoom des photos aériennes est 24 fois afin de travailler à l'échelle du pixel ; et le pixel a une valeur de  $\pm 0,5$  m sur le terrain.

2) Un deuxième type d'erreur est lié à l'erreur résiduelle qui subsiste après le calcul des modèles polynomiaux. Cette erreur est évaluée par le logiciel au niveau de chaque amer : elle correspond à la différence en pixels entre les coordonnées d'un amer déterminé sur le document servant de référence à la correction et les coordonnées de ce même amer sur l'autre document une fois qu'il a été géoréférencé. Il est admis qu'un modèle polynomial est de qualité à partir du moment où l'erreur est inférieure à 0,5 pixels pour tous les amers (Durand, 2000). L'ANCPI apprécie qu'après les avoir calées, géoréférencées et corrigées, l'erreur des photos aériennes reste d'environ 3 m. Ce type d'erreur est calculée, dans notre cas, pour les Cartes topographiques et pour les Plans Militaires. Dans le cas des Cartes topographiques, nous avons réussi à abaisser l'erreur au-dessous de ce seuil. Mais comme le pixel est la plus petite parcelle visible à l'écran, il convient de la porter à 1 pixel au niveau de chaque amer, soit  $\pm 3$  m. Dans le cas des Plans Militaires, malgré nos efforts, l'erreur arrive jusqu'à 5 pixels, selon la feuille de la carte, soit  $\pm 12,5$  m sur le terrain.

Le type de projection peut contribuer à ce type d'erreur. Nous avons choisi un type commun de projection pour tous les documents analysés, bien que ce type de projection ne soient pas celui d'origine. La projection commune choisie est la projection Stéréographique 1970 ou Stéréo 70. C'est la projection officielle de la Roumanie depuis 1971 ; elle a remplacé la projection Gauss-Krüger. Cette projection est conforme ; elle ne déforme pas les angles, mais elle déforme les superficies, en fonction de leur distance par rapport au pôle de la projection. Le bassin de la Prahova se trouve à l'intérieur du cercle de la déformation nulle, donc il se caractérise par une déformation linéaire négative de  $-0,25$  cm/km. Ainsi la déformation linéaire de la projection Stéréo70 est de 2,5 fois plus réduite que celle de la projection de Gauss (Moroşanu, 2008). Cette projection utilise l'ellipsoïde Krasovski 1940 orienté vers Pulkovo, en reprenant ainsi les caractéristiques de la projection de Gauss-Krüger.

Le géoréférencement et le calage des cartes topographiques et des plans militaires se fait au moyen du logiciel ERDAS.

3) Un troisième type d'erreur dérive du fait que les traits digitalisés ne sont pas toujours parfaitement discernables. Lorsque les photos aériennes ne sont pas toujours de très bonne qualité, il peut y avoir un léger flou au niveau de la limite plan d'eau – berge par exemple, d'où une hésitation pour repérer précisément la ligne de rivage. Cela s'avère en particulier vrai pour les photos aériennes, à cause du fait que l'eau est turbide ou à cause du fait que des arbres bordent le cours d'eau. Nous estimons que cette erreur est de 2 pixels pour les photos aériennes (soit  $\pm 1$  m). Cette erreur peut être calculée pour les autres documents aussi ; elle est

estimée à 1 pixel pour les cartes topographiques (soit  $\pm 3$  m) et à 1 pixel pour le plan militaires (soit  $\pm 2,5$  m).

La digitalisation des documents cartographiques se fait au moyen du logiciel Arcview 3.2a.

4) Un quatrième type d'erreur est lié aux variations du niveau de l'eau. Cette erreur concerne les photos aériennes, qui, effectivement, montrent la situation au moment de la prise de vue. Nous ne disposons pas de la date exacte des photos aériennes, mais, pour certaines d'entre elles, il est possible d'estimer le régime hydrologique. Par exemple les photos aériennes d'avril-juin ont été prises en phase de hautes eaux. En tenant compte des dimensions du cours d'eau, nous estimons que cette erreur est inférieure à 1 pixel (soit  $\pm 0,5$  m).

Type d'erreur / Type de document	Photo aérienne (2003-2005)	Carte topographique - deuxième série – (1977-1980)	Carte topographique - première série – (1950)	Plans Militaires (1895-1902)
Erreur dans le repérage des amers (m)	-	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 2,5$
Erreur résiduelle de calcul (m)	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 12,5$
Erreur de digitalisation (m)	$\pm 1$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 2,5$
Erreur liée au niveau de l'eau (m)	$\pm 0,5$	-	-	-
Total (m)	$\pm 4,5$	$\pm 9$	$\pm 9$	$\pm 17,5$

**Tableau 16. Récapitulatif des erreurs inhérentes à la méthode.**

D'autres auteurs ont déjà mise en place des études diachroniques à partir des mêmes types de données cartographiques afin d'analyser l'évolution des cours d'eau. Dobre (2007), Grecu *et al.* (2008) analysent l'évolution du chenal de la Prahova subcarpatique. Grecu *et al.* (2009) mettent en évidence l'évolution de la confluence Ialomița-Prahova. Des thèses en cours à l'Université de Bucarest se basent sur les mêmes données, la même méthodologie, la même région d'étude – la vallée subcarpatique de la Prahova.

### 2.2.3. Interprétation des résultats

#### 2.2.3.1. Détermination du style fluvial

La détermination du style fluvial repose essentiellement sur l'estimation de la sinuosité et de la multiplicité des chenaux fluviaux.

Ce paragraphe présente les méthodes proposées pour le calcul du taux de sinuosité et du taux de multiplicité et justifie les choix faits dans la thèse.

### **1) Taux de sinuosité**

Selon Leopold et Wolman (1957), le taux de sinuosité est défini comme le ratio de la longueur du talweg sur la longueur de la vallée.

Brice (1964) définit un indice de sinuosité qui est le ratio de la longueur du chenal sur la longueur de l'axe de la bande de méandrage.

Brice (1984) et Schumm (1985) calculent l'indice de sinuosité en tant que rapport entre la longueur du chenal et la longueur de la vallée. Ces trois indices sont valables dans le cas d'un chenal unique.

Dans le cas d'un chenal sinueux, Maizels (1979) cité par Peiry (1988) estime plus précis de calculer la sinuosité moyenne en tant que rapport entre la longueur de tous les chenaux divisée par le nombre de bras.

En préfigurant les résultats de la thèse, l'indice de sinuosité sera estimé pour des tronçons peu longs ; c'est pour cette raison que la sinuosité est définie par rapport à une ligne droite, donc **l'indice de sinuosité sera calculé dans la thèse en tant que rapport entre la longueur du chenal et la distance à vol d'oiseau entre deux points considérés** (cf. Figure 36). Leopold et Wolman (1957) considèrent que les chenaux à méandres ont un indice de sinuosité supérieur à 1,5. Quelques années plus tard, Brice (1964) séparent les chenaux rectilignes, de chenaux sinueux et de chenaux à méandres par le taux de sinuosité : les chenaux rectilignes ont un indice de sinuosité inférieur à 1,02 ; les chenaux sinueux ont un indice de sinuosité entre 1,02 et 1,4 ; les chenaux de à méandres ont un indice de sinuosité supérieur à 1,4. **Cette classification de Brice (1964) qui classe les chenaux fluviaux selon le taux de sinuosité est adoptée dans la thèse**

### **2) Taux de multiplicité**

Leopold et Wolman (1957) calcule « la longueur développée de chenaux ou bras en eaux courante » par kilomètre de vallée ; c'est un indice de développement des chenaux tressage (Peiry, 1988) qui tient compte de la sinuosité. Dans ce cas le degré de multiplicité n'est pas démonstratif : la multiplicité des chenaux d'un cours d'eau très sinueux est comparable à la multiplicité d'un cours d'eau formé par un grand nombre de chenaux.

Brice (1964) définit un indice de tressage à partir d'une série d'observations : 1) les îles végétalisées sont ordinairement les seules formes émergées durant la période limite avant débordement. Le tressage paraît à peu près constant dans sa forme ; il est caractérisé par un indice de tressage « stabilisé », ration du périmètre des îles sur la longueur de l'axe de la bande active ; 2) les bancs sans couverture végétale sont immergés pour des débits voisins au débordement. Le tressage change de style avec le niveau de la rivière ; pour chacun d'entre eux, on peut calculer un indice « éphémère », ration du périmètre des bancs sur la longueur de l'axe de la bande active ; 3) l'indice total prend en compte le périmètre des îles et des bancs. Seul l'indice « stabilisé » est utilisable lors d'une comparaison entre différents cours d'eau. La prise en compte du niveau de l'eau rend relativement difficile le calcul de cet indice.

Rust (1978) définit le périmètre « d'une tresse » comme la ligne médiane de chenaux entourant chaque banc ou île, qu'ils soient en eau ou pas ; la longueur de la tresse est la distance rectiligne entre ses deux extrémités. En conséquence, l'intensité du tressage est mise en évidence au moyen d'un indice calculé comme le nombre de bras par longueur d'onde moyenne d'un méandre. Le désavantage de cet indice réside dans le fait qu'il n'est pas possible d'estimer la longueur d'onde d'un méandre dans le cas de chenaux rectilignes. Pourtant l'avantage de cet indice est qu'il prend en compte également les chenaux qui ne sont pas en eau, ce qui limite l'influence du niveau de l'eau.

Autres chercheurs ont proposé des indices qui estiment la multiplicité de chenaux (cf. Tableau 17). Selon Bridge (1993), Egozi et Ashmore (2008), les indices de quantification de la multiplicité des chenaux se divisent en trois catégories : a) les indices qui prennent en compte les bancs alluviaux ; b) les indices qui prennent en compte les chenaux fluviaux ; c) les indices qui prennent en compte la longueur du tronçon analysé et donc leur sinuosité. **Effectivement tous ces indices ne mettent pas en évidence le tressage, mais la multiplicité de chenaux fluviaux, qui est également caractéristique pour d'autres styles fluviaux. C'est pour cette raison que le taux d'activité de tressage est préféré dans la thèse ; il est mesuré par la largeur de la bande active (Peiry, 1988)** conformément à la Figure 36. La bande active représente l'emprise de chenaux en eau et des bancs de galets non végétalisés (Peiry, 1988). L'absence de la végétation sur les bancs est indicatrice d'une inondation active, avec mise en mouvement des galets dont la fréquence est probablement annuelle. Les mesures sont effectuées perpendiculairement sur l'axe de la bande de la bande active. Selon le même auteur, la détermination du taux d'activité du tressage présente plusieurs avantages parmi

lesquels on mentionne : 1) c'est une méthode simple et rapide ; 2) on s'affranchit de la contrainte méthodologique imposée par le niveau de l'eau.

Auteurs	Indice de tressage
Howard, Keetch et Vincent (1970)	Moyenne du nombre des chenaux perpendiculaires sur le flux principal
Hong et Davies (1979)	Longueur des chenaux rapportée à la longueur du tronçon
	Nombre des chenaux sur la section transversale
Mosley (1981)	Longueur totale des chenaux / la longueur du chenal principal
Richards (1982), Robertson-Rintoul et Richards (1993)	Longueur totale des chenaux / longueur de la vallée
Ashmore (1991)	Nombre moyen des chenaux actifs en section transversale
	Nombre moyenne des chenaux actifs liés dans un réseau tressé
Friend et Sinha (1993)	Somme des longueur des chenaux centraux/ longueur du chenal principal

Tableau 17. Indices de multiplicité des chenaux fluviaux proposés par plusieurs auteurs. Source : modifié d'après Bridge, 1993.

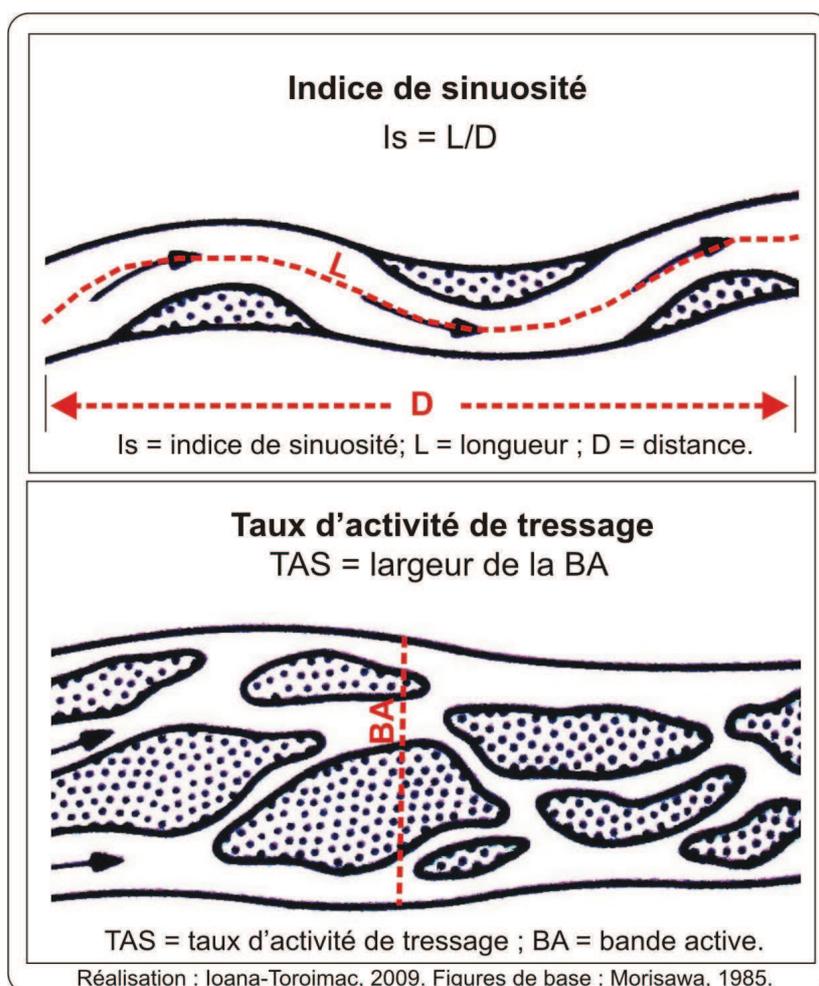


Figure 36. Schémas d'estimation de l'indice de sinuosité et du taux d'activité de tressage.

### 2.2.3.2. Reconstitution de chenal fluvial à partir des documents utilisés

La reconstitution du chenal fluvial se base essentiellement sur les éléments représentés sur les documents cartographiques utilisés. Des précisions sont apportées par les références bibliographiques analysées et par les observations actuelles de terrain.

Le chenal fluvial est représenté sous différentes formes selon le document analysé (cf. Figure 37) :

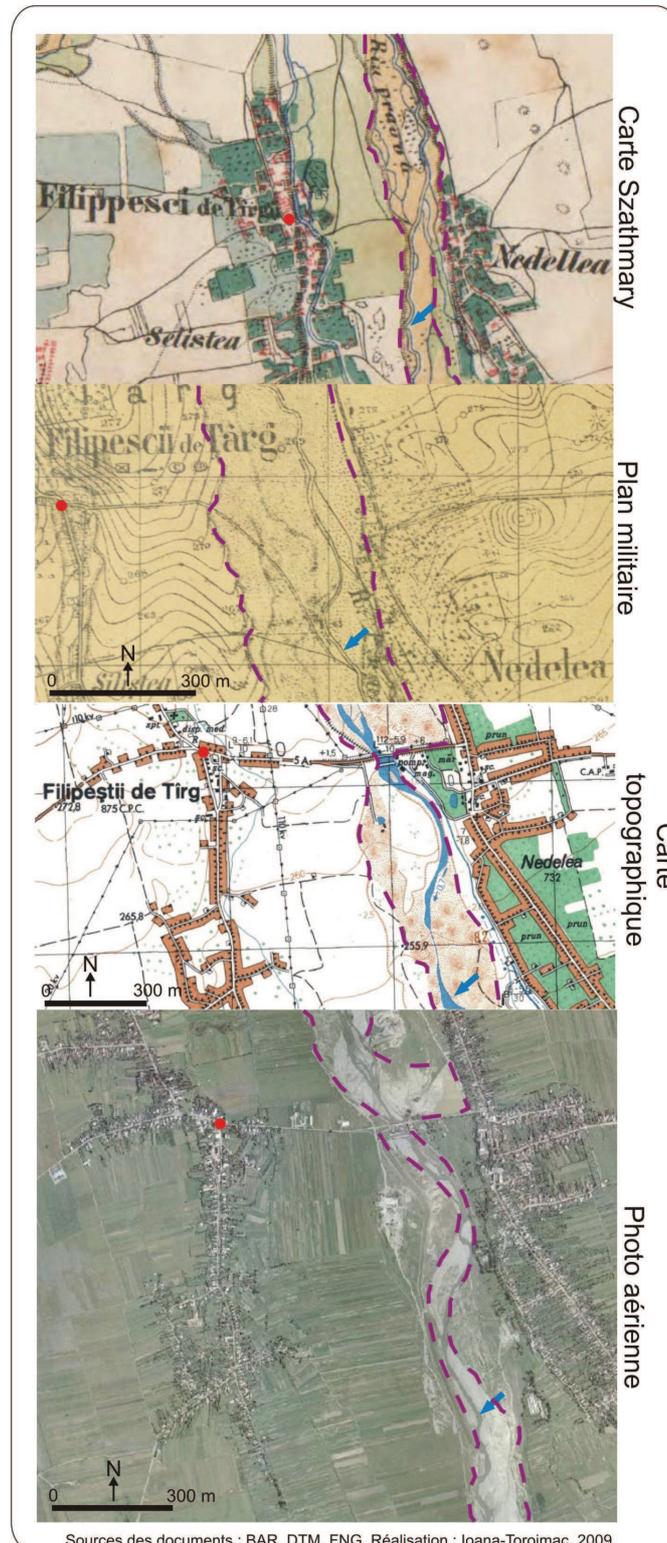
- **Sur les lithographies de 1854**, considérées qualitativement fiables, le chenal fluvial est représenté par un trait bleu dont l'épaisseur correspond à la largeur du chenal.
- **Sur les plans militaires de 1895-1902**, le chenal fluvial est délimité par deux traits noirs ; la distance entre les deux traits noirs correspond à la largeur du chenal. Mais deux situations particulières peuvent apparaître : 1) le chenal fluvial peut être représenté par un seul trait noir quand il est peu large, sans pouvoir préciser la valeur-seuil ; 2) le chenal peut être délimité par un talus ; nous estimons que cette représentation est valable quand les berges du chenal ont plus de 1 m de hauteur.
- **Sur les cartes topographiques**, le chenal fluvial est représenté par un trait bleu, dont l'épaisseur varie en fonction de la largeur du chenal ; ses limites ont une nuance de bleu plus foncée. Quand les berges du chenal ont plus de 1 m de hauteur, elles sont représentées en tant que talus.
- **Sur les photos aériennes**, la délimitation du chenal dépend du jeu des couleurs qui, à son tour, dépend de la turbidité de l'eau, de la couleur des alluvions mouillées et de la position du soleil au moment de la prise de vue.

Localement le chenal fluvial est occupé par un ou plusieurs bancs alluviaux. Les **bancs alluviaux** sont représentés sous différentes formes :

- **Sur les plans militaires de 1895-1902**, ils sont représentés sous forme d'une superficie délimitée par un trait noire et qui est hachurée en pointillé noir ;
- **Sur les cartes topographiques**, ils sont représentés sous forme d'une superficie délimitée par un trait marron et dont l'intérieur est hachuré en pointillé marron ;
- **Sur les photos aériennes**, ils sont repérés selon leur position et leur couleur (la couleur des alluvions sèches ou humides, la couleur de la végétation).

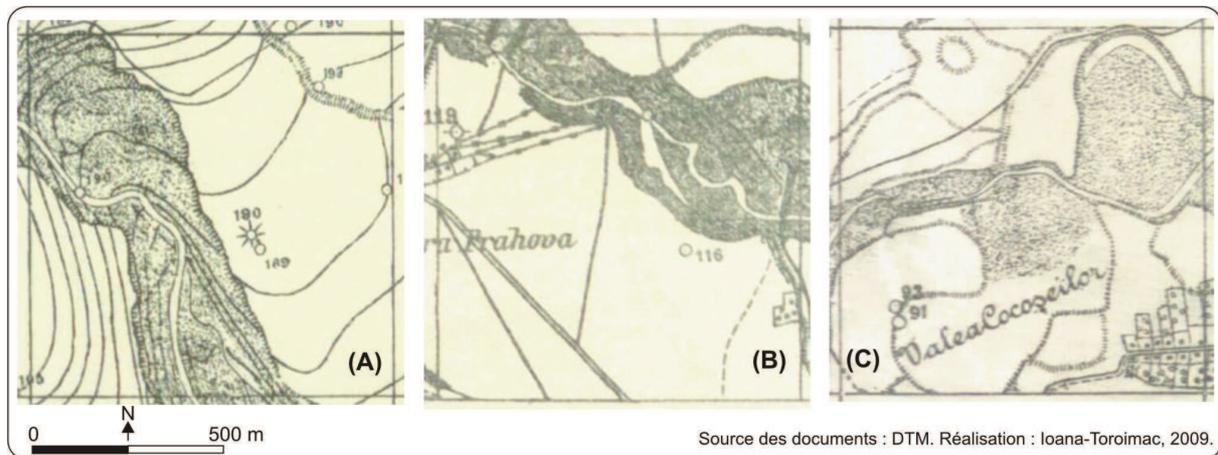
Sur certains tronçons, le chenal fluvial traverse des zones alluvionnaires fonctionnelles, donc pas couvertes de végétation. Ces zones alluvionnaires constituent des bandes tout le long

du tronçon concerné, raison pour laquelle nous considérons qu'elles représentent les bandes actives de tressage (cf. Figure 37).



**Figure 37. Représentation du chenal fluvial et de la bande active de tressage sur différents documents. La flèche bleue indique le chenal fluvial, les tiretés mauves indiquent les limites de la bande active de tressage, le point rouge est le point de repère commun.**

La particularité des plans militaires réside dans la représentation des caractéristiques de cette zone alluvionnaire ; bien que la légende ne donne pas les informations nécessaires, on suppose que la différence est faite selon la granulométrie des alluvions. Cette particularité des plans militaires a l'avantage de contribuer à une meilleure compréhension des styles fluviaux.



**Figure 38. Trois types de représentation de la bande active sur les plans militaires de fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Le type A est associé à un chenal principal, bien qu'on suppose que des chenaux secondaires existent. Le type B est associé à plusieurs chenaux ; certains d'entre eux se perdent dans la bande d'alluvions ; étant donné le fait que le type B se forme plus en aval par rapport au type A, il est possible que la bande de type B soit constituée d'alluvions plus fines que la bande de type A. Le type C est associé aux méandres ; en prenant l'exemple du présent cette bande d'alluvions est probablement constituée de limons d'inondations (voir §2.3.3.1.).**

Afin de pouvoir comparer l'intensité de l'activité de tressage, nous prenons en compte, comme nous l'avons fait dans le chapitre antérieur, la largeur de la bande active de tressage, en ignorant les chenaux fluviaux qui se trouvent à l'intérieur de la bande active. Ce choix est justifié par l'explication de Peiry (1988), qui a remarqué que les chenaux fluviaux visibles sur une photo aérienne ne correspondent pas aux chenaux fluviaux représentés sur la carte topographique de la même année. Dans le cas de la Prahova, ce calcul est appliqué pour les bandes de type A et B (cf. Figure 38), associé à des chenaux multiples.

## 2.3. Evolution récente de la Prahova

### 2.3.1. Le style fluvial - prémisse de sectorisation de la Prahova

L'analyse qualitative des documents cartographiques présentés ci-dessus met en évidence plusieurs styles fluviaux que la rivière Prahova forme le long de son cours (cf. Figure 40).

La carte de Szathmary est utilisée pour la détermination du style fluvial de la Prahova **au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle**. Pourtant elle n'est pas suffisamment précise ; en conséquence les résultats obtenus doivent être pris en compte avec une certaine précaution. Au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, la Prahova formait :

- un secteur à chenal unique dans les Carpates conformément à l'aquarelle du peintre Amedeo Preziosi (1868) (cf. Figure 39) ;



**Figure 39. Vallée de la Prahova – tableau du peintre italien Amedeo Preziosi (1816-1882). Le tableau a été réalisé lors de ces voyages en Roumanie, en accompagnant le roi Charles Ier. Bien que les proportions ne soient pas respectées, il est possible que le tableau montre une image de la Prahova en traversant les montagnes de Bucegi (l'abrupt qu'on remarque sur la gauche de la peinture). Source de l'image : CIMEC.**

- un secteur en tresses dans les Subcarpates et dans la Plaine de Ploiești ;
- un secteur de transition dans la Plaine de Ploiești, entre les localités de Tinosu et de Puchenii Miroslăvești, qui se caractérise par une bande active discontinue ;
- un secteur à méandres dans la Plaine de Gherghița, donc en aval de la localité de Puchenii Miroslăvești ;

Les plans militaires sont utilisés pour la détermination du style fluvial de la rivière Prahova **à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle**. Ces représentations sont faites avec beaucoup de soin ; en effet elles contiennent des éléments qui ne sont plus représentés sur les cartes topographiques ultérieures. C'est pour cette raison qu'elles sont considérées de confiance. A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la rivière Prahova formait trois grands secteurs :

- un secteur caractérisé par une succession de tronçons à chenal sinueux avec des bancs alluviaux longitudinaux et de tronçons formant des ébauches de tresses dans les Carpates ; les bancs alluviaux, ainsi les ébauches de tresses se forment dès l'entrée dans la localité de Bușteni, ce qui correspond, du point de vue naturel, à la confluence avec l'affluent Valea Cerbului et à l'entrée dans le bassin de Sinaia ;
- un secteur en tresses dans les Subcarpates et dans la Plaine de Ploiești, en amont de la localité de Piatra ;
- un secteur divaguant dans la Plaine de Ploiești entre les localités de Piatra et de Puchenii Miroslăvești ; le style fluvial divaguant est représenté sur les plans militaires par une bande active à l'intérieur de laquelle certains chenaux secondaires se perdent dans les alluvions probablement plus fines qu'en amont ; la représentation cartographique est nettement différente par rapport au style fluvial en tresses ; le style fluvial divaguant est associé souvent au processus de rétrécissement de la bande active ; il peut être interprété en tant que style de transition de tresses vers les méandres/le chenal sinueux dans le cas des rivières alpines françaises à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et au début du 20<sup>ème</sup> siècle (Liébault et Piégay, 2002) ;
- un secteur à méandres dans la Plaine de Gherghița.

Les cartes topographiques de 1954-1955 sont utilisées afin de déterminer le style fluvial de la rivière Prahova **au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle**, que la Prahova formait trois secteurs :

- le secteur à chenal unique avec des bancs alluviaux longitudinaux correspond toujours aux Carpates ;
- le secteur en tresses s'étend dans les Subcarpates et dans la Plaine de Ploiești ;

- conformément à la représentation cartographique, les tronçons à chenal unique s'étendent dans les Subcarpates sur environ 1 km de longueur ;
- entre les localités de Tinosu et de Puchenii Miroslăvești la bande active est discontinue ;
- le secteur à méandres correspond à la Plaine de Gherghița.

Les cartes topographiques réalisées d'après des levés topographiques de la période **1977-1980**, la Prahova formait :

- un secteur à chenal unique dans les Carpates ; la superficie totale occupée par des bancs alluviaux avait diminué ;
- un secteur en tresses dans les Subcarpates et dans la plaine de Ploiești ;
  - conformément à la représentation cartographique, les tronçons à chenal unique s'étendent dans les Subcarpates sur environ 3 km de longueur ;
  - en aval de la localité de Piatra, la bande active est discontinue.
- un secteur à méandres dans la Plaine de Gherghița.

En comparant les informations disponibles sur les plans militaires et sur les cartes topographiques, il résulte que les premiers documents proposent une représentation plus complexe. Par exemple, à partir des cartes topographiques, il n'est pas possible de tirer des conclusions concernant le style fluvial divaguant ; s'il existait toujours, il était représenté comme un style en tresses. De même, il n'est pas possible de faire des appréciations concernant la zone inondable.

En **2003-2005**, lors de la plus récente campagne de photos aériennes, la Prahova avait encore changé sa sectorisation initiale. Prahova se caractérisait par plusieurs styles fluviaux d'amont en aval :

- le secteur à chenal unique et sinueux s'étend dans les Carpates ; les bancs alluviaux sont de forme longitudinale ; leur forme est un indicateur de croissance (Church et Jones, 1982) ;
- le secteur présentant des ébauches de tresses et de tresses s'étend dans les Subcarpates et dans la plaine de Ploiești ;
  - dans les Subcarpates, la longueur totale des tronçons à chenal unique a augmenté à environ 8,5 km ; nous n'avons pas inclus dans cette catégorie les tronçons qui se caractérisent par des ébauches de tresses. Ce secteur se caractérise par des bancs alluviaux longitudinaux, latéraux, transversaux et médians, qui indiquent une charge solide importante et l'érosion latérale des berges du cours d'eau (Church et

Jones, 1982). Les photos aériennes utilisées apportent des précisions concernant le fonctionnement du cours d'eau entre les localités de Zalhanaua et de Piatra ; la bande active est sinueuse (bien qu'en amont elle soit rectiligne), parce qu'elle fonctionne par érosion de la berge concave et accumulation de la berge convexe ; cette particularité est une conséquence de l'éloignement de la source des sédiments (Church et Jones, 1982). Effectivement l'application d'un test de rupture statistique (test de Pettitt<sup>9</sup>) indique une rupture (significativité statistique pour le seuil de 99%) juste en aval de la localité de Zalhanaua, ce qui montre que la loi de distribution est différente en amont de ce point par rapport à l'aval.

- Un secteur à chenal sinueux et localement des bancs d'alluvions entre les localités de Piatra et de Puchenii Mirosălăvești ;
- Un secteur à méandres dans la Plaine de Gherghița, qui présente des bancs de convexité.

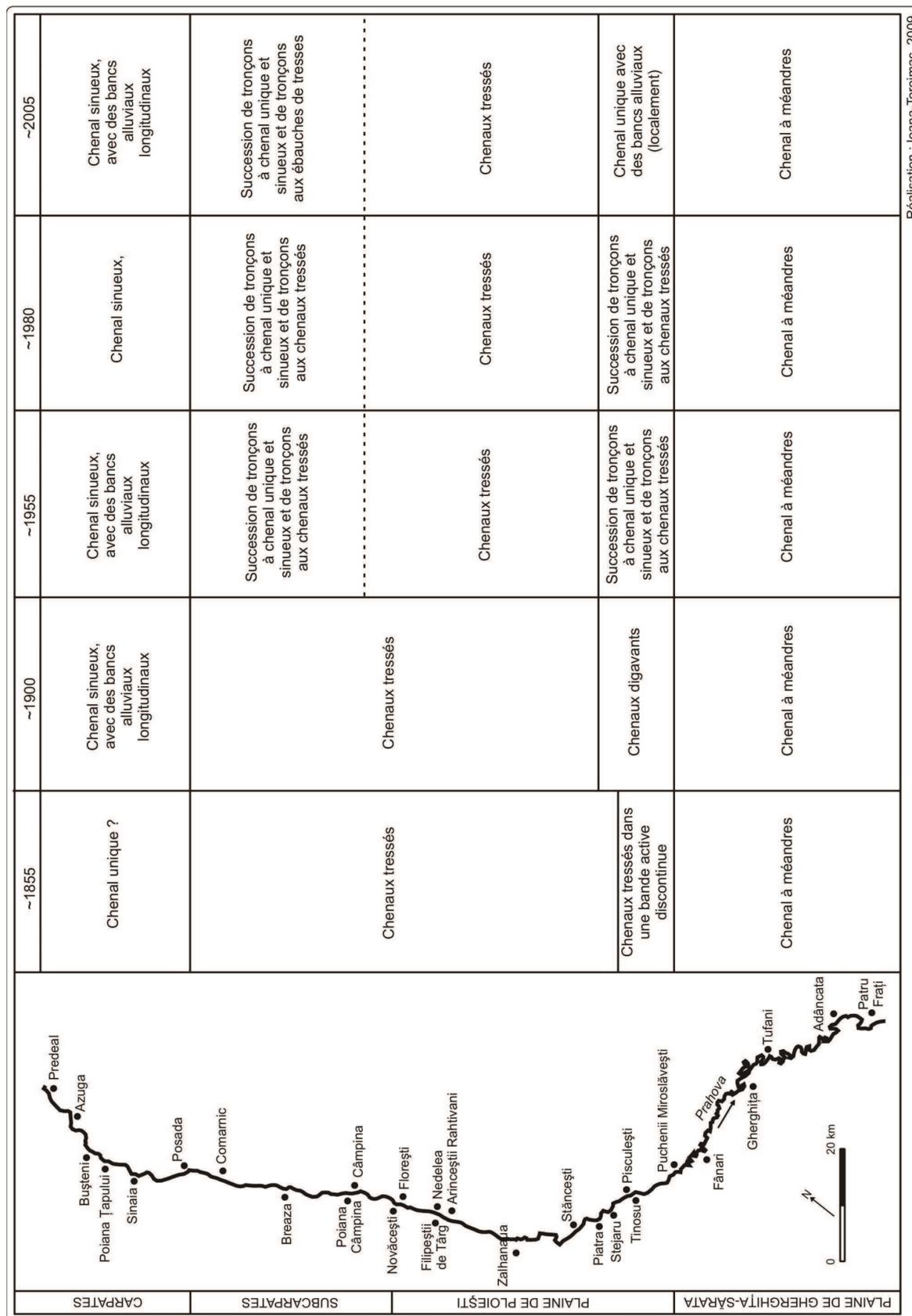
Quelques caractéristiques actuelles du chenal de la Prahova sont observées sur les photos de la Figure 41. Caractéristiques actuelles du chenal fluvial / des chenaux fluviaux de la Prahova.

L'apport de ces documents pour la détermination du style fluvial de la Prahova a été souligné par Ioana-Toroimac (2007). À part leur rôle dans l'étude diachronique, ces documents ont certaines particularités qui les rendent très utiles pour l'étude des rivières. Les plans militaires apportent des informations concernant les caractéristiques de la bande active. Les photos aériennes apportent des informations concernant la forme des bancs alluviaux.

La détermination du style fluvial de la rivière Prahova pourrait être la base de la sectorisation de la rivière. À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la Prahova formait quatre secteurs (cf. Figure 42). Le secteur à chenal sinueux et tendances locales de tressage correspond à une pente forte (dans les Carpates). Le secteur en tresses correspond à une pente moyenne (dans les Subcarpates et dans la Plaine de piémont de Ploiești). Le secteur divagant correspond à la partie basse de la Plaine de piémont de Ploiești. Le secteur à méandres correspond à une pente faible (dans la plaine de subsidence de Gherghița). En 2005, les secteurs de la Prahova ont la même succession malgré le fait que leur style fluvial a évolué.

---

<sup>9</sup> La rupture statistique correspond au changement de la loi de distribution d'une série de données.



Réalisation : Ioana-Torcinac, 2009.

Figure 40. Styles fluviaux de la rivière Prahova depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle. Les lignes continues représentent les limites entre les secteurs ayant le même style fluvial ; les tiretés représentent les limites entre des tronçons dans le cadre du même secteur.



Prahova dans les Carpates à Bușteni -  
chenal unique, sinueux avec un banc alluvial longitudinal.  
Photo : Ioana-Toroimac, le 20 octobre 2007.



Prahova dans les Subcarpathes en aval de Breaza -  
chenal unique, sinueux et incisé.  
Photo : Ioana-Toroimac, le 28 avril 2007.



Prahova dans les Subcarpathes en amont de Breaza -  
ébauches de tresses  
Photo : Ioana-Toroimac, le 28 avril 2007.



Prahova dans la Plaine de Ploiești, à Stăncești -  
chenaux en tresses.  
Photo : Ioana-Toroimac, le 24 août 2006.



Prahova dans la Plaine de Ploiești, à Tinosu -  
chenal unique, sinueux.  
Photo : Ioana-Toroimac, le 24 août 2006.



Prahova dans la Plaine de Gherghița, à Adâncata -  
chenal aux méandres et bancs latéraux.  
Photo : Ioana-Toroimac, le 5 juillet 2008.

**Figure 41. Caractéristiques actuelles du chenal fluvial / des chenaux fluviaux de la Prahova.**

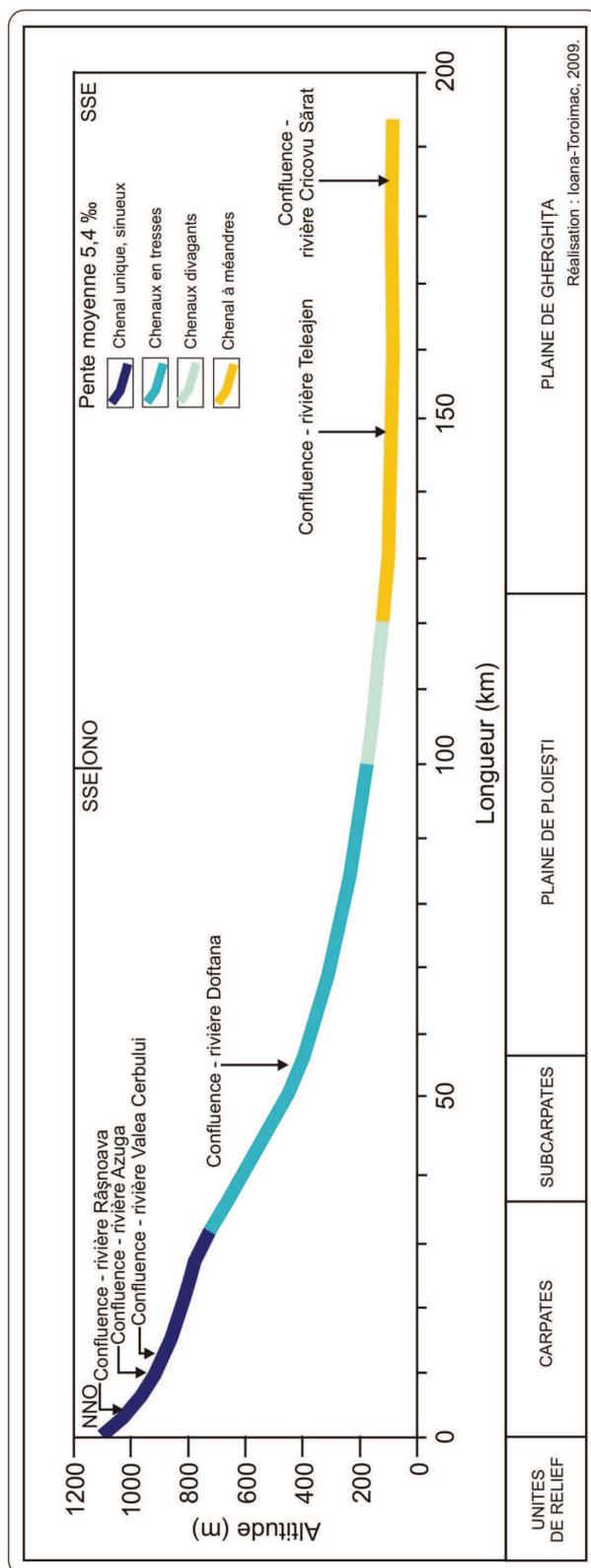
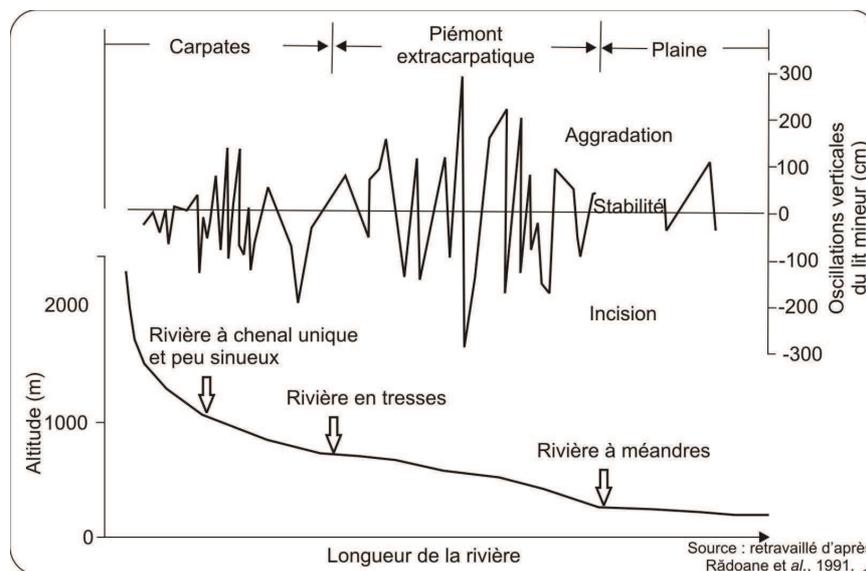


Figure 42. Profil longitudinal de la Prahova (réalisé d'après les cartes topographiques de 1977-1980 de la DTM) et styles fluviaux (en 1900). Le style fluvial de 1900 a été choisi parce qu'il est considéré démonstratif pour le fonctionnement naturel de la rivière. Le profil en long a probablement évolué entre 1900 et 1980 ; mais le profil en long de la rivière à 1900 n'était pas disponible par manque des certains feuilles de carte et par manque de visibilité d'autres feuilles de carte.

De fait cet enchaînement de styles fluviaux est caractéristique pour les rivières carpatiques. Rădoane *et al.* (1991) (cités par Rădoane et Rădoane, 2007) prennent l'exemple des rivières de l'est des Carpates orientales (cf. Figure 43). Les rivières, qui traversent les montagnes de flysch, se caractérisent par un lit à chenal unique avec des bancs d'alluvions latéraux ; elles s'écoulent sur une strate d'alluvions bien roulées (galets, graviers). A travers le piémont extracarpatique, les rivières forment des chenaux tressés. A l'entrée dans la région de plaine, les rivières forment des méandres, la pente est plus faible et les oscillations verticales moins accentuées. Un exemple de la région de la Courbure des Carpates est celui de la rivière Putna. Le bassin hydrographique de la Putna s'étend dans les Carpates de courbure, dans les Subcarpates de courbure et dans la Plaine Roumanie. Selon Zaharia (1999), dans les Carpates et dans les Subcarpates, les chenaux d'écoulement de la Putna et de ses affluents sont peu larges, pavés de galets, de graviers et de sables. En traversant plaine de piémont, dénommée « Plaine sous-collinaire de la Putna » (Mihăilescu, 1966), la rivière et ses affluents forment des tresses, dont les berges sont peu évidentes. En traversant la Plaine de subsidence du Siret Inférieur, la Prahova et ses affluents forment des méandres dont les berges atteignent localement 5-9 m de hauteur.



**Figure 43. Styles fluviaux en relation avec le profil longitudinal et les processus d'aggradation/incision des rivières de l'est des Carpates orientales.**

Bravard et Gilvear (1993) expliquent que les cours d'eau forment plusieurs secteurs fonctionnels selon le zonage de Schumm (1977) : le secteur étroit à pente forte caractérise la zone d'érosion et de production des sédiments ; le secteur en tresses caractérise la zone de transfert des sédiments ; le secteur à méandres et à anastomoses caractérise la zone de stockage.

## 2.3.2. Evolution de la bande active de tressage de la Prahova

### 2.3.2.1. Rétrécissement de la bande active à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle

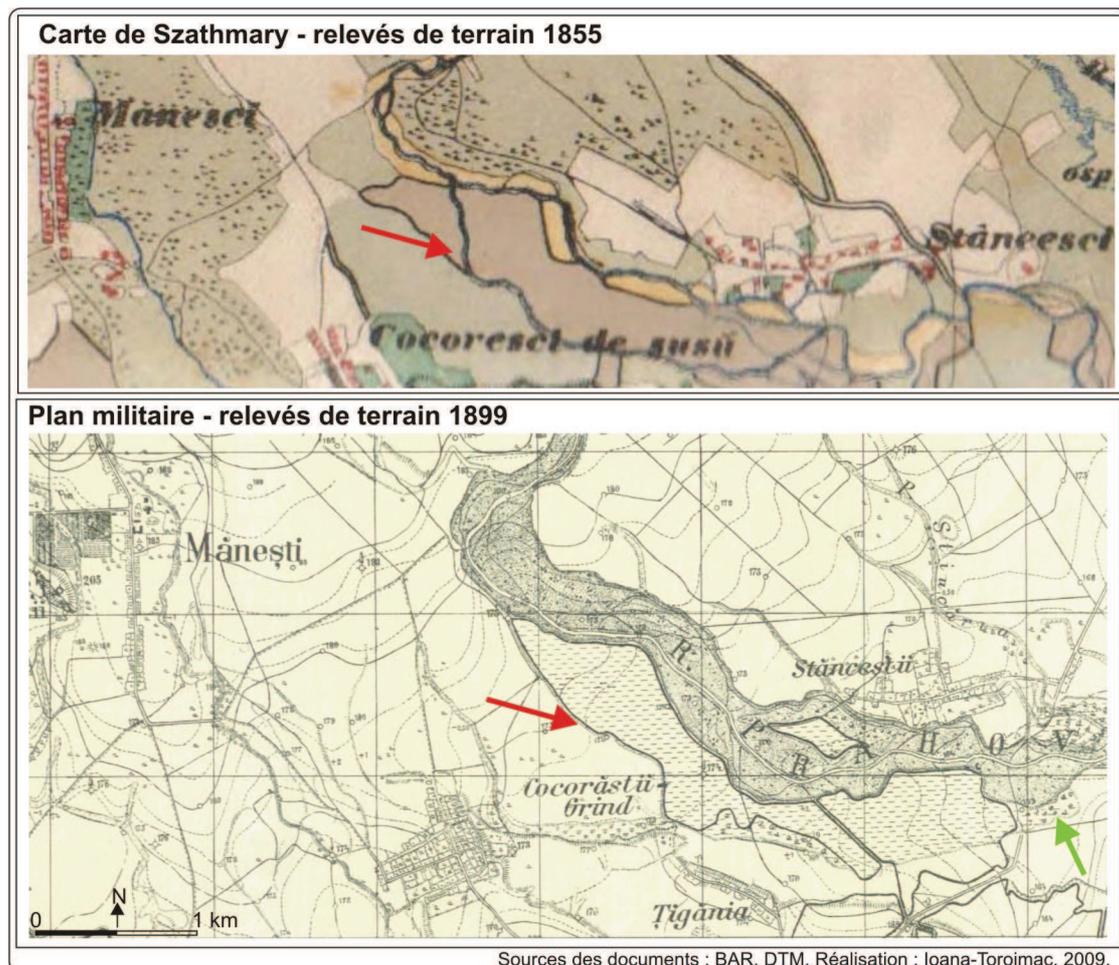
On a retrouvé très peu d'informations concernant les styles fluviaux de la Prahova avant le 19<sup>ème</sup> siècle. C'est la toponymie qui nous a permis d'avoir un aperçu du fonctionnement passé de la rivière. En ce sens on renvoie à l'Annexe 2 de la thèse qui présente, entre autre, cette brève recherche concernant la signification des noms de lieux.

A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle le rétrécissement de la bande active avait déjà commencé. Plusieurs éléments confirment cette affirmation :

- par rapport à la situation de 1855, la Prahova perdent certains bras secondaires ; l'exemple le plus évident est celui du bras secondaire que la rivière formait à Stăncești ; en 1899 cet ancien bras est représenté en tant que zone inondable ; cela pourrait indiquer une diminution du débit liquide de la Prahova (cf. Figure 44).
- en 1899, localement, les marges de la bande active avaient été colonisées par la végétation essentiellement le long du tronçon Stăncești-Pisculești. En effet ce rétrécissement s'est probablement produit sur le tronçon de transition d'un style fluvial à un autre : de tressé à divaguant. Etant donné le fait que les styles fluviaux affectés dépendent de la charge solide du cours d'eau, il est fort possible que ce paramètre ait enregistré une diminution (cf. Figure 44).

Etant donné le caractère iconographique de la carte de Szathmary, il n'est pas recommandable de faire des comparaisons entre la largeur de la bande active en 1855 et en 1899.

Afin de comprendre si cette évolution caractérise les rivières « voisines » de la Prahova, on a pris l'exemple de la rivière Teleajen, son plus grand affluent, qui descend également des Carpates et traverse les mêmes unités de relief que la Prahova. Tandis qu'en 1855 sa bande active était unitaire, en 1899 les marges de la bande active étaient végétalisées sur un tronçon de transition du style fluvial en tresses au style fluvial à méandres, ce qui confirme le rétrécissement de sa bande active.



Sources des documents : BAR, DTM. Réalisation : Ioana-Toroimac, 2009.

**Figure 44. Rétrécissement de la bande active de tressage entre 1855 et 1899. La flèche rouge indique la disparition d'un bras de la Prahova à la place duquel une zone inondable s'est formée (sur la carte de 1899). La flèche verte indique le développement de la végétation sur les marges de la bande active de tressage.**

De fait le même type d'évolution a été observé pour les rivières alpines françaises et pour les rivières carpatiques polonaises. Certains auteurs considèrent que le style fluvial en tresses représente une relique du PAG quand les conditions climatiques différents se manifestaient par une charge solide importante et par des pics de crues très élevés (Bravard, 1991 ; Gautier, 1992 ; Miramont et Guilbert, 1997 ; Starkel, 2002, 2005, 2006). Selon les mêmes auteurs, les changements climatiques de la fin du PAG ont eu comme conséquences la diminution de la charge solide et des pics des crues, ce qui s'est manifesté par le rétrécissement progressif de la bande active à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Dans les Alpes françaises, ainsi que dans les Carpates polonaises, le rétrécissement de la bande active à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle est expliqué également par les reforestations des bassins torrentiels (politique de Restauration des Territoires en Mouvement en France) et par l'exode rural.

### 2.3.2.2. Le rétrécissement de la bande active continue au 20<sup>ème</sup> siècle

Le rétrécissement de la bande active continue dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Cela est mis en évidence par une représentation graphique de type boîte à moustaches (cf. Figure 45) ; l'avantage de ce type de représentation graphique consiste à permettre de visualiser la distribution statistique des séries de données analysées. Conformément à cette représentation :

- la largeur moyenne de la bande active de la Prahova a baissé de 33% entre 1900 et 1955 et de 15% entre 1955 et 1980 ; au total la largeur moyenne de la bande active s'est diminuée de 48,7% en 80 ans.
- la médiane des séries de valeurs de largeur de la bande active a baissé de 322 m (en 1900) à 200 m (en 1955) et à 157 m (en 1980) ; les séries de valeurs sont dispersées.

Le même type analyse a été appliqué séparément pour trois tronçons : le tronçon tressé subcarpatique en amont de la confluence avec la Doftana, le tronçon tressé situé entre la confluence avec la Doftana et la localité de Piatra et le tronçon divagant (en 1900) situé entre les localités de Piatra et de Puchenii Mirosălăvești. Ces tronçons ont été choisis pour leur représentativité. Le premier tronçon, subcarpatique, situé en amont de la confluence avec la Doftana, met en évidence l'évolution de la Prahova sans l'influence de cet affluent. Le deuxième tronçon représente les deux autres tiers du secteur en tresses et il est ressent aussi bien l'évolution de la Prahova en amont, que l'évolution de l'affluent Doftana. Le troisième tronçon, qui s'étend entre les localités de Piatra et de Puchenii Mirosălăvești, a comme particularité un style fluvial divagant à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, dont l'évolution particulière doit être analysée.

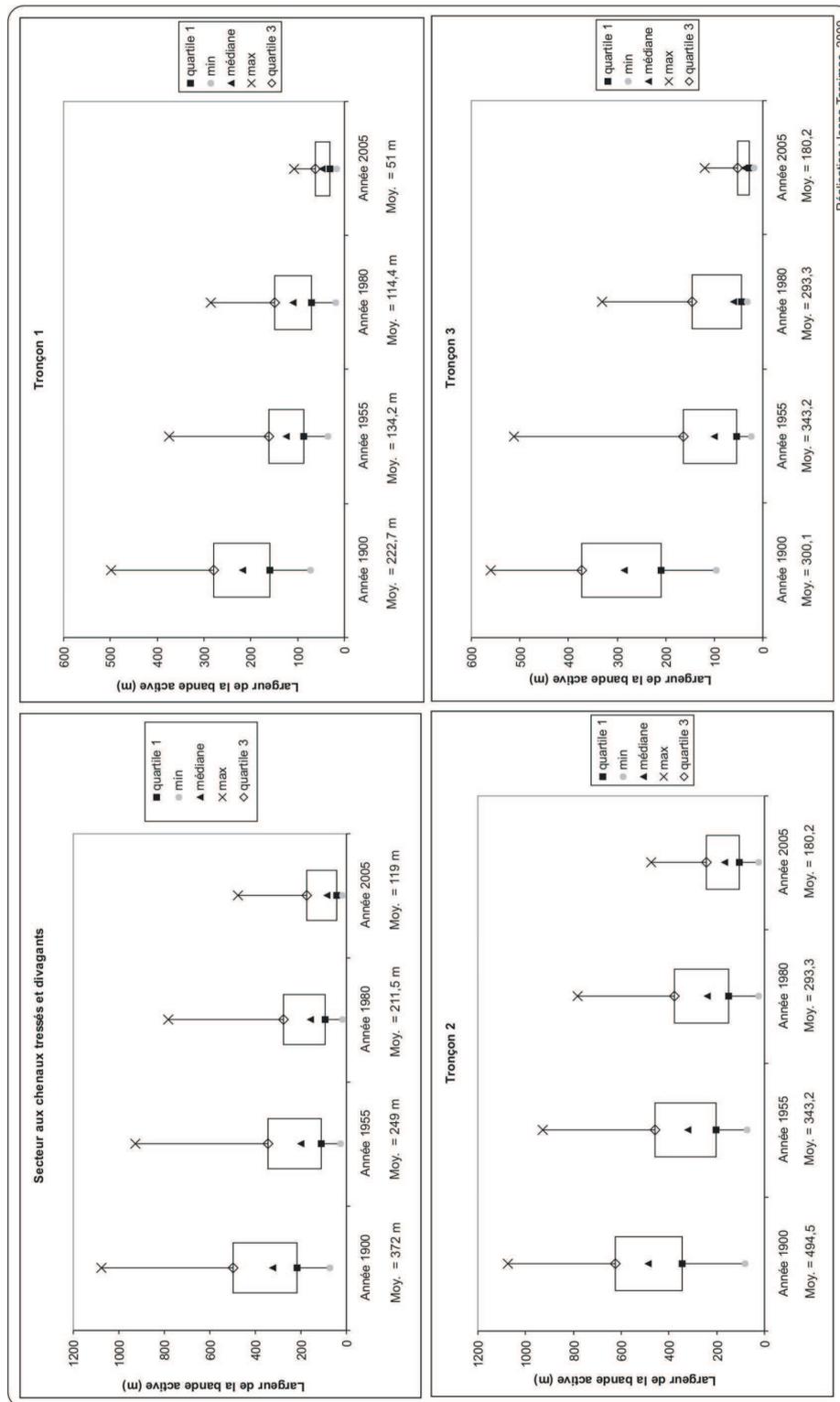
- Le tronçon subcarpatique se caractérise par la diminution de la largeur moyenne de la bande active d'environ 40% entre 1900 et 1955 et de 14% entre 1955 et 1980.
- Le deuxième tronçon en tresses se caractérise par la diminution de la largeur moyenne de la bande active d'environ 30% entre 1900 et 1955 et d'environ 14% entre 1955 et 1980.
- Le tronçon divagant se caractérise par la diminution de la largeur moyenne de la bande active d'environ 53% entre 1900 et 1955 et d'environ 26% entre 1955 et 1980.

On observe donc un rétrécissement progressif de la bande active de la Prahova ; le rétrécissement produit en 25 ans (1955-1980) représente environ la moitié de celui produit durant les 55 précédentes années (1900-1955). De plus les trois tronçons ont les mêmes tendances d'évolution, sauf que le premier enregistre un rétrécissement plus important entre

1900 et 1955, tandis que le troisième est le plus affecté par le rétrécissement de la bande active durant la période analysée (cf. Figure 45).

En prenant l'exemple des rivières alpines françaises, Liébault et Piégay (2002) expliquent que le rétrécissement graduel de leurs bandes actives dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle représente une continuation des effets de la fin du PAG et des reforestations des bassins torrentiels, qui ont déterminé la réduction de la charge solide et des pics de crues. Etant donné le caractère progressif et relativement unitaire du rétrécissement de la bande active de la Prahova, même sous l'influence de la rivière Doftana, ainsi que la ressemblance avec l'évolution des rivières alpines, on considère que l'évolution de la Prahova entre 1900 et 1980 aurait pu être déterminée essentiellement par des facteurs naturels. Il reste à expliquer les facteurs qui auraient pu déterminé le rétrécissement supérieur à la moyenne enregistré par le tronçon subcarpatique. En ce qui concerne le dernier tronçon, effectivement, si un changement s'était produit dans les sources d'alluvions situées dans la partie amont du bassin versant, les effets auraient du se ressentir tout d'abord dans cette partie aval. De fait on a remarqué le même modèle d'évolution avant 1900. Comme conséquence du rétrécissement, les marges de la bande active se sont végétalisées ; en 1955, les marges végétalisées (entre les localités de Stăncești et de Puchenii Miroslăvești) étaient colonisées par une ripisylve constituée essentiellement d'espèces d'aulnes ; cette ripisylve est susceptible de contribuer à la fixation de l'ancienne bande active et donc à la diminution des possibilités de migration latérale du cours d'eau.

A propos des marges végétalisées, en 1955 des périmètres végétalisés par des buissons étaient présents plus en amont, entre les localités de Stăncești et de Zalhanaua ; cela montre un rétrécissement important de la bande de tressage par rapport à la situation antérieure. En 1980, les marges de la bande active avaient été colonisées par une ripisylve (les espèces de peuplier et d'aulne étant dominantes) en aval de la localité de Zalhanaua, ce qui montre le développement de la végétation qui existait déjà en 1955 (cf. Figure 47). En 1980 certains périmètres de l'ancienne bande active de la Prahova étaient végétalisés (des herbes, des arbustes, localement des arbres).



Réalisation : Ioana-Torinmac, 2008.

Figure 45. Largeur de la bande active de la Prahova en 1900, 1955, 1980 et 2005. La largeur de la bande active est mesurée tous les 250 m sur les plans militaires, sur les cartes topographiques de la DTM et sur les photos aériennes du FNG. Le secteur aux chenaux tressés et divagants s'étend dans les Subcarpathes et dans la Plaine de Ploiești. Le premier tronçon s'étend dans les Subcarpathes, en amont de la confluence avec la Doftana, donc en amont de la localité de Câmpina. Le deuxième tronçon s'étend entre la confluence avec la Doftana et la localité de Piatra. Le troisième tronçon s'étend entre les localités de Piatra et de Puchenii Miroslăvești.

En ce qui concerne l'affluent Doftana, deux tronçons ont été analysés. Le premier tronçon (5,5 km de longueur) correspond au bassin de Teșila, où la Doftana développe une bande active de tressage ; en amont et en aval de ce tronçon, la Doftana forme soit des ébauches de tresses, soit un chenal unique en relation avec les caractéristiques des unités de relief traversées. Ce tronçon a été choisi, parce qu'il reflète l'évolution essentiellement naturelle de la Doftana, qui a subi peu de modifications anthropiques en amont. Le deuxième tronçon (7,5 km de longueur) se trouve en aval du Lac Voila et il s'étend jusqu'à la confluence avec la Prahova. Ce tronçon a été choisi, parce qu'il est susceptible de subir l'influence des deux barrages-réservoirs de Paltinu et de Voila.

En comparant la bande active de la Doftana en 1902, 1955 et 1980 (cf. Figure 46), il résulte que :

- le premier tronçon a subi un rétrécissement de sa bande active depuis 1902 ; la largeur moyenne de la bande active a baissé de 35% entre 1902 et 1955 et de 20% entre 1955 et 1980.
- le deuxième tronçon a été également affecté par le rétrécissement de la bande active ; sa largeur moyenne a baissé de 27% entre 1902 et 1955 et de 31,5% entre 1955 et 1980.

Conformément aux images Google Earth (2003), ainsi qu'aux observations de terrain, la bande active actuelle de la Doftana a les marges végétalisées, ce qui indique son rétrécissement.

Le premier tronçon, essentiellement naturel, a enregistré le même type d'évolution que la Prahova entre 1902 et 1980. Cela confirme que le rétrécissement de la bande active de tressage est essentiellement naturel. Le deuxième tronçon a une évolution légèrement différente. Le taux important de rétrécissement de la bande active entre 1955 et 1980 indique le rôle du facteur anthropique qui s'est manifesté par la construction des barrages-réservoirs de Paltinu et de Voila, par les reforestations liées à la construction de ces barrages, par l'endiguement local du cours de la Doftana.

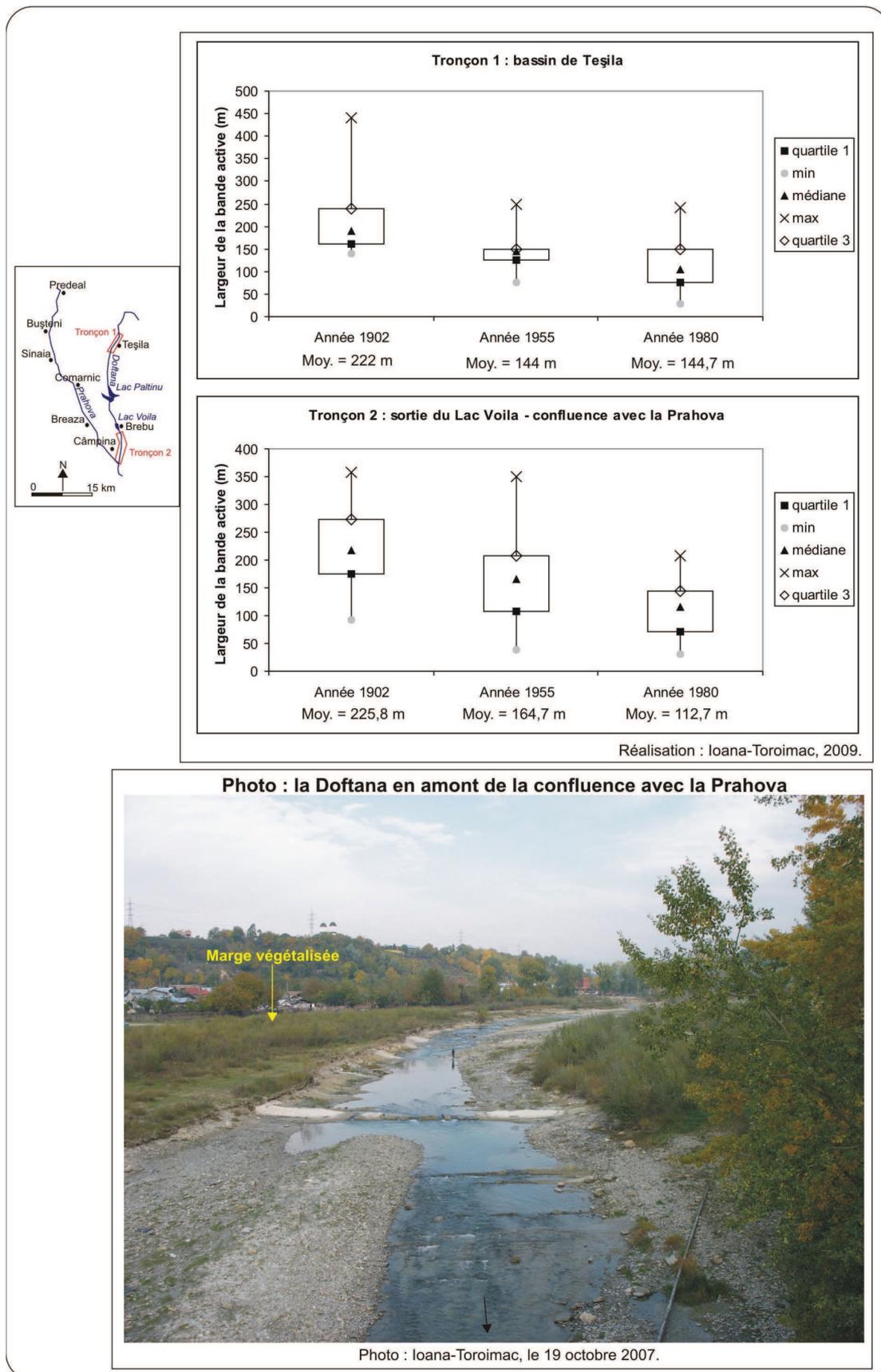


Figure 46. Evolution de la bande active de la Doftana entre 1902 et 1980. Le petit cadre situé en haut à gauche présente la position des deux tronçons sur la Doftana. La largeur de la bande active est mesurée tous les 250 m sur les plans militaires et sur les cartes topographiques de la DTM.

### 2.3.2.3. *Le rétrécissement de la bande active s'intensifie après 1980*

On a constaté que, entre 1980 et 2005 :

- la largeur moyenne de la bande active s'est diminuée de 43% entre 1980 et 2005 : cette valeur de rétrécissement est relativement proche de celle enregistrée durant les 80 années d'avant.
- la largeur moyenne de la bande active du tronçon subcarpatique (en amont de la confluence avec la Doftana) s'est diminuée de 55% entre 1980 et 2005 ;
- la largeur moyenne de la bande active du deuxième tronçon tressé s'est diminuée d'environ 38% entre 1980 et 2005 ;
- la largeur moyenne de la bande active du tronçon divaguant (en 1900) s'est diminuée d'environ 58% entre 1980 et 2005.

En même temps, en 2005, les marges végétalisées étaient évidentes dans les Subcarpates (des herbes, des arbustes et localement des arbres) et dans la Plaine de Ploiești (des herbes) ; en aval de Zalhanaua, les marges végétalisées ont gardé les caractéristiques de 1980, étant colonisées par la ripisylve (cf. Figure 47). A Stăncești, des replantations ont été faites afin d'empêcher l'évolution latérale du cours d'eau au détriment de la localité. L'espèce préférée a été l'aulne ; les espèces d'aulnes s'adaptent sur des dépôts d'alluvions stratifiés ou sur des sols alluviaux stratifiés, où la nappe phréatique est accessible (Diaconu *et al.*, 1971). Pour conclure, selon Osaci-Costache et Ene (2007), le taux de boisement actuel dépasse de 5% le taux de boisement de l'année 1897 dans le bassin de la Prahova.

L'intensification du processus de rétrécissement a été observée aussi pour les rivières alpines françaises et pour les rivières carpatiques polonaises, en général après 1950. Ce rétrécissement intensif est accompagné dans certains cas de l'incision du chenal fluvial. Ces deux processus sont en général associés au rôle du facteur humain.



#### 2.3.2.4. Incision du chenal de la Prahova essentiellement après 1980 : études de cas

Les études de cas présentés ci-dessus ont le rôle de compléter l'image générale sur l'évolution de la rivière Prahova durant les 150 dernières années et d'apporter un plus d'informations afin de mieux comprendre les causes responsables de cette évolution.

##### 2.3.2.4.1. Incision du chenal subcarpatique de la Prahova

Tout d'abord, il faut mentionner que la Prahova s'incise le long des deux tronçons à cause d'un phénomène naturel. A la sortie des Carpates (en amont et en aval de la localité de Posada), ainsi que dans les Subcarpates (à Breaza), la rivière traverse deux zones qui se caractérisent par des mouvements épirogéniques positifs. Tandis que ces zones se soulèvent, la rivière s'incise dans la roche en place créant deux tronçons de gorges antécédentes (Orghidan, 1969 ; Grecu et Comănescu, 1998).

Sur le fond général du rétrécissement de la bande active subcarpatique surtout depuis 1980, Pascu (1999), qui a disposé de mesures de profondeur du chenal fluvial aux pieds de ponts carpatiques et subcarpatiques traversant la Prahova, parle de l'incision du chenal fluvial. L'auteur estime : 1) une moyenne de l'incision du chenal fluvial d'environ 1 m entre 1987 et 1998, pour le secteur carpatique et pour le tronçon subcarpatique de la Prahova, le tronçon subcarpatique étant plus affecté ; 2) une incision de 3-4 m dans le bassin de Comarnic (Subcarpates) où la Prahova s'écoulait sur un lit d'alluvions dans les années 1980, tandis que, à présent, elle s'écoule directement sur la roche en place.

La Figure 48 montre un tel exemple d'incision du chenal subcarpatique de la Prahova. En 1980 la Prahova formait une bande active de tressage, dont la largeur dépassait 200 m. Tout d'abord la Prahova a abandonné son chenal situé à droite<sup>10</sup>, à la base du front de la terrasse de Breaza. Dans la partie abandonnée de la bande active, deux petits étangs se sont formés. Depuis le moment de l'abandon, les deux autres chenaux s'incisent. Ce processus est mis en évidence par la présence de la roche en place qui apparaît à la base du banc alluvial. De fait ce banc alluvial est beaucoup plus important pour le gabarit actuel du cours d'eau ; la hauteur de ce banc dépasse 3 m. Récemment deux seuils de stabilité ont été mis en place afin de protéger contre l'incision le pont situé juste en amont de ce tronçon. De fait cette action est

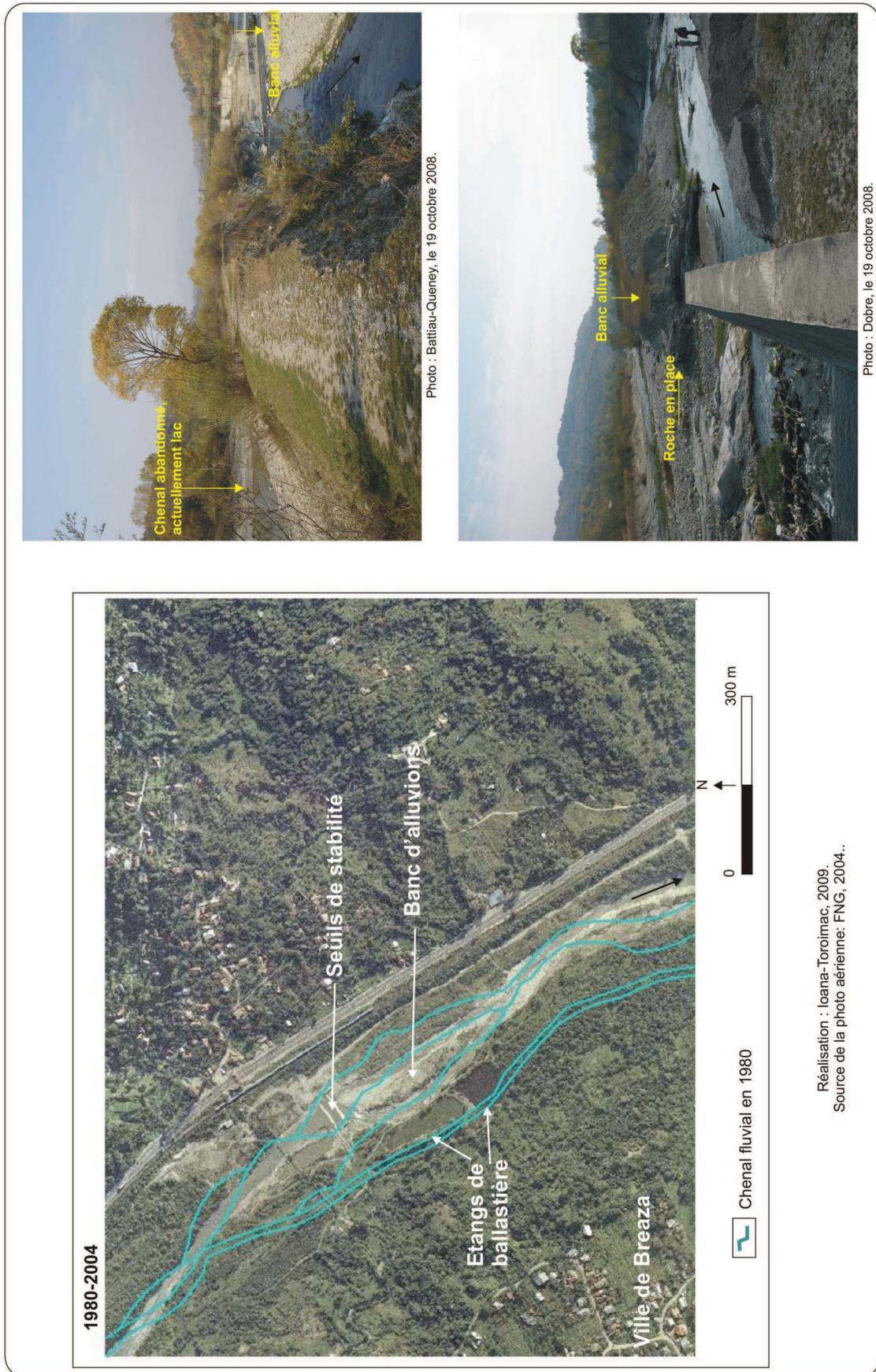
---

<sup>10</sup> Il est fort possible que cet « abandon » ait été déterminé par le facteur humain, parce que, par sa position, ce chenal aurait pu déstabiliser le front de la terrasse affecté déjà par des glissements de terrain (Armaş *et al.*, 2003). Le même type d'action a été observé par Armaş et Manea (2002) quelques kilomètres en aval.

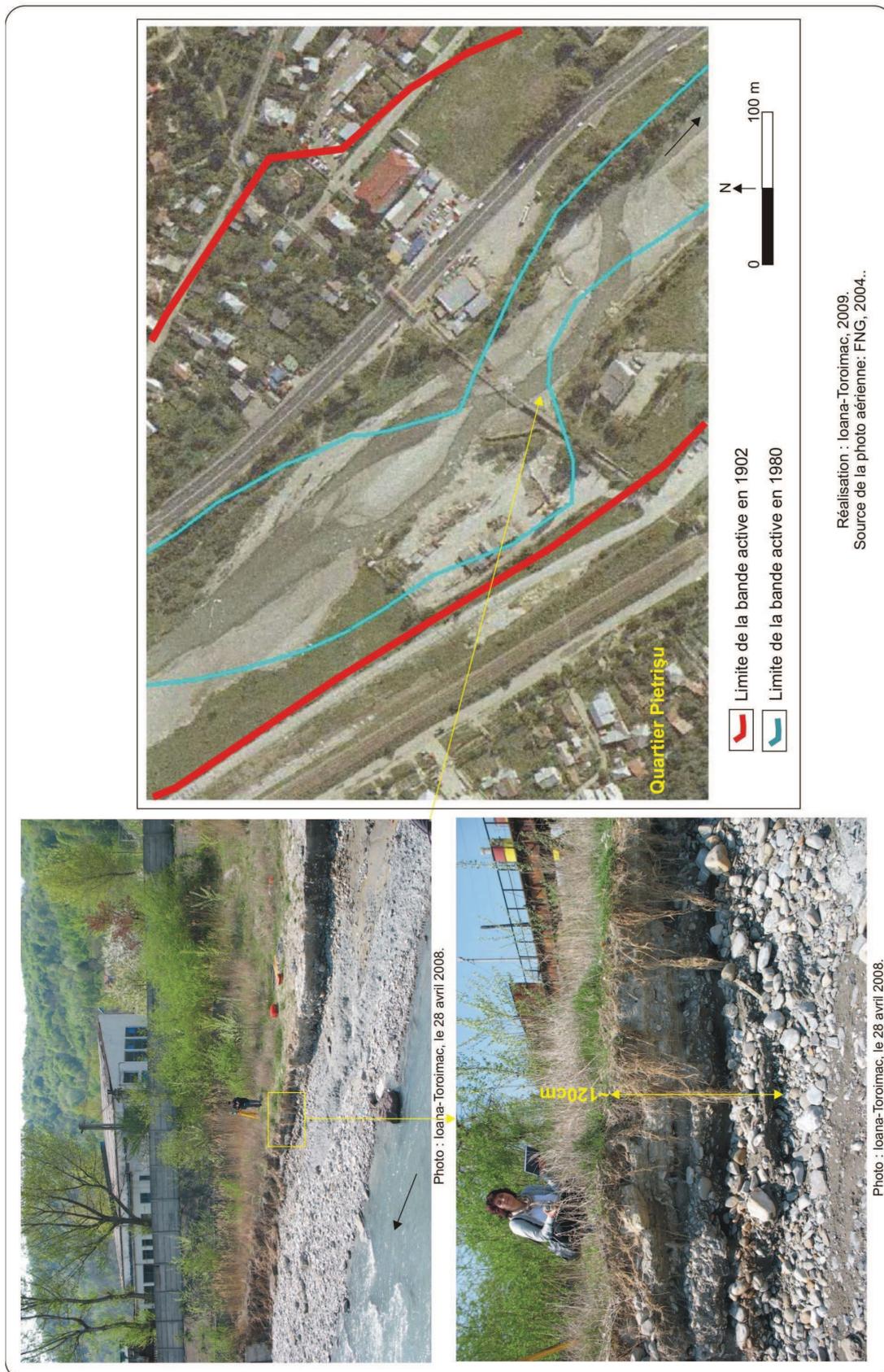
systematique sur la riviere Prahova. En theorie les seuils de stabilisation constituent des points durs qui stabilisent le lit du chenal ; ils rehaussent artificiellement les lignes d'eau (interet pour les nappes phreatiques et pour la ripisylve) ; ils constituent une zone de dissipation de l'energie fluviale et empachent un nouvel approfondissement du lit. Mais Peiry *et al.*, (1994) montrent que ces seuils de stabilisation ne sont pas efficaces pour proteger les chenaux des rivieres contre l'incision ; c'est le cas d'un seuil construit sur l'Arve en aval de Cluses en 1983 dont les fondations se sont affouillees d'environ 1,5 m jusqu'en 1994. Donc il reste a voir les effets secondaires de ces nouveaux ouvrages de protection sur la Prahova...

Mais pourquoi la Prahova s'est-elle incisee particulierement sur ce troncon ? La cle de la reponse se trouve dans l'existence des deux petits lacs. En effet le meme type de lacs, plus nombreux et moins grands, existe egalement sur la rive gauche quelques centaines de metres en amont. En effet ces lacs sont les restes des anciennes ballastieres qui ont fonctionne sur ce troncon de la Prahova, en exploitant des graviers et des sables de l'ancienne bande active. En cas de debordement, ces lacs peuvent etre des pieges a sediments (voir § 2.4.2.1.). De plus il est fort possible que des exploitations de graviers aient ete faites directement dans les chenaux de la Prahova, action relativement systematique sur la Prahova.

Plus en aval, on a observe un autre exemple ou l'incision est moins importante, mais cet exemple permet de comprendre les causes de cette evolution de la riviere Prahova. Lors de campagnes de terrain, on a fait des observations sur la berge droite de la Prahova au quartier Pietrişu (en traduction *Gravier*), situe dans la partie sud de la localite de Poiana Câmpina (cf. Figure 49). La berge actuelle faisait partie de la bande de tressage de la Prahova aussi bien en 1900 qu'en 1980. Dans cette berge d'environ 120 cm de hauteur, on a observe une succession de couche de galets, graviers et sables. La couche la plus basse se caracterise par les galets ayant les dimensions les plus importantes. Dans la partie superieure de cette couche il y en a une autre constituee de galets et de graviers. Puis, d'une maniere relativement brusque, la riviere a depose des sables et des limons d'inondation en plusieurs strates paralleles. Puis une autre couche de graviers et de sables a ete deposee. Dans la partie superieure il y a essentiellement des sables. La structure de cette berge montre donc une longue evolution de la riviere Prahova qui a subi des periodes ayant des caracteristiques differentes. On comprend donc que le retrécissement et l'incision de la riviere Prahova soient lies a la diminution de la charge de fond de fond. On estime que ces variations de granulometrie sont essentiellement naturelles bien qu'elles soient probablement influencees par le facteur anthropique ; cela est justifie par l'absence totale de galets dans les couches superieures.



**Figure 48. Exemple d'incision des chenaux de la Prahova dans les Subcarpathes. Les chenaux fluviaux de 1980 sont tracés à partir des cartes topographiques de la DTM.**



**Figure 49. Observations sur la constitution de la berge droite de la Prahova au quartier Pietrișu situé au sud de la localité de Poiana Câmpina. Les bandes actives de 1902 et de 1980 sont tracées à partir des plans militaires et des cartes topographiques de la DTM.**

#### 2.3.2.4.2. Incision du tronçon Piatra-Pisculești

Vers 1900, le long de ce tronçon, la Prahova avait probablement un style fluvial divaguant. Sa bande active était déjà en rétrécissement, étant donné la présence de la végétation sur les marges de sa bande active. Ce processus a continué, ainsi qu'en 1955, une partie de l'ancienne bande active était occupée par une forêt constituée essentiellement d'aulnes. Le rétrécissement de la bande active a continué ; en conséquence, en 1980 la forêt (espèce dominante - le peuplier) s'étendait dans la bande active de 1955. En 1980 les marges végétalisées ont atteint un maximum de développement, tandis que la bande active atteint son minimum de largeur. Cette ripisylve occupe actuellement l'ancienne bande active. Dans le contexte général de la réduction des contraintes exercées par la rivière, la ripisylve a contribué à la fixation de l'ancienne bande active, ce qui a favorisé l'incision du chenal de la Prahova le long de ce tronçon. Par exemple l'Ain a connu les mêmes tendances dans son évolution récente. Bravard *et al.* (1989) expliquent que la rivière change son style fluvial de tresses à méandres probablement dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Cette évolution est due à la diminution de la charge et à la raréfaction des grandes crues puis quelques dizaines d'années. Depuis la fin des années 1950, le processus de migration latérale est devenu plus lent. En conséquence, bien que dans les années 1940 seulement quelques peupliers noirs colonisaient l'ancienne bande active, entre 1950 et 1960, le peuplier noir colonise rapidement le lit majeur. Cet événement a entraîné une modification du tracé du cours d'eau, qui perd la sinuosité des méandres et se transforme dans un tracé pseudo-linéaire. Entre 1960 et 1980, la colonisation végétale s'accélère et la végétation occupe même les bancs de convexité et le chenal fluvial devient plus stable. Depuis 1980, la colonisation présente une forte régression en relation avec la liberté de migration latérale du cours d'eau. Les mêmes auteurs ont observé que la forte colonisation végétale, ainsi les autres facteurs mentionnés ci-dessus, ont déterminé la fixation du lit majeur et l'incision du chenal fluvial, en contribuant ainsi à la métamorphose fluviale. En prenant l'exemple de la Loire, Leteinturier *et al.* (2000) concluent que le développement de la ripisylve annonce la fermeture du système alluvial.

Il est fort probable que l'ensemble de ce tronçon occupé par la ripisylve ait le même type d'évolution dans le futur. L'incision, en tant qu'effet secondaire du rétrécissement de la bande active et de sa végétalisation, est très évident sur le tronçon Piatra-Pisculești, parce qu'il a été le premier confronté avec le rétrécissement et la végétalisation de la bande active.

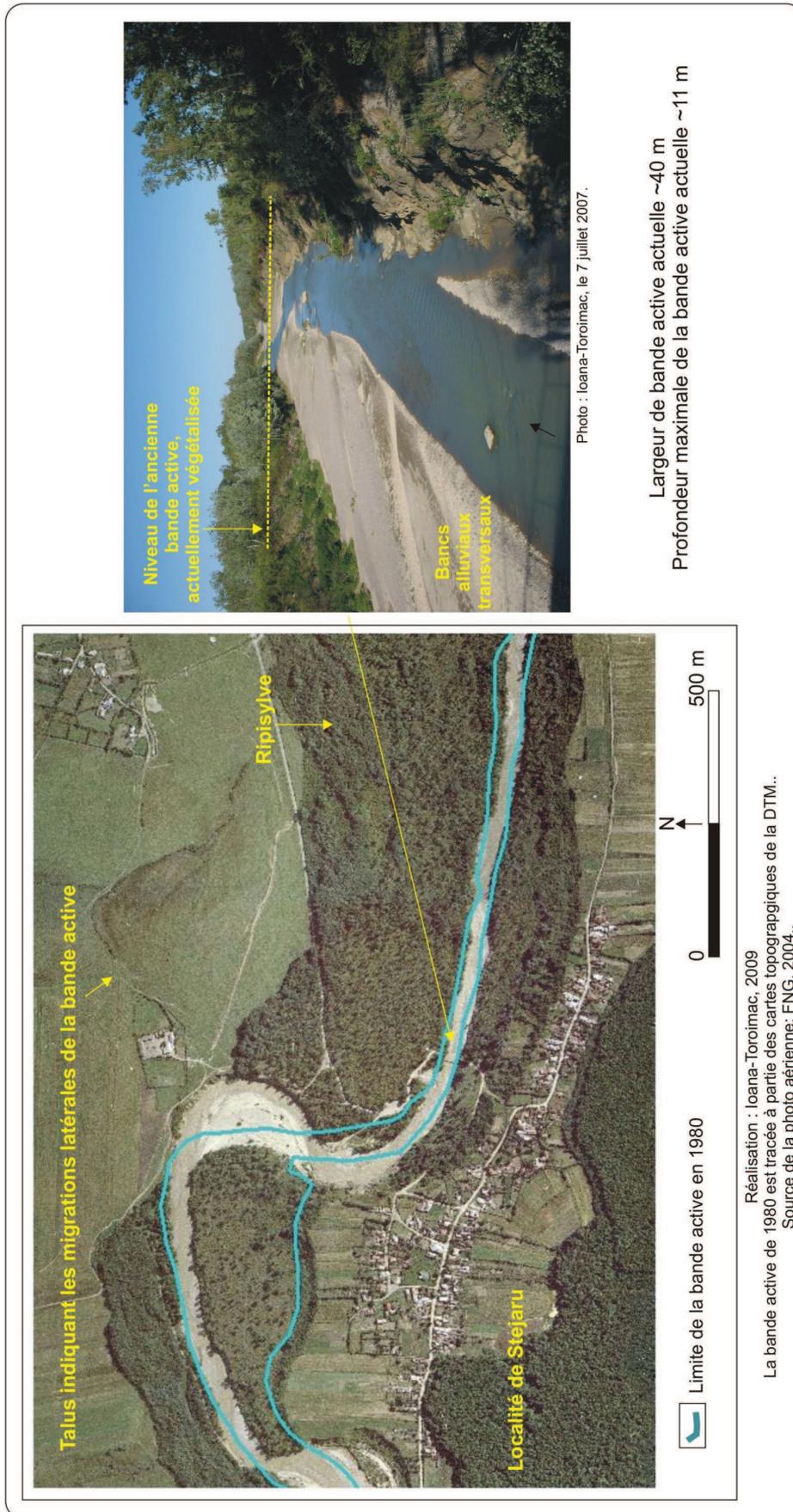


Figure 50. Exemple d'incision du chenal fluvial de la Prahova à Stejaru, dans la Plaine de Ploiești.

### 2.3.2.5. Métamorphose fluviale de la Prahova

Suite au rétrécissement de la bande active, deux tronçons de la rivière Prahova ont subi un processus de métamorphose passant d'un style fluvial en tresses/divaguant à un style fluvial à chenal unique.

C'est l'exemple d'un tronçon subcarpatique de la Prahova (cf. Figure 51). Cette métamorphose a eu lieu entre 1980 et 2005, mais elle a été préparée bien avant par un ensemble de conditions favorables au rétrécissement. Ce tronçon d'environ 8 km s'étend entre le pont ferroviaire de Breaza et le pont routier Câmpina-Breaza. Cette évolution a été observée par Armaş *et al.* (2007) aussi. Pourquoi ce tronçon a-t-il été particulièrement affecté ? En effet la Prahova dépose ses alluvions dans le petit bassin intra-subcarpatique (de Comarnic), situé en amont du tronçon de gorge antécédente de Breaza. En conséquence la quantité d'alluvions diminue ; de plus elle n'a pas d'affluents importants le long de ce tronçon. Juste en aval du pont Câmpina-Breaza, elle reçoit son affluent Câmpea sur la rive gauche, qui lui apporte des alluvions et en aval la Prahova forme des ébauches de tresses.

L'autre tronçon affecté par la métamorphose fluviale est celui qui s'étend entre les localités de Piatra et de Puchenii Mirosălăveşti. Ce tronçon est passé en 100 ans d'un style fluvial divaguant à un chenal unique et sinueux. Mais ce chenal est parsemé de bancs alluviaux qui indiquent la formation des pseudo-méandres. Plusieurs éléments justifient cette explication :

- A Piatra, la Prahova forme un chenal unique et des bancs latéraux traversés par des petits chenaux, ce qui est conforme à la phase E au schéma de Hickin (1972) (cf. Figure 52).
- En aval de Stejaru, sur le tronçon incisé, la Prahova a déposé des bancs alluviaux ayant une forme relativement en diagonale par rapport au chenal fluvial unique, d'une manière alternative sur les deux berges (cf. Figure 50). Les bancs alluviaux caractérisés par cette forme sont associés à l'évolution des méandres (Church et Gilbert, 1975). Etant donné le fait que les berges sont fixées par la végétation, il est peu probable que le chenal forme des sinuosités.

Entre Pisculeşti et Puchenii Mirosălăveşti, la Prahova forme un chenal unique et sinueux, qui évolue par le développement des bancs de convexité, par rapport auxquels le chenal fluvial se déplace à l'extérieur en créant une sinuosité (phase D du schéma de Hickin, 1972) (cf. Figure 52). Les bancs latéraux formés sont rapidement colonisés par la végétation. Hickin

(1972) a utilisé en laboratoire un canal en béton, long de 3,7 m, large de 1 m, profond de 15 cm et rempli de 10 cm de sable ; sur ce lit

- de sable, il a créé un chenal ayant 3 m de longueur, 8,5 cm de largeur et 1,3 cm de profondeur et il a assuré en permanence la pente. Ainsi il a obtenu cinq phases de pseudo-méandrage. Dans un premier temps (phase A), des ondulations ont apparu à la surface de l'eau. Dans un deuxième temps (phase B), des bancs mobiles se sont formés dans le chenal ; quand ces bancs ont atteint une des berges, les sinuosités ont commencé se former. Dans un troisième temps (phase C), l'ancien chenal a été abandonné et un nouveau chenal s'est formé à l'extérieur. Dans les phases 4 et 5 (D et E), la sinuosité s'accroît et, en situation de débits élevés, des chenaux secondaires se forment sur les bancs de convexité. Finalement le banc de convexité migre vers l'aval et la berge opposée (concave) est érodée. Ainsi, bien que le chenal n'ait pas de variations de largeur, l'amplitude des sinuosités augmente. Finalement le chenal initial se transforme en un chenal méandro-tressé ; cette phase est considérée une phase d'équilibre. Par rapport au modèle de Hickin qui propose l'évolution d'un chenal rectiligne vers un chenal à méandres, la métamorphose de la Prahova s'est réalisée de chenaux tressés vers des chenaux à méandres.

L'exemple de la métamorphose fluviale de la rivière Prahova n'est pas singulier. Les rivières françaises (exemples : la Drôme, l'Ain, le Drac, le Rhône) ont subi le même type d'évolution, en passant d'un style fluvial en tresses à un style fluvial à méandres où sinueux (Bravard *et al.*, 1999 ; Liébault et Piégay, 2002). Cela confirme la forte sensibilité des hydrosystèmes en tresses, qui répondent rapidement aux changements qui ont lieu dans leurs bassins versants.

**Afin de conclure**, on présente l'exemple d'une autre rivière carpatique roumaine, dont l'activité de tressage a enregistré les mêmes tendances d'évolution que celle de la Prahova. La rivière Crişul Repede descend des Carpates occidentales et puis traverse une région de piémont (Bassin de Vad-Borod, Collines et Plaine d'ouest) ; elle est un affluent du troisième ordre du Danube. Elle a une longueur de 209 km et un bassin versant de 2973 km<sup>2</sup> sur le territoire de la Roumanie ; son bassin versant a une énergie d'environ 600 m sur le territoire de la Roumanie. A la sortie du pays, son débit est d'environ 25 m<sup>3</sup>/s. Petrea *et al.* (2006) ont analysé l'évolution de la rivière entre 1969 et 2000 à partir des documents cartographiques. Selon ces auteurs, le tronçon carpatique, essentiellement sinueux, a enregistré une faible évolution latérale durant la période étudiée ; mais localement ils ont pu constaté l'activation

de l'activité de tressage en relation avec les déforestations des bassins versants de ses affluents. Dans la région de piémont, en amont des barrages-réservoirs de Lugașu de Jos et de Tileagd, la rivière forme des pseudo-méandres dans une bande active qui s'est rétréci sous l'influence des exploitations des graviers et des sables. En aval de ces barrages-réservoirs, la rivière est endiguée ; sous l'influence de l'ensemble de ces facteurs anthropiques, son chenal s'est incisé durant la période étudiée ; l'incision a atteint localement 1,8 m ; ce processus est susceptible d'influencer la stabilité des ponts traversant la rivière.

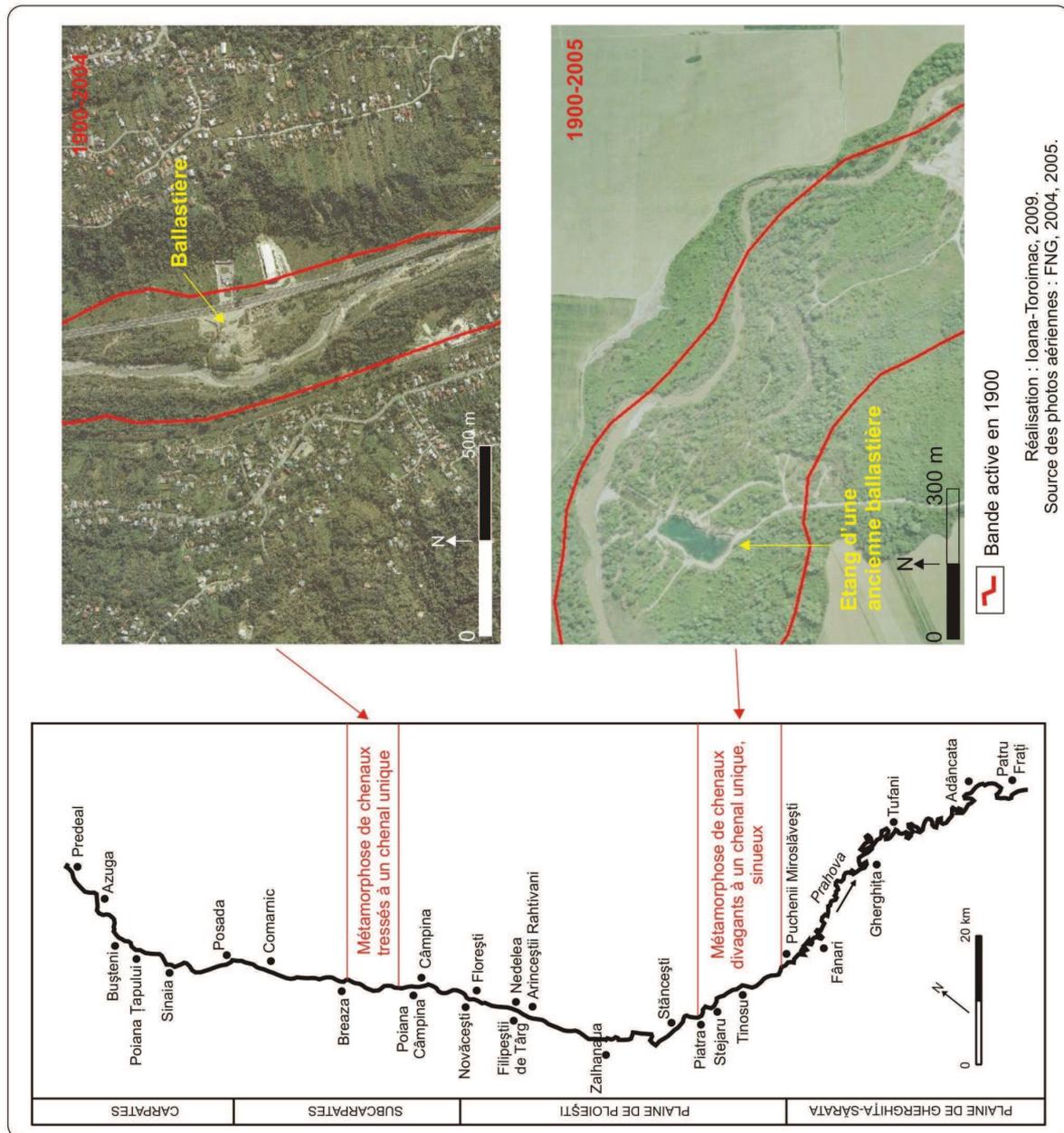


Figure 51. Tronçons de la Prahova affectés par la métamorphose fluviale. Les limites de la bande active de 1900 sont tracées à partir des plans militaires de la DTM.

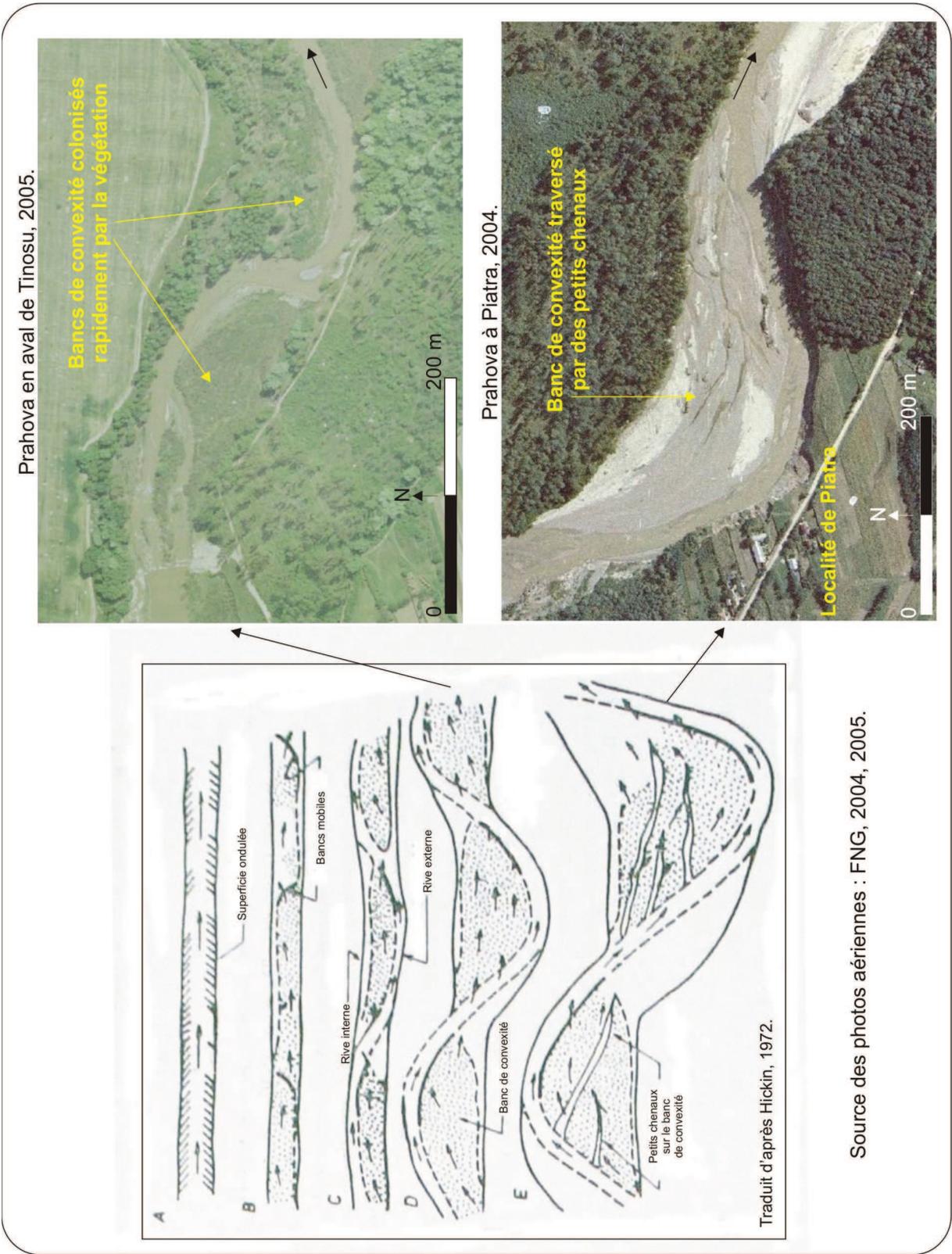


Figure 52. Exemples de pseudo-méandrage sur deux tronçons de la Prahova.

### 2.3.3. Evolution des méandres de la Prahova

La Prahova forme un secteur à méandres en aval de la localité de Puchenii Mirosălăvești. De manière générale, l'indice de sinuosité de ce secteur a baissé depuis 1897 quand il était de 2,387. Puis en 1954 il était de 2,236, en 1980 il était de 2,261 et en 2005 il était de 2,280.

Une première observation dans l'analyse de ce secteur à méandres se réfère aux documents utilisés.

En 1900, ce secteur est représenté sur les plans militaires comme étant formé de trois tronçons. Le premier tronçon s'étend entre les localités de Puchenii Mirosălăvești et de Fânari. La Prahova forme des méandres dans une bande d'alluvions discontinue. Le deuxième tronçon s'étend entre les localités de Fânari et de Movileanca ; le long de ce tronçon la Prahova forme des méandres qui fonctionnent dans une zone inondable ; la bande d'alluvions n'est plus représentée. Le troisième tronçon s'étend entre la localité de Movileanca et la confluence avec l'Ialomița ; sa particularité réside dans le fait que la Prahova forme un chenal à méandres dans une bande d'alluvions. Aussi bien dans le cas du premier tronçon, que dans le cas du dernier, cette bande d'alluvions se développe essentiellement sur la rive convexe. La largeur de la bande d'alluvions (qui contient le chenal) diminue de l'amont du tronçon vers l'aval, d'environ 93 m en amont de Fânari à environ 81 m en aval de Movileanca. La largeur du chenal fluvial augmente dans le même sens, d'environ 21 m en amont de Fânari à environ 49 m en aval de Movileanca. Comment expliquer cette succession de tronçons ? Afin de pouvoir répondre à cette question, il faut comprendre le contexte de la réalisation des levés topographiques utilisés pour l'élaboration des plans militaires. En ce sens on renvoie au § 2.4.1.3. et on rappelle que la Prahova a enregistré plusieurs vagues d'inondations importantes à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et même en 1897, année qui correspond aussi à la réalisation des levés topographiques de terrain. En conséquence il est fort probable que cette succession de tronçons correspond au passage d'une crue importante. De fait la crue de mars 2007 a eu des caractéristiques ressemblantes : 1) les zones peu couvertes de végétation à la fin du moins de mars mettent en évidence les rives constituées de limons d'inondations ; 2) durant cette crue le débit liquide de la Prahova a diminué de la station de Halta Prahova vers la station d'Adâncata sous l'impact du débordement et de l'infiltration d'eau et malgré l'apport des affluents ; 3) étant donné l'apport de l'affluent Teleajen, la zone la plus affectée par des inondations s'étend sur quelques kilomètres en aval de cette confluence. En conclusion on considère que c'est plus sage de considérer que l'extension de la zone inondable sur les plans

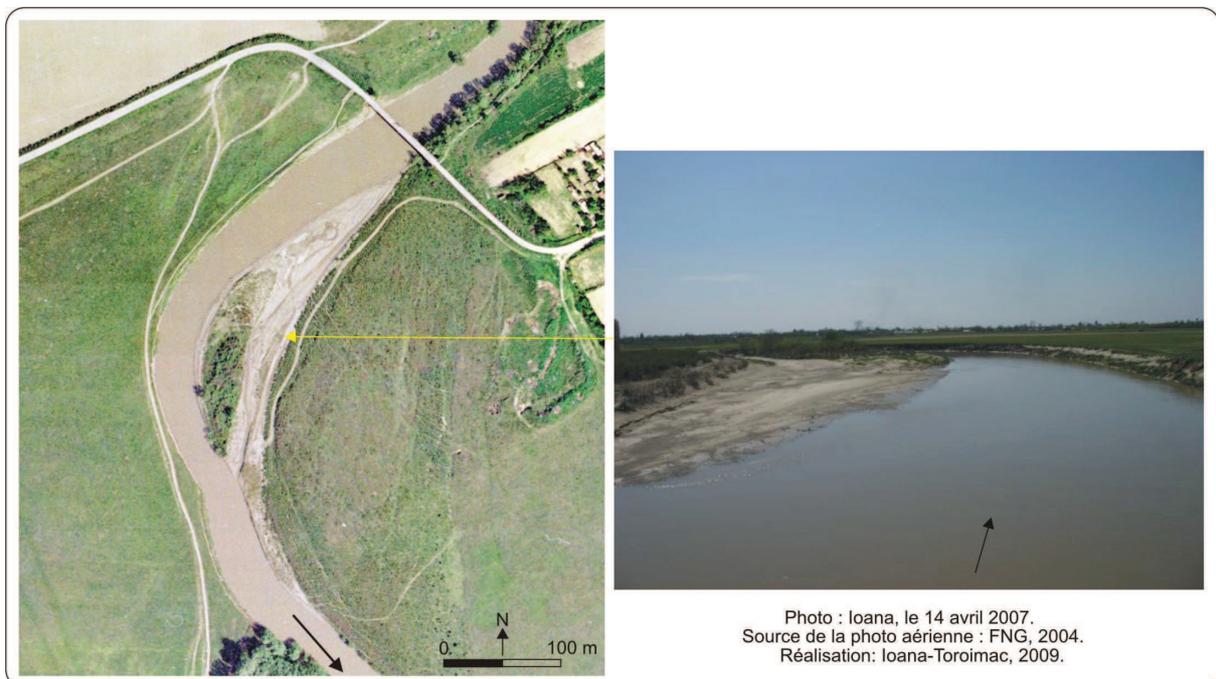
militaires caractérise une situation particulière. La disparition de la bande d'alluvions, ainsi que de la zone inondable sur les cartes ultérieures indiquent seulement que les levés topographiques de terrain n'ont pas été réalisés en période de crue.

Des précautions doivent être prises aussi dans le cas des photos aériennes de 2004-2005. Ces documents ont une échelle fine par rapport aux autres documents utilisés. C'est pour cette raison qu'ils permettent d'identifier des petites sinuosités. En même temps, les berges du chenal sont localement couvertes de végétation forestière, ce qui rend les mesures de la largeur du chenal peu précises.

Malgré ces différences, les bancs de convexité ont une caractéristique commune sur tous les documents analysés (cf. Figure 53 et Figure 54) :

- en situation de hautes eaux, ce banc se détache de la rive par un chenal interne<sup>11</sup> qui canalise l'écoulement de crue ;
- en situation de basses eaux, le banc se rattache à la berge.

Cette particularité indique que la fourniture sédimentaire est forte (Church et Jones, 1982). Vogt (1965) voit par ce chenal l'expression d'une transition vers un style fluvial à chenaux multiples.



**Figure 53. Particularité des bancs de convexité de la Prahova - un exemple à Tufani.**

<sup>11</sup> Ce chenal interne s'appelle « chute alluviale » (Church et Jones, 1982).

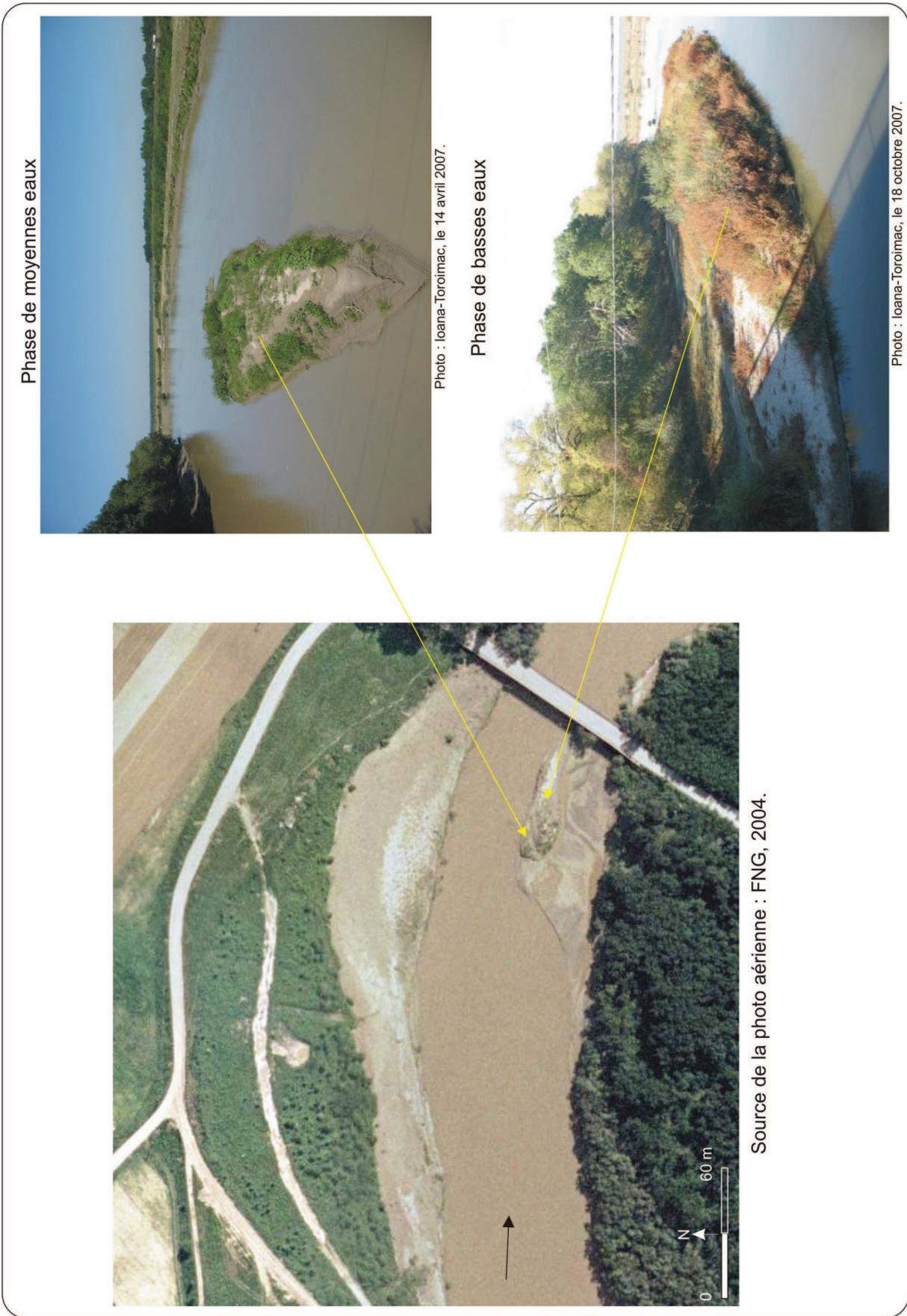
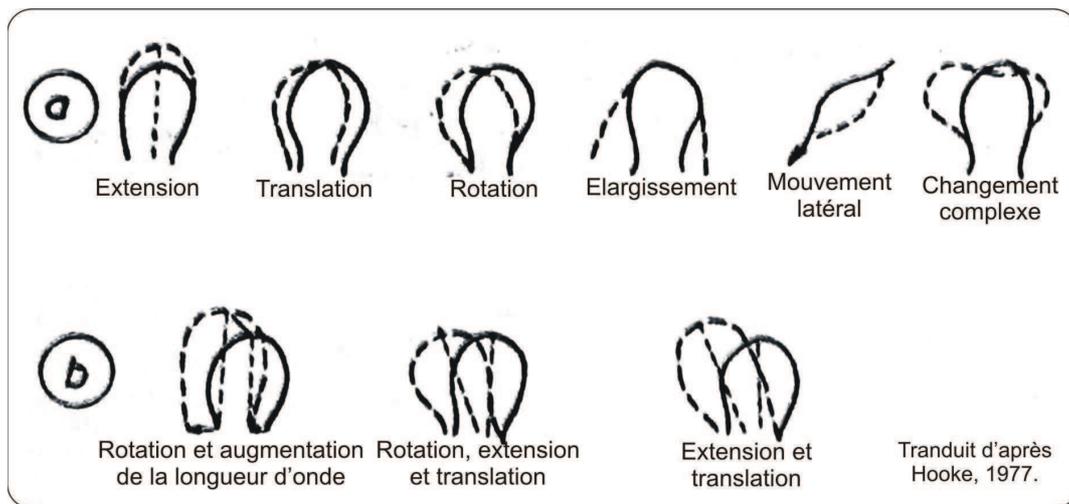


Figure 54. Particularité des bancs de convexité de la Prahova - un exemple à Patru Frați.

### 2.3.3.1. Evolution active avant 1955 versus évolution lente après 1955

Hooke (1977) propose plusieurs types de migrations : simples (translation, extension, rotation, élargissement, mouvement latéral), complexes (rotation et augmentation de la longueur d'onde ; rotation, extension et translation ; extension et translation) (cf. Figure 55).

En ce qui concerne leur tracé, les méandres ont enregistré des changements significatifs entre 1854 et 1900 - des migrations latérales complexes incluant des recoupements aussi. Des changements importants ont été observés aussi entre 1900 et 1955. Dans le cas de la Prahova on retrouve la plupart des types de migration proposés par Hooke (1977) : migrations simples (extension, translation, rotation, élargissement), ainsi que des migrations complexes qui consistent dans l'action combinée de plusieurs migrations simples. Dans certains cas, les méandres se sont recoupés et ultérieurement le chenal fluvial a évolué dans la direction opposée ; dans ces cas il est difficile de reconstituer les étapes d'évolution à cause de l'absence des documents cartographiques entre les deux moments analysés. Entre 1955 et 1977, la migration latérale des méandres a été moins active ; un seul méandre a été recoupé. Après 1977, les migrations latérales deviennent encore moins importantes ; on remarque seulement l'accentuation des petites sinuosités. Ces migrations sont comptabilisées dans le Tableau 18. Dans le contexte de la direction générale de ce secteur de la Prahova (du SO au NE en amont de la localité de Drăgănești et du NO au SE en aval de cette localité), la plupart des méandres, qui ont subi de rotations et des translations, se sont orienté en fonction de ces deux directions. Cette situation est expliquée probablement par l'existence de la zone de subsidence.



**Figure 55. Types de migration latérale ; a) formes simples de migration latérale ; b) forme complexes de migration latérale.**

Méandres 1897-1954	Méandres 1954-1977	Méandres 1977-2005
19 extensions	10 extensions	7 extensions
11 translations	12 translations	-
5 rotations	9 rotations	4 rotations
-	2 élargissements	1 élargissement
17 recoupements	3 recoupements	-
5 méandres stables	10 méandres stables	38 méandres stables

**Tableau 18. Evolution des méandres de la Prahova entre 1897 et 2005. Certains méandres ont enregistré une évolution complexe (extension et translation...). Cette évolution résulte de l'analyse des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.**

Ces migrations latérales se reflètent dans le changement des paramètres des méandres (cf. Tableau 19). Selon Ferguson (1975, 1979) cité par Knighton (1984), le tracé des méandres se caractérisent essentiellement par la longueur d'onde, la sinuosité et la degré d'irrégularité. La longueur d'onde et l'amplitude des méandres de la Prahova a augmenté entre 1900 et 1955 ; après 1955, elle a baissé. L'indice de sinuosité a augmenté durant la période d'analyse. Selon Hickin et Nanson (1975), les méandres évoluent par érosion et accumulation quand ils atteignent une valeur du rapport  $r_c/w$  supérieur à 2 (où  $r_c$  est le rayon de courbure et  $w$  est la largeur du chenal). Dans le cas des méandres de la Prahova, 95% d'entre eux se caractérisent par des valeurs de ce rapport supérieures à 2, d'où résulte leur dynamique active, plus ou moins lente. La largeur du chenal a augmenté depuis 1900. Mais, étant donné les types différents de documents utilisés, ce résultat n'est pas de confiance, parce que la représentation du chenal fluvial dépend des bancs alluviaux latéraux et de la végétation.

Année	Nombre de méandres analysés	Longueur (m)	Longueur d'onde (m)	Indice de sinuosité (m)	Amplitude (m)	Largeur du chenal (m)	Rayon de courbure (m)
1900	52	1064	507	2,098	426	46	172
1955	55	1195	542	2,204	499	53	177
1980	50	1155	516	2,238	479	55	179
2005	50	1152	511	2,254	477	54	179

**Tableau 19. Paramètres des méandres de la Prahova, calculés à partir des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.**

L'application du test de Pettitt sur chaque série de paramètres indique des ruptures statistiques un amont ou en aval de la confluence avec le Teleajen. Donc on considère que le

fonctionnement des méandres change en relation avec cet affluent : en amont les méandres sont plus petits (longueur d'onde, amplitude) et moins sinueux qu'en aval de la confluence (cf. Tableau 20 et Tableau 21).

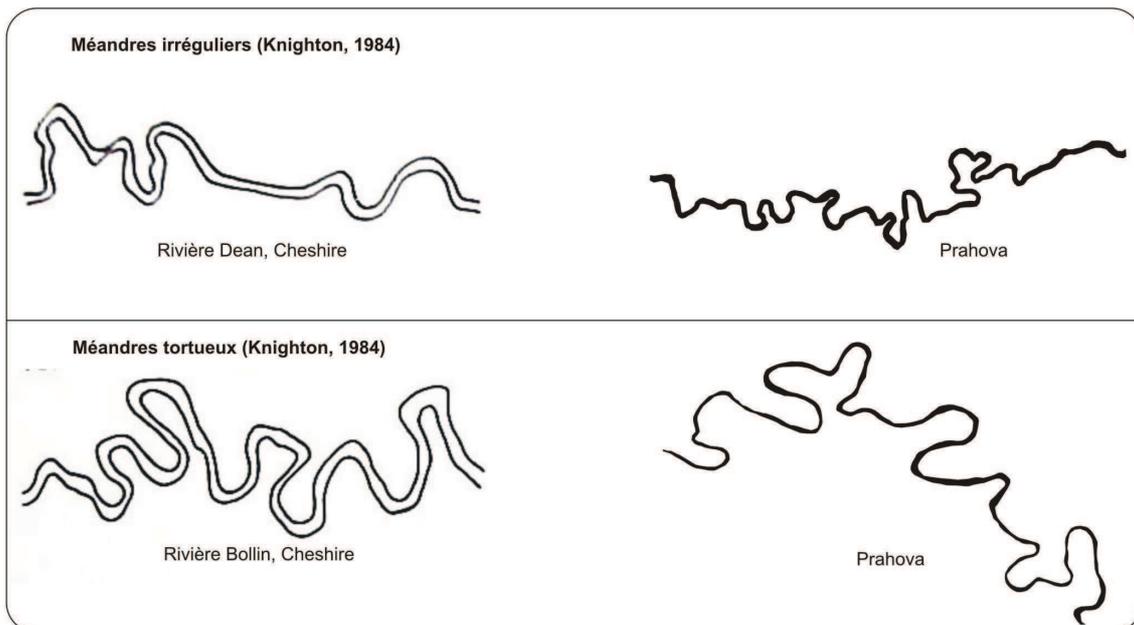
Année	Nombre de méandres analysés	Longueur (m)	Longueur d'onde (m)	Indice de sinuosité (m)	Amplitude (m)	Largeur du chenal (m)	Rayon de courbure (m)
1900	18	670	338	1,982	287	26	114
1955	24	860	413	2,082	356	41	122
1980	22	739	364	2,030	297	42	120
2005	21	735	362	2,030	296	41	121

**Tableau 20. Paramètres des méandres de la Prahova en amont de la confluence avec son affluent Teleajen, calculés à partir des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.**

Année	Nombre de méandres analysés	Longueur (m)	Longueur d'onde (m)	Indice de sinuosité (m)	Amplitude (m)	Largeur du chenal (m)	Rayon de courbure (m)
1900	34	1276	605	2,109	508	56	212
1955	29	1497	644	2,324	630	63	224
1980	28	1481	635	2,332	622	65	226
2005	29	1478	634	2,331	620	65	226

**Tableau 21. Paramètres des méandres de la Prahova en aval de la confluence avec son affluent Teleajen, calculés à partir des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.**

En ce qui concerne le degré d'irrégularité, en amont de la confluence avec le Teleajen, la Prahova forme des méandres irréguliers, selon l'exemple de la rivière Bollin (Cheshire, Royaume Uni) proposé par Knighton (1984). En aval de la confluence avec le Teleajen, les méandres de la Prahova sont essentiellement tortueux selon l'exemple de la rivière Dean (Cheshire, Royaume Uni) proposé par Knighton (1984) (cf. Figure 56).



**Figure 56. Types de méandres de la Prahova selon leur degré d'irrégularité.**

Un exemple démonstratif est celui du tronçon Gherghița- Răsimnicea (cf. Figure 57). Les nombreux chenaux montrent une longue évolution de ce tronçon. Par exemple les méandres situés au sud-est et au sud-ouest de la localité de Drăgănești et le méandre situé au nord de la localité de Gherghița ont été recoupés entre 1855 et 1897. Si la représentation cartographique de 1855 est correcte, le recoupement du méandre situé au sud-est de la localité de Drăgănești a été fait par un chenal fluvial créé sur la rive convexe du méandre et pendant une certaine période de temps l'ancien et le nouveau chenal ont fonctionné ensemble. La même situation a caractérisé le méandre situé au nord de la localité de Gherghița ; le petit chenal qui existe à la base de l'ancien méandre est un indicateur en ce sens. Dans le cas du méandre situé au sud-ouest de la localité de Drăgănești, la reconstitution est plus difficile à faire ; pourtant la forme de ce méandre n'indique pas un resserrement du pédoncule ; c'est une bonne raison pour croire que le recoupement a eu le même scénario que dans les deux autres cas. Ces exemples de recoupement rappellent le type de recoupement par déversement<sup>12</sup> ; il est caractéristique pour les rivières à régime hydrologique contrasté et dont les lits alluviaux sont constitués de matériaux grossiers, ce qui pourrait s'appliquer dans le cas de la Prahova, parce que, même

<sup>12</sup> La Prahova recoupe ses méandres par tangence aussi. Dans le cas, le recoupement se fait de manière progressive par resserrement du pédoncule. Le chenal recoupé est très incurvé, isolé du chenal principal par des bouchons alluviaux construits aux extrémités et rempli de limons et d'argiles de débordement. L'exemple le plus typique est celui du recoupement du méandre du Cotul Grecului, situé entre les localités de Brazii et d'Adâncata (cf. Figure 104 de la troisième partie de la thèse). Contrairement aux autres méandres recoupés, qui sont peu végétalisés et inondables, le méandre de Cotul Grecului est complètement végétalisé.

actuellement le lit de son chenal est constitué de graviers, de sables et de limons. Les nouveaux chenaux créés par ce type de recouplement ont rapidement évolué. Les ox-bow formés sont inondables ; dans certains cas l'eau s'accumule dans l'ancien chenal en formant un lac. Le phénomène de recouplement des méandres est un indicateur d'instabilité et peut être considéré comme une réponse à une sinuosité excessive qui diminuent les pentes dans les méandres, de telle façon que, par réduction de la compétence du chenal, la charge de fond ne peut plus être transportée (Bravard et Petit, 2000). Par recouplement, la pente augmente et le cours d'eau peut transporter la charge de fond. Les recouplements des méandres nécessitent des conditions préparatoires, mais ils se produisent le plus souvent en réponse à un événement de fréquence rare (Bravard et Petit, 2000). Entre 1897 et 1954, trois méandres situés au sud de la localité de Drăgănești et un méandre situé à Răsimnicea ont été recoupés ; les autres ont évolué latéralement ; le chenal de la Prahova a réoccupé un méandre abandonné. Entre 1954 et 1977, les réajustements latéraux sont moins importants. Et entre 1977 et 2004, les méandres de la Prahova sont stables, exception faite par une petite sinuosité du deuxième méandre représenté sur la Figure 57. En comparant le type de recouplement des méandres observés entre 1855 et 1900 avec la situation actuelle quand la dynamique des méandres est lente, il résulte que les caractéristiques de l'hydrosystème Prahova ont beaucoup évolué. Elle –est passé d'un hydrosystème très énergétique dans la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle à un hydrosystème beaucoup moins énergétique actuellement.

Les confluences évoluent par les mêmes mécanismes. Par exemple la confluence Ialomița-Prahova a une évolution aussi bien naturelle qu'anthropique (cf. Figure 58). Entre 1855 et 1897, la confluence se déplace vers l'amont par le recouplement d'un méandre. Puis entre 1897 et 1954, elle se déplace vers l'aval après le recouplement d'un autre méandre. Entre 1954 et 1977, la confluence se caractérise par une faible évolution latérale. En 1982, sur la rivière Ialomița, en amont de la confluence avec la Prahova, un barrage et un lac d'accumulation ont été construits dans la localité de Dridu ; cet aménagement a un rôle hydroénergétique, d'irrigation et pour la régularisation du cours de l'Ialomița, qui inondait facilement son lit en aval de la confluence. Suite à la construction de ce barrage-réserveur, la confluence des deux rivières a été déplacée anthropiquement vers l'aval (Grecu *et al.*, 2008). Donc en amont de la confluence actuelle, sur environ un kilomètre, la Prahova s'écoule par l'ancien chenal de l'Ialomița. L'ancienne confluence (de 1954 et de 1977) est actuellement utilisée pour l'exploitation de sables et de graviers. Et le paléocours de l'Ialomița, abandonné à la sortie du lac de Dridu, est actuellement un terrain à marais, occupé par une végétation spécifique.

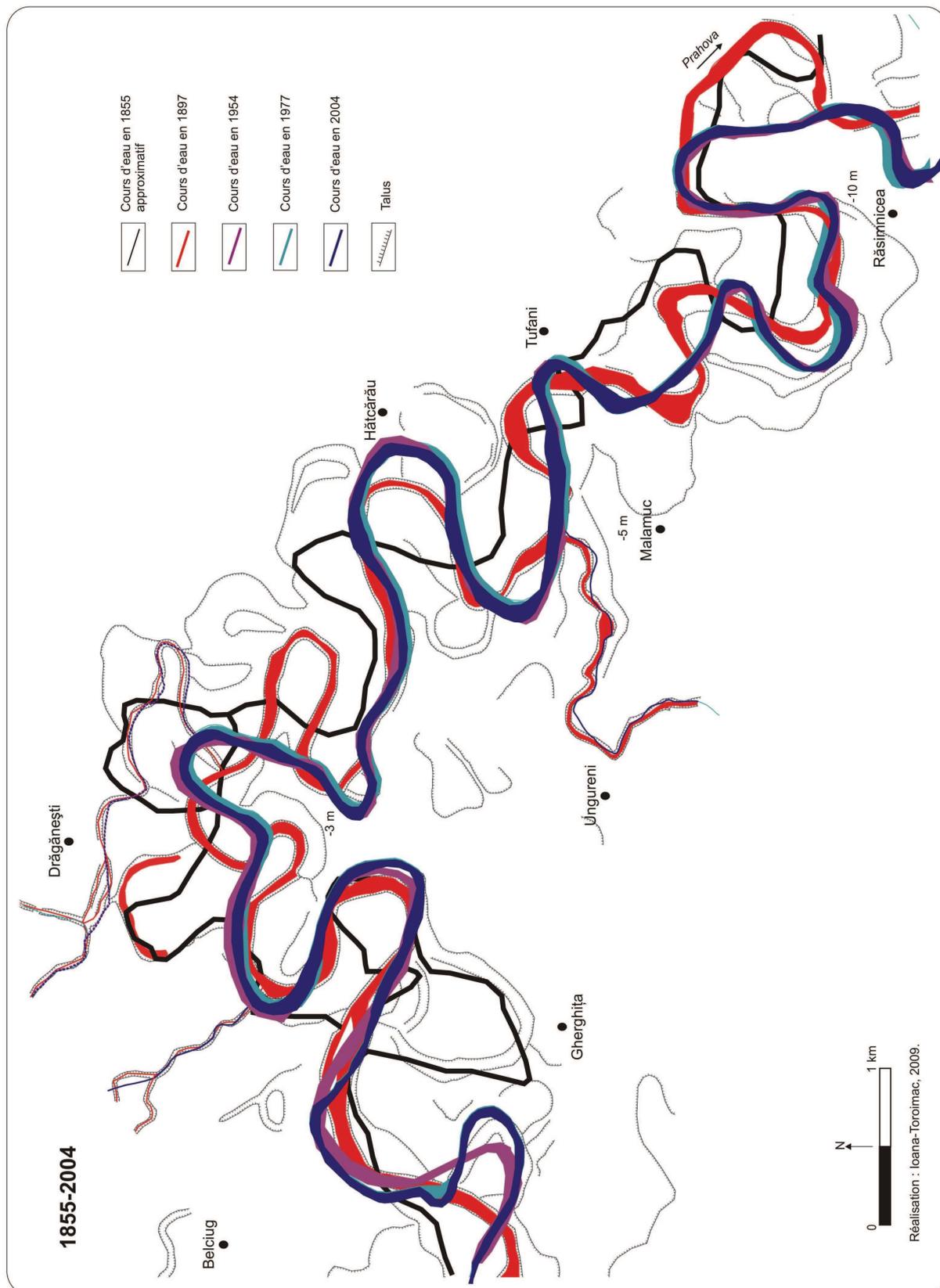


Figure 57. Evolution latérale d'un tronçon à méandres de la Prahova entre 1855 et 2004. Les éléments de la légende sont tracés à partir des cartes de Szathmary de la BAR, des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.



La migration des méandres est considérée un mécanisme propre d'auto-organisation à la recherche d'un état d'équilibre. Mais pourquoi l'évolution des méandres a-t-elle été plus active entre 1854 et 1955 qu'après 1955 ? Selon Hooke (2008), la migration du chenal fluvial dépend de l'écoulement, de l'occupation du sol et de l'érodabilité des berges. Dans les cas de la Prahova, ces hypothèses sont toutes trois vérifiées : 1) la fréquence et la magnitude des inondations ont diminué durant le 20<sup>ème</sup> siècle ; 2) la réduction granulométrique de la charge solide est probablement la cause du développement des berges constituées actuellement d'alluvion fines ; or Ikeda (1989) explique le cas des méandres confinés qui sont formés dans des sédiments fins qui bloquent leur migration latérale ; 3) le développement de la végétation (et surtout de la végétation forestière), spontanément ou anthropiquement, diminue la vitesse de migration latérale du chenal.

Ces hypothèses sont vérifiées pour le tronçon Puchenii Mirosălăvești-Fânari.

1) En ce qui concerne la première hypothèse, on a pu constater sur le terrain, juste après la crue de mars 2007, l'existence d'une bande latérale d'alluvions (cf. Figure 59), ce qui rappelle la représentation faite sur les plans militaires de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Cela indique que cette bande d'alluvions est réactivée après chaque crue importante.

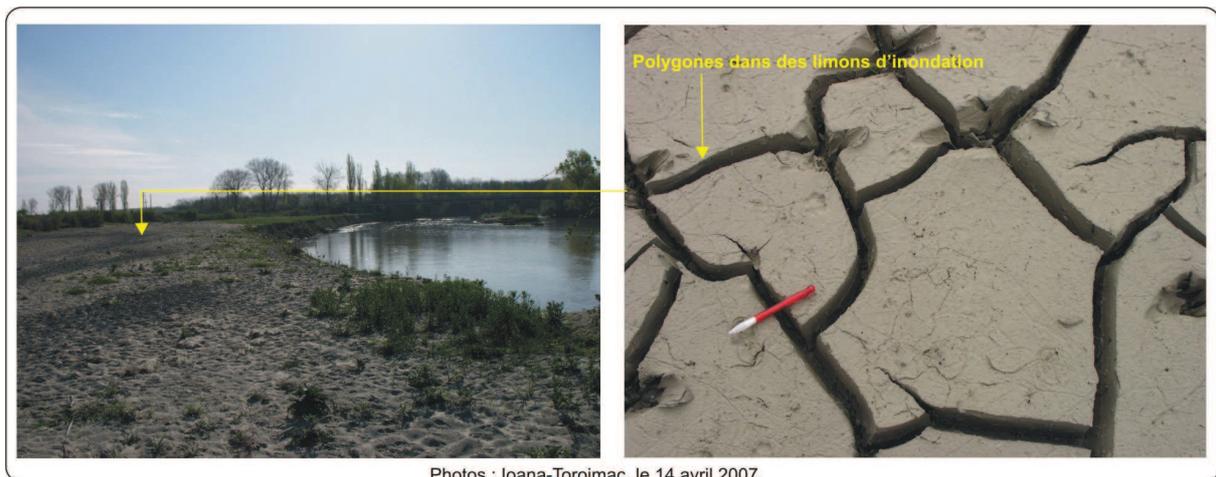
2) En ce qui concerne la deuxième hypothèse, la Figure 59 montre que les berges de la Prahova sont constituées de limons d'inondation.



**Figure 59. Berges constituées de limons d'inondations à Fânari, ce qui montre le rôle des débordements dans l'évolution de la plaine alluviale.**

La structure de cette berge, constituée de plusieurs couches successives d'alluvions fines, indique des débordements successifs de la Prahova sur ce tronçon. En même temps cela confirme que la construction de la plaine alluviale se fait par accrétion verticale (Fenneman,

1906, cité par Bravard et Gilvear, 1993) ; cet exhaussement est fréquent dans les aires de subsidence conformément à Fisk (1947), cité par Bravard et Gilvear (1993). Localement ces berges sont affectées par l'écroulement, ce qui fait que ces alluvions contribuent de nouveau à la charge fine du cours d'eau. Cette situation est caractéristique pour l'ensemble du secteur à méandres. Par exemple à Patru Frați, avant la confluence avec l'Ialomița, le lit d'inondation est couvert d'alluvions fines argilo-limoneuses (cf. Figure 60).



Photos : Ioana-Toroimac, le 14 avril 2007.

**Figure 60. Le lit d'inondation de la Prahova à Patru Frați qui présente des polygones de dessiccation. Les polygones de dessiccation se forment d'habitude dans des alluvions argileuses qui se dessèchent.**

3) En ce qui concerne la troisième hypothèse, la Figure 61 montre une évolution importante de la superficie forestière surtout entre 1897 et 1954 quand la superficie forestière est passée de 0,12 km<sup>2</sup> à environ 4,5 km<sup>2</sup>. Les forêts sont essentiellement d'origine naturelle ; elles se sont développées probablement à cause de la diminution des contraintes de la rivière. Ces ripisylves sont constituées essentiellement de peuplier. La forêt de Gherghița, constituée de différentes espèces de chêne, existait déjà à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, mais elle se trouvait plus au sud par rapport au périmètre représenté ; dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, la ripisylve évolue vers le sud et rejoint cette forêt. En effet la superficie de la ripisylve du secteur à méandres a augmenté tout le long du 20<sup>ème</sup> siècle (cf. Tableau 25). Les ripisylves des lits d'inondation représentent des filtres en situation de hautes eaux : elles retiennent et fixent les alluvions dans le lit, ce qui diminue l'érosion en aval et donc augmente la stabilité des berges, en diminuant l'intensité des processus de dynamique latérale (Diaconu *et al.*, 1971). Ces forêts ont également le rôle de protéger contre les inondations en diminuant la magnitude des crues (Diaconu *et al.*, 1971). Cette problématique est développée dans la troisième partie de cette thèse.

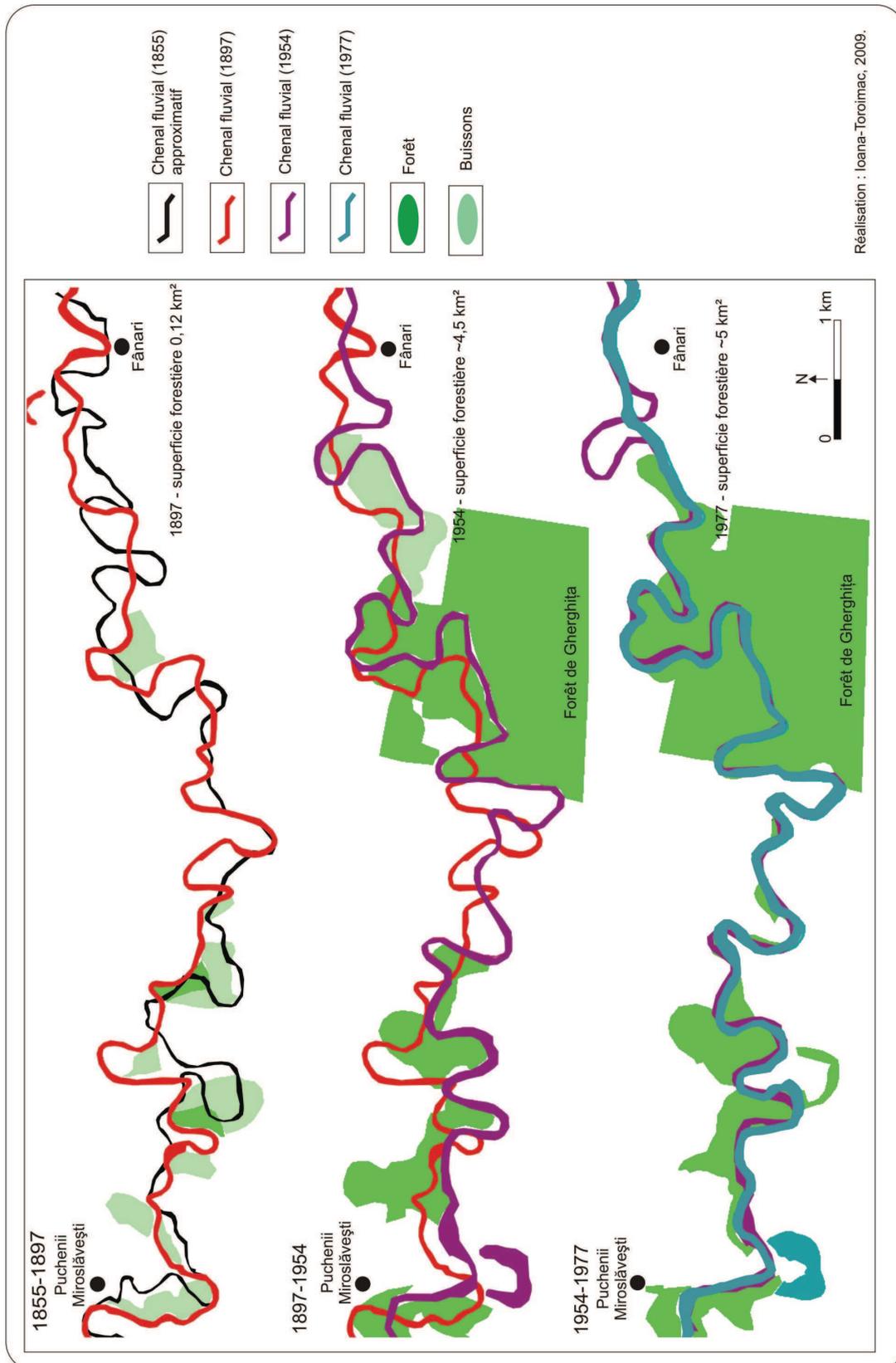
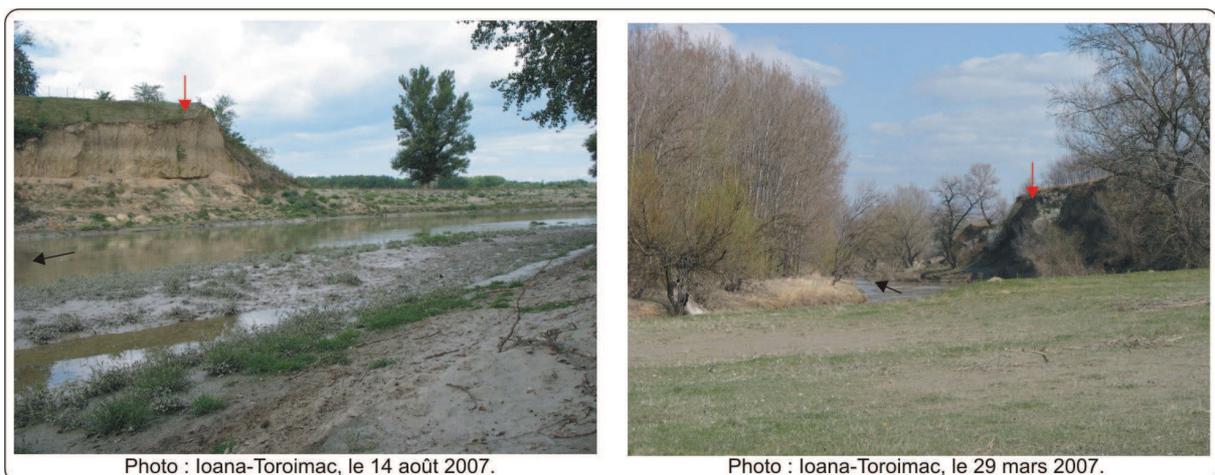


Figure 61. Evolution d'un tronçon à méandres de la Prahova, situé entre les localités de Puchenii Mirosălăvești et de Fânari, et augmentation de la superficie forestière entre 1897 et 1977. Les éléments de la légende sont tracés à partir des cartes de Szathmary de la BAR, des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.

### 2.3.3.2. Prahova - méandres ancrés

L'évolution des méandres de la Prahova, décrite ci-dessus (extensions, translations, recoupements...), est typique pour l'évolution des méandres libres. En général les méandres libres se caractérisent par une bonne corrélation entre leur amplitude et leur longueur d'onde (Bravard et Petit, 2000). La relation entre l'amplitude et la longueur d'onde des méandres de la Prahova est statistiquement significative. Mais les couples de longueur d'onde-amplitude sont dispersés par rapport à la droite de régression linéaire. Selon Bravard et Petit (2000), les méandres ancrés ont des amplitudes supérieures par rapport aux amplitudes des méandres libres à longueur d'onde égale. Cela pourrait indiquer que l'évolution des méandres de la Prahova est « bloquée » par une contrainte. Même dans le cas des rivières à méandres libres, différentes contraintes naturelles peuvent bloquer leur fonctionnement naturel (exemple : affleurements rocheux, bilan incision-accumulation qui favorise l'exhumation du substratum...). Dans de tels cas, on parle de méandres ancrés. Ce type de méandres a été mis en évidence pour la rivière Rulles dans le sud de l'Ardenne (Petit, 1989) ; dans ce cas, la schistosité empêche la migration latérale des méandres. En effet la Prahova s'écoule dans un « système » d'anciens chenaux par rapport auxquels le chenal actuel s'est incisé de 2-3 m. De plus la Prahova s'écoule, sur sa rive droite, à la base d'une terrasse du Pléistocène supérieur - Holocène, qui atteint localement 10 m de hauteur. La forme de cette terrasse conserve la forme des anciens méandres de la Prahova. En conclusion il est fort probable que la Prahova forme des méandres ancrés.



**Figure 62. Terrasse du Pléistocène supérieur-Holocène bloquant la migration latérale de la Prahova à Brazii. La terrasse a une dizaine de mètres de hauteur.**

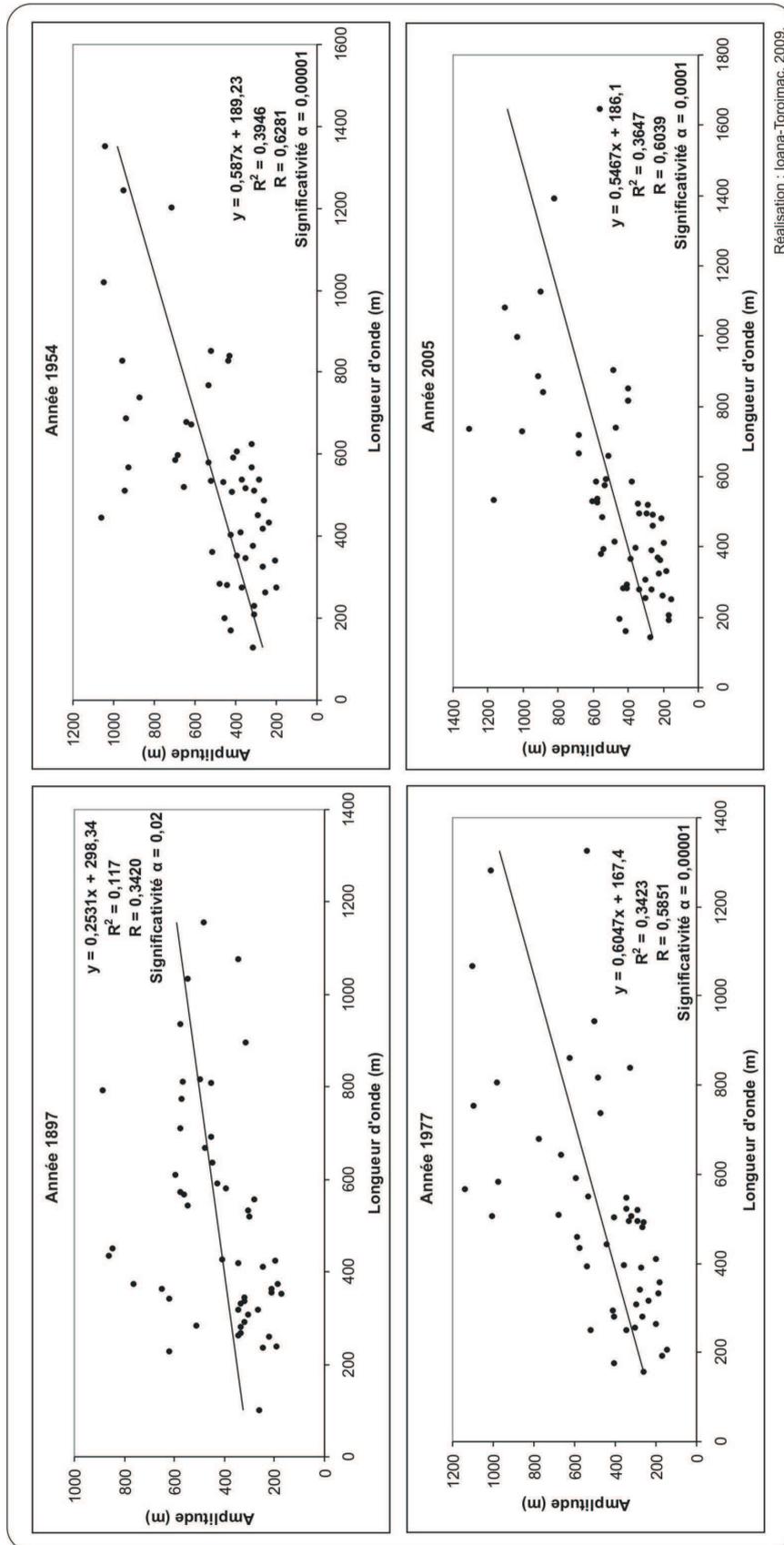


Figure 63. Corrélation entre la longueur d'onde et l'amplitude des méandres de la Prahova (secteur Puchenii Mirosălăvești-confluence Ialomița-Prahova). Ces paramètres sont calculés à partir des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.

## 2.4. Facteurs responsables de l'évolution de la Prahova

Les résultats obtenus dans les paragraphes antérieurs indiquent une possible diminution de la charge solide de fond, ainsi que de la fréquence et de la magnitude des crues. Par conséquent l'objectif de ce paragraphe est de clarifier cette problématique associée aux causes responsables de l'évolution de la rivière Prahova.

Ce paragraphe repose sur l'hypothèse que les principales sources de sédiments de la rivière Prahova sont les versants carpatiques et subcarpatiques, ainsi que ses berges et les berges des cours d'eau de son bassin versant. Dans le contexte de l'absence de données concernant la charge solide de fond, ce paragraphe propose d'investiguer les plus importantes modifications apparues à l'échelle du bassin versant durant les 150 dernières ans, susceptibles de provoquer des modifications de la charge solide de fond.

### 2.4.1. Variations climatiques

#### 2.4.1.1. La fin du Petit Âge Glaciaire

Le PAG, approximatif 1550-1850 A.D., est une période caractérisée par des températures moyennes plus basses que les températures actuelles. Ce concept a été proposé par un historien ; dans sa thèse, Le Roy Ladurie (1983) identifie l'existence de cette période à partir de données d'archive sur les dates des moissons en France. Puis cette période froide a été remarquée dans les peintures de Pieter Brugel l'Ancien<sup>13</sup>, de Pieter Brugel le Jeune<sup>14</sup>, de Hendrick Avercamp<sup>15</sup> qui mettent en évidence des paysages d'hiver froid au 16<sup>ème</sup> et au 17<sup>ème</sup> siècle, respectivement dans les Flandres et dans les Pays Bas. Les Flandres et les Pays Bas ne connaissent plus des hivers très enneigés et des rivières complètement gelées. Actuellement différents types d'analyses confirment l'hypothèse de l'existence du PAG. Ultérieurement le PAG a été confirmé par des analyses scientifiques : analyses du contenu en isotopes d'oxygène, analyses palynologiques et dendrochronologiques (Grove, 1988).

---

<sup>13</sup> A voir les peintures : Les cycles des mois : janvier, Chasseurs dans la neige, Le Trébuchet.

<sup>14</sup> A voir les peintures : Le paiement de la dîme.

<sup>15</sup> A voir les peintures : Paysage d'hiver, Scène sur la glace près d'une ville, Patineurs, Paysage d'Hiver, Scène sur la Glace,.

Dans les Alpes, le PAG s'étend entre 1350-1900 conformément aux analyses réalisées sur chironomidae du Lac Anterne (Alpes françaises du nord) par Millet *et al.* (2009). Les glaciers alpins ont avancé essentiellement vers 1600/1640, 1680, 1720, 1820, 1850 (Nicolussi et Patzelt, 1996). Dans la littérature géomorphologique, le PAG est perçu comme une période caractérisée par l'intensification des processus de versant, ce qui a pour conséquence un excédent des entrées de matériaux grossiers, dépassant la capacité de transport des rivières ; en conséquence les rivières forment des tresses et leurs lits s'agradient et s'élargissent ; certaines de ces rivières sont soumises à la métamorphose fluviale, en passant d'un style à méandres à un style fluvial tressé (Lamb, 1995). Ces effets ont été remarqués pour les rivières alpines françaises (Bravard, 1989, 1998, 2000). Le même auteur estime que ces rivières étaient probablement sous le contrôle de fortes crues et d'une très abondante charge de fond mobilisée dans les têtes des bassins montagnards ou dans les vallées, au détriment de stocks plus anciens ; de plus ces cours d'eau « n'auraient pas connu de crues autres qu'épisodiques entre le 9<sup>ème</sup> et le 14<sup>ème</sup> siècle (Rhin), le 14<sup>ème</sup> siècle (Rhône), ou le 15<sup>ème</sup> siècle (Loire, Garonne) ». Mais Bravard (1989) rappelle que cette période coïncide avec une croissance démographique dans les Alpes françaises, ce qui aurait pu influencer la dynamique des processus de versant ! Salvador (1991) prend l'exemple de la métamorphose fluviale des rivières Isère et Drac, qui sont passées d'un style à méandres au tressage moderne. « Au début du 17<sup>ème</sup> siècle, l'Isère coulait dans un chenal unique après la confluence (avec le Drac), probablement méandrique à l'aval de Tullins ». Une phase d'instabilité liée à un accroissement de charge semble affecter le cours d'eau dans la partie amont dès le début du 18<sup>ème</sup> siècle. Le tressage de l'Isère a évolué progressivement jusqu'au début du 19<sup>ème</sup> siècle, puis les processus se sont stabilisés. Jusqu'à la fin du 14<sup>ème</sup> siècle, le Drac était suffisamment « calme pour qu'on pût y établir des ouvrages hydrauliques et des moulins » (Bouchayer, 1925, cité par Salvador, 1991). Puis, vers 1632-1636, son chenal est « comblé de grands bois et autres immondices » selon le même auteur et le tressage se développe. Mais les deux rivières réagissent de façon différente aux changements climatiques en fonction de la position par rapport aux sources de matériaux et en relation avec leur pente.

L'existence du PAG est confirmée pour l'Europe Centrale. Prenons l'exemple des côtes baltiques de la Pologne (à environ 54° de latitude nord et 5-7°C en moyenne par an), qui représente un milieu favorable à ce type de recherches : en fonction de la variabilité du climat, cette région évolue sous l'action de l'océan ou en régime continental. Une série d'analyses (datations des isotopes de carbone, palynologiques, dendrochronologiques) atteste l'existence

du PAG dans cette région. Par exemple l'expansion de certaines espèces (exemple : Sphagnum) au détriment d'autres montre un climat froid, humide entre 1500 et 1650 ap. J.C. et sec entre 1800 et 1850 ap. J.C. (Lamentowicz *et al.*, 2008). Starkel (2002) confirme que, durant le PAG, le climat a été plus humide, avec des événements extrêmes qui ont déterminé des crues/inondations et donc une activité fluviale très intense. Le même auteur associe les périodes caractérisées par une fréquence élevée des événements extrêmes avec la baisse de l'activité solaire. Starkel (2005) associe le PAG avec l'érosion intense du sol durant le 14<sup>ème</sup> et le 16<sup>ème</sup> siècle. Le même auteur cite Szumanski (1977) explique que le cours moyen de différentes rivières a changé de méandres aux tresses. 1977) explique que le cours moyen de différentes rivières a changé de méandres aux tresses. Starkel (2006) confirme que les rivières de différentes régions de l'Europe ont tendance à former des tresses. Selon Klimeck et Latocha (2007), qui cite Bradzil (1992), le PAG est aussi confirmé pour la région de Bohême (République tchèque). Bartholy *et al.* (2004) analyse le climat durant les 1000 dernières années dans le bassin carpatique à partir de la collection de Rethly (informations de nature météorologique - observations et autres sources historiques). Ils expliquent que, dans le bassin carpatique, la période 1350-1450 a été froide (surtout en hiver) ; un réchauffement climatique se ressent après 1700 surtout en hiver ; les dernières décennies froides l'ont été en 1810-1820 et 1820-1840. La fin du PAG s'est manifestée aussi bien par le réchauffement du climat, que par la modification du régime pluviométrique et hydrologique. Issar (2003) explique que la fin du PAG s'est manifestée dans l'Europe Centrale par le changement du régime pluviométrique et hydrologique vers l'intensification des pluies estivales et des crues d'été.

Pour la Roumanie, les datations isotopiques et les études palynologiques, qui pourraient apporter des informations concernant cette période s'arrêtent avant. Elles se concentrent essentiellement sur la fin de la plus récente glaciation, afin de confirmer l'existence de cette période dans les Carpates roumaines. En investiguant les isotopes dans leur contenu d'oxygène des stalagmites de la grotte Urșilor, située dans les montagnes Apuseni, dans l'ouest de la Roumanie, Onac *et al.* (2002) expliquent que la variabilité climatique de cette région correspond à la variabilité climatique du reste de l'Europe et qu'elles sont liées au fonctionnement du système océan-atmosphère sur l'Atlantique du Nord ; en ce sens ils prennent l'exemple de l'Optimum Climatique de l'Holocène (6,8-4,4 ka). Holmlund *et al.* (2005) estiment que le glacier de la grotte de Scărișoara est une archive du climat et que des investigations en ce sens se déroulent actuellement ; mais ces auteurs ne se prononcent pas

encore sur l'existence du PAG en Roumanie. Les études palynologiques de Feurdean et Bennike (2004) et de Feurdean *et al.* (2007) sur la végétation des plusieurs sites des Carpates s'arrêtent respectivement vers 8000 BP et vers 10500 BP, confirmant la migration progressive de la végétation avant et après l'époque glaciaire. Les études palynologiques de Björkman *et al.* (2003) sur les montagnes de Gutâi, situées dans le nord-ouest de la Roumanie s'arrêtent dans le temps présent ; mais leurs conclusions insistent sur le rôle du facteur anthropique dans le développement de la végétation durant les 1000 dernières années. Les études dendrochronologiques insistent, en général, sur le temps récent. L'épaisseur des cercles de croissance des espèces d'*Abies alba*, *Picea abies*, *Fagus sylvatica* des montagnes Apuseni, situées dans la partie occidentale de la Roumanie, à plus de 1600 m d'altitude, ont enregistré des diminutions en 1865, 1900, 1920 et 1940 ; cela indique un refroidissement du climat (surtout en automne, en hiver et au printemps) et des précipitations peu abondantes au printemps, surtout en avril (Kern et Popa, 2007). L'épaisseur peu importante des cercles de croissance de l'espèce de *Pinus cembra* des montagnes de Călimani, situées dans les nord des Carpates orientales roumaines, à environ 1800 m d'altitude, indique l'extension temporelle du PAG jusqu'en 1920, dans la zone alpine selon Nagy *et al.* (2004). Le PAG est confirmé pour les Carpates par les analyses dendrochronologiques de Popa et Kern (2009), qui portent sur l'espèce de *Pinus cembra* L. (sous-fossile) extrait de montagnes de Călimani (situé dans le nord de la Roumanie), 1450-1850 m d'altitude, apportent les informations nécessaires. L'épaisseur des cercles de croissance est corrélée aux températures d'été, ce qui a permis la reconstruction des températures moyennes d'été entre 1163-2005. Conformément à ces résultats, le PAG a laissé son empreinte dans les montagnes de Călimani entre les années 1370 et 1630 et puis dans les décennies 1820 et 1840. Le réchauffement climatique récent est évident depuis 1980. Après 1920, la fréquence et la sévérité d'événements froids ont connu une tendance déclinante (par rapport à la période 1740-1920) (Kern et Popa, 2007). Ces résultats sont conformes aux tendances climatiques qui caractérisent l'Europe Centrale. Au contraire la période froide 1630-1740, qui correspond au Minimum de Maunder, n'a pas été enregistrée par des changements environnementaux dans les Carpates orientales (Popa et Kern, 2009). A partir d'une approche dendromorphologique, Urdea (1998), conclut que les pins alpestres se sont installés sur les cônes d'éboulis des Montagnes Retezat (altitude maximales 2509 m, situées dans les Carpates méridionales roumaines) vers 1860 ; ces cônes se sont relativement stabilisés vers 1935 ; il confirme ainsi l'activité périglaciaire intense durant le PAG dans les Carpates roumaines.

En prenant l'exemple des autres rivières montagneuses européennes, le PAG a probablement eu des conséquences sur l'évolution des rivières carpatiques roumaines (intensification de l'activité de tressage durant le PAG et diminution de cette activité à la fin du PAG) bien que cet aspect ne soit pas encore directement démontré. Les rivières ayant dans leur bassin versants des ressources importantes d'alluvions (exemple : les bassins versants affectés par les glaciations) ont probablement été les plus affectées.

#### 2.4.1.2. Diminution du cumul de précipitations depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle

Conformément aux études du département de climatologie de l'ANM, les cumuls annuels de précipitations ont enregistré une tendance à la baisse sur la plupart du territoire de la Roumanie (et une tendance ascendante localement au nord-est et au sud) durant la période 1891-2007 ; après 1961 le déficit pluviométrique s'intensifie dans le sud de la Roumanie (Busuioc *et al.*, 2008). Selon les mêmes auteurs, la plus importante tendance à la baisse a été enregistrée dans la région de la Courbure des Carpates : moins 164 mm entre 1891 et 2007 (cf. Figure 64).

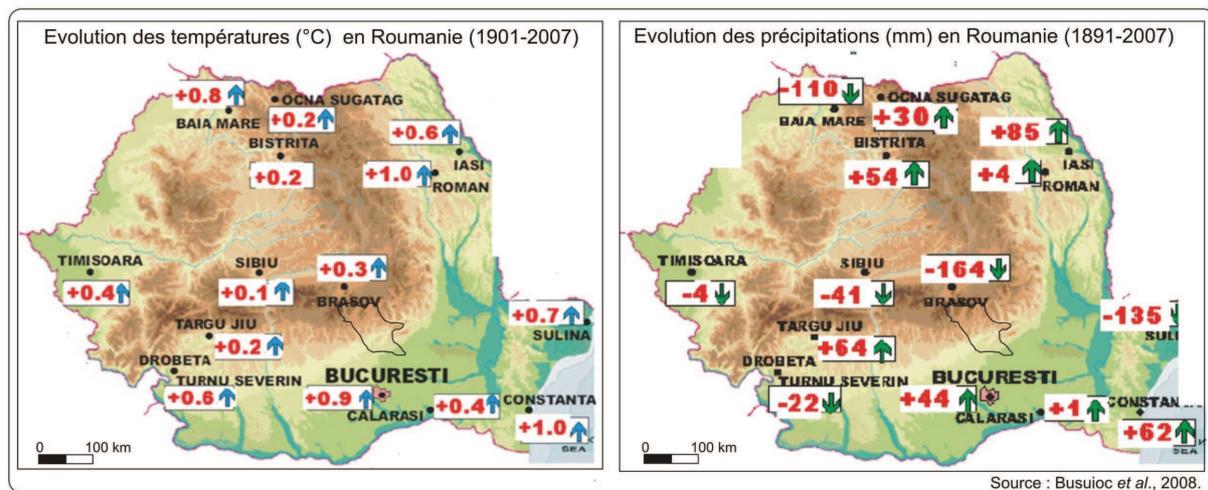


Figure 64. Evolution des températures et des précipitations en Roumanie durant le 20<sup>ème</sup> siècle. Le bassin de la Prahova est représenté en trait noir.

La baisse de la quantité de précipitations n'a pas été uniforme. Depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, se sont succédé plusieurs périodes caractérisées par des déficits ou des excédents pluviométriques. Les périodes excédentaires et déficitaires sont en général associées à des changements dans la circulation atmosphérique générale (Busuioc et Von Storch, 1996 ; Râmbu *et al.*, 2002 ; Boroneanț et Ioniță, 2005 ; Tomozeiu *et al.*, 2005 ; Ghioca, 2005a, 2005b 2006). Selon les mêmes auteurs, l'augmentation des précipitations ultérieure aux années 1930 est due à l'intensification des flux du sud-ouest et à une diminution de l'intensité

de l'Oscillation Nord-Atlantique ; la diminution des précipitations en Roumanie après 1980 correspond au renforcement de l'Oscillation Nord-Atlantique (Boroneanț et Ioniță, 2005). Cette rupture statistique pluviométrique en relation avec l'Oscillation Nord-Atlantique a été identifiée dans la région de la Courbure des Carpates aussi (Zaharia *et al.*, 2002 ; Zaharia et Ioana-Toroimac, 2007).

La température de l'air a enregistré une croissance de 0,5°C entre 1901 et 2007 pour la région extra-carpatique roumaine (Busuioc *et al.*, 2008). Les événements extrêmes de la période 1961-2000 se caractérisent par (selon Busuioc *et al.*, 2008, et confirmé par Boroneanț, 2007) : une augmentation de la fréquence annuelle des jours très chauds (>30°C) ; une diminution de la fréquence des jours froids (<0°C) ; une augmentation de la température moyenne minimale en été ; une augmentation de la température moyenne en hiver et en été (jusqu'à 2°C au sud et au sud-est en été).

Dans ce contexte, cette analyse porte sur la variabilité des cumuls annuels de précipitations à la région de Courbure depuis les années 1960, période pour laquelle les séries de données provenant de l'ANM sont disponibles. On a choisi de travailler sur l'ensemble de la région de Courbure afin de pouvoir comparer les résultats obtenus pour le bassin de la Prahova avec les tendances régionales. A cette occasion, deux autres paramètres sont analysés : les débits modules mensuels et les débits modules mensuels de matières en suspension aux stations hydrométriques de la même région et pour la même période de temps ; les séries de données utilisées proviennent de l'INHGA.

Dans un premier temps, les ruptures statistiques sont détectées. Dans un deuxième temps, les tendances statistiques des séries de données sont analysées. La détection des ruptures statistiques facilite la compréhension des tendances statistiques des séries de données qui peuvent être analysées avant et après cette rupture. En ce sens les tests de Pettitt et de Mann-Kendall ont été appliqués sur les séries chronologiques des cumuls annuels de précipitations. Le test de Pettitt (1979) est un test non-paramétrique, dont l'hypothèse retenue concerne l'homogénéité de la série de données ; si l'hypothèse est rejetée, alors la série de données n'est pas homogène. Le test de Pettitt est appliqué de manière automatique, au moyen du logiciel Khronostat 1.01 et met en évidence également l'année de la rupture statistique. Le test de Mann-Kendall est un test non-paramétrique, dont l'hypothèse retenue est l'absence de la tendance ; si l'hypothèse est rejetée, alors la série de données se caractérise par une tendance. Le test de Mann-Kendall a été appliqué de manière automatique au moyen d'une macro-fonction appliquée en Excel (Sälmi *et al.*, 2002).

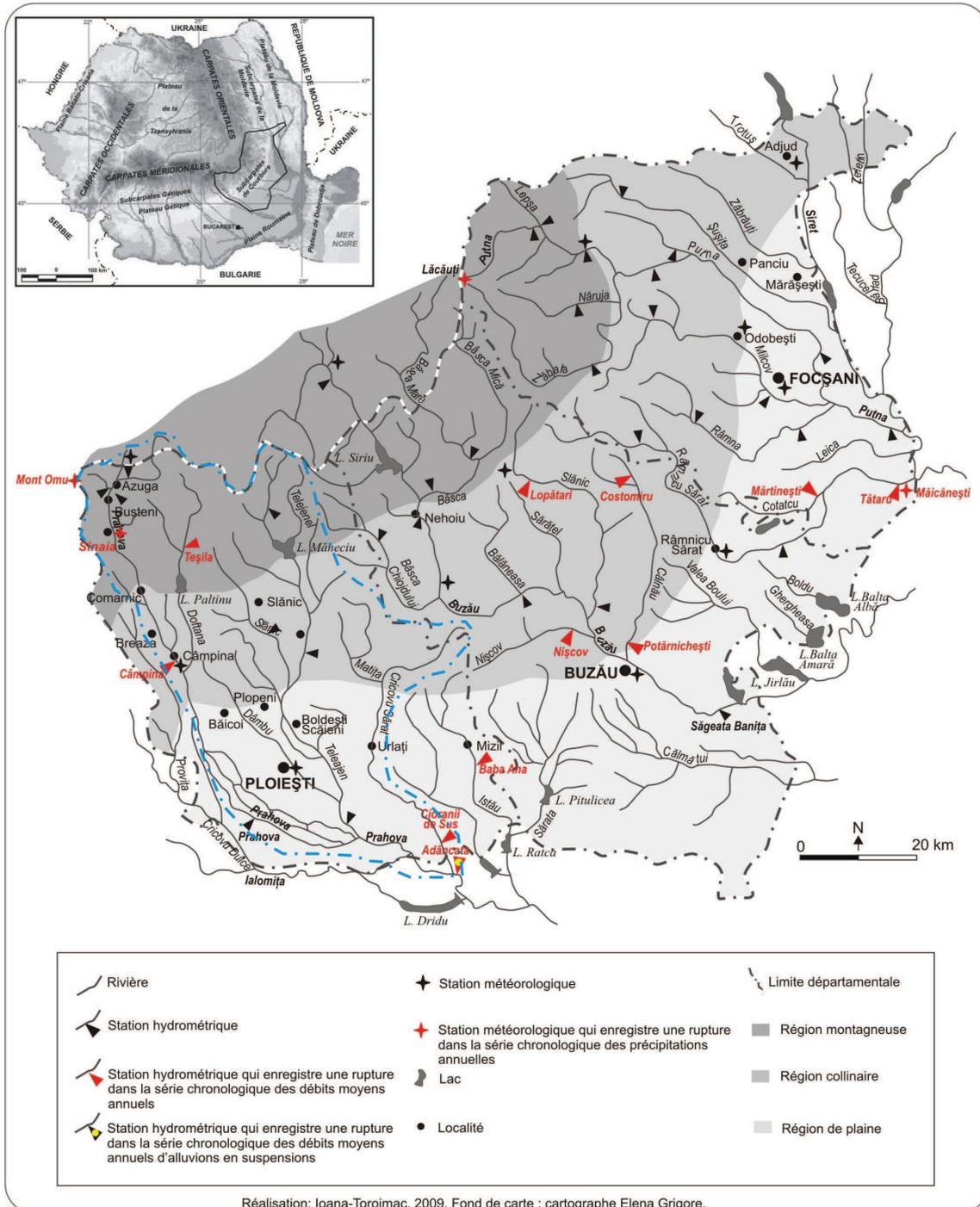
Dans les cas des trois paramètres analysés, le test de Pettitt confirme la rupture statistique du début des années 1980 aussi bien pour les stations du bassin versant de la Prahova, que pour d'autres stations de la région de Courbure (cf. Tableau 22). Le test de Mann-Kendall est appliqué : 1) pour les séries de données entières qui n'ont pas de ruptures statistiques ; 2) pour les deux séries de données d'avant et d'après la rupture statistique. Mais ce test ne détecte aucune tendance statistiquement significative pour la période concernée. Il résulte donc que les débits liquides et de matières en suspension ont enregistré une rupture statistique autour de la même année que la rupture statistique pluviométrique, sans avoir une tendance d'évolution.

En conclusion, bien que des études de confiance réalisées sur des séries chronologiques qui commencent à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle aient montré une tendance à la baisse des précipitations annuelles à la Courbure des Carpates, les investigations menées sur les 40-45 dernières années ne mettent pas en évidence, du point de vue statistique, une tendance nette d'évolution.

Paramètres	Station météorologique ou hydrologique	Période de l'analyse	Année de la rupture significative statistique (pour un seuil de significativité supérieur à 90%)
Précipitations mensuelles	Sinaia	1961-2005	1979
	Mont Omu	1961-2005	1984
	Lăcăuți	1961-2000	1979
	Măicănești	1961-2002	1972
Débit module mensuel	Câmpina sur la Prahova	1961-2002	1984
	Adâncata sur la Prahova	1961-2002	1984
	Costomiru sur le Călnău	1961-1998	1973
	Potârnichești sur le Călnău	1961-1998	1973
	Martinești sur le Cotatcu	1961-1998	1984
	Cioranii de Sus sur le Cricovu Sărat	1961-1998	1973
	Teșila sur la Doftana	1961-1998	1984
	Baba Ana sur l'Ișțău	1961-1998	1984
	Nișcov sur le Nișcov	1961-1998	1973
	Tătaru sur le Râmnicu Sărat	1961-1998	1981
	Lopătari sur le Slănic	1961-1998	1981
Débit module annuel de matières en suspension	Adâncata sur la Prahova	1961-1995	1981

**Tableau 22. Année de rupture statistique des séries de précipitations annuelles, de débits liquides modules annuels et de débits modules annuels de matières en suspension aux stations météorologiques et hydrométriques de la région de la Courbure des Carpates.**

La Figure 65 présente la distribution spatiale des stations météorologiques et hydrométriques prises en compte, ainsi que les principaux résultats obtenus.



**Figure 65. Ruptures statistiques hydropluviométriques à la Courbure des Carpates. Le bassin de la Prahova se trouve dans l'ouest de la région et il est représenté en bleu.**

Ces variations climatiques ont eu des conséquences sur la couverture végétale et surtout sur les forêts. Les chercheurs roumains ont remarqué que certaines espèces d'arbres sont confrontées avec des problèmes de dessiccation ; en général les espèces de conifères sont

affectées (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Abies alba*). Par exemple *Abies alba* souffre de la rétraction de sa limite altitudinale inférieure d'extension (Bludjea, 2007). Le même processus est subi par les espèces de *Quercus frainetto* (Bludjea, 2000 ; Simionescu, 2001). Les arbustes sont considérés comme les plus exposés aux conditions météorologiques extrêmes, tandis que les espèces herbives s'adaptent facilement et sont considérées comme des espèces invasives. (Bludjea, 2000 ; Simionescu, 2001 ; Roșu, 2001). Les ripisylves sont considérées parmi les écosystèmes les plus sensibles aux mutations naturelles ou anthropiques et elles ont déjà été confronté avec des problèmes de dessiccation dus aux changements du régime hydrologique et aux aménagements anthropiques (Nicolae *et al.*, 2001 ; Roșu, 2001). De plus, à l'est de la Courbure de Carpates, les sylviculteurs ont remarqué le début précoce du cycle de végétation (Bludjea, 2007). Il reste à voir si ces changements dans la composition de la couverture végétale auront des conséquences importantes sur l'activité des hydrosystèmes.

#### 2.4.1.3. Diminution de la magnitude des événements hydropluviométriques extrêmes ?

L'investigation des inondations que la Prahova a subies depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle apporte plus d'informations qui permettent de comprendre l'évolution des paramètres pluviométriques et hydrologiques durant le dernier siècle.

Conformément aux premiers enregistrements météorologiques systématiques (qui datent de la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle), la Roumanie a été confrontée avec des inondations importantes dans la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle (Mustățea, 1996). Pour la Prahova, les plus importantes inondations ont été celles de mai-juin 1893, avril 1895, avril-juillet 1897 (Mustățea, 1996). Selon le même auteur, en mai 1893, 346 mm de précipitations sont tombés durant 18 jours à Câmpina ; et en juin on a enregistré 290 mm de précipitations à Doftana. Or ces cumuls de précipitation sont supérieurs à ceux qu'on a connus durant les 40-45 dernières années. Le cumul mensuel de précipitation en mai et juin à la station météorologique de Câmpina est de respectivement 87 mm et 111 mm (pour la période 1961-2005). A la même station météorologique et durant la même période, le cumul maximal de précipitation en 24 heures a été enregistré le 19 septembre 2005 (118 mm). La quantité maximale de précipitations enregistrées durant 18 jours a atteint 260 mm pour la période 1961-2005.

Les enregistrements hydrométriques systématiques ont commencé dans le bassin de la Prahova au début des années 1960. En comparant le temps de retour des débits annuel de pointe de la Prahova (cf. Tableau 23) avec le temps de retour du débit à pleins bords (voir §1.3.3.3.), quelques conclusions peuvent être tirées.

Année	Station hydrométrique de Poiana Țapului	Station hydrométrique de Câmpina	Station hydrométrique de Prahova	Station hydrométrique d'Adâncata
1961	-	-	7,6	4,5
1962	-	1,6	1,6	1,9
1963	-	2,3	2,8	1,5
1964	-	3,7	1,6	1,5
1965	-	2,4	3,0	5,5
1966	1,4	2,0	2,8	9,9
1967	1,2	4,1	3,5	3,8
1968	1,5	1,0	1,0	1,2
1969	17,0	2,9	3,5	3,6
1970	2,2	3,6	2,2	3,0
1971	21,4	1,8	2,0	6,2
1972	2,0	3,3	3,9	8,0
1973	2,3	2,7	2,5	2,3
1974	2,3	2,8	3,5	2,9
1975	11,4	20,0	19,5	99,8
1976	1,1	1,3	1,5	1,5
1977	2,8	2,2	1,3	1,5
1978	1,7	1,3	1,5	1,5
1979	1,7	8,2	7,1	3,8
1980	1,6	8,3	4,2	6,7
1981	16,7	4,7	2,0	2,9
1982	1,9	9,4	6,0	1,9
1983	2,3	9,4	3,1	3,5
1984	6,1	2,5	2,3	2,8
1985	2,4	0,8	1,9	1,6
1986	1,1	1,0	1,0	1,2
1987	1,2	1,0	1,0	1,4
1988	1,3	26,7	3,3	2,6
1989	5,2	1,6	1,2	1,3
1990	11,9	2,7	2,0	1,7
1991	2,0	2,2	2,3	3,5
1992	1,3	1,1	1,1	1,3
1993	-	3,1	2,3	2,1
1994	-	1,3	1,4	1,5
1995	-	2,6	2,1	1,8
1996	-	1,5	2,3	2,7
1997	-	12,3	16,0	15,7
1998	-	1,5	2,0	3,1
1999	-	1,4	1,4	2,0
2000	-	1,0	1,1	1,2
2001	-	6,3	12,9	3,5
2002	-	1,1	1,6	2,7
2003	-	1,5	1,3	1,1
2004	-	1,3	4,1	2,2
2005	-	36,1	95,1	32,3
2006	-	1,6	2,5	2,5
2007	-	8,1	13,3	4,2

**Tableau 23. Temps de retour des débits annuels de pointe de la Prahova, calculés selon le modèle fréquentiel de Pearson III. Cette méthode est présentée dans le §1.3.2.3. Les temps de retour supérieurs à 10 ans sont représentés en gris.**

L'interprétation qu'on propose doit être prise en compte avec une certaine précaution, parce que le débit à pleins bords dépend des caractéristiques du chenal fluvial, qui étaient différentes il y a quarante ans. Pourtant cette interprétation propose une image générale de la fréquence des inondations par débordement de la Prahova.

- A Câmpina (ébauches de tresses), le débit à pleins bords a un temps de retour de 6,8 ans. Si on compare cette valeur avec celles des temps de retour des débits de pointe de la période 1962-2007, il résulte que la Prahova a subi des inondations en 9 ans sur 45 ans.
- A Stăncești (secteur en tresses), le débit à pleins bords a un temps de retour de 35 ans, calculé par rapport aux débits enregistrés à Prahova situé à 8 km en aval. On estime donc que depuis le début des enregistrements hydrométriques systématiques, la Prahova a débordé à Stăncești une seule fois, en 2005. Cela explique pourquoi, après 1960, la ripisylve a pu coloniser les marges de la bande active.
- A la station de Prahova (actuellement chenal unique, sinueux), le temps de retour du débit à pleins bords est de 4,9 ans. En conséquence, la Prahova a débordé en 7 ans sur 46 analysés (1961-2007).
- A la station d'Adâncata (dans le secteur à méandres), le temps de retour du débit à pleins bords est de 2,9 ans. En conséquence, le secteur à méandres est plus souvent affecté par les inondations, mais elles ont en générale une magnitude faible. A cette station hydrométrique, les enregistrements ont commencé en 1927 ; depuis, l'inondation la plus importante a eu lieu en 1975 (Ioana-Toroimac *et al.*, 2006).

Bien que le facteur climatique soit probablement le plus important dans la compréhension de l'évolution de la rivière Prahova, les trois derniers paragraphes donnent seulement un aperçu des variations de ce facteur, faute de données. A ce stade de la recherche, il est possible de conclure que, depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la quantité annuelle de précipitations a diminué à la Courbure des Carpates. De plus, les événements hydropluviométriques extrêmes semblent avoir une magnitude inférieure à présent par rapport à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. En prenant l'exemple des autres rivières montagneuses européennes présentées dans l'introduction de cette partie, qui ont subi elles aussi des fortes crues dans la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, on peut considérer que la Prahova a ralenti sa dynamique en relation avec ces variations hydropluviométriques.

## 2.4.2. Rôle des facteurs anthropiques

### 2.4.2.1. Effets de l'exploitation des graviers et des sables

Pendant des siècles, les roches et les blocs ont été extraits des rivières d'Europe pour faciliter le transport, le commerce... et les galets étaient utilisés pour des constructions. Depuis les années 1950, les rivières à fond mobile sont considérées comme des milieux où la ressource en granulat et en sable est jugée inépuisable. Mais l'exploitation des graviers peut avoir des effets négatifs sur l'évolution hydrogéomorphologique des rivières. C'est le cas de la Drôme ; son originalité naturelle consiste dans la longueur exceptionnelle pour les Alpes occidentales de son style fluvial tressé (106 km) selon Faton *et al.* (1997). La bande active de la Drôme s'est rétrécie de 25% entre 1946 et 1970 et de 24% entre 1970 et 1991 (Landon *et al.*, 1998). Selon les mêmes auteurs, elle s'est incisée de 4-5 m durant le 20<sup>ème</sup> siècle. Faton *et al.* (1997) expliquent que les extractions massives de gravier ont été clairement reconnues comme étant la principale cause de cette évolution de la Drôme : estimé à 35 000 m<sup>3</sup>/an, le volume de matériaux transitant annuellement dans le cours d'eau ne pouvait pas compenser les prélèvements qui pouvaient atteindre 250 000 m<sup>3</sup>/an. Pour Landon *et al.* (1998), ce processus a des conséquences, parfois irréversibles, sur l'environnement et les ouvrages de génie civil. L'incision du chenal, accompagnée de l'érosion latérale, a favorisé la destruction de la base des ouvrages de protection latérale sur 7,5 km de longueur de la Drôme et elle a mis en danger la stabilité des ponts traversant la rivière. Une autre conséquence de l'incision du chenal est l'augmentation de la pente et donc l'intensification de l'érosion régressive, avec des conséquences possibles sur les aménagements situés en amont. Le même processus d'incision du chenal a déterminé l'approfondissement de la nappe phréatique de 1-5 m, la disparition de certains bancs alluviaux ou le développement d'une végétation permanente sur les bancs alluviaux. Etant donné la prise en compte des effets négatifs de cette activité, l'intensité de l'exploitation des graviers et des sables a été diminuée dans les pays de l'Europe Occidentale depuis les années 1970.

Les données existantes ne permettent pas d'estimer le volume de graviers et de sables exploité de la vallée de la Prahova et de ses affluents. Mais le nombre élevé d'exploitations indique une activité florissante ! Conformément aux cartes topographiques de 1980, trois ballastières fonctionnaient sur la Prahova. Actuellement, le long de la Prahova fonctionnent vingt ballastières : deux dans le secteur carpatique, quatre dans le secteur subcarpatique, treize dans le secteur correspondant à la Plaine de Ploiești et une ballastière

dans le secteur correspondant à la Plaine de Gherghița (cf. Figure 66). Les ballastières de Poiana Țapului et de Sinaia exploitent des galets et des graviers directement du chenal de la Prahova (cf. Figure 67). Les ballastières situées dans le secteur en tresses exploitent des graviers et des sables essentiellement de l'ancienne bande active de la Prahova. A part ces exploitations organisées, il y a des exploitations non-officielles, effectuées par les riverains. Les effets de l'exploitation des granulats ont été également observés dans le cas de la Dore, affluent de l'Allier (Cubizolle, 1996). Cet auteur explique que les exploitations des graviers et des sables de l'ancienne bande active ont créé des fosses représentant de vraies pièges à sédiments ; l'abandon d'une partie de la charge alluviale dans ces fosses entraîne une augmentation de l'énergie nette du cours d'eau à la sortie de la zone d'extraction, d'où une reprise sensible de l'érosion. L'exploitation des granulats par raclage du fond du lit favorise l'érosion régressive, avec des effets négatifs sur les piles des ponts.

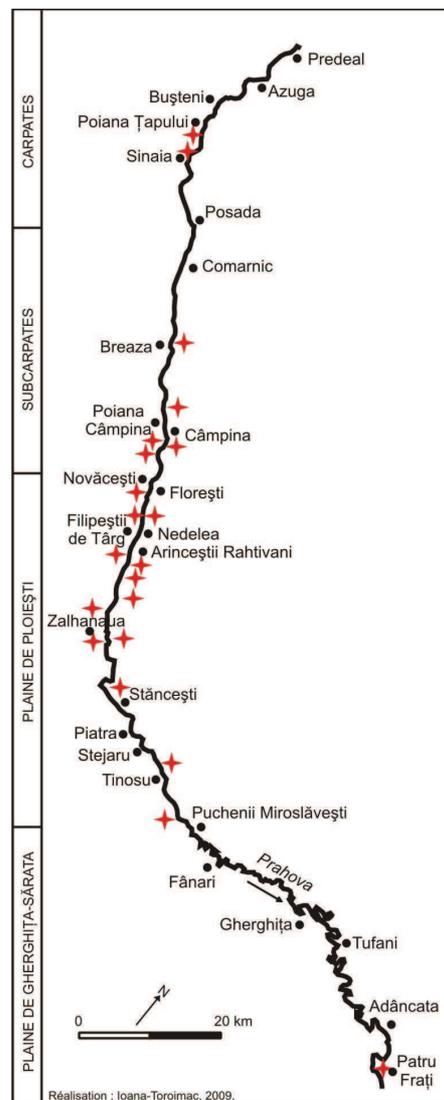
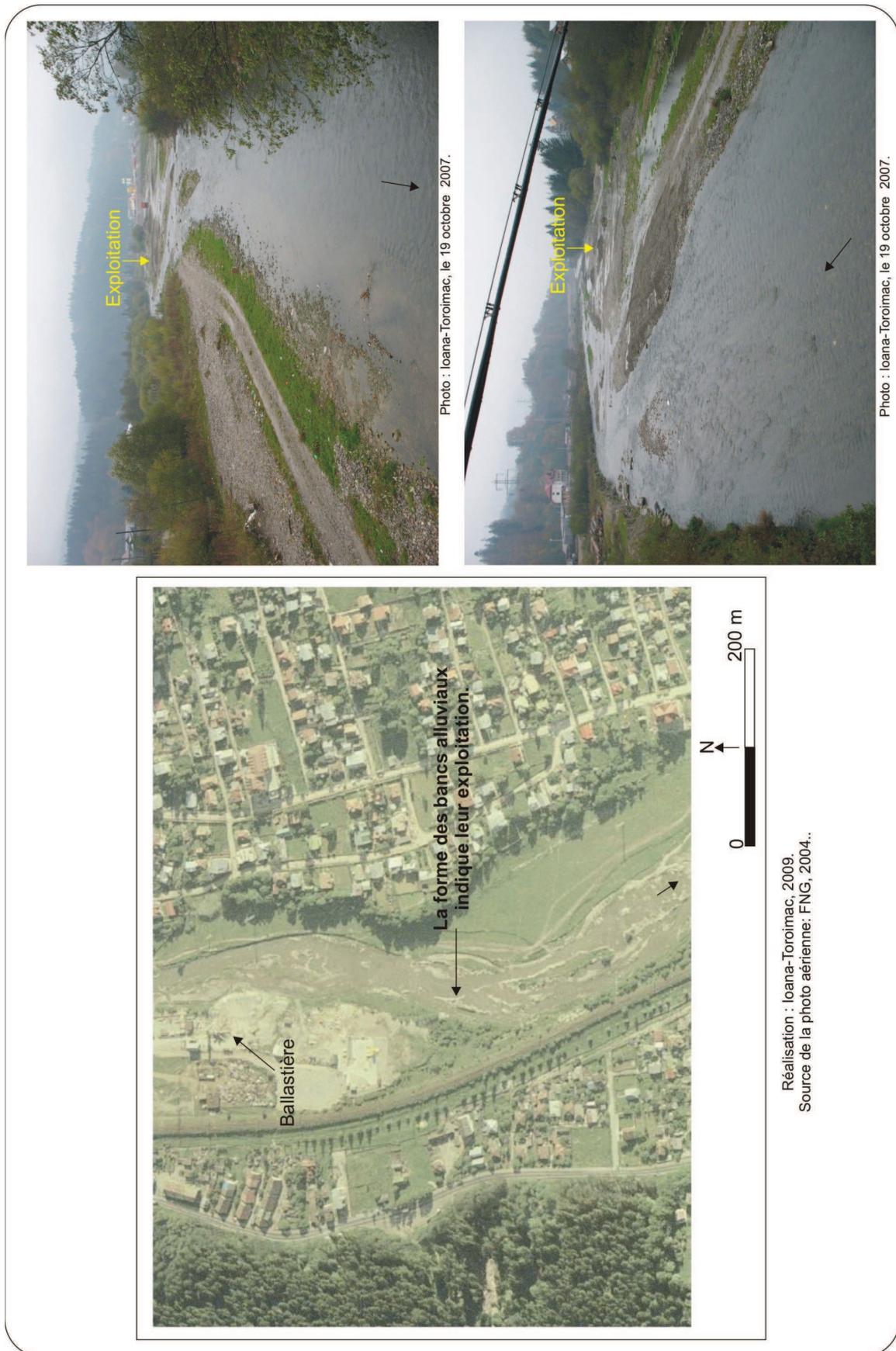


Figure 66. Position des ballastières le long de la Prahova.



**Figure 67. Exploitation de graviers directement du chenal fluvial de la Prahova dans les Carpates, à Poiana Țapului.**

#### 2.4.2.2. Effets des barrages-réservoirs

L'impact des barrages sur les hydrosystèmes fluviaux concerne, d'une part, le réservoir proprement dit et, d'autre part, le cours d'eau en aval. Les réservoirs sont affectés par la perte d'eau par évaporation, par le comblement de sédiments et par des problèmes de qualité de l'eau. En aval le cours d'eau est affecté par la rupture de la connectivité longitudinale, par la modification du régime hydrologique avec des conséquences sous forme de réajustement géomorphologique, par la modification de la qualité de l'eau et des habitats. Mais cet impact diffère d'un barrage à l'autre en relation avec leurs dimensions et leurs fonctions.

Nos préoccupations concernent les possibles impacts hydrogéomorphologiques des barrages-réservoirs. Pour ce qui est du changement du régime hydrologique, à la sortie des barrages, le débit d'eau est en général diminué par rapport à la situation naturelle ; cela pourrait déterminer le rétrécissement du chenal fluvial. Mais les barrages-réservoirs sont susceptibles aussi de modifier le régime saisonnier, ce qui pourrait avoir des effets sur l'écosystème. En même temps les pics de crues sont atténués. En conséquence, la partie extérieure du lit d'inondation pourrait être soustraite à l'action directe de la rivière ; cette zone pourrait subir un processus de salinisation et voir sa biodiversité diminuer. Par contre, les barrages-réservoirs permettent d'assurer un débit minimum, qui est favorable aux écosystèmes aquatiques. Assani *et al.* (2006) montre que la construction des barrages a déterminé des changements dans l'écoulement des rivières québécoises du bassin de la rivière Saint Laurent. L'analyse des données hydrologiques indique que la fréquence des débits annuels de pointe a diminué durant la période des hautes eaux, ainsi que leur variabilité ; les crues à période de retour de 10 ans ont presque disparu. Le régime hydrologique s'est donc homogénéisé. Le fonctionnement de ces barrages peut même déterminer l'inversion du régime hydrologique naturel. Par exemple, l'eau qui résulte de la fonte de la neige (avril-mai) est stockée, parce que les ressources en eau sont peu abondantes à cause du phénomène de gel. L'excès d'eau est libéré durant le reste de l'année.

Mais les barrages sont susceptibles de réduire ou même de supprimer la charge solide, ce qui peut produire l'incision du chenal du cours d'eau en aval ; à long terme, ce processus d'incision peut menacer la stabilité des barrages ! Mais ce processus dépend de la résistance à l'érosion de la roche en place et/ou du lit d'alluvions, mais aussi de la compétence du cours. Or sa compétence diminue suite à la réduction des pics de crue. Si le cours d'eau ne peut pas s'inciser, alors il érodera ses berges, surtout si elles sont constituées de matériaux friables. Ce

processus d'érosion latérale pourrait déterminer l'augmentation de la sinuosité. Suite à ces changements de processus dominants à la sortie d'un barrage-réservoir par rapport à la situation naturelle, un cours d'eau peut subir des modifications du chenal fluvial.

La plupart des aménagements hydrauliques du bassin versant de la Prahova ont été construits durant la période 1965-1985, ce qui correspond à l'étape de renforcement de la politique nationale dans ce domaine<sup>16</sup>. Leur rôle était de produire de l'énergie hydroélectrique, d'alimenter en eau la population et l'industrie, de fournir l'eau nécessaire à l'irrigation et de créer des conditions favorables à la pisciculture. Deux barrages-réservoirs de petites dimensions fonctionnent sur la rivière Prahova. Les barrages-réservoirs de dimensions importantes en tant que volume se trouvent sur ses affluents : le barrage Paltinu sur la Doftana et le barrage Măneciu sur le Teleajen (cf. Figure 68). Selon leur position, les barrages-réservoirs susceptibles de produire des modifications sont : 1) le barrage-réservoir de Sinaia – en aval de la localité homonyme ; 2) le barrage de Nedelea – sur la bande de tressage de la Plaine de Ploiești ; 3) le barrage-réservoir de Paltinu sur la Doftana - sur la bande de tressage de la Prahova en aval de la confluence ; 4) les barrages-réservoirs du bassin du Teleajen – sur le secteur à méandres.

Afin de comprendre l'influence de ces barrages sur l'hydrosystème de la Prahova, les exemples les plus démonstratifs sont présentés ci-dessous.

Le barrage de Nedelea a été construit en 1965 sur la Prahova et il avait un rôle initial hydroénergétique. Il a été rénové plusieurs fois, la dernière fois au début des années 1980. De cette dernière rénovation date son canal de dérivation, dont le rôle est d'utiliser l'eau pour l'irrigation. Les effets de la construction du barrage de Nedelea sont évidents à l'échelle locale : 1) le rétrécissement forcé de la bande active en amont du barrage et l'aggradation des chenaux avec des conséquences visibles sur le pont entre les localités de Nedelea et de Filipeștii de Târg (voir §3.3.3.1.2.) ; 2) la construction du canal de dérivation du barrage de Nedelea a déterminé le rétrécissement de la bande active de tressage de la Prahova sur la

---

<sup>16</sup> En Roumanie, la construction des barrages-réservoirs a commencé vers le 15<sup>ème</sup> siècle en Transylvanie. La construction des barrages modernes avec une fonction hydroélectrique date de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (à Bucarest sur la Dâmbovița). Avant 1940, la Roumanie avait 128 barrages hydroélectriques, mais leurs réservoirs n'étaient pas très importants par leurs dimensions. Après 1960 cette activité a été intensifiée ; elle a culminé en 1980-1990 quand 78 barrages-réservoirs ont été construits. Entre 1991 et 2000 encore 17 barrages-réservoirs ont été construits (Rădoane et Rădoane, 2005).

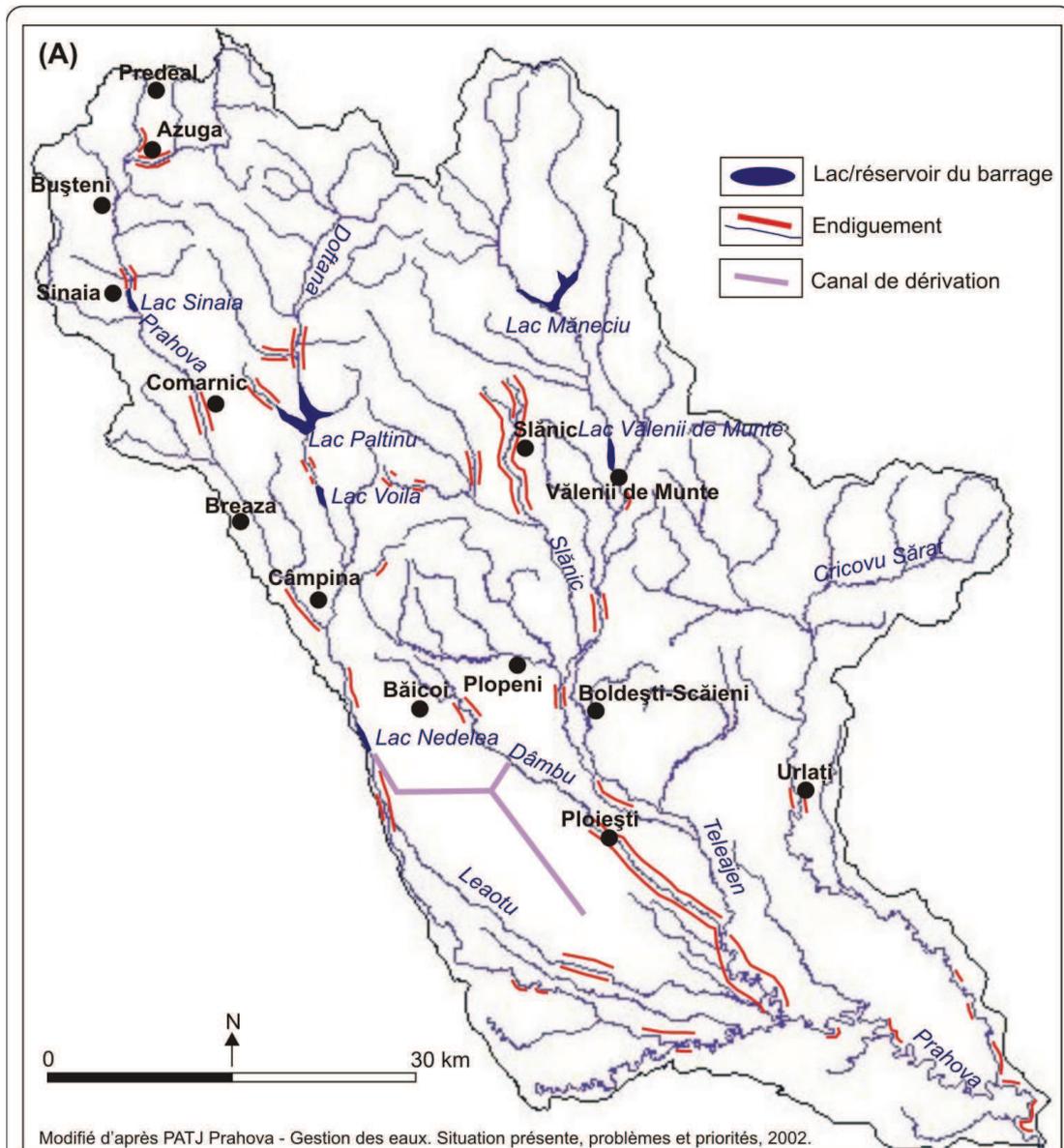
longueur du chenal ; après 2 km l'eau du canal revient dans la Prahova ; de plus, dans l'ancienne bande active, une ballastière a été installée (cf. Figure 69).

Le barrage-réservoir de Paltinu sur la Doftana, à la sortie de Carpatas, a été construit en deux étapes : 1968-1971 et 1976-1982. Durant la même période un autre barrage a été aménagé quelques kilomètres en aval à Voila, dans les Subcarpatas. Les deux barrages se trouvent dans le secteur en tresses de la rivière Doftana, affluent de la Prahova. Actuellement 8% du réservoir du barrage de Paltinu est colmaté (MM, 2007). Il est fort possible que ces deux barrages aient contribué au rétrécissement de la bande active de la Doftana et même à la bande active de la Prahova en aval de la confluence.

On a observé sur le terrain et sur les images de Google Earth que les marges de la bande active du Teleajen sont occupées par des ripisylves, d'où résulte que cet affluent de la Prahova a subi le rétrécissement de sa bande active. Les données utilisées dans la thèse ne permettent pas de corréliser ce rétrécissement avec la mise en fonctionnement du barrage de Măneciu, mais cela reste une question ouverte pour des futures recherches.

L'impact des grands barrages-réservoirs se reflète aussi dans la régularisation de l'écoulement de la Prahova au moment de grandes crues. En ce sens, la compagnie Hidroelectrica (2007) confirme que le barrage-réservoir de Sinaia a atténué le pic de la crue de mars 2007, qui a fait des dégâts en amont. La SGA Prahova confirme que les barrages-réservoirs de Paltinu sur la Doftana et de Măneciu sur le Teleajen ont atténué le pic de la crue de septembre 2005 sur la Prahova.

D'autres prélèvements d'eau de la Prahova, fonctionnels en 2005, utilisent environ 1,8 m<sup>3</sup>/s (SGA Prahova) ; l'eau de la Prahova est utilisée essentiellement pour l'alimentation de l'industrie et pour des irrigations. De plus ces canaux de dérivation sont susceptibles de retenir une partie de la charge solide et surtout les matières en suspension. En conséquence ces canaux pourraient se combler, ce qui aurait des effets négatifs sur leur fonctionnement. Cela pourrait aussi diminuer la charge de matières en suspension de la Prahova.



(B)

Barrage	Rivière	Unité de relief	Année (Source : SGA Prahova)	Volume du lac (mil. m <sup>3</sup> ) (Source : MM, 2007)	Prise d'eau associée et débit transité (m <sup>3</sup> /s) (Source : PATJ, 2004)	Utilisation (Source : PATJ, 2004)
Barrage-réservoir de Sinaia	Prahova	Carpates	1982	-	4,5	Hydroélectricité (4,5 MW)
Barrage mobile de Nedelea	Prahova	Plaine de Ploiești	1965	-	0,72	Hydroélectricité (0,72 MW) ; alimentation en eau industrielle ; irrigations
Barrage-réservoir de Paltinu	Doftana	Subcarpates	Début des travaux : 1968 Fonctionnement : 1971 Deuxième étape de consolidation : 1976-1982	53,7	10	Hydroélectricité (10 MW) ; alimentation en eau de la population et de l'industrie ; irrigations
Barrage mobile de Voila	Doftana	Subcarpates	1971	-	-	Alimentation de la population et de l'industrie
Barrage-réservoir de Măneciu	Teleajen	Carpates	1984	60	10	Hydroélectricité (10 MW) ; alimentation en eau de la population et de l'industrie ; irrigation
Barrage mobil de Vălenii de Munte	Teleajen	Subcarpates	1984	-	-	Station du traitement de l'eau

Figure 68 (A) Position des principaux barrages, des endiguements (localisation approximative) et des canaux de dérivation de l'eau dans le bassin de la Prahova. Les ouvrages de type gabion ne sont pas pris en compte. (B) Principaux barrages qui fonctionnent dans le bassin de la Prahova.



**Figure 69. Rétrécissement de la bande active en aval du barrage de Nedelea. La photo montre une image de la Prahova à la sortie du barrage. La bande active de tressage en 1980 est tracée à partir des cartes topographiques de la DTM.**

#### *2.4.2.3. Impact de l'endiguement du chenal de la Prahova*

De manière générale, selon Bravard et Petts (1993) l'endiguement peut avoir différentes conséquences. Il favorise la prolongation des pics de crues et donc l'accroissement de la fréquence des débordements en aval. Il facilite le transit de la charge solide d'amont en aval, ce qui détermine l'aggradation du chenal en aval ; à l'inverse, l'endiguement peut aussi déterminer la diminution de l'apport des berges pour la charge solide. L'endiguement a des effets particuliers pour les cours en tresses et à méandres.

Prenons l'exemple du Haut-Rhône qui, au début du 19<sup>ème</sup> siècle, était une rivière tressée, dont la bande active occupait plusieurs kilomètres de largeur (Bravard et Petts, 1993). Les travaux ont commencé vers 1840 et ils envisageaient la protection des terres agricoles situées des deux côtés de la rivière. Plus tard, vers 1880-1890, les endiguements submersibles, qui barraient les chenaux secondaires, avaient pour fonction de concentrer les eaux à l'étiage dans le but de permettre la navigation ; ces chenaux secondaires restaient en permanence alimentés, par filtration à travers les blocs non maçonnés à l'étiage et par déversement lors des crues. Ces ouvrages ont déterminé l'isolement quasi complet du fleuve par rapport à son lit d'inondation. Ils ont provoqué le colmatage des bras secondaires qui se sont progressivement remplis de sédiments minéraux fins et l'incision du chenal principal. Tout cela a eu des conséquences néfastes sur la biodiversité. Ces tendances ont été accentuées par la mise en service des réservoirs hydroélectriques.

Selon les mêmes auteurs, l'endiguement des méandres par des levées de terre est susceptible de déterminer l'incision du chenal et l'érosion des berges. Mais l'incision du chenal peut provoquer l'abaissement de la nappe phréatique avec des conséquences pour l'agriculture. Ces levées de terre, indifféremment de la distance par rapport au chenal, provoquent l'isolement d'une partie du lit d'inondation et donc perturbent le fonctionnement des zones humides. Mais les grandes crues peuvent provoquer localement une rupture de la digue ; l'eau s'engouffre dans la brèche à une vitesse élevée, ce qui peut provoquer des dégâts encore plus importants. De telles situations peuvent être encore compliquées par des apports d'eau polluée qui peut stagner derrière la levée de terre.

L'endiguement de la rivière Prahova manifeste la volonté de protéger le cours d'eau des dégâts de l'érosion et/ou des inondations. Depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et surtout depuis 1970, les progrès techniques ont permis à la société industrielle de réorganiser de façon systématique l'espace fluvial. Plusieurs types d'endiguement se remarquent : la canalisation

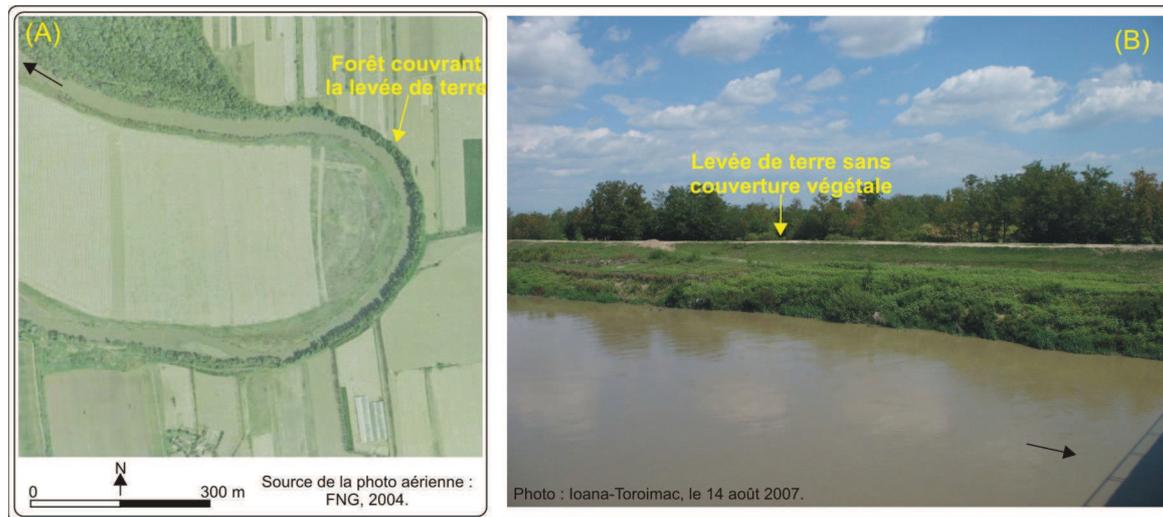
par application de dalles de béton sur les berges du chenal ; l'emplacement des levés de terre sur les bords du chenal afin d'agrandir la hauteur des berges ; la mise en place de gabions sur les berges du chenal.

Les plus importants ouvrages de protection de berges ont été construits entre 1975 et 1985. Par exemple à Azuga (Carpates), les berges de la Prahova sont consolidées par des dalles de béton sur 1 km pour la protection contre l'inondation du chemin de fer, depuis 1980. A Sinaia (Carpates), des dalles de béton protègent la zone industrielle (sur 4 km) contre le débordement de la Prahova, depuis 1983. A Comarnic et à Poiana Cămpina, dans les Subcarpates, les berges de la Prahova sont consolidées par des dalles de béton (sur environ 1 km) pour la protection contre les inondations des zones industrielles, depuis 1974-1976 (cf. Figure 68A). Ce type d'ouvrage de protection a été mis en place sur les affluents de la Prahova aussi. Conformément au Plan d'Aménagement du Territoire Départemental du département de la Prahova les plus importants ouvrages de protection des berges de la Prahova dans les Carpates et dans les Subcarpates couvraient 6 km de longueur (en une cinquantaine) et encore 0,8 km concernaient les affluents. A part ces endiguements, des gabions ont été aménagés pour la protection des berges ; ces gabions ne sont pas recensés dans ce plan d'aménagement ; on a pu identifier des gabions dans les Carpates et dans les Subcarpates et localement (en aval des ponts sur la Prahova) dans la Plaine de Ploiești ; ce type d'ouvrage n'existe pas dans la Plaine de Gherghița. On estime que la longueur totale de ces gabions est d'environ 8 km. Le même type d'ouvrages a été mis en place dans les bassins versants des autres affluents (Doftana, Teleajen, Cricovu Sărat, Vișoara), durant la même période.

Suite à l'incision du chenal de la Prahova, d'autres mesures de protection ont été mises en place depuis l'années 2000 : les berges sont actuellement protégées par des gabions et des seuils de stabilisation ont été aménagés afin de réduire l'incision (voir §3.3.3.1.).

Des levées de terre ont été mises en place le long de la Prahova à la fin des années 1970, comme mesure de protection prise après les fortes inondations de juillet 1975 : à Novăcești sur 4,4 km, à Ariceștii Rahtivani sur 4,4 km, à Puchenii Mari sur 0,55 km, à Gherghița sur 4 km, à Tufani sur 1,7 km, à Adâncata et à Patru Frați (cf. Figure 68A). Un effet secondaire de la construction de ces levées de terre a été remarqué à Gherghița. Dans cette commune, une des levées de terre borde la berge concave d'un méandre. La levée de terre a diminué la fréquence des débordements ce qui a permis le développement de la végétation arborescente ; actuellement des arbres occupent la levée de terre et l'espace situé juste derrière elle (cf. Figure 70). La levée de terre de Tufani est elle aussi végétalisée. Mais cette situation ne se

répète pas dans tous les cas. Par exemple à Adâncata, la levée de terre est couverte localement d'une végétation herbeuse ; les habitants ont transformé la partie supérieure de la digue en chemin occasionnel.



**Figure 70. Levée de terre protégeant les localités voisines contre les débordements de la Prahova : (A) à Gherghița ; (B) à Adâncata.**

En conclusion, les facteurs anthropiques pris en compte ont été : l'exploitation des graviers et des sables, la construction et la mise en fonctionnement des barrages-réservoirs et l'endiguement du chenal / des chenaux de la Prahova. Parmi les autres facteurs qui auraient pu influencer cette évolution de la Prahova, on peut compter les changements dans utilisation des terrains agricoles et les reforestations. Les changements les plus importants dans l'utilisation des terrains agricoles sont associés aux changements socio-politiques et aux réformes agraires : en 1864 et en 1921 (décentralisation), en 1945 (centralisation), en 1990 (décentralisation) (Berindei et Adăniloiaie, 1967 ; Scurtu *et al.*, 2002). Mais en ce moment de la recherche, on ne peut pas comptabiliser le rôle des changements de pratiques agricoles sur l'évolution du cours d'eau. En ce qui concerne les forêts, elles ont toujours restées dans la propriété des grands propriétaires ou de l'Etat, raison pour laquelle elle ont été moins concernées par les réformes agraires au moins dans le département de la Prahova (Giurăscu, 1975). Des reforestations ont été faites dans les années 1960 et elles ont concerné essentiellement la ripisylve (Gheorghe, 2005) (voir aussi §3.4.4.1. et §3.4.4.2.).

## 2.5. Conclusions de la deuxième partie

L'objectif de cette partie de la thèse a été de déterminer l'évolution de la Prahova durant les 150 dernières années. Cette analyse repose sur une étude cartographique diachronique qui prend en compte des iconographies du milieu du 19<sup>ème</sup> siècle (la carte de Szathmary réalisée d'après des levés de terrain de 1854-1855), des plans militaires (levés de terrain 1896-1902), des cartes topographiques (levées de terrain 1954-1955 et 1977-1980) et des photos aériennes (prise de vue 2003-2005). En effet le choix de la période d'analyse repose essentiellement sur les documents disponibles.

La reconstitution du style fluvial à partir de ces documents indique (cf. Figure 71) :

- une succession de styles fluviaux d'amont en aval, typique des rivières montagneuses : un secteur à chenal unique dans les montagnes, un secteur en tresses avec le maximum de développement dans la zone de piémont, un secteur à méandres dans la région de plaine à pente faible ;
- le rétrécissement de la bande active, progressif avant 1980 et plus intense après 1980 ; de plus, conformément aux observations de terrain, après 1980, le chenal de la Prahova s'incise localement.
- la migration latérale des méandres, plus intense avant 1955 et plus lente ultérieurement.
- par rapport à la situation de 1900, la Prahova a subi une métamorphose fluviale sur deux tronçons : 1) dans les Subcarpathes, sur environ 8 kilomètres, la Prahova a changé son style fluvial, passant de chenaux tressés à un chenal unique ; 2) sur les 10 derniers kilomètres de la Plaine de Ploiești, la Prahova a changé son style fluvial, passant de chenaux probablement divagants à un chenal unique et sinueux.

Par manque de données, les explications concernant les causes responsables de l'évolution de la rivière Prahova sont essentiellement des hypothèses (cf. Figure 71). De plus il reste difficile à distinguer l'impact de chaque facteur (naturel ou anthropique) dans l'évolution d'ensemble de la rivière Prahova. L'évolution de la rivière est probablement due :

- aux variations climatiques qui se caractérisent par la diminution de la quantité annuelle de précipitations et de la magnitude des événements extrêmes depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Les facteurs climatiques ont probablement déterminé la diminution

de l'intensité des contraintes associées à la rivière (crue forte et charge solide abondantes). Cela a permis le développement de la ripisylve, qui, à son tour, a empêché les migrations latérales du cours d'eau et favorisé l'incision du chenal.

- aux activités anthropiques très intenses depuis le milieu des années 1970 : construction des barrages et endiguements, ainsi que l'exploitation des graviers et des sables ; l'ensemble de ces facteurs a probablement contribué à la diminution de la charge solide de fond.

Activité/Période	1900	2005
Intensité de l'activité de tressage		
Intensité de l'activité de méandrage		
Quantité de précipitations et magnitude des événements extrêmes		
Développement de la ripisylve		
Intensité des activités anthropiques portant sur la rivière		

Réalisation : Ioana-Toroimac, 2009.

**Figure 71. Schéma de l'évolution de la Prahova en relation avec les principaux facteurs responsables.**

En conclusion, l'évolution de la Prahova peut être replacée dans le contexte général de l'évolution des rivières montagneuses européennes (alpines françaises et italiennes, carpatiques polonaises) essentiellement par le rétrécissement de sa bande active de tressage durant le 20<sup>ème</sup> siècle en relation avec des facteurs naturels et anthropiques et par l'incision plus récente de ses chenaux en relation avec des facteurs anthropiques.

Un deuxième résultat de cette analyse consiste dans le rôle du style fluvial pour la sectorisation des rivières. Mais l'analyse de ce paramètre qualitatif ne doit pas se limiter au temps présent, parce que le style fluvial évolue. La prise en compte d'un état antérieur permet de comprendre les caractéristiques naturelles du cours d'eau, non-altérées par les activités humaines. Dans des conditions naturelles, la rivière Prahova forme quatre secteurs à style fluviaux différents, démonstratifs pour une certaine dynamique (à chenal unique dans les

Carpates, en tresses et probablement divagant dans les Subcarpates et dans la Plaine de Ploiești et à méandres dans la Plaine de Gherghița). En conclusion, la gestion de la rivière et l'aménagement du territoire devraient tenir compte des particularités de la dynamique fluviale.



**TROISIÈME PARTIE.**

**CONSÉQUENCES DE LA DYNAMIQUE DE LA PRAHOVA  
DANS SON ESPACE DE LIBERTÉ**



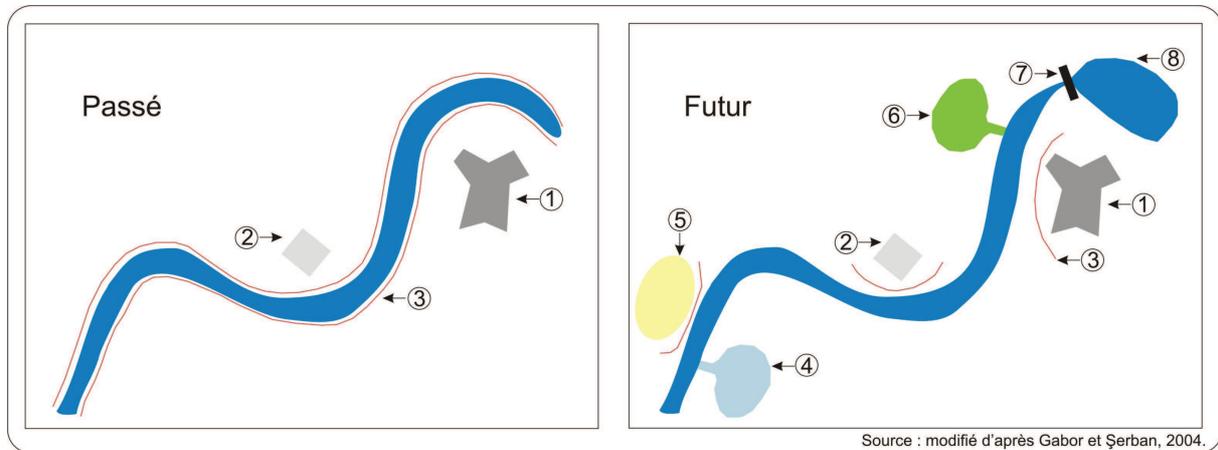
### **3.1. Introduction : le contexte de la nécessité de préserver l'espace de liberté de la rivière**

La deuxième partie de la thèse a mis en évidence le fait que la rivière est en équilibre dynamique ; elle adapte son cours en fonction de l'énergie à dissiper et elle répond aux modifications environnementales et anthropiques par des ajustements latéraux et verticaux de ses chenaux. Cette partie de la thèse est construite autour de la question : **quelles sont les conséquences de la dynamique de la rivière sur les autres composantes du milieu riverain ?**

Depuis quelque temps on se rend compte que les cours d'eau ont été endigués sans tenir compte de leur « respiration » (Frossard *et al.*, 1998). Combattre de manière systématique ces processus, ainsi que les phénomènes hydrologiques extrêmes, perturbe inévitablement la dynamique naturelle et conduit le plus souvent à accentuer les dysfonctionnements. Dans ces cas, la connectivité longitudinale et latérale du cours d'eau peut être interrompue, avec des conséquences négatives sur le fonctionnement des écosystèmes. La pollution aussi est responsable de la perturbation du fonctionnement des hydrosystèmes. En même temps il y a des nombreux exemples de risque lié à la dynamique latérale de la rivière. Dans ce contexte plusieurs programmes qui visent la renaturation des rivières ont été mis en place.

En prenant l'exemple de l'expérience européenne dans le projet portant sur l'aménagement durable de la zone inondable du Rhin (Dister *et al.*, 1990 ; Ministerie van Verkeer en Waterstraat, 2008), « plus d'espace pour les rivières » est un concept adopté également par l'ANAR. Ce concept envisage principalement la diminution du risque d'inondation et la conservation de la biodiversité des zones humides (cf. Figure 72). Il se réfère à la restitution des anciens lits inondables à la rivière, lits qui avaient été pratiquement abandonnés par le cours d'eau suite à l'endiguement. Les principales mesures structurelles (Scarwell et Laganier, 2004) liées à ce concept d'aménagement des rivières sont : l'aménagement de lacs afin d'atténuer l'onde de la crue et d'utiliser ultérieurement la ressource d'eau ; l'aménagement de polders à inondation contrôlée afin d'atténuer les débits de pointe ; l'aménagement de digues exclusivement pour la protection des enjeux socio-économiques ; la renaturation des rivières et la création d'habitats spécifiques afin de conserver des éléments floristiques et faunistiques. Jusqu'à présent, l'ANAR applique ce concept pour renaturer le cours inférieur du Danube (projet Corridor Vert du Danube Inférieur) et pour assurer la dynamique naturelle de la Jijia Veche (affluent de la rivière Prut, qui forme la frontière

orientale de la Roumanie avec la République Moldave et l'Ukraine). En même temps, un projet LIFE de l'APM du département du Galați a pour but la conservation et la protection des zones humides du Prut Inférieur.



**Figure 72. Evolution des concepts de l'aménagement des rivières. 1 = localité ; 2 = enjeux socio-économiques ; 3 = digue ; 4 = zone à inondation contrôlée ; 5 = superficie drainée ; 6 = zone humide ; 7 = barrage ; 8 = lac.**

Depuis l'année 2006, à l'échelle nationale, l'ANAR élabore des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des bassins hydrographiques, qui représentent les principaux instruments de gestion des eaux des bassins hydrographiques roumains et qui respectent les demandes de la directive européenne DC 2000/60/EC (Șerban et Gălie, 2006, Gălie et Popovici, 2009). Ces documents sont constitués d'un plan de gestion des bassins hydrographiques et d'un plan d'aménagement des bassins hydrographiques. Les principaux objectifs du plan de gestion des bassins hydrographiques sont : le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques, l'évaluation de l'impact anthropique sur le fonctionnement des rivières et la diminution des effets négatifs de l'impact anthropique et en particulier de la pollution ; parmi les objectifs secondaires l'ANAR souligne la nécessité de connaître les zones humides associées aux rivières, afin de pouvoir restaurer leur dynamique quasi-naturelle. Selon l'ANAR, en Roumanie, 15,3% de la longueur totale des rivières sont protégés et 6,1% du territoire du pays représentent des zones humides protégées essentiellement pour leur biodiversité. Les principaux objectifs du plan d'aménagement des bassins hydrographiques sont : l'exploitation des ressources naturelles selon leurs particularités, la maintenance de l'équilibre entre les ressources d'eau disponibles et nécessaires pour la consommation, la diminution des effets des aléas hydriques.

Bethemont (1993) conclut que le fleuve est un miroir fidèle de la société, qui reflète chaque étape de son développement par des changements. Le même auteur distingue trois

âges du fleuve Rhône : le fleuve naturel, peu ou pas perturbé par l'action humaine ; le fleuve des ingénieurs, aménagé ; le fleuve de l'époque de l'écologie contre la technologie, quand la gestion des eaux envisage le bon état des écosystèmes.

Après avoir évalué l'impact des facteurs naturels et anthropiques sur la dynamique de la rivière dans la partie précédente, la troisième partie de la thèse propose d'analyser les conséquences de cette dynamique. Le premier chapitre propose de délimiter l'espace utilisé par la rivière pour sa dynamique (migrations latérales, inondations). Ensuite on insiste sur l'occupation du sol de cet espace et plus précisément sur les enjeux socio-économiques qui subissent, d'une façon négative, la dynamique de la rivière et sur les zones humides qui fonctionnent en relation avec la rivière et pour lesquelles sa dynamique est, en général, bénéfique. Le deuxième chapitre Le deuxième chapitre de cette partie se focalise sur les enjeux socio-économiques, situés dans l'espace de liberté de la rivière, qui sont soumis à la dynamique de la rivière. Le troisième chapitre porte sur les zones d'intérêt écologique qui se trouvent dans l'espace de liberté de la rivière - les zones humides alluviales.

Tout le long de cette partie, on renvoie, à plusieurs occasions, aux résultats obtenus dans la deuxième partie de la thèse. Cela montre que les phénomènes et les processus qui se déroulent dans l'espace fluvial font partie d'une boucle d'action-rétroaction. Par ses objectifs, ce travail propose de répondre aux demandes européennes et nationales concernant la gestion et l'aménagement des rivières dans leurs bassins versants.

## 3.2. Délimitation de l'espace de liberté de la Prahova

### 3.2.1. Introduction

C'est dans ce contexte que le concept d'« espace de liberté » du cours d'eau est apparu. Il a été utilisé pour la première fois en 1990 aux Assises nationales de l'eau (Protection des milieux naturels aquatiques, Ministère de l'environnement, 1990, cité par Piégay *et al.*, 1996) ; il a été repris en 1996 par le groupe de travail « Protection et gestion des plaines alluviales » de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (Piégay *et al.*, 1996). L'espace de liberté de la rivière représente la partie du lit majeur de la rivière à l'intérieur de laquelle le chenal ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments et le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques et terrestres ; c'est la définition proposée en 1998 dans le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux de la région Rhône-Méditerranée-Corse. La notion d'espace de liberté repose sur deux concepts (Malavoi et Souchon, 1996) : 1) un concept géomorphologique : l'espace de divagation théorique du cours d'eau (Bravard, 1991) qui représente l'ensemble de la plaine alluviale qui, par sa nature géologique (alluvions récentes, alluvions anciennes, sédiments tertiaires), peut être soumise à l'activité érosive du fleuve et peut être le lieu d'ajustement en plan du tracé. Cette surface peut être très vaste et ne pas être entièrement utilisée par la rivière aujourd'hui ; 2) un concept de gestion dérivant du premier : l'espace de liberté proprement dit, de largeur inférieure ou égale à celle de l'espace de divagation théorique (maximale) du fleuve. Il s'agit de l'espace à préserver pour permettre au fleuve de conserver son potentiel d'ajustement en plan et en long, en fonction de l'évolution des autres variables (débit liquide et débit solide) et de se recharger en sédiments. La relation entre le concept « espace de liberté » et l'aménagement du territoire est soulignée par Piégay *et al.* (1996) : « ce concept naturaliste affirme la nécessité de préserver les caractères fonctionnels des hydrosystèmes caractérisés par une dynamique latérale active ; l'objectif est une gestion écologique durable, qui puisse reposer sur un équilibre entre les usages de l'espace et le milieu ». Ce concept se retrouve dans les Schémas Directeur de l'Aménagement et de la Gestion des Eaux (SDAGE) des régions françaises. Depuis quelques temps il est utilisé en Suisse aussi (par exemple par la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman, par l'Office de la Coordination environnementale et de l'énergie du canton de Berne).

Des chercheurs se préoccupent aussi de délimiter l'espace de liberté des rivières belges du massif ardennais (Snijders *et al.*, 2006).

Le concept « espace de liberté » a comme équivalent dans la littérature anglo-saxonne le concept de *river corridor* (Decamp et Naiman, 1989 ; Naiman et Decamp, 1990 ; Brinson, 1990 ; Malanson, 1993). Le *river corridor* représente l'espace du lit d'inondation qui fonctionne sous l'influence du cours d'eau. C'est un concept essentiellement naturaliste, parce qu'il se focalise sur le fonctionnement écologique du *river corridor* ; effectivement sa délimitation se base essentiellement sur la connectivité latérale du cours d'eau avec les écosystèmes de son corridor (Forreman, 1995).

Les deux concepts mettent en évidence l'espace soumis au fonctionnement du cours d'eau par des approches différentes. L'espace de liberté a une approche essentiellement hydrogéomorphologique, tandis que le *river corridor* se réfère au même espace dans une perspective écologique. C'est pour cette raison que le premier concept est préféré dans notre analyse ; de plus il a déjà montré son utilité pour les rivières mobiles latéralement.

Dans le but de contribuer à un meilleur aménagement et gestion de la rivière, ce chapitre propose de répondre à deux objectifs. Le premier objectif consiste dans la délimitation de l'espace de liberté de la rivière Prahova. Le deuxième objectif se réfère à l'identification des enjeux socio-économiques, qui se trouvent dans cet espace et qui sont affectés par les aléas associés à la dynamique de la rivière.

### **3.2.2. Démarche méthodologique**

La méthodologie de délimitation de l'espace de liberté de la rivière a été proposée par Malavoi *et al.* (1998) dans le Guide technique n°2 pour le SDAGE Rhône-Méditerranée Corse. Le principe qui se trouve à la base de cette méthodologie est que l'état actuel du cours d'eau est le résultat d'une longue évolution spatio-temporelle.

Conformément à ce guide, afin de connaître l'espace de liberté, trois enveloppes de mobilité de la rivière sont délimitées : l'espace de mobilité maximale, l'espace de mobilité fonctionnelle et l'espace de mobilité minimale. La méthode de délimitation de ces espaces emboîtés est essentiellement cartographique, mais les données introduites dans la démarche cartographique reposent sur une bonne connaissance du terrain (géologie, géométrie des chenaux, granulométrie).

- **L'espace de mobilité maximale** de la rivière correspond généralement à l'ensemble du fond de vallée ; en général il a été formé à la fin de la plus récente période glaciaire. Les matériaux déposés sont potentiellement mobilisables. Cette enveloppe correspond au lit majeur des rivières (épisodique, exceptionnel) qui fonctionne en situation de crues exceptionnelles (Masson *et al.*, 1996) et, dans certains cas, elle peut inclure les terrasses basses aussi, qui ont un rôle important dans l'apport sédimentaire (Malavoi *et al.*, 1998). Cet espace s'approche du concept d'« espace de mobilité idéale », dans la mesure où, si on laissait au cours d'eau l'ensemble de cet espace, il disposerait de toutes les conditions nécessaires pour l'ajustement morphodynamique à long terme : amplitude du champ de méandrage pour ajuster sa pente, ensemble du stock alluvial pour ajuster sa charge solide (Malavoi *et al.*, 1998).
- **L'espace de mobilité fonctionnelle représente l'espace de liberté** au sens préconisé par le SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse. Sa délimitation se fait en cinq étapes, certaines étant optionnelles (Malavoi *et al.*, 1998).
  - **Approche par le concept d'amplitude d'équilibre.** L'amplitude d'équilibre représente l'espace qui pourrait être affecté par le fonctionnement du cours d'eau dans les conditions hydroclimatiques actuelles. Il repose sur des relations entre différents paramètres géométriques du cours d'eau (pente, largeur à pleins bords, sinuosités...). Selon Malavoi *et al.* (1998), dans les cas des rivières à méandres, l'amplitude d'équilibre théorique des rivières de la région Rhône-Méditerranée-Corse varie entre 4 et 18 fois la largeur à pleins bords, la moyenne des valeurs se situant à 8,5 fois cette largeur. Par précaution l'amplitude d'équilibre est estimée à 10 fois la largeur du chenal à pleins bords ; elle devrait être équi-répartie sur les deux rives du cours d'eau, mais, en réalité, elle dépend de contraintes anthropiques (routes, zones urbanisées). Les mêmes auteurs considèrent que le tressage n'est pas un style fluvial d'équilibre où l'impossibilité d'estimer l'amplitude d'équilibre ; dans ce cas, elle est estimée approximativement à l'espace de mobilité historique sans influence des contraintes anthropiques.
  - **Approche de la capacité de transport.** Le calcul de la capacité de transport d'un cours d'eau permet de connaître la charge qui pourrait être transportée par le cours d'eau en fonction de ses particularités géométriques.
  - **Approche basée sur l'évolution historique.** La définition de l'espace de mobilité historique d'un cours d'eau se base sur l'analyse de sa dynamique fluviale récente

et notamment sur l'emprise spatiale historique des déplacements du chenal/des chenaux. Le principe de base consiste à superposer l'ensemble de ses tracés historiques, jusqu'aux plus récents disponibles et à dessiner l'enveloppe externe.

- **La délimitation de l'espace actuel de mobilité résiduelle (ou restreinte).** Il s'agit de la portion de l'espace maximal encore disponible pour l'érosion latérale. Cet espace n'est pas nécessairement inclus dans le précédent dans la mesure où l'érosion peut dépasser les limites de l'espace historique occupé par le cours d'eau durant les 100 dernières années. La méthode consiste à localiser et cartographier les ouvrages de protection des berges et les digues, c'est à dire toutes les structures naturelles ou artificielles pouvant faire obstacle à la dynamique latérale (Malavoi *et al.*, 1998).
- **Les zones d'érosion à 50 ans.** Le but de cette étape est de déterminer les zones d'érosion probable à moyen terme (50 ans). Cette étape consiste dans la superposition des documents cartographiques récents et le calcul du taux d'érosion pour une certaine période (exemple : de 20 ou de 50 ans) et pour des tronçons homogènes. Les valeurs obtenues sont extrapolées pour les 50 ans à venir. Cette délimitation devrait tenir compte des situations engendrées par des recoupements de méandres.
- **La délimitation de l'enveloppe minimale fonctionnelle.** Cette étape représente une synthèse des premières étapes. Elle consiste dans la délimitation de l'enveloppe externe de l'espace fonctionnel en fonction des résultats obtenus dans les étapes antérieures et dans l'indication des zones d'érosion.
- **La délimitation de l'espace de liberté minimale.** L'espace de mobilité minimale représente l'espace fonctionnel retouché en fonction d'enjeux et de concentrations locales, pour prendre en considération certaines contraintes anthropiques (exemple : zones urbanisées). L'approche socio-économique permet d'analyser l'occupation du sol de l'espace fonctionnel de la rivière, qui donne un aperçu des zones d'intérêt écologique actuel et potentiel et des enjeux socio-économiques exposés aux aléas associés à la dynamique de la rivière.

A partir de cette démarche méthodologique, on a fait ici quelques choix liés aux données disponibles et aux caractéristiques du terrain d'étude.

- En ce qui concerne **le lit majeur des rivières carpatiques romaines**, Posea *et al.* (1963) précisent qu'il résulte de l'action de la plus récente période glaciaire et qu'il

est plus large que la capacité actuelle des rivières ; la fonte des glaciers carpatiques a créé des rivières dont le débit et la charge solide étaient plus importants qu'à présent. Dans le cas de la Prahova, le lit majeur carpatique et subcarpatique correspond au fond de la vallée. Dans la zone de plaine, la délimitation du lit majeur dépend localement de la présence des terrasses ; dans le cas de l'absence des terrasses, cette délimitation s'avère difficile à cause de la longue évolution de la rivière et de la présence des affluents. En absence de données sédimentologiques, les limites proposées dans ce travail sont hypothétiques.

- En ce qui concerne **l'amplitude d'équilibre de la rivière Prahova**, on a essayé d'utiliser aussi bien la méthode de Malavoi *et al.* (1998), que la méthode d'Arnaud-Fassetta et Fort (2008). En prenant l'exemple de l'Aude, Arnaud-Fassetta et Fort (2008) considère que la zone d'amplitude d'équilibre est équivalente à la zone inondable pour des débits supérieurs au temps de retour de 80 ans. Dans cette thèse, on a tenu compte de l'extension de la zone inondable telle qu'elle a pu être déterminée. Là où des données concernant l'extension de la zone inondable n'existent pas, sa limite a été estimée à 10 fois la largeur du chenal fluvial à pleins bords (dans le cas des tronçons sinueux et à méandres). Les conclusions de ce chapitre indiqueront qu'elle est la signification de cette valeur de « 10 fois » étant donné les particularités de la rivière Prahova. Dans le cas des tronçons en tresses, cette amplitude est estimée à l'espace de mobilité historique et aux zones inondables, telle qu'elles sont connues actuellement. De toute façon, on a pu remarquer que les débordements de la Prahova sont rares dans les tronçons tressés (par exemple, à Stăncești, le temps de retour du débit à pleins bords est d'environ 35 ans).
- La délimitation de **l'espace de mobilité historique de la rivière Prahova** valorise les résultats obtenus dans la première partie de cette thèse. On rappelle que les documents disponibles sont les plans militaires de 1897-1902, les cartes topographiques de 1954-1955 et de 1977-1980 et sur des photos aériennes de 2003-2005. La méthodologie de superposition de ces documents est expliquée dans la première partie.
- **L'espace de liberté de la rivière Prahova représente l'espace maximal délimité par l'enveloppe d'amplitude équilibre théorique/zone inondable et par l'enveloppe de mobilité historique.**

- La détermination des **zones d'érosion à 50 ans** de la rivière Prahova repose sur celle des zones érodées par le cours d'eau durant les 25 dernières années (1980-2005). Puis ce taux d'érosion est doublé afin d'obtenir le taux d'érosion à 50 ans. Cette étape est basée sur l'estimation du taux d'érosion dans les conditions hydrologiques récentes, sans prendre en compte les éventuels changements de débit liquide et solide qui modifieraient l'intensité de l'érosion. Ces zones sont ensuite ajustées en fonction des contraintes anthropiques. Bien que Bien que cette étape puisse paraître rudimentaire, Piégay *et al.* (2005) considèrent qu'elle est nécessaire, parce que l'idée de délimiter un espace fluvial potentiellement soumis à l'érosion ne doit pas se limiter à l'approche historique de la migration des chenaux fluviaux.
- **L'espace de liberté minimale de la rivière Prahova** tient compte des contraintes anthropiques (digues, ponts, remblais des voies de transport, zones urbanisées). La limite de cette espace est tracée entre le cours d'eau et ces enjeux. Au cours de cette étape, on met en évidence aussi les zones soustraites à l'érosion latérale ; dans cette catégorie on a inclus aussi bien les zones qui se trouvent dans l'espace de liberté, que les zones qui se trouvent entre la limite de l'espace de liberté et la limite du lit majeur.

**En conclusion, l'espace de liberté est l'espace utilisé par la rivière essentiellement pour des débordements, tandis que l'espace de liberté minimale représente l'espace qui peut être soumis aux ajustements latéraux du cours d'eau.**

### **3.2.3. Espace de liberté de la Prahova. Etudes de cas pour des tronçons à dynamiques différentes**

Afin de comprendre les problèmes liés à la délimitation de l'espace de liberté de la rivière Prahova, des tronçons à dynamiques différentes (style fluvial, évolution) sont pris en compte. Ces tronçons sont choisis à partir des résultats de la première partie de cette thèse. Donc la démarche méthodologique expliquée ci-dessus est appliquée sur : 1) un tronçon carpatique, qui se caractérise par un chenal sinueux qui s'est rétréci par la « perte » de ses bancs alluviaux surtout dans la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle ; 2) un tronçon subcarpatique qui se caractérise par le rétrécissement de sa bande active et dont l'ancienne bande active est anthropisée ; 3) un tronçon en tresses dans la Plaine de Ploiești qui se caractérise par le rétrécissement de sa bande active sous l'influence de la végétalisation de ses marges ; 4) deux

tronçons à méandres de la Plaine de Gherghița qui se caractérisent par leur migration latérale durant les 100 dernières années ; on a choisi de présenter ces deux exemples pour leur intérêt pratique (en préfigurant les résultats, cet intérêt pratique se réfère au risque d'inondation).

#### *3.2.3.1. L'exemple d'un tronçon carpatique*

Le tronçon carpatique pris en compte s'étend entre les localités de Poiana Țapului et de Sinaia, sur une longueur de 4,7 km.

On a considéré que, dans les Carpates, le lit majeur de la Prahova correspond au fond de sa vallée (cf. Figure 73A) et il est délimité à partir de cartes topographiques.

La zone d'amplitude d'équilibre est estimée à 10 fois la largeur du chenal fluvial à pleins bords. Localement, cette zone a été retouchée en fonction de l'extension de la zone inondable (cf. Figure 73A). Par exemple, la rive droite de la rivière est entièrement inondable conformément aux témoignages des habitants.

A l'intérieur du lit majeur, le chenal de la Prahova a migré latéralement entre 1902 et 2004. L'espace balayé par ses migrations est son espace de mobilité historique (cf. Figure 73B). Si on considère que l'érosion de la berge concave continuera et que le taux d'érosion sera double par rapport à celui des 25 dernières années (1980-2004), à condition que les caractéristiques hydrologiques actuelles restent les mêmes, on estime que six périmètres se caractériseront par la migration latérale du chenal fluvial dans les 50 ans à venir (cf. Figure 73C). Cette situation n'est pas tout à fait réelle à cause de contraintes anthropiques.

L'espace de liberté de la rivière correspond à l'extension maximale de sa zone inondable et de son espace de mobilité historique (cf. Figure 73D). Mais les contraintes anthropiques font que cet espace soit moins large. A droite, il est délimité par le remblai de la voie routière (DN1/E60) et par des zones urbanisées (essentiellement résidentielles – le quartier du périphérique de Sinaia) qui se développent entre le remblai de la voie routière et le chenal de la rivière. A gauche, il est délimité par des zones urbanisées (industrielle et résidentielle – quartier Cumpătu de Sinaia). Ces contraintes ne permettent que localement l'évolution du cours d'eau par érosion dans les 50 ans à venir. Pourtant le fonctionnement de la rivière met en danger ces installations et plus précisément le remblai de la voie routière DN1/E60 (voir § 3.3.3.1.1.). De plus les zones soustraites à l'érosion et qui se trouvent dans l'espace de liberté de la rivière peuvent être affectées par les débordements de la Prahova (voir §3.3.4.1.).

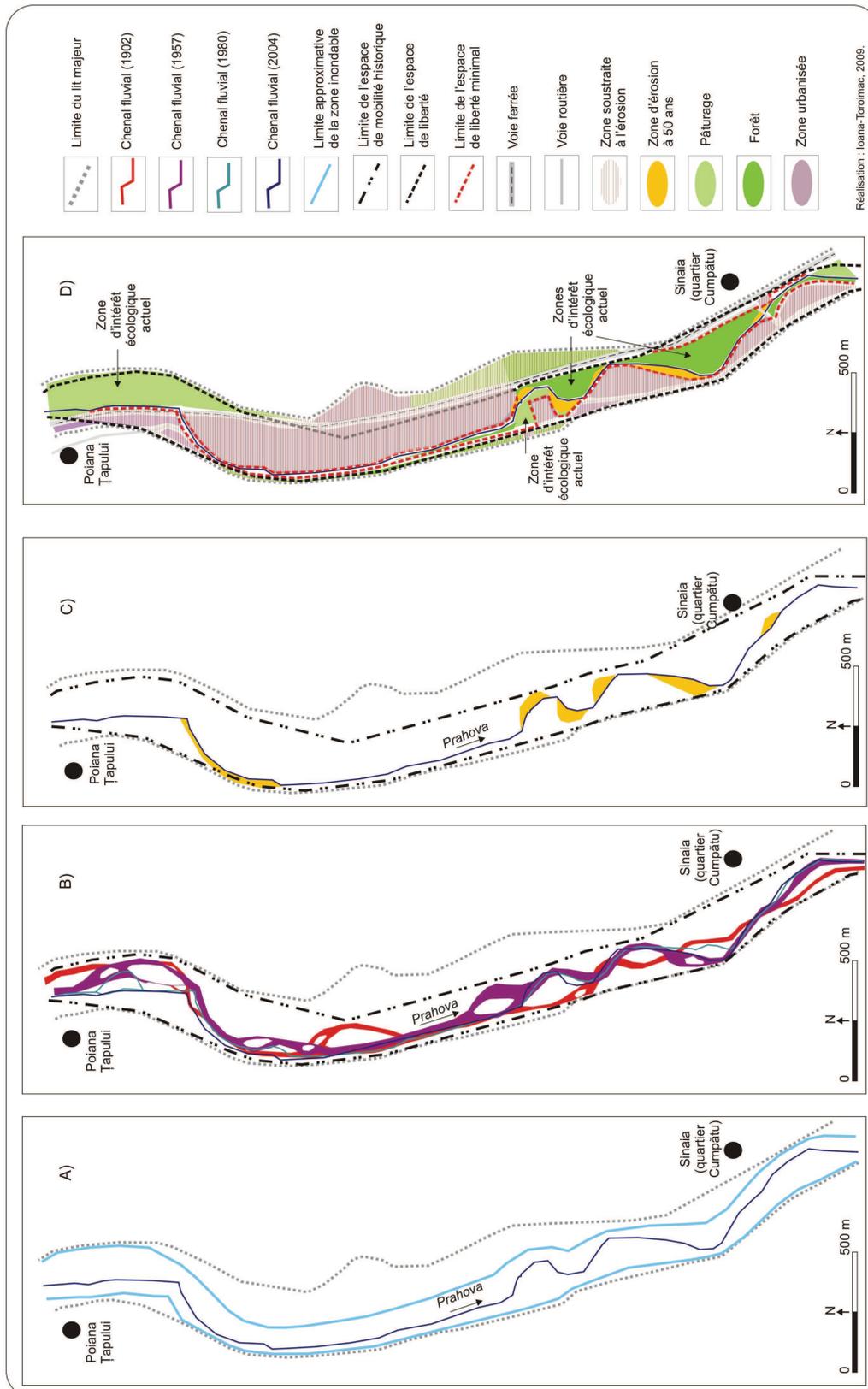


Figure 73. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon carpatique. A) Extension du lit majeur et de la zone inondable. B) Extension de l'espace de mobilité historique. C) Zones d'érosion à 50 ans dans les conditions hydrologiques actuelles. D) Extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques.

### 3.2.3.2. *L'exemple d'un tronçon subcarpatique*

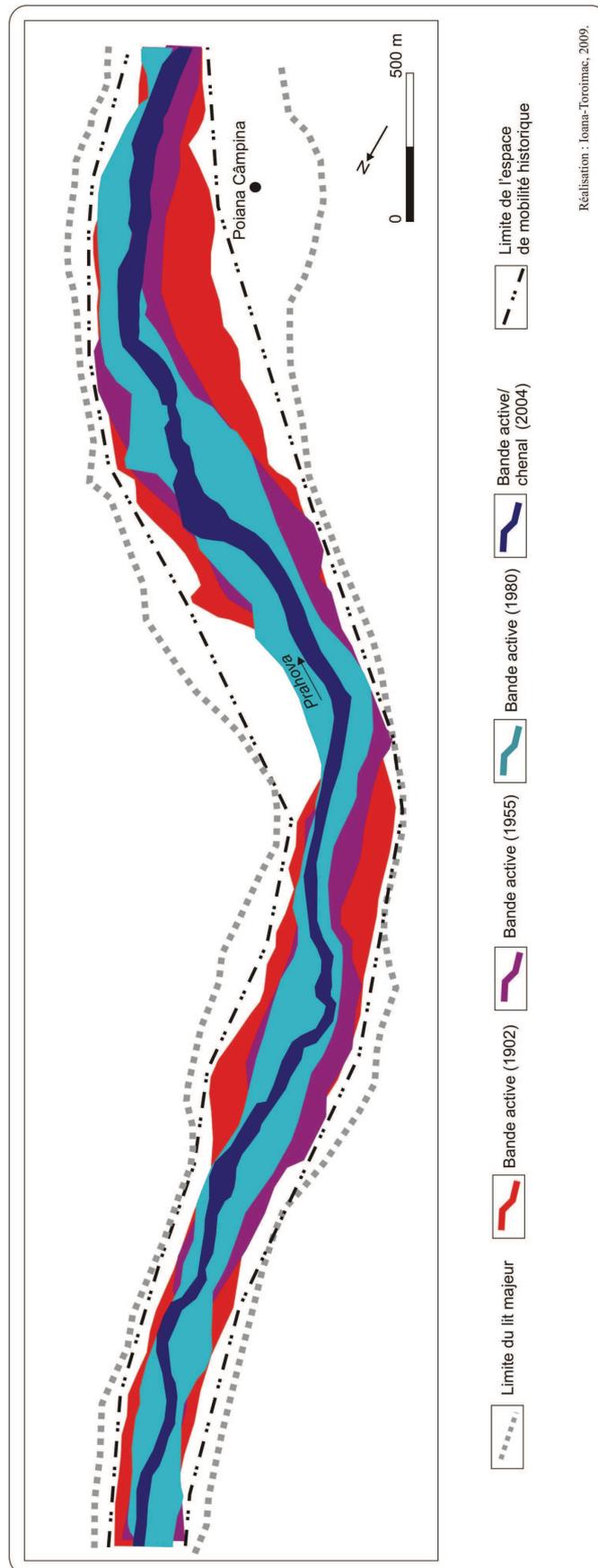
Le tronçon subcarpatique étudié se trouve en amont de la localité de Poiana Cămpina, sur une longueur de 5,5 km.

Dans cette analyse, on a considéré que le lit majeur de la Prahova correspond au fond de sa vallée subcarpatique (cf. Figure 74).

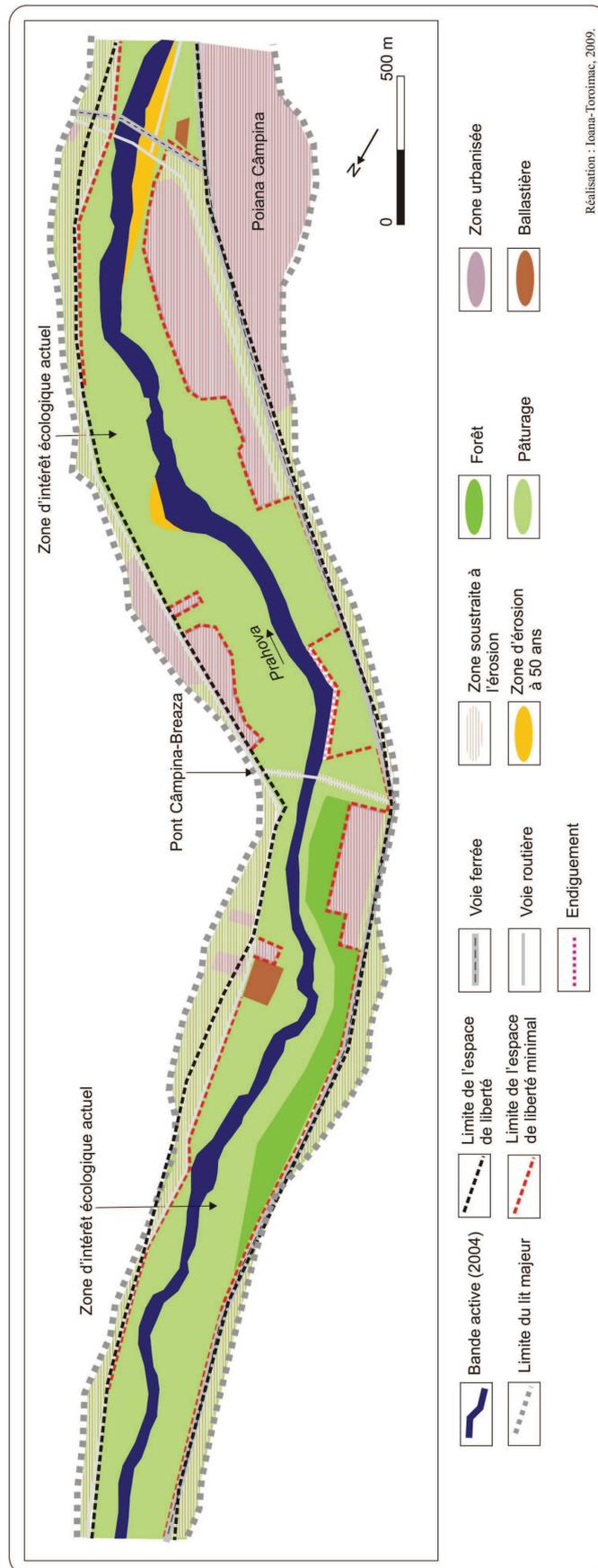
Etant donné le fait que c'est un tronçon présentant des ébauches de tresses, sa zone d'amplitude d'équilibre correspond à l'espace de mobilité historique conformément aux explications données dans la présentation de la démarche méthodologique. De plus cette zone est rarement inondable, étant donné l'incision du chenal/de la bande active de la Prahova le long de son tronçon subcarpatique.

L'espace de mobilité historique de la rivière correspond à la superficie balayée par les réajustements latéraux de la bande active de la Prahova durant la période 1902-2004 (cf. Figure 74). Cette figure confirme les résultats obtenus dans la deuxième partie de la thèse : le rétrécissement progressif de la bande active de la Prahova. Malgré le rétrécissement, on a identifié deux berges concaves qui ont été érodées par rapport à la situation de 1980. Après avoir estimé le taux d'érosion de cette période, on propose deux périmètres qui seront affectés par la migration latérale de la Prahova durant les 50 années à venir si les conditions hydrologiques ne changent pas (cf. Figure 75)

Bien qu'en théorie, l'espace de liberté de la rivière soit égale à l'espace de mobilité historique, en réalité il est délimité par des contraintes anthropiques (cf. Figure 75). Sur la rive droite, il est délimité par le remblai de la voie ferrée (Bucarest-Braşov), par des zones urbanisées (résidentielles), ainsi que par un ouvrage de type gabion qui se trouve en aval du pont Cămpina-Breaza et qui a le rôle de limiter la migration latérale du cours d'eau. Sur la rive gauche, l'espace de liberté est délimité par le remblai de la voie routière (DN1/E60) et localement par la présence des zones urbanisées (essentiellement résidentielles). Une des zones d'érosion à 50 ans met en danger une route de Poiana Cămpina, d'importance locale. De plus deux ballastières exploitent des graviers et des sables de la Prahova au détriment de l'activité de tressage telle qu'elle est analysée dans la deuxième partie de cette thèse ; pourtant on considère que ces deux zones d'exploitation ne limitent pas, à long terme, les ajustements latéraux du cours d'eau.



**Figure 74. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon subcarpatique : extension du lit majeur et de l'espace de mobilité historique.**



**Figure 75. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon subcarpatique : extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques.**

### 3.2.3.3. L'exemple des deux tronçons tressés dans la Plaine de Ploiești

Le premier tronçon en tresses analysé s'étend en amont et en aval des localités de Nedelea et d'Ariceștii Rahtivani, sur une longueur de 9,5 km.

Sur ce tronçon, le lit majeur de la Prahova est délimité sur les deux rives par une terrasse. La terrasse n'est plus visible au sud de la localité de Nedelea. Selon Niculescu (1960), la disparition de cette terrasse est liée au dépôt d'alluvions sur le cône de déjection de la Prahova. Selon le même auteur le Leaotu est un ancien cours de la Prahova, mais l'auteur ne précise par l'âge de ce cours abandonné. Actuellement le Leaotu est utilisé en tant que canal de dérivation de l'eau de la Prahova vers la zone industrielle de Ploiești. Dans ce contexte, la délimitation du lit majeur au sud de la localité de Nedelea est assez compliquée. En absence d'autres données, on propose de délimiter le lit majeur de la Prahova entre les deux cours d'eau en respectant la forme des courbes de niveau. Sur la rive gauche se trouve le Canal des Moulins (en roumain *Iazul Morilor*), un autre cours abandonné de la Prahova ; étant donné le fait qu'il se trouve à la base de la terrasse, il est intégré dans le lit majeur de la Prahova. En effet cette délimitation du lit majeur de la Prahova est confirmée par Velcea et Velcea (1965).

L'espace de mobilité historique de la rivière correspond à la superficie utilisée pour les ajustements latéraux de la bande active de la Prahova durant la période 1899-2005 (cf. Figure 76). Cette figure confirme les résultats obtenus dans la deuxième partie de la thèse ; la bande active de la Prahova s'est rétrécie durant le 20<sup>ème</sup> siècle. Ce rétrécissement de la bande active a eu comme conséquence l'extension des pâtures dans les périmètres abandonnés par le cours d'eau. Ces marges végétalisées pourraient être réoccupées par le cours d'eau, raison pour laquelle elles sont importantes aussi bien du point de vue hydrogéomorphologique, que du point de vue écologique. Localement la bande active de la Prahova a migré latéralement. Après avoir estimé le taux d'érosion de la période 1980-2005, on estime que plusieurs périmètres peuvent être affectés par la migration latérale de la Prahova dans les 50 années à venir dans les conditions hydrologiques actuelles (cf. Figure 77).

L'espace de liberté de la rivière correspond à son espace de mobilité historique (cf. Figure 77). Localement il est délimité par des contraintes anthropiques. Sur la rive gauche, l'espace de liberté de la rivière est délimité par les berges en béton du canal de dérivation du barrage de Nedelea et, plus en aval, par la localité d'Ezeni. Sur la rive droite, une levée de terre a été construite dans le lit majeur de la Prahova après l'inondation de juillet 1975 qui a affecté une partie de la localité d'Ariceștii Rahtivani ; de fait depuis juillet 1975, il n'y a pas de fortes

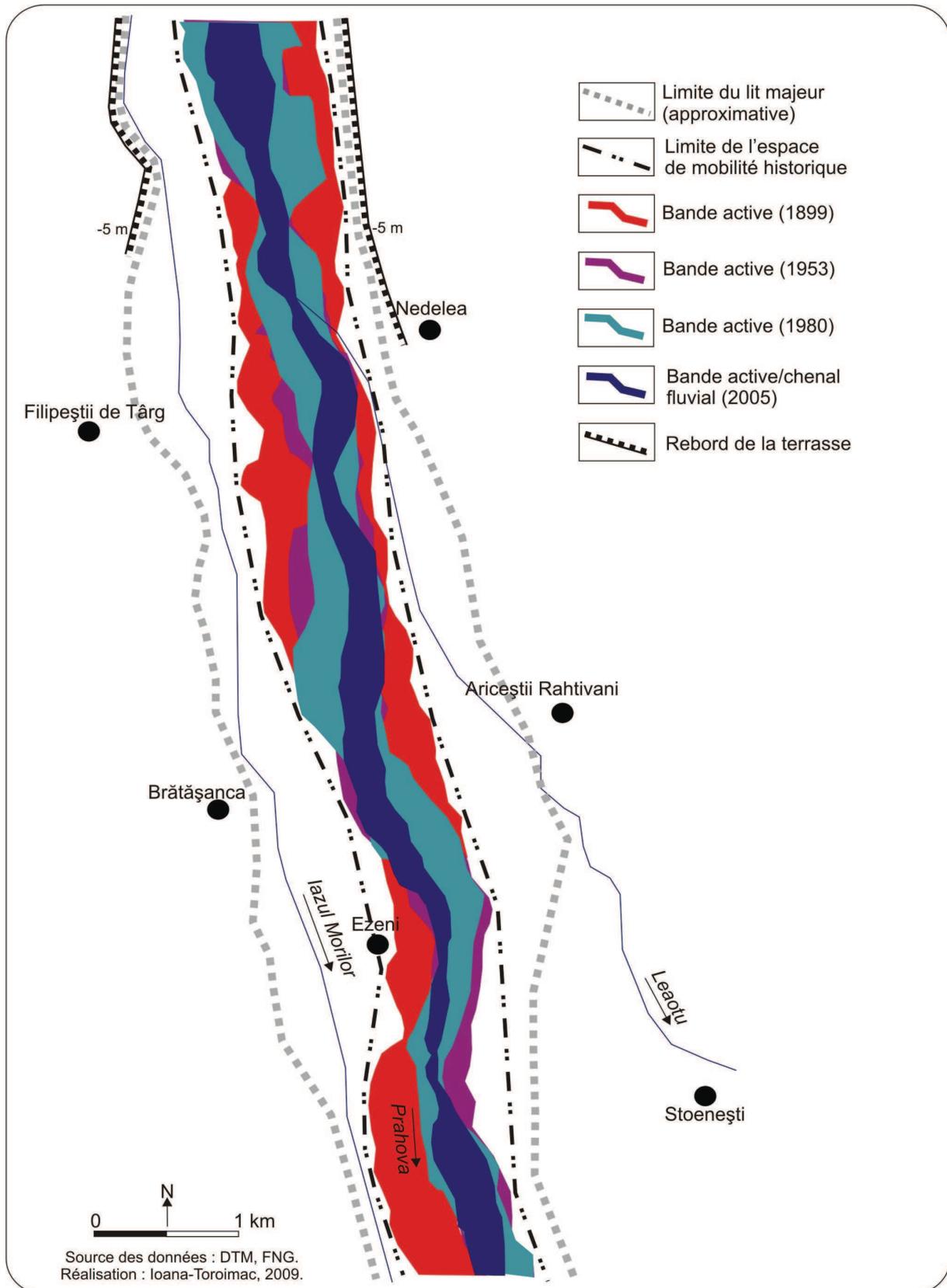
inondations qui aient affectées les localités situées le long de ce tronçon de la Prahova. Pourtant, à long terme, tous ces aménagements empêchent les ajustements latéraux de la Prahova.

Le deuxième tronçon en tresses analysé s'étend en amont et en aval des localités de Stăncești, Piatra et Stejaru, sur une longueur de 14,4 km.

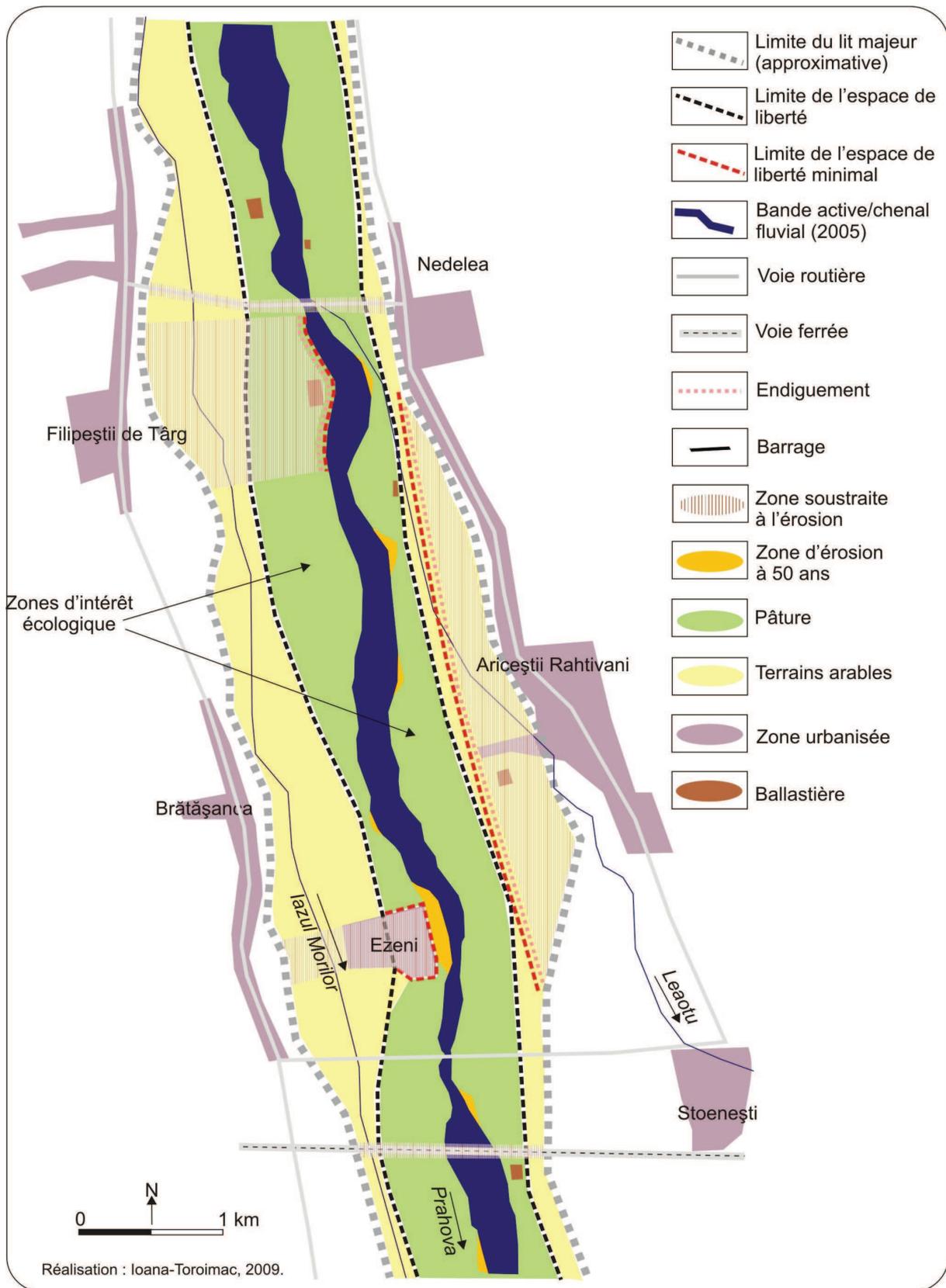
La délimitation du lit majeur de la Prahova dans le secteur en tresses de la Plaine de Ploiești est une problématique compliquée. L'estimation qu'on propose dans la Figure 78 a pour point de départ les observations et la schématisation proposée par Velcea et Velcea (1965). De fait, dans le même lit majeur s'écoule aussi bien la Prahova actuelle, que le canal Iazul Morilor ; c'est pour cette raison la limite du lit majeur a été positionné très loin sur la rive droite. Sur la rive gauche la limite est tracée en respectant les courbes de niveau. Comme dans le cas des tronçons antérieurs, l'amplitude d'équilibre correspond à l'espace de mobilité historique pour ces tronçons en tresses. Pourtant les plans militaires de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle proposent deux zones inondables, qui représentent d'anciens bras abandonnés par la Prahova (cf. Figure 78).

L'espace de mobilité historique est délimité en fonction de la dynamique latérale de la Prahova durant la période 1899-2004 (cf. Figure 78). Elle confirme les observations faites dans la première partie de la thèse concernant le rétrécissement progressif de la bande active après 1899, ainsi que ses migrations latérales. A partir de l'évolution de la bande active entre 1980 et 2004, on a déterminé, selon la méthodologie expliquée dans les paragraphes antérieurs, cinq périmètres qui seront affectés par des migrations latérales dans les 50 ans à venir (cf. Figure 79). De plus l'érosion latérale pourrait déterminer l'évolution latérale de l'espace de mobilité historique de la rivière.

L'espace de liberté de la rivière correspond à l'extension maximale de l'espace de mobilité historique et des deux zones inondables. L'impact des interventions anthropiques sur l'extension de l'espace de liberté de la rivière se manifeste essentiellement par la soustraction à l'érosion latérale des deux périmètres qui correspondent à un axe de transport traversant le cours d'eau (cf. Figure 79). Une situation particulière est à Piatra et à Stejaru. Deux ouvrages de protection des berges (dalles de béton) ont le rôle de protéger de l'érosion la berge droite de la Prahova. Mais la berge de la Prahova coïncide avec le bord raide et haut de plus de 10 m d'une terrasse. Bien que la base de la terrasse soit protégée, la partie supérieure recule sous l'impact des processus de météorisation, au détriment des deux localités (voir § 3.3.3.3.).



**Figure 76. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon tressé de la Plaine de Ploiești (Nedelea-Ariceștii Rahtivani) : extension du lit majeur et de l'espace de mobilité historique.**



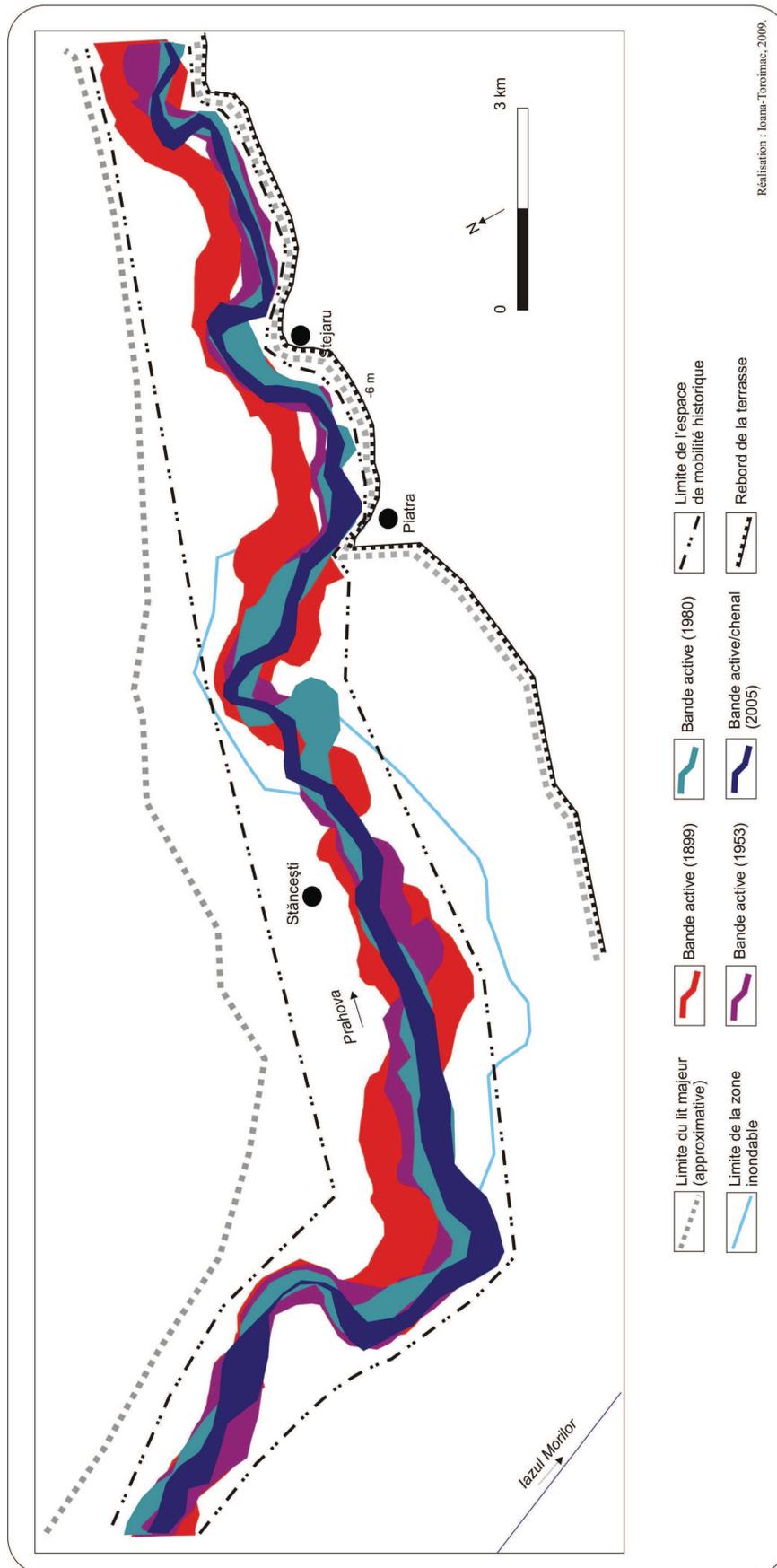


Figure 78. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon tressé de la Plaine de Ploiești (à Stăncești): extension du lit majeur, de la zone inondable et de l'espace de mobilité historique.

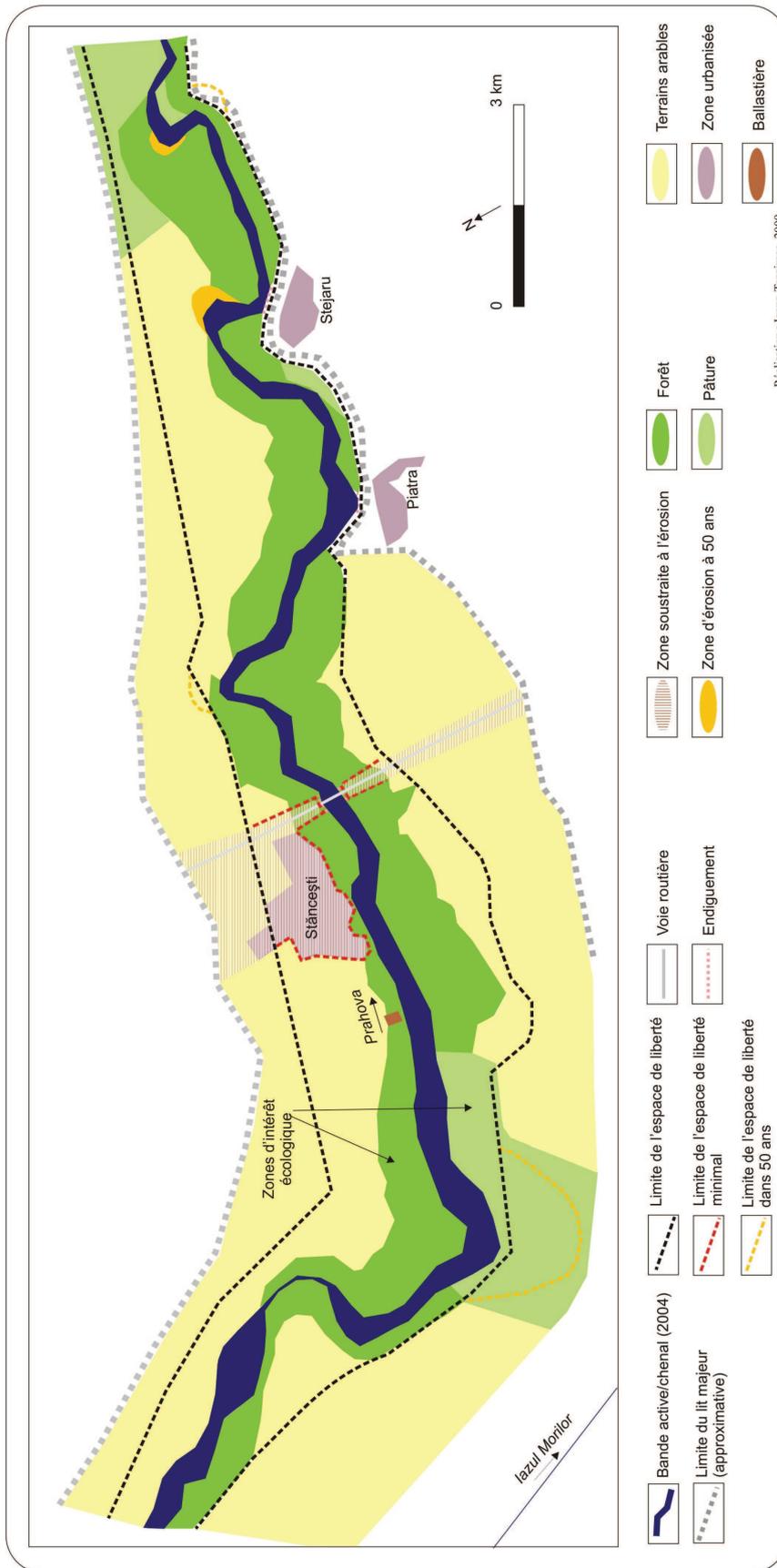


Figure 79. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon tressé de la Plaine de Ploiești (à Stăncești) : extension espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques.

#### 3.2.3.4. L'exemple de deux tronçons à méandres dans la Plaine de Gherghița

Le premier tronçon à méandres pris en compte s'étend entre les localités de Gherghița et de Tufani, sur une longueur de 21,5 km.

Une première difficulté réside dans la délimitation du lit majeur de la Prahova (cf. Figure 80). Pour le tronçon analysé, la limite droite du lit majeur est nette, parce qu'elle correspond aux bords d'une terrasse du Pléistocène supérieur – Holocène. Localement le rebord de la terrasse est raide et atteint 5 m de hauteur. Là où la terrasse n'est pas visible dans la topographie (phénomène de subsidence), on a reconstitué sa limite à partir de la carte géologique (la limite entre les alluvions récentes et les matériaux du Pléistocène supérieur – Holocène). La limite gauche est moins évidente. En absence d'analyses sédimentologiques, il est difficile de la distinguer de celles des lits majeurs des affluents qui traversent cette zone à pente faible. Elle a été estimée approximativement et à titre d'hypothèse, comme celle proposée par Velcea et Velcea (1965), à partir des courbes de niveau. En ce qui concerne l'amplitude d'équilibre, elle est équivalente à la zone inondable représentée sur les plans militaires de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, et retouchée en respectant la valeur de 10 fois la largeur du chenal à pleins bords proposée par Malavoi *et al.* (1998) (cf. Figure 80).

On remarque la migration latérale importante des méandres entre 1897 et 1954 et l'évolution latérale peu importante du cours d'eau depuis 1954, situation expliquée précédemment dans cette thèse. La délimitation de l'espace de mobilité historique tient compte de la terrasse située sur la rive droite de la Prahova (cf. Figure 81). Etant donné la mobilité réduite des méandres depuis 1977, on estime qu'un seul périmètre pourrait être soumis à l'érosion dans 50 ans (cf. Figure 82).

L'espace de liberté de la rivière représente l'extension maximale de la zone inondable et de l'espace de mobilité historique (cf. Figure 82). Localement il est délimité par des levées de terre (construites à Gherghița et à Tufani), dont le rôle est de protéger contre les inondations, et par le développement des localités. On a identifié également des zones soustraites à l'érosion ; ces zones se situent soit à l'intérieur de l'espace de liberté, soit à l'extérieur, ce qui montre que dans le futur, la migration latérale de la rivière dans son espace de liberté sera localement contrariée par des contraintes anthropiques. Pourtant les zones situées dans l'espace de liberté et soustraites à l'érosion peuvent être affectées par le débordement du cours d'eau (voir §3.3.4.2.).

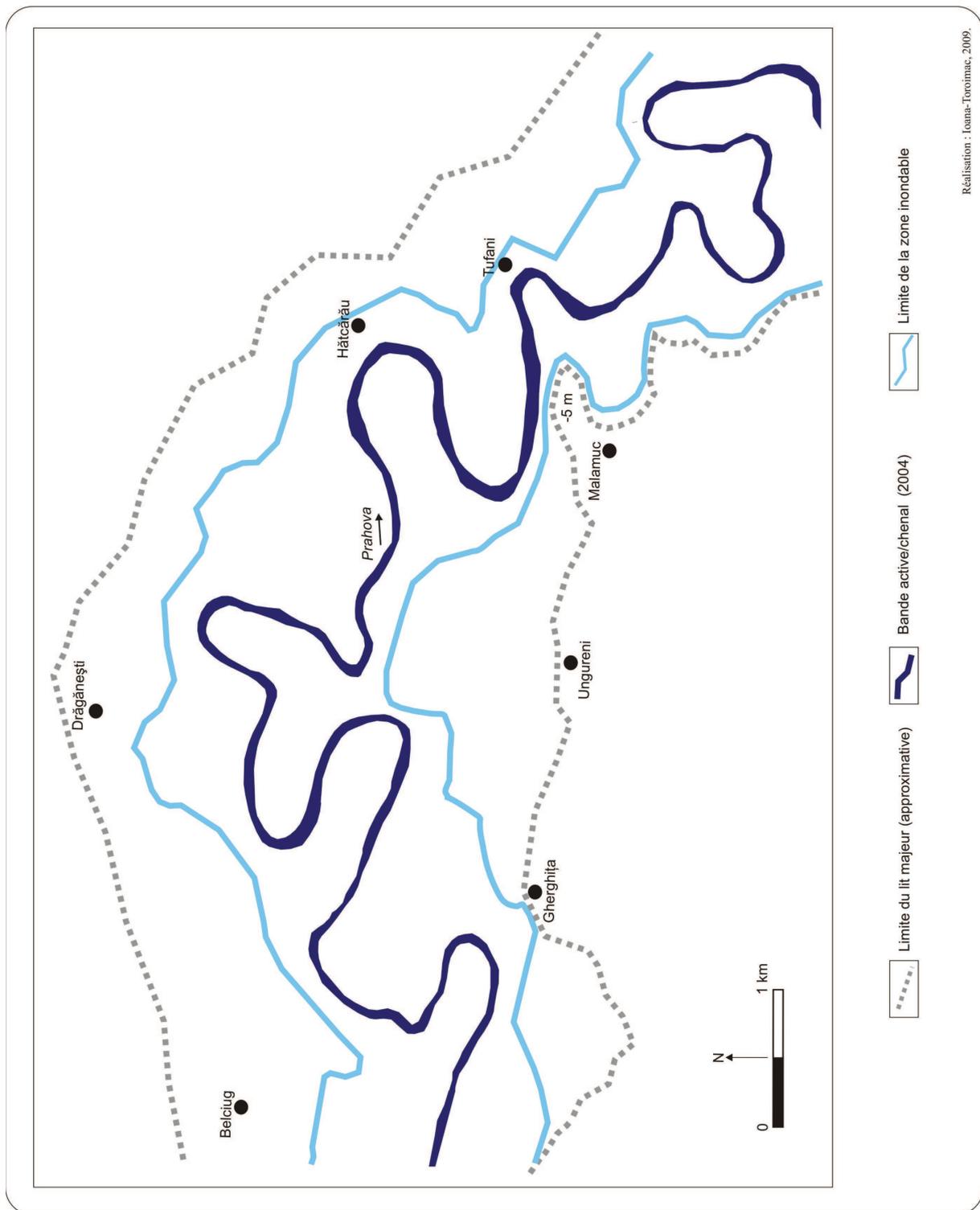


Figure 80. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (à Gherghița) : extension du lit majeur et de la de la zone inondable.

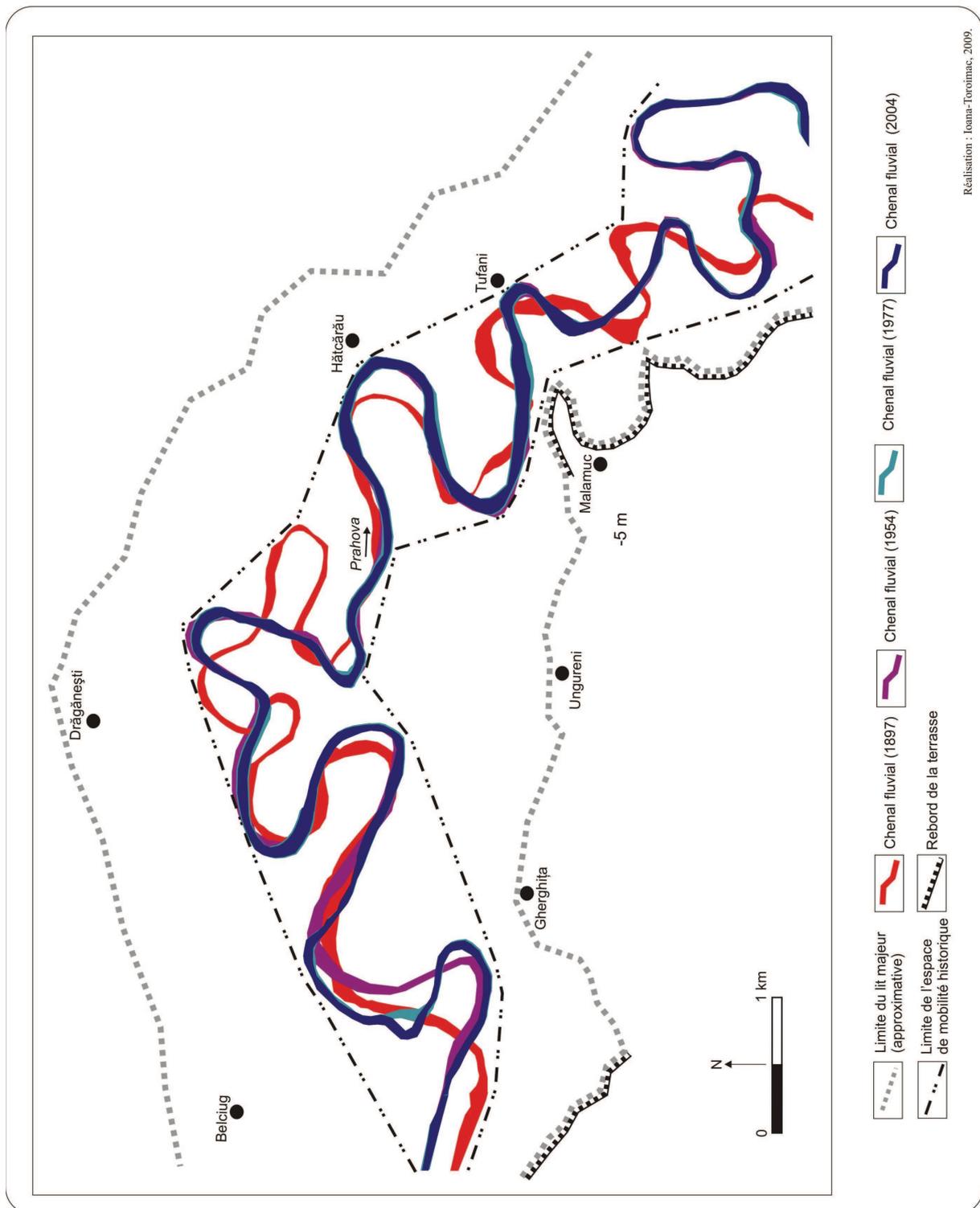


Figure 81. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (à Gherghița) : extension de l'espace de mobilité historique.

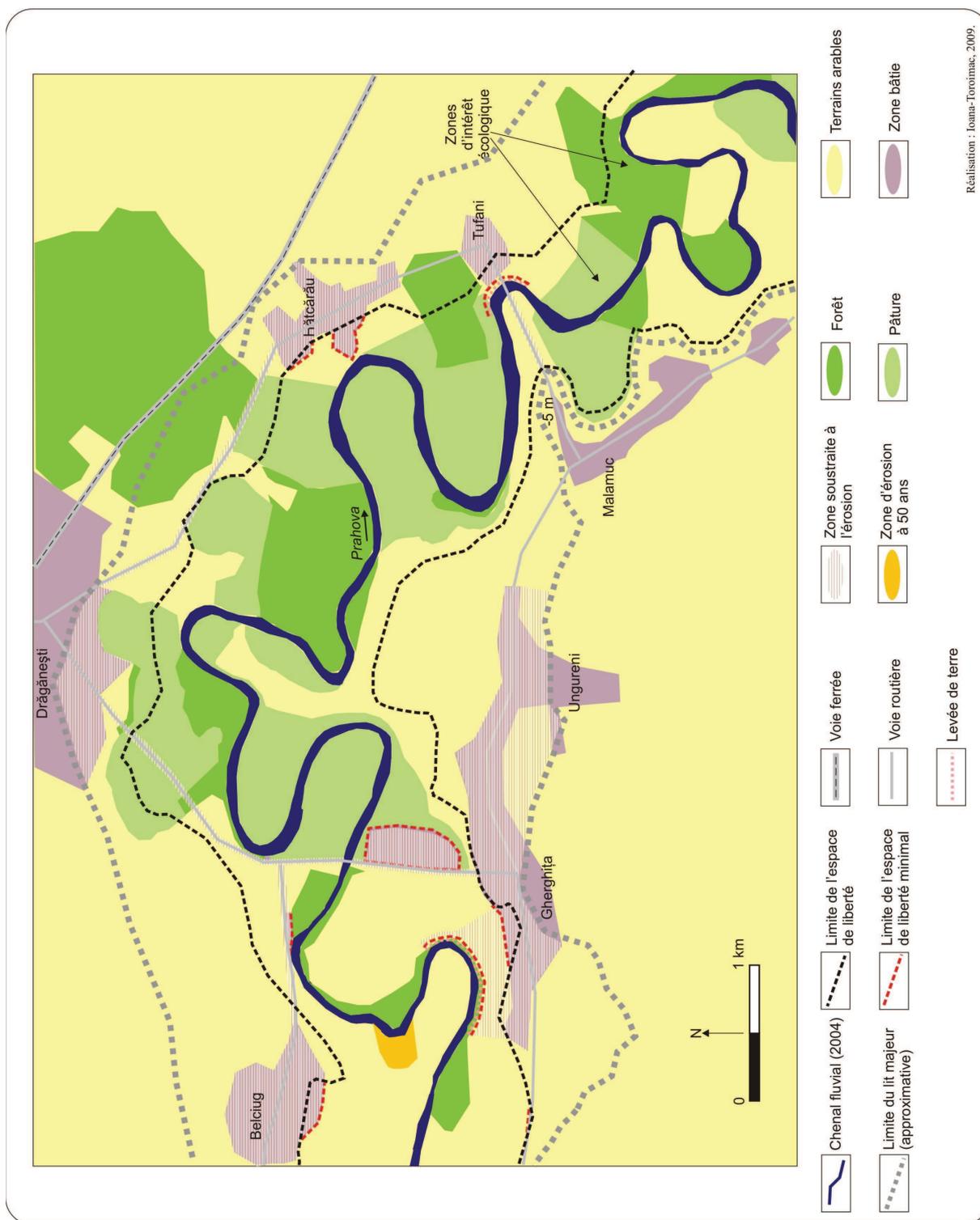


Figure 82. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (à Gherghița) : extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques.

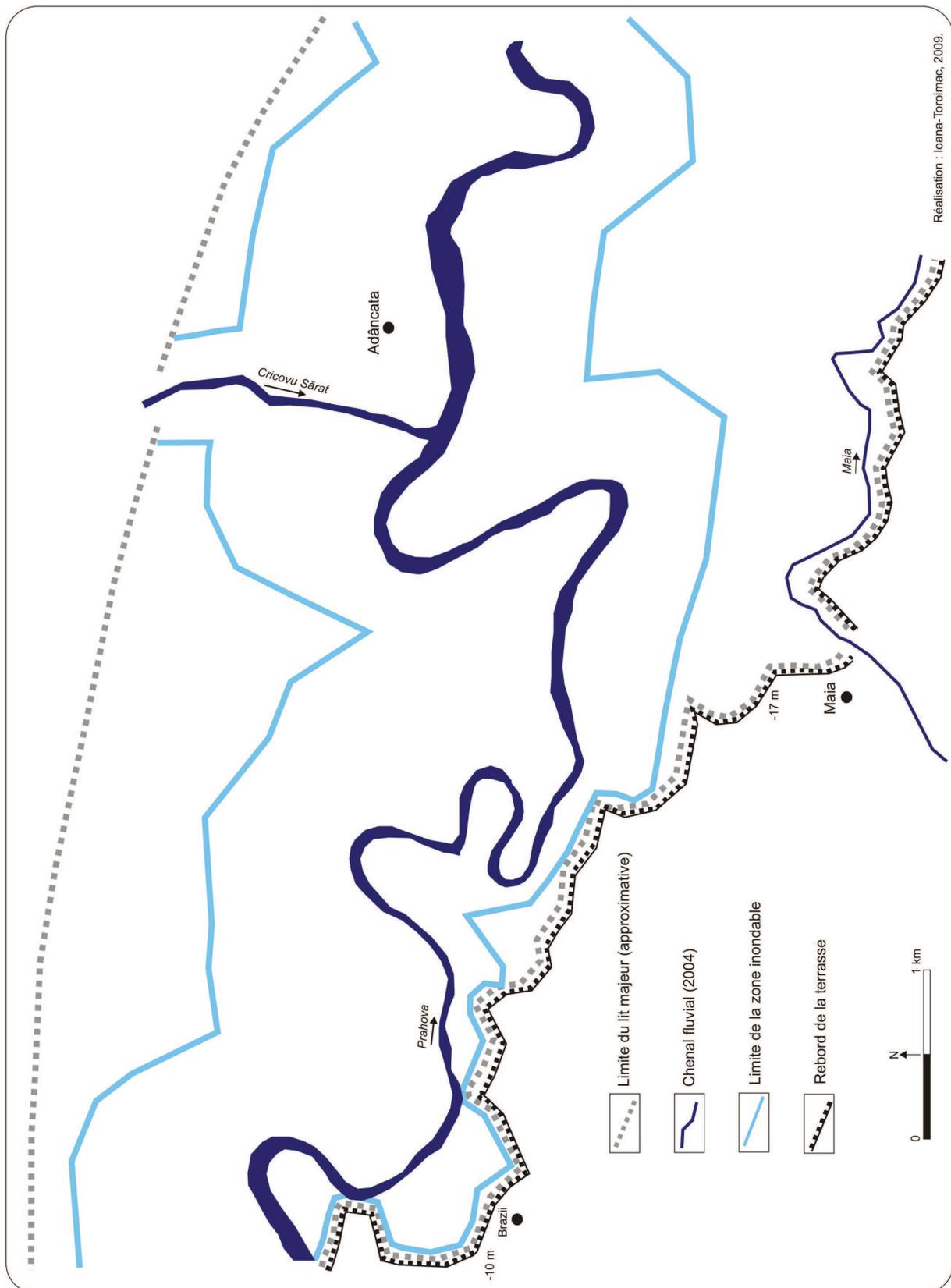
Le deuxième tronçon à méandres s'étend entre les localités de Brazii et d'Adâncata, sur une longueur de 14 km.

Le lit majeur de la Prahova est délimité sur la rive droite par une terrasse du Pléistocène supérieur – Holocène, dont le rebord atteint localement 17 m de hauteur (cf. Figure 83). La rivière Maia est un affluent que la Prahova reçoit quelques kilomètres en aval et qui s'écoule à la base de cette terrasse. La limite gauche du lit majeur est plus difficile à tracer essentiellement à cause de la pente faible. De plus la Prahova, ainsi que ses affluents ont eu une longue évolution latérale sur ce tronçon, qui résulte des nombreux paléo-méandres et qui complique cette délimitation. En conséquence la limite qu'on propose dans cette analyse est purement hypothétique ; elle représente la limite extérieure des paléo-méandres de la Prahova qu'on a pu identifier à partir de documents cartographiques.

L'amplitude d'équilibre est estimée à 10 fois la largeur du chenal à pleins bords proposée par Malavoi *et al.* (1998) (cf. Figure 83). Son contour correspond aux limites de la zone inondable conformément à la SGA Prahova.

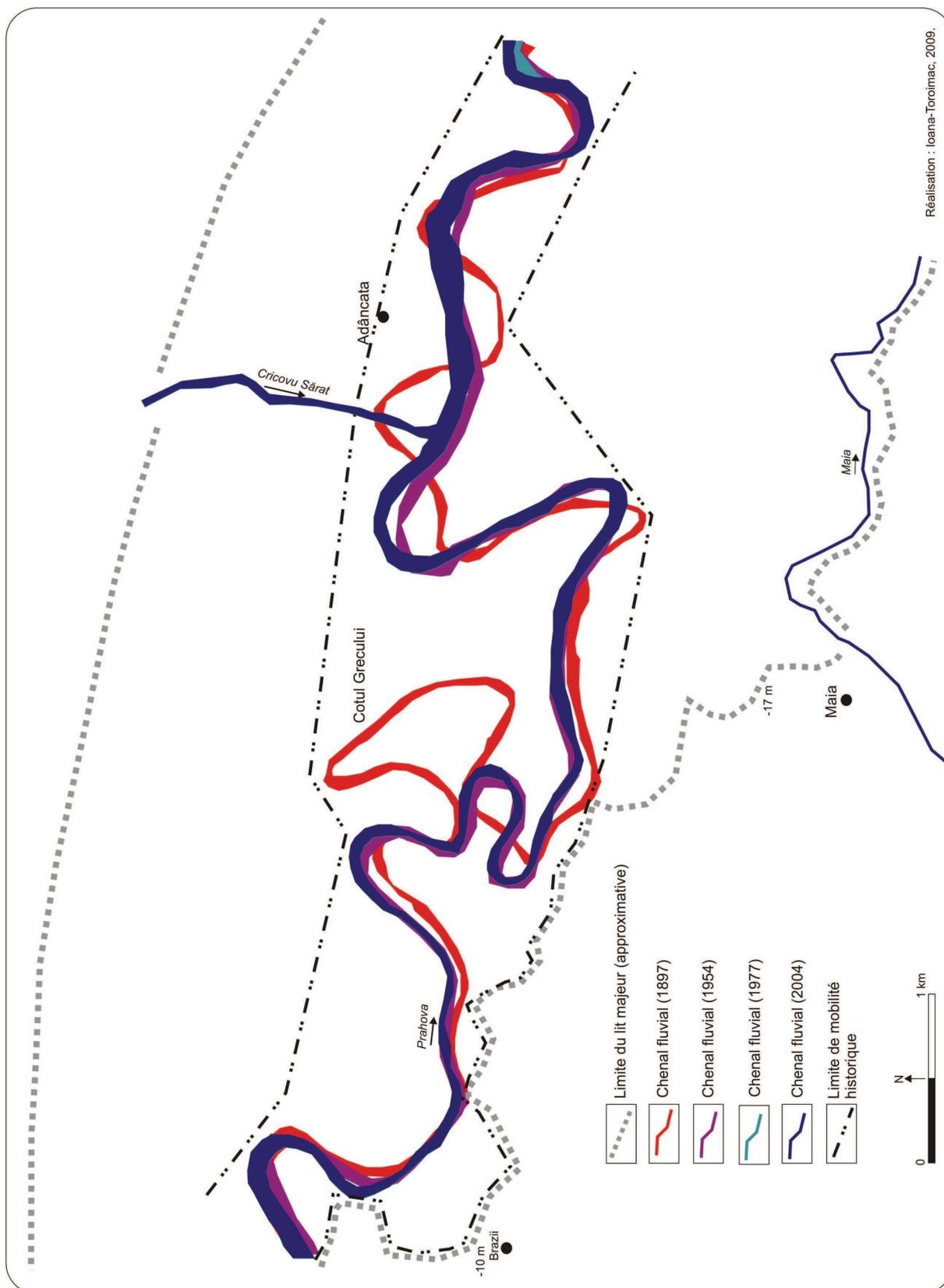
La migration latérale des méandres de la Prahova a été importante entre 1897 et 1954, quand un méandre fut recoupé et la confluence avec le Cricovu Sărat a évolué vers le sud sous l'influence de cet affluent. Ultérieurement, après 1954, les migrations latérales furent plus lentes. La délimitation de l'espace de mobilité historique utilisé par la rivière entre 1897 et 2004 tient compte de la terrasse située sur la rive droite de la Prahova (cf. Figure 84). Dans le contexte d'une dynamique peu active des méandres depuis 1977, un seul périmètre pourrait être soumis à l'érosion dans 50 ans (cf. Figure 85). Un des facteurs qui a contribué au ralentissement des migrations latérales est la forêt. La majeure partie de la superficie forestière est d'origine anthropique ; des peupliers ont été plantés depuis les années 1960 sur les rives du cours d'eau dans le but d'atténuer les crues.

L'espace de liberté de la rivière représente l'extension maximale de la zone inondable et de l'espace de mobilité historique (cf. Figure 85) ; l'espace de mobilité historique est moins étendu en superficie que la zone inondable. La localité d'Adâncata se trouve dans l'espace de liberté de la rivière. Elle est protégée contre la dynamique de la rivière (migration latérale, inondations) par une levée de terre. On estime que la zone occupée par cette localité est soustraite à l'érosion, mais elle reste inondable, bien que, depuis sa mise en place dans la deuxième moitié des années 1970, la levée de terre ait été efficace.



Réalisation : Ioana-Torolmac, 2009.

Figure 83. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (Brazii-Adâncata) : extension du lit majeur et de la de la zone inondable.



**Figure 84. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (Brazii-Adâncata) : extension de l'espace de mobilité historique.**

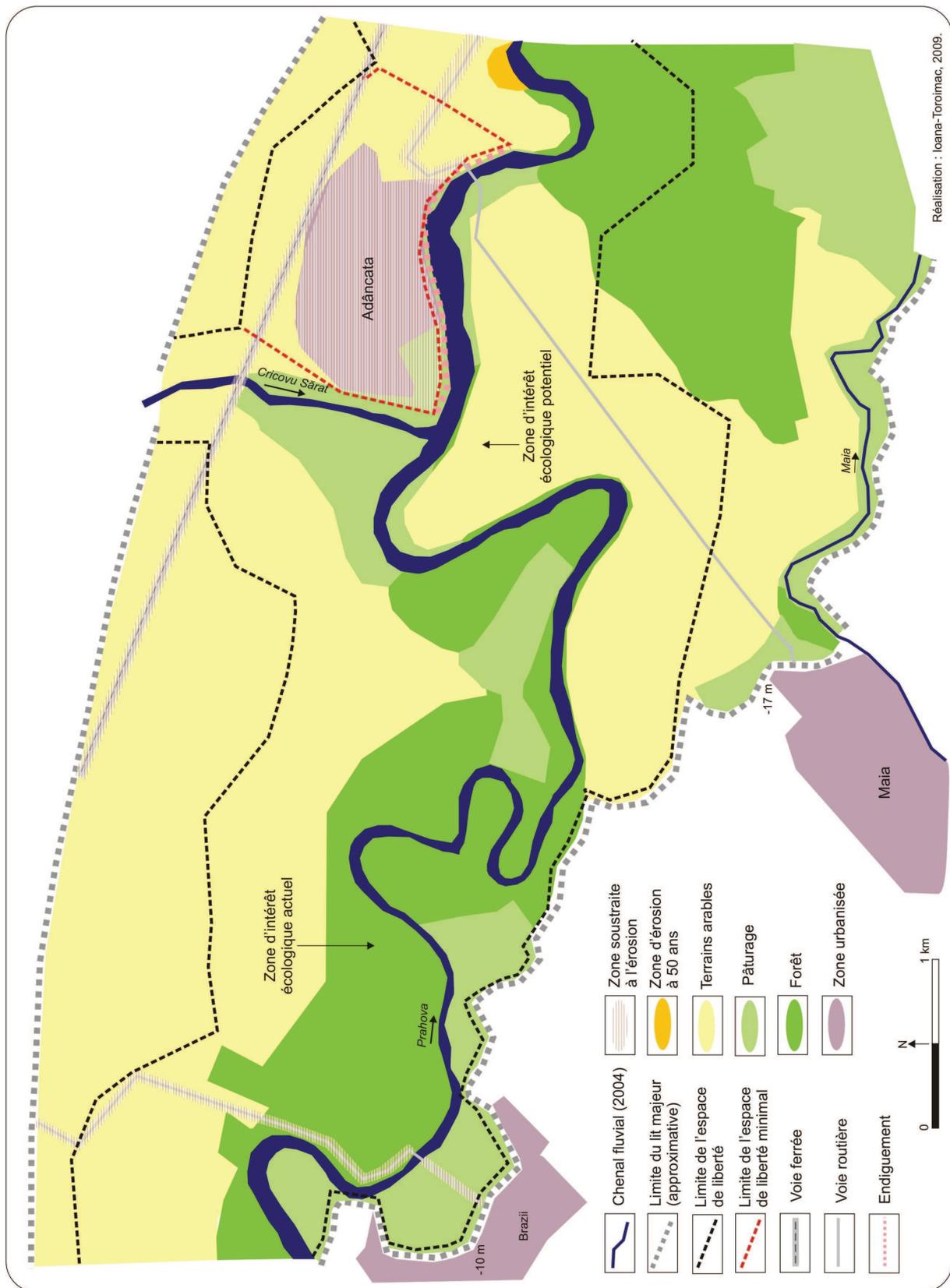


Figure 85. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (Brazii-Adâncata) : extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques.

### 3.2.4. Discussions et conclusions

En conclusion, l'espace de liberté de la rivière a des particularités pour chaque type de style fluvial. En cumulant les résultats de la délimitation de l'espace de liberté de la rivière et ceux présentés antérieurement dans cette thèse, il est possible de tirer deux conclusions. A présent, l'espace de liberté des tronçons en tresses de la rivière Prahova se caractérise essentiellement par des migrations latérales accompagnant l'érosion des berges ; les inondations sont assez rares. De plus, dans le cas des tronçons en tresses et surtout du tronçon Nedelea-Aricești Rahtivani, l'espace de liberté de la rivière correspond en bonne partie à la bande active de la Prahova de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, ce qui confirme la diminution significative des contraintes de la rivière durant le 20<sup>ème</sup> siècle. L'espace de liberté des tronçons à méandres est moins affecté par la migration actuelle du chenal, parce que la rivière est dans une étape de dynamique lente de ces méandres ; par contre il fonctionne sous l'impact des inondations, qui sont plus fréquentes par rapport aux tronçons en tresses.

En ce qui concerne le questionnement sur la signification de l'amplitude d'équilibre de la rivière, telle qu'elle a été représentée, et son équivalence avec la zone inondable, deux conclusions ont été obtenues. Conformément aux témoignages des habitants, l'inondation de 1990 a couvert la voie routière (DN1/E60) qui longe la Prahova sur sa rive droite en amont de Sinaia. Il en résulte donc que la zone inondable correspond à un débit à temps de retour supérieur à 10 ans (cf. Tableau 23 de la deuxième partie de la thèse). D'après les témoignages des habitants de la partie nord-ouest de la localité de Gherghița (partie située dans la zone inondable et donc dans l'espace de liberté de la rivière), leurs maisons, construites dans les années 1920-1940, ont été affectées par les inondations de 1975, puis par cinq vagues successives d'inondation entre 1998 et 2007. Conformément au Tableau 23 de la thèse, ces inondations correspondent à un débit à temps de retour supérieur à 10 ans. De fait l'extension maximale de la zone inondable se trouve probablement juste en aval de la confluence avec le Teleajen, à 4,5 km en amont de la localité de Gherghița. Conformément à la SGA Prahova, à partir des expériences de juillet 1975 et de septembre 2005, la localité d'Adâncata peut être entièrement inondée pour un débit à temps de retour supérieur à 50 ans. Les agriculteurs qui cultivent les terrains situés sur la rive droite de la Prahova, en face de la localité d'Adâncata, attestent que, depuis 1975, ils n'ont été affectés ni par les débordements de la Prahova, ni par les fortes crues de son affluent Cricovu Sărat, ce qui confirme les particularités de la zone inondable/amplitude d'équilibre de chaque tronçon de la rivière.

Les interventions anthropiques ont limité les possibilités de la rivière d'évoluer latéralement. La situation la plus « dramatique » est dans les Carpates, où il reste très peu d'espace disponible pour la migration de la rivière. De plus les interventions anthropiques ont diminué la superficie à intérêt écologique actuel. Ces superficies forment environ 21% pour le tronçon carpatique analysé, environ 71% pour le tronçon subcarpatique, environ 85% pour le tronçon en tresse de Nedelea- Aricești Rahtivani, environ 68% pour le tronçon en tresses de Stăncești, environ 73% pour le tronçon à méandres de Gherghița-Tufani et environ 42% pour le tronçon à méandres de Brazii-Adâncata.

La démarche méthodologique proposée dans ce chapitre a quelques limites : 1) la délimitation du lit majeur des tronçons de plaine (en tresses et à méandres) est approximative et nécessite des analyses sédimentologiques afin de pouvoir tirer des conclusions pertinentes ; 2) en absence des documents qui montrent l'extension des inondations historiques de la Prahova, la délimitation de la zone inondable reste approximative ; 3) la précision de la délimitation de l'espace de mobilité historique dépend de la qualité des documents utilisés ; en ce sens on revoit au Tableau 16 de la deuxième partie qui propose les erreurs de la méthodologie de superposition des documents utilisés ; 4) les zones d'érosion à 50 ans sont délimitées en fonction des conditions hydrologiques des 25 dernières années, mais il est possible que ces conditions hydrologiques changent.

On observe deux types de logique de l'occupation du sol de l'espace de liberté de la Prahova. 1) **La logique de l'espace gagné à la rivière**, qui consiste dans l'urbanisation intense de l'espace fluvial. Cette logique caractérise l'espace de liberté de la Prahova dans les Carpates et même dans les Subcarpates (en amont de la confluence avec la Doftana). Elle a été appliquée essentiellement entre 1900 et 1955, quand la plupart des aménagements actuels ont été mis en place, en relation avec le développement récent d'une infrastructure de transport moderne et celui de l'industrie. 2) **La logique du respect de la rivière**, qui caractérise le cours de la Prahova en aval de la confluence avec la Doftana (essentiellement dans les plaines de Ploiești et de Gherghița). Conformément à cette logique, on a laissé la rivière évoluer librement (la ripisylve étant incluse). La protection contre les inondations est assurée localement par des reforestations et par la mise en place de levées de terre uniquement au voisinage des enjeux socio-économiques exposés à ce type de risque. En conséquence, on considère que cette logique est plus « pertinente » et plus proche du concept de « plus d'espace pour les rivières ». Pourquoi une telle différence entre ces deux logiques ? On remarque que cette deuxième logique plus respectueuse de la rivière est plus ancienne : la

plupart des localités qui longent le cours d'eau datent de l'époque médiévale. Depuis le début de la période d'analyse vers 1900, cette partie du bassin versant de la Prahova est restée essentiellement agricole et l'infrastructure a été peu développée. Quelques moyens de protection ont été mis en place surtout après l'inondation de juillet 1975. Une situation particulière est à Adâncata, qui se trouve à la confluence de la Prahova avec le Cricovu Sărat, dans la zone inondable. En effet cette localité s'est développée autour d'un monastère (nombreux lieux de prières cherchant des endroits isolés au Moyen-Âge afin de se protéger contre les invasions étrangères) et ultérieurement en relation avec la transhumance, activité favorisée par les pâturages humides des deux rivières. Mais il n'est pas possible de préciser quel était le tracé des deux rivières au moment de l'apparition de cette localité !

L'intérêt pour la délimitation de l'espace de liberté de la rivière réside dans quatre aspects prioritaires : 1) la prise de conscience des effets de l'anthropisation sur la dynamique naturelle du cours d'eau, tels qu'ils ont été présentés dans la deuxième partie de cette thèse ; 2) la prise de conscience des aléas associés à la dynamique de la rivière et des enjeux socio-économiques ; 3) l'identification et la conservation des zones d'intérêt écologique, qui fonctionnent en relation avec la dynamique du cours d'eau et même la renaturalisation des zones d'intérêt écologique potentiel ; les zones d'intérêt écologique représentent en fait des zones humides, spécifiques à chaque type de style fluvial ; 4) dans le contexte d'une réactivation hypothétique de l'activité du cours d'eau, en relation avec les variations du climat, l'espace de liberté sera le premier réoccupé au détriment des enjeux socio-économiques.

### 3.3. Les enjeux liés à la dynamique de la Prahova

#### 3.3.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, on a délimité l'espace de liberté de la Prahova et on a observé que l'Homme utilise cet espace soumis à la dynamique de la rivière. Dans certaines situations, il essaie même de limiter la dynamique de la rivière afin de protéger ces biens.

Le cas de la Prahova n'est pas singulier. L'incision du chenal, accompagné de l'érosion latérale, peut favoriser, d'une part, la destruction de la base des ouvrages de protection latérale et, d'autre part, l'augmentation de la pente, l'intensification de l'érosion régressive, avec des conséquences possibles sur les aménagements situés en amont. C'est le cas de la Drôme ; ces processus ont favorisé la destruction de la base des ouvrages de protection latérale sur 7,5 km de longueur et ils mettent en danger la stabilité des ponts traversant la rivière (Landon *et al.*, 1998). Selon les mêmes auteurs, à part les solutions locales pour la réhabilitation des ouvrages de protection des berges, la surveillance de la charge solide et le renouvellement des alluvions sont nécessaires. L'aggradation du chenal empêche l'écoulement et favorise le débordement. Un tel exemple est celui de la rivière Waiho, qui s'écoule sur le versant occidental des Alpes du Sud de la Nouvelle Zélande. Une évolution spectaculaire a eu lieu lors de la crue de décembre 1995 : l'aggradation a été si rapide qu'il restait trop peu d'espace pour que l'eau s'écoule sous le pont de l'autoroute SH6, ce qui réduisit sa fonction d'axe de circulation. La même crue a arraché un volume de matériaux de 15 m de largeur et 10 m de hauteur sur 200 m de longueur, sur la rive gauche du cours d'eau, mettant en danger l'infrastructure touristique (hôtel, camping) (Davies, 1997 ; West Costal Regional Council, 2002). Deux solutions sont proposées pour résoudre ce problème : à court terme il est nécessaire de renforcer les travaux de protection latérale des berges et à long terme il est envisagé de déplacer les zones touristiques (Ministry of Civil Defence and Emergency Management, 2002). Les précipitations abondantes et les changements récents dans la l'occupation du sol sur les versants (conversion d'une activité agro-pastorale à des activités de ski et de randonnée pédestre, constructions de différents types) ont favorisé la crue de juin 2000 du Guil (affluent de la Durance, qui traverse les Alpes Française du Sud), dont le temps de retour serait de 30 ans. Selon Arnaud-Fassetta *et al.*, (2005), suite à cet événement, la rivière a changé sa géométrie : localement elle a changé de style fluvial et érodé ses berges en créant un chenal principal plus large ; elle a réoccupé des cours abandonnés ou modifiés, en

endommagent les gabions, les digues et autres ouvrages de protection. La crue a provoqué aussi des inondations à Aiguilles, où plusieurs bâtiments ont été endommagés.

Dans ce contexte, **ce chapitre propose d’investiguer les enjeux liés à la dynamique de la Prahova et qui se trouvent dans sont espace de liberté.**

### **3.3.2. Démarche méthodologique**

Afin de comprendre les disfonctionnements des enjeux socio-économiques qui se trouvent dans l’espace de liberté de la Prahova, ce chapitre repose sur plusieurs types de données.

- Les observations de terrain, effectuées en même temps que les observations et les mesures hydrogéomorphologiques, permettent de comprendre les en relation avec les phénomènes et les processus de dynamique fluviale.
- Les discussions avec les habitants permettent de comprendre le caractère récurrent des phénomènes, des processus et des dégâts subis par les enjeux investigués.
- Le rapport de la crue de mars 2007 (CJSU, 2007) permet de connaître les dégâts produits par cette crue et de comparer les données officielles avec les observations de terrain.
- Les rapports de l’APM Prahova concernant la qualité de l’eau et du sol en 2007 dans le département de la Prahova permettent de faire la relation hypothétique entre la dynamique de la rivière (et plus précisément les inondations) et les éventuelles accidents de pollution.
- Les plans d’aménagement du territoire national (PATN-Section V-Zones à risque naturel, 2002)<sup>17</sup> et départemental (PATJ, 2004)<sup>18</sup> intègrent des informations concernant la gestion de la rivière. Ces informations permettent de comprendre comment sont prises les décisions concernant la protection des enjeux liés à la dynamique de la rivière, la gestion et l’aménagement de la rivière et de son espace.

La Figure 86 montre la position des sites pris en compte comme exemples dans la thèse.

---

<sup>17</sup> Disponible en ligne sur le site du Ministère du Développement Régional et de l’Habitat (Ministerul Dezvoltării Regionale și Locuinței).

<sup>18</sup> Disponible en ligne sur le site du Conseil Départemental de Prahova (Consiliul Județean Prahova).

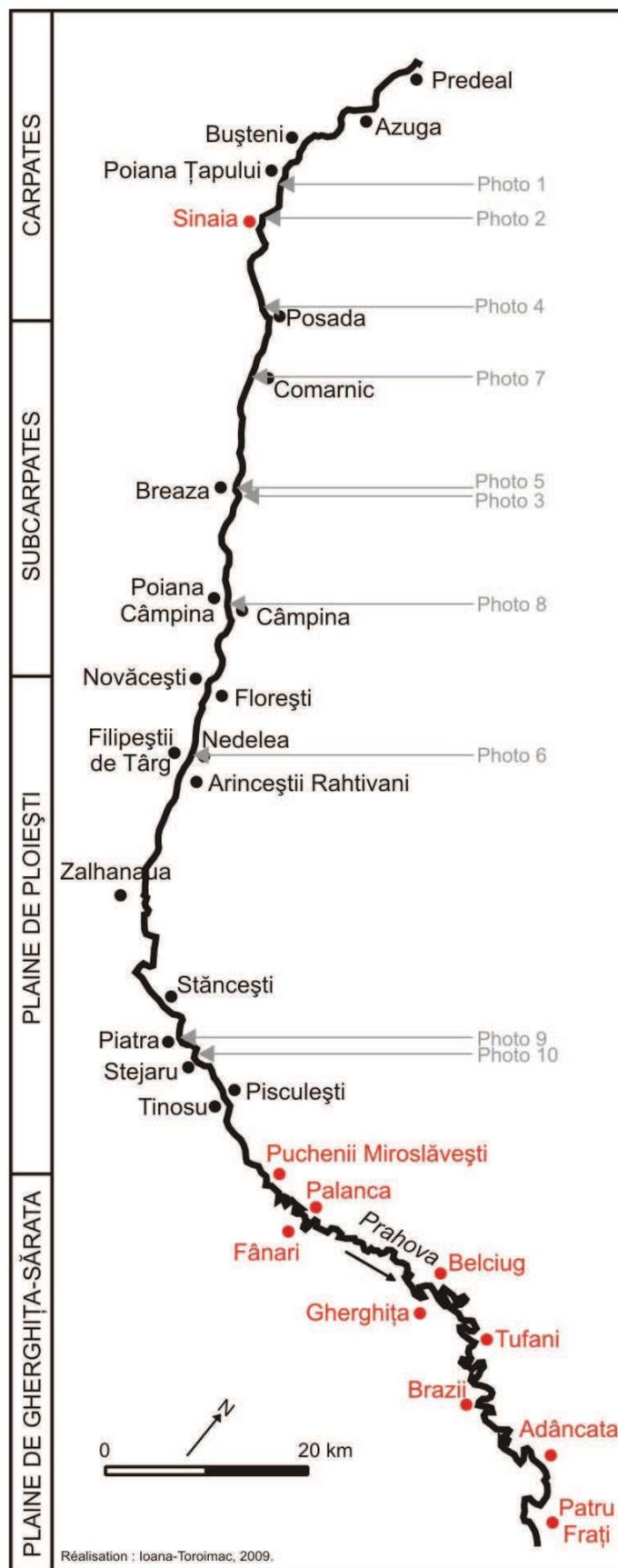


Figure 86. Sites présentés dans ce chapitre : en gris – exemples d’enjeux liés aux processus de dynamique fluviale (érosion latérale, incision, aggradation) ; en rouge – exemples d’enjeux liés aux débordements de la Prahova entre 2005 et 2007.

### **3.3.3. Les enjeux liés aux processus de dynamique fluviale (érosion des berges, incision, aggradation)**

#### *3.3.3.1. Les problèmes récents des voies de transport*

##### 3.3.3.1.1. Les problèmes de la route DN1/E60

Un des enjeux socio-économiques qui se trouvent dans l'espace de liberté de la Prahova, dans les Carpates et dans les Subcarpates, est la route DN1/E60

La voie de transport DN1/E60 a le tracé actuel depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, exception faite par le tronçon Câmpina-Comarnic. Ce tronçon a été construit dans les années 1960. Avant 1960, cette voie de transport traversait la Prahova à Câmpina, montait sur le front de la terrasse de Breaza (sur la droite de la Prahova), traversait cette localité, qui se trouve sur un terrasse, puis elle descendait sur le front de la terrasse et traversait de nouveau la Prahova pour arriver à Comarnic. Le nouveau tracé raccourcit le chemin entre les localités de Câmpina et de Comarnic et il a été construit à la base de la terrasse gauche de la Prahova.

A la fin du mois de mars 2007, au kilomètre 17,8 de la rivière Prahova, dans les Carpates, la route DN1/E60 s'est écroulée sur environ 10 m de longueur et 50 cm de largeur. Sur ce tronçon, la route est étroite, avec une seule voie dans chaque sens. La chaussée routière se trouve à la base du versant et forme la berge droite concave de la Prahova. Les causes supposées avoir déclenché l'écroulement ont été les précipitations abondantes de la période des 21-25 mars 2007 (172,7 mm à Bușteni, valeur trois fois plus élevée que le cumul mensuel moyen), qui ont engendré des écoulements torrentiels sur le versant et une crue de la Prahova. Un facteur favorable à ce processus a probablement été la dynamique fluviale : les berges concaves de rivières sont souvent soumises à l'érosion. L'écroulement de la route a empêché le bon déroulement du trafic sur cet axe transcarpatique, le plus fréquenté de Roumanie ; la circulation a dû se faire en alternance sur une seule voie de circulation. Comme mesure de protection, en octobre 2007, la berge de la Prahova a été renforcée par un mur de béton (cf. Photo 1). Depuis, l'axe routier est à nouveau fonctionnel et la circulation s'y déroule dans les mêmes conditions qu'avant l'événement.

Une situation similaire, mais moins grave, a été identifiée à 2,2 kilomètres en aval. En octobre 2007, la route de déviation de la ville de Sinaia, qui double la DN1/E60 traversant la ville, était affectée par l'érosion. Sur ce tronçon la voie routière se trouve sur la berge droite, concave de la Prahova, en contrebas d'une de ses terrasses. Les causes supposées de

l'érosion sont la dynamique fluviale, plus précisément le processus d'érosion de la berge concave, et la nature lithologique meuble de la berge (graviers d'origine fluviale peu consolidés). Afin de protéger la berge et donc la route contre l'érosion, les responsables de la SGA Prahova avaient créé des bancs d'alluvions artificiels, de forme longitudinale, pour rediriger le flux principal d'eau vers le centre du chenal fluvial (cf. Photo 2). La route n'est pas affectée actuellement, mais elle est menacée à terme par ce type de processus qui pourrait engendrer des dégâts.

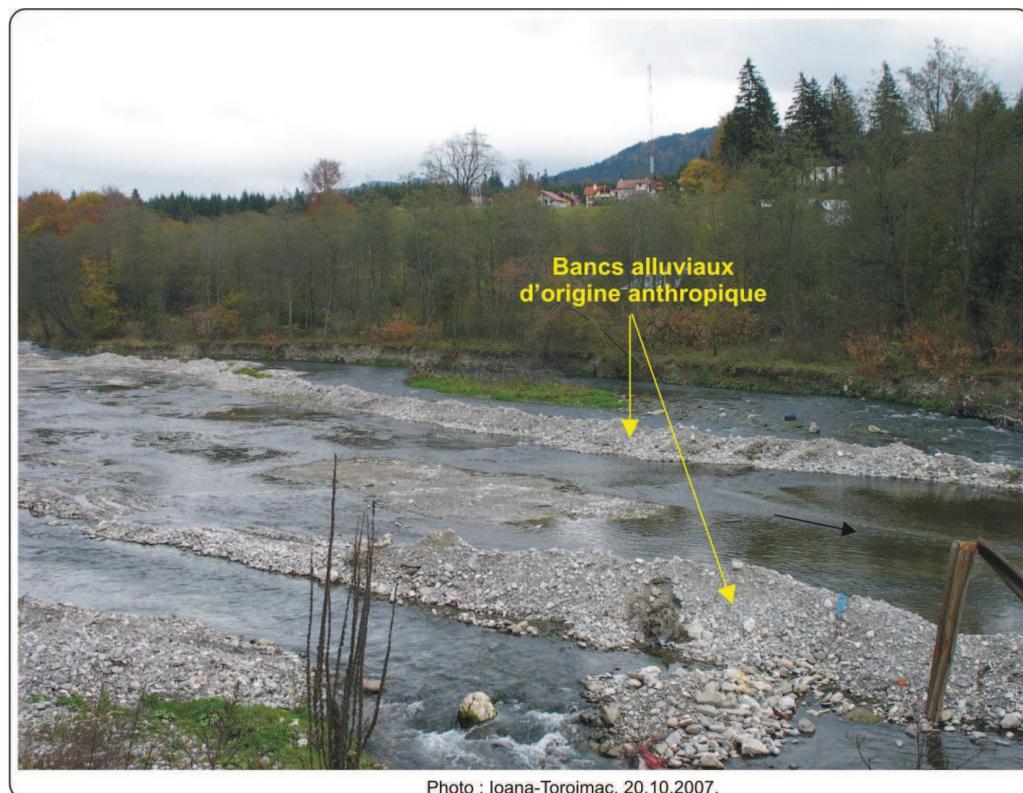
Une autre conséquence des pluies abondantes, tombées cette fois en avril 2006, a été l'intensification de l'érosion torrentielle dans la gorge de Posada. L'un des résultats fut que la même route DN1/E60 vit l'écroulement partiel de la chaussée, sur la bande de roulement Braşov-Bucarest, sur plusieurs centaines de mètres de longueur et environ un mètre de largeur. Durant plusieurs mois, la circulation s'est faite en alternance sur une seule bande de roulement, ce qui a augmenté la durée du transport. Avant la fin de l'année 2006, la voie de transport et le versant ont été renforcés et la circulation a pu se dérouler normalement.

Plus en aval, au kilomètre 48 de la Prahova, dans les Subcarpates, la route DN1/E60 s'est écroulée en avril 2006 sur environ 20 m de longueur et 1 m de largeur. Sur ce tronçon, la voie routière est construite sur la berge gauche, concave de la Prahova et elle est creusée à la base de la terrasse fluviale. Ce tronçon de la voie routière a été construit dans les années 1960. La cause qui a déclenché l'écroulement est d'origine pluviale, à savoir les précipitations abondantes d'avril 2006 engendrant des écoulements torrentiels sur le front de la terrasse de la Prahova. Mais ce processus d'écroulement a été favorisé par la nature lithologique de la berge gauche de la Prahova (graviers d'origine fluviale peu consolidés). De plus il est fort possible que les processus de dynamique fluviale aient fragilisé par érosion cette berge concave de la Prahova. Suite à l'écroulement de la chaussée routière, la circulation a été restreinte à une seule voie, en alternance, déterminant d'importants retards. Comme moyen de réhabilitation et de protection, la berge de la Prahova est protégée contre l'érosion latérale (cf. Photo 3) par des gabions depuis octobre 2007.

Ces exemples montrent que aussi bien des tronçons anciens, que des tronçons récents de cette voie de transport sont affectés par la dynamique latérale de la rivière, ce qui indique que la rivière a la tendance de réoccuper sa place.



**Photo 1. Renforcement de la berge droite de la Prahova, suite à l'écroulement de la route DN1/E60. La photo montre également le trafic intense sur cet axe de transport.**



**Photo 2. Réorientation du flux principal de la Prahova par des bancs alluviaux d'origine anthropique.**



**Photo 3. Renforcement de la berge gauche de la Prahova à Breaza suite à l'écroulement de la route DN1/E60.**

#### 3.3.3.1.2. Ponts routiers et ferroviaires traversants la Prahova

Plusieurs ponts routiers et ferroviaires traversant la Prahova sont affectés par la dynamique de la rivière.

A la sortie de la gorge de Posada, les berges de la Prahova sont de nouveau affectées par l'érosion latérale. Ce processus est visible surtout sur la berge droite de la rivière. L'aléa est déclenché par la dynamique de la rivière, mais il est favorisé par la nature lithologique de la berge (marnes friables). C'est une situation à risque pour quelques constructions ouvrières situées actuellement sur le bord de la berge. Au même endroit, l'incision présumée du chenal de la rivière a fragilisé les piles du pont qui traversait la Prahova ; ce processus d'incision est d'origine tectonique ; dans la gorge de Posada la rivière s'incise tandis que les montagnes se soulèvent (Orghidan, 1969). Le pont s'est écroulé en 2005 et il a été reconstruit en 2006 ; le nouveau pont est de type bailey (préfabriqué, portatif/ facilement à transporter), car les ingénieurs ont tenu compte de ce phénomène d'incision et d'affouillement sur ce tronçon de la rivière (cf. Photo 4). Mais les restes de l'ancien pont, ainsi que les restes d'autres ouvrages situés en amont, encombrant toujours le chenal fluvial, ce qui représente un danger ; effectivement en situation de crue, ils pourraient être déplacés par l'eau et faire des dégâts en

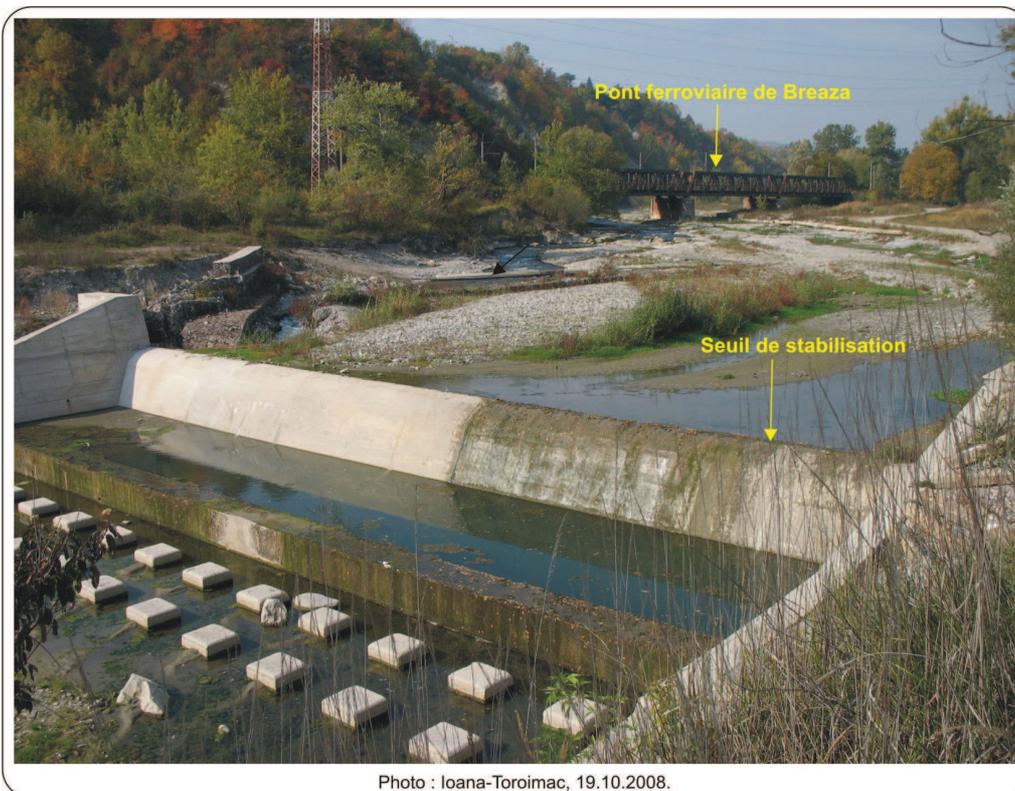
aval en affectant des piles de ponts, des prises d'eau, des canalisations ou même des habitations.

Selon Pascu (1999), le pont ferroviaire qui traverse la Prahova au voisinage de la localité de Breaza a été affecté par l'incision entre 1987 et 1998. En conséquence des ouvrages de protection ont été mis en place en 2004. Un seuil de stabilisation se situe en aval du pont et a le rôle de diminuer l'incision en amont (cf. Photo 5). Des recherches antérieures ont montré que ces seuils sont en général peu efficaces (voir §2.3.3.4.1.). Ici, il est encore trop tôt pour estimer l'impact de cet ouvrage de protection sur la dynamique de la Prahova.

A la sortie des Subcarpathes et après la confluence avec la Doftana, la Prahova forme des tresses. Dans ce secteur en tresses, un barrage a été construit à Nedelea. Le barrage est utilisé actuellement pour une prise d'eau ; sa capacité hydroénergétique n'est pas actuellement exploitée. Derrière ce barrage, à moins de 10 m, se trouve un pont routier qui fait la liaison entre Nedelea et Filipeștii de Târg ; ce pont est antérieur au barrage. Mais il est bien connu que, dans les tresses, les alluvions sont abondantes. Les alluvions de la Prahova se sont déposées en amont du barrage et ont provoqué l'aggradation de la bande de tressage. Cela a agit sur les piles du pont qui se sont écroulées. Cet incident a eu lieu en 2006 et il n'est toujours pas reconstruit. De plus les restes du pont se trouvent toujours dans l'eau, en amont du barrage (cf. Photo 6). En situation de crue ils pourraient être déplacés par l'eau et pourraient bloquer les vannes du barrage, situation qui engendrerait une inondation en amont selon SGA Prahova. De plus l'aggradation du chenal pourrait empêcher la circulation des poissons. On a là une source de conflit entre SGA Prahova, le gestionnaire de la rivière, et Hidroelectrica, l'aménageur du barrage. En effet ce problème de présence des gravats dans le chenal de la Prahova a été constaté pour d'autres sites d'observations aussi.



**Photo 4. Le nouveau pont de type bailey traversant la Prahova à Posada. L'ancien pont s'est effondré comme effet de la dynamique de la rivière.**



**Photo 5. Seuil de stabilisation qui a le rôle de protéger le pont ferroviaire de Breaza contre l'incision du chenal de la Prahova.**



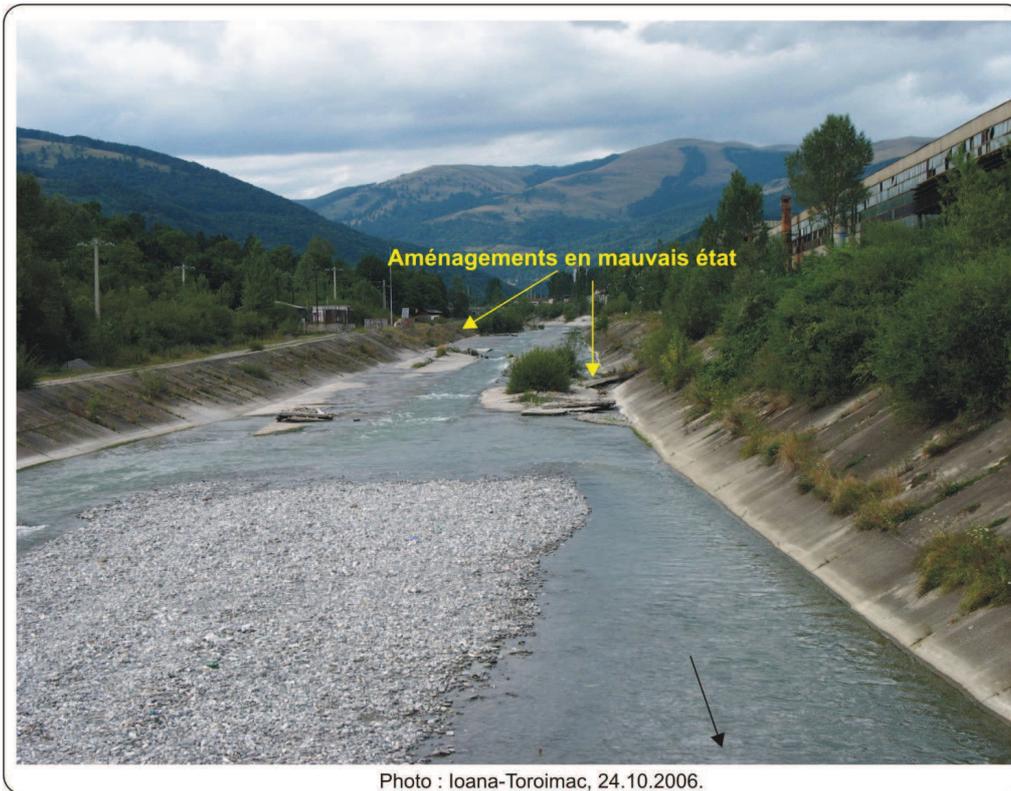
**Photo 6. Pont routier détruit et circulation empêchée entre les localités de Nedelea et de Filipeștii de Târg.**

### *3.3.3.2. Etat des ouvrages de protection des zones industrielles de Comarnic et de Poiana Cămpina*

Dans les années 1980, une zone industrielle (entreprise de ciment) a été construite à Comarnic dans les Subcarpates, dans l'ancienne bande de tressage de la Prahova, (cf. chapitre 3). Afin de la protéger contre les inondations et d'empêcher la migration latérale du cours d'eau, le chenal fluvial a été partiellement canalisé : des dalles de béton protègent ses berges et localement son fond. Mais le chenal subcarpatique de la Prahova s'est incisé durant les 20 dernières années. En conséquence quelques dalles de béton ont été affouillées à leur base, se sont déstabilisées puis écroulées (cf. Photo 7). Cela ne représente pas encore un risque pour la zone industrielle. Mais, en situation de crue, quand la vitesse de l'eau est élevée, ces dalles pourraient être transportées en aval et menacer des enjeux socio-économiques.

Dans les années 1930, une zone industrielle a été construite à Poiana Cămpina, sur la berge droite de la rivière Prahova, à la sortie des Subcarpates. Nos recherches indiquent qu'elle se trouve dans l'ancienne bande de tressage de la Prahova. Afin de protéger cette zone contre les inondations, la berge droite de la rivière a été renforcée par des dalles de béton. Ce type d'aménagement s'est montré peu efficace, parce qu'une bonne partie de ces dalles de béton se sont écroulées (cf. Photo 8). Cela s'explique probablement par l'incision du chenal de la Prahova, telle qu'elle résulte des chapitres précédents de la thèse. Après l'écroulement des dalles de béton, le processus d'érosion latérale a repris ses caractéristiques naturelles. Actuellement cette zone industrielle est abandonnée. Les constructions existantes ne sont pas menacées par la dynamique de la rivière. Il n'y a aucun exemple d'inondation récente de cette zone. Mais en cas de forte crue, ces dalles de béton pourraient être emportées par l'eau et transportées en aval où elles pourraient affecter d'autres aménagements.

Des ouvrages de protection similaires se retrouvent également dans les Carpates : 1) la berge gauche de la Prahova à Azuga est entièrement artificielle ; elle a été construite en béton ; le rôle de cet ouvrage est de protéger la voie ferrée qui longe le cours d'eau, sur sa rive gauche ; 2) à Bușteni, la berge droite de la Prahova est renforcée par des dalles de béton qui la recouvrent ; le rôle de cet aménagement est de protéger une station d'épuration (actuellement abandonnée) contre les débordements de la rivière ; 3) la Prahova a été canalisée à la sortie de Sinaia afin de protéger la zone industrielle (mécanique fine) située sur sa rive droite. Ces ouvrages de protection sont actuellement en bon état, témoignant d'une dynamique de la rivière moins active que dans les Subcarpates.



**Photo 7. Aménagement en mauvais état à Comarnic. Cet aménagement a le rôle de protéger contre les inondations la zone industrielle qui se trouve sur la rive gauche de la Prahova.**

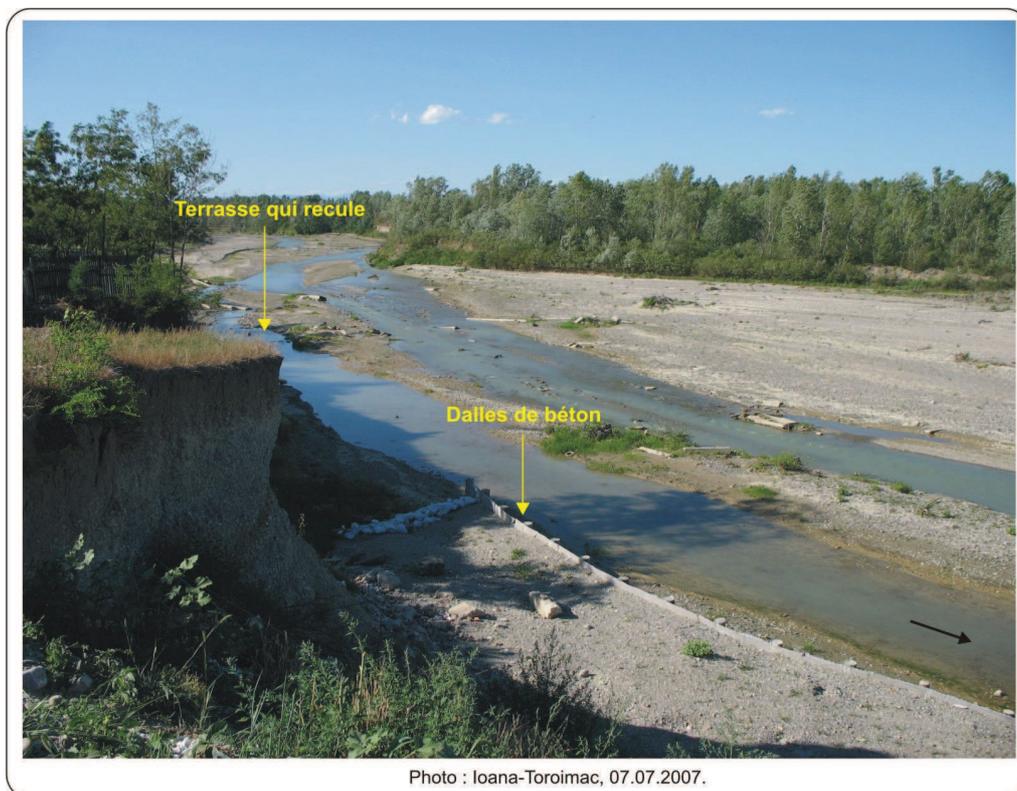


**Photo 8. Aménagement en mauvais état à Poiana Câmpina. Cet aménagement a le rôle de protéger contre les inondations la zone industrielle qui se trouve sur la rive droite de la Prahova.**

### 3.3.3.3. *Recul de la terrasse de la Prahova menaçant les localités de Piatra et de Stejaru*

La localité de Piatra se trouve sur la berge droite de la Prahova, sur une terrasse qui dépasse 6 m de hauteur de mètres de hauteur. Le rebord de la terrasse correspond à la berge droite concave de la bande de tressage de la Prahova. Cette terrasse subit un processus de recul qui a été observé sur le terrain (cf. Photo 9). Il est dû au sapement de la berge concave par la rivière. La base de la terrasse étant affouillée par l'eau, la partie supérieure s'effondre. Le processus est favorisé aussi bien par la nature lithologique de la terrasse, qui est constituée de graviers d'origine fluviale et de sables, que par les facteurs météorologiques propres à cette région (pluies intenses, phénomènes de gel-dégel). Actuellement ce recul affecte les jardins des maisons situées au bord de la terrasse. Afin d'empêcher ou de ralentir le recul, les habitants ont placé des dalles de béton à sa base. Mais ce type d'ouvrage est inapproprié : le rebord de la terrasse continue à reculer sous l'effet des processus d'érosion très actifs sur cette rive concave.

La même situation a été constatée quelques kilomètres en aval à Stejaru. Actuellement des dalles de béton protègent la terrasse de Stejaru contre la migration latérale de la Prahova (cf. Photo 10).



**Photo 9. Moyen de protection de la terrasse de Piatra contre l'érosion latérale de la Prahova.**



**Photo 10. Moyen de protection de la terrasse de Stejaru contre l'érosion latérale de la Prahova.**

Conformément à la méthodologie appliquée dans le chapitre antérieur, les localités de Piatra et de Stejaru ne se trouvent pas dans l'espace de liberté de la Prahova. Pourtant elles sont soumises à la dynamique de la rivière. Cela montre qu'il est nécessaire de corriger cette méthodologie en fonction des particularités locales.

La conclusion des paragraphes précédents est que les enjeux socio-économiques situés dans l'espace de liberté de la rivière peuvent être affectés par les processus de dynamique fluviale. On a remarqué que les solutions pour la protection contre la dynamique fluviale sont prises surtout à l'échelle locale. Effectivement quand un enjeu socio-économique est affecté par un certain aléa, le propriétaire de l'enjeu cherche une solution. Cette solution est proposée et appliquée par une institution spécialisée, mais en préalable le projet doit être approuvé par la SGA et l'APM. On a observé que les solutions choisies sont en général de type ouvrage de génie civil : gabions/dalles de béton pour la protection contre l'érosion des berges et seuils de stabilité pour la protection contre l'incision. En revenant aux exemples antérieurs, la mise en place des endiguements qui se trouvent dans les localités de Piatra et de Stejaru est expliquée dans le PATJ Prahova (2004) par leur rôle pour la protection contre les inondations. Etant donné le fait que les deux localités se trouvent sur une terrasse à plus de 10 m de hauteur par rapport au chenal de la Prahova, elles ne peuvent pas être soumises aux inondations, mais plutôt à

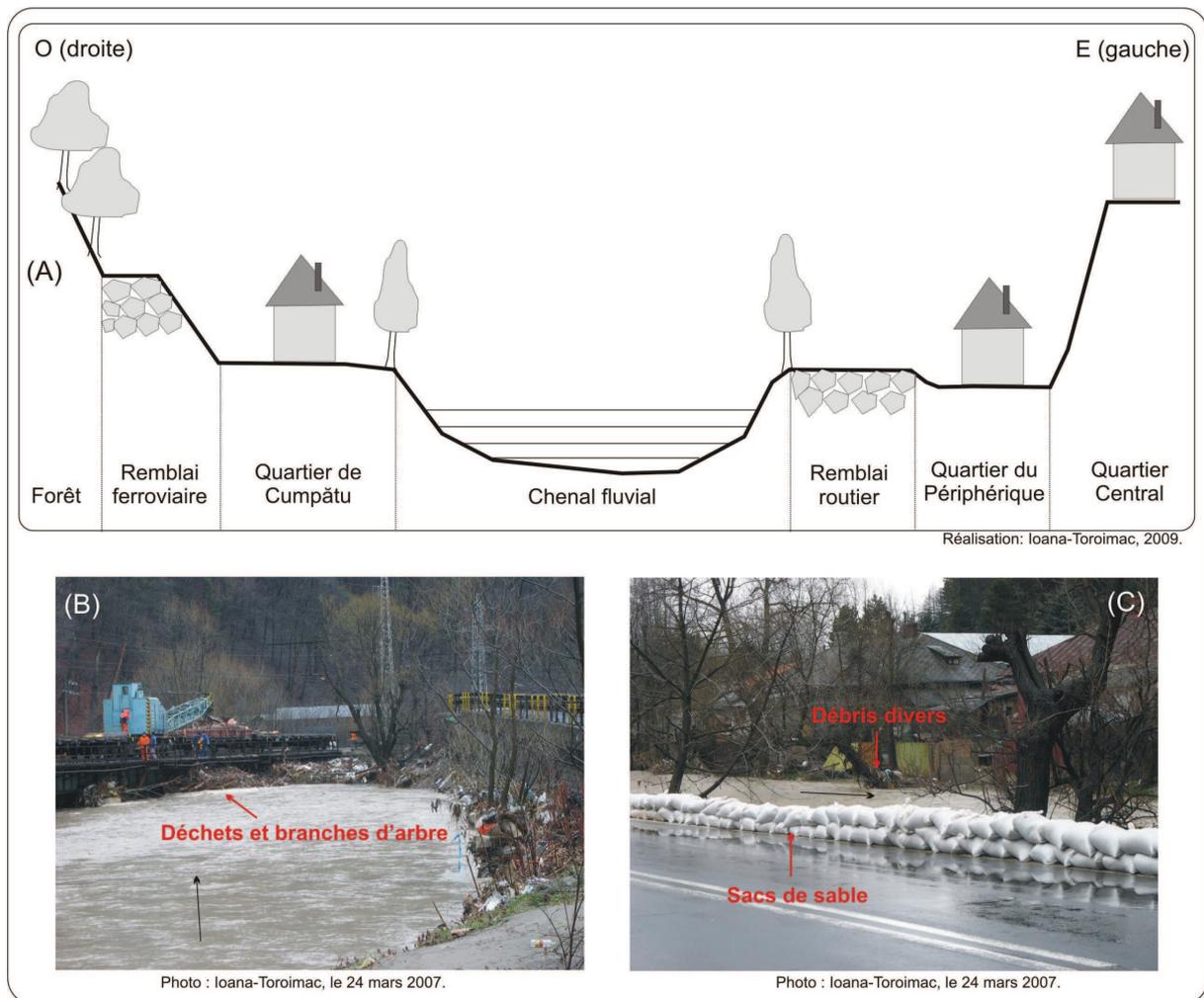
l'érosion latérale du cours d'eau. De plus les gabions et les seuils de stabilité ne sont pas recensés dans le PATJ Prahova (2004). Tout cela indique que les processus de dynamique fluviale ne sont pas pris en compte en tant qu'aléas dans les plans d'aménagement.

### **3.3.4. Les enjeux liés aux inondations par débordement de la Prahova**

#### *3.3.4.1. Sinaia : l'exemple de l'inondation de mars 2007*

Un premier exemple est celui de la ville de Sinaia. Les premières découvertes archéologiques datent de l'Époque du Bronze, mais l'existence de la localité est attestée dans les documents historiques, en 1581, quand elle se développe autour d'un monastère, sur une terrasse de la Prahova (Velcea, 1961). Son nom est d'origine religieuse et dérive de Mont Sinaï. La localité s'est beaucoup développée vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle quand des voies modernes de transport furent construites dans la vallée. L'emplacement de la résidence d'été de la famille royale au Château de Peleş a favorisé le développement touristique de la localité. Le régime communiste encouragea le tourisme et favorisa le développement industriel de la vallée de la Prahova. En conséquence, la superficie de la ville s'étendit après 1950. Aujourd'hui, Sinaia est une ville à la fois touristique (sports d'hiver, randonnées pédestres) et industrielle (mécanique fine). Le centre de la ville se situe sur une terrasse de la Prahova, sur la rive droite, mais les habitations descendent sur le front aménagé de cette terrasse jusqu'au fond de la vallée. Sur la rive gauche de la rivière s'étend le quartier de Cumpătu. La plupart des maisons de ce quartier se trouvent sur le versant, mais une dizaine de maisons ont été construites dans le fond de la vallée. Dans le fond de la vallée de la Prahova se succèdent sur une centaine de mètres de largeur, de gauche à droite (de l'ouest à l'est), le remblai de la voie ferrée, des maisons du quartier de Cumpătu, le chenal de la Prahova (25 m de largeur), le remblai de la route de déviation de Sinaia et des maisons situées à la base du front de terrasse (cf. Figure 87 A). Les maisons du quartier de Cumpătu se trouvent à quelques mètres du chenal de la Prahova. Sur l'autre rive, des maisons se trouvent dans un creux entre le remblai du périphérique et la base de la terrasse.

Suite à des précipitations abondantes tombées à la fin du mois de mars 2007 (voir §1.2.6.4.), ces maisons, ainsi que le périphérique de Sinaia ont été inondés.



**Figure 87. Etude du cas de l'inondation de Sinaia de mars 2007. (A) Schéma de l'occupation du sol dans la vallée de la Prahova. (B) L'accumulation de débris, macro-déchets et branches d'arbres au-dessous du pont ferroviaire a déterminé le débordement de la Prahova en amont ; le pont ferroviaire se trouve en aval par rapport au schéma de la figure A. (C) Perspective vers le périphérique de Sinaia et vers le quartier de Cumpătu ; les débris divers indiquent le passage de la crue ; les sacs de sable sont destinés à protéger la route de déviation de Sinaia.**

Le 23 mars 2007, les maisons du quartier de Cumpătu, situées à proximité de la rivière ont été inondées par le débordement de la Prahova. L'inondation fut d'autant plus importante que l'espace disponible était étroit. Le débordement de la Prahova résulta de la conjugaison des deux facteurs : la crue de la Prahova et le barrage formé par un pont ferroviaire bloqué par des gravats et branches d'arbre, empêchant ainsi l'écoulement de l'eau qui s'est accumulée derrière le pont (cf. Figure 87 B). Selon les estimations des habitants, la hauteur de l'eau a atteint 30 cm dans les cours des maisons. De plus, selon les journalistes qui se trouvaient sur place, le pont (routier) situé en amont, qui fait la liaison entre le quartier de Cumpătu et le

reste de la ville, a été inondé pendant quelques heures, isolant le quartier (consultation de la presse locale du 23 mars 2007).

En même temps, le périphérique de Sinaia a été submergé par l'eau de la Prahova sur une dizaine de centimètres de hauteur.

Les maisons situées à la base du front de la terrasse ont été inondées par les écoulements torrentiels consécutifs aux pluies intenses qui n'ont pas pu s'infiltrer dans le sol saturé ou dans l'asphalte de la ville. Etant donné leur position par rapport au remblai de la voie routière, dans un creux, l'eau n'a pas pu être évacuée vers le chenal de la rivière. Elle s'est accumulée dans les cours de ces maisons en formant une couche d'une cinquantaine de centimètres, selon les estimations des habitants.

Les secours ont visé essentiellement le déblocage du pont ferroviaire bloqué par des gravats et des branches d'arbres et la protection du périphérique de Sinaia par des sacs de sable (cf. Figure 87 C).

Un jour plus tard, le 24 mars 2007, la Prahova était revenue dans son chenal, les maisons et le périphérique de Sinaia n'étaient plus inondés, ce qui confirme l'hypothèse de crue éclair émise par l'ANAR.

Conformément au CJSU (2007) deux ponts traversant la rivière à Bușteni et à Sinaia ont été endommagés par la crue de la Prahova. Par contre le rapport du CJSU ne contient aucune information concernant le débordement de la rivière et les dégâts associés.

#### *3.3.4.2. Gherghița : exemples des inondations de juillet 1975, de septembre 2005 et de mars 2007*

La commune de Gherghița se situe sur la rive droite de la Prahova, dans la plaine homonyme, à une altitude moyenne d'environ 80 m. Du point de vue lithologique elle se développe, en partie, sur des graviers et sur des sables pléistocènes, et sur des alluvions holocènes au nord-ouest. Il en résulte donc qu'une partie de la localité se situe sur la terrasse pléistocène dont le rebord se remarque, en amont et en aval, par son escarpement. La terrasse, en tant que forme de relief, n'est pas évidente à Gherghița ; cette situation est probablement la conséquence du phénomène de subsidence qui affecte la région.

Cette localité est attestée dans les documents d'archive depuis l'année 1453 et son nom est associé à Saint Georges. Mais les recherches archéologiques ont mis en évidence des traces d'habitation au Néolithique, durant l'Époque du Bronze et au Moyen Âge. Au 16<sup>ème</sup> siècle, la

localité était une foire médiévale au carrefour des routes carpatiques (sur les vallées de Teleajen et de Prahova) et de celles venant du Danube, et en tant que cité judiciaire grâce à sa position près de la capitale Bucarest (Sacerdoțeanu, 1971). Les découvertes archéologiques montrent que le centre de la localité médiévale se trouve à environ 30 m au nord-ouest de l'église Sf. Procopie (chantier A) et sa limite ouest correspond à l'école actuelle (chantier B) (Olteanu *et al.*, 2001). Sur le chantier A, les habitations et les céramiques découvertes datent du 15<sup>ème</sup> et jusqu'au 18<sup>ème</sup> siècle. La céramique du 16<sup>ème</sup> siècle se trouve à 0,6 m de profondeur, tandis que la céramique des 17-18<sup>ème</sup> siècles se trouve à 0,5 m de profondeur. Sur le chantier B, la maison construite à la fin du 15<sup>ème</sup> siècle se trouve à 0,1 m de profondeur par rapport à la maison construite au début du 17<sup>ème</sup> siècle. Le développement important de la commune au Moyen Age, ainsi que la faible profondeur des fouilles archéologiques, indiquent que la commune n'était pas soumise aux inondations. Au 19<sup>ème</sup> siècle et au début du 20<sup>ème</sup> siècle, la superficie de la commune de Gherghița s'agrandit surtout vers l'ouest et vers le nord-ouest. Actuellement la commune de Gherghița a environ 4000 habitants. Selon son extension spatiale, elle est considérée de type village-rue. La commune a un profil économique essentiellement agricole.

Cette commune a été touchée par plusieurs vagues d'inondations, raison pour laquelle nous avons choisi de présenter son exemple. Trois exemples d'inondations sont pris en compte : les inondations de juillet 1975 et de septembre 2005 ont été importantes par le débit d'eau de la Prahova (voir §1.2.6.1. et §1.2.6.3.) ; l'inondation de mars 2007, moins importante que les deux autres par le débit de la Prahova, a pu être observée sur le terrain dans le cadre de cette thèse. Une propriétaire-habitante témoignait en juillet 2008 que sa maison, construite dans les années 1940, après la Deuxième Guerre Mondiale, et située dans le nord-ouest de la commune, a subi l'inondation de 1975 et encore cinq vagues d'inondations depuis 1998, parmi lesquelles trois se sont produites entre 2005 et 2007. En comparant son témoignage avec les résultats obtenus dans le Tableau 23 de la deuxième partie de la thèse, il résulte que cette maison située dans la partie du nord-ouest de la localité a été endommagée par les débordements de la Prahova qui correspondent à des débits dont le temps de retour est supérieur à 10 ans.

Le débordement de la Prahova de juillet 1975 a affectée le nord-ouest de la localité, des terrains agricoles et la ferme zootechnique située au nord de la localité conformément aux entretiens avec le personnel de la SGA Prahova en 2007. Après cette forte inondation, des mesures structurelles ont été prises. Une levée de terre a été construite le long du méandre de

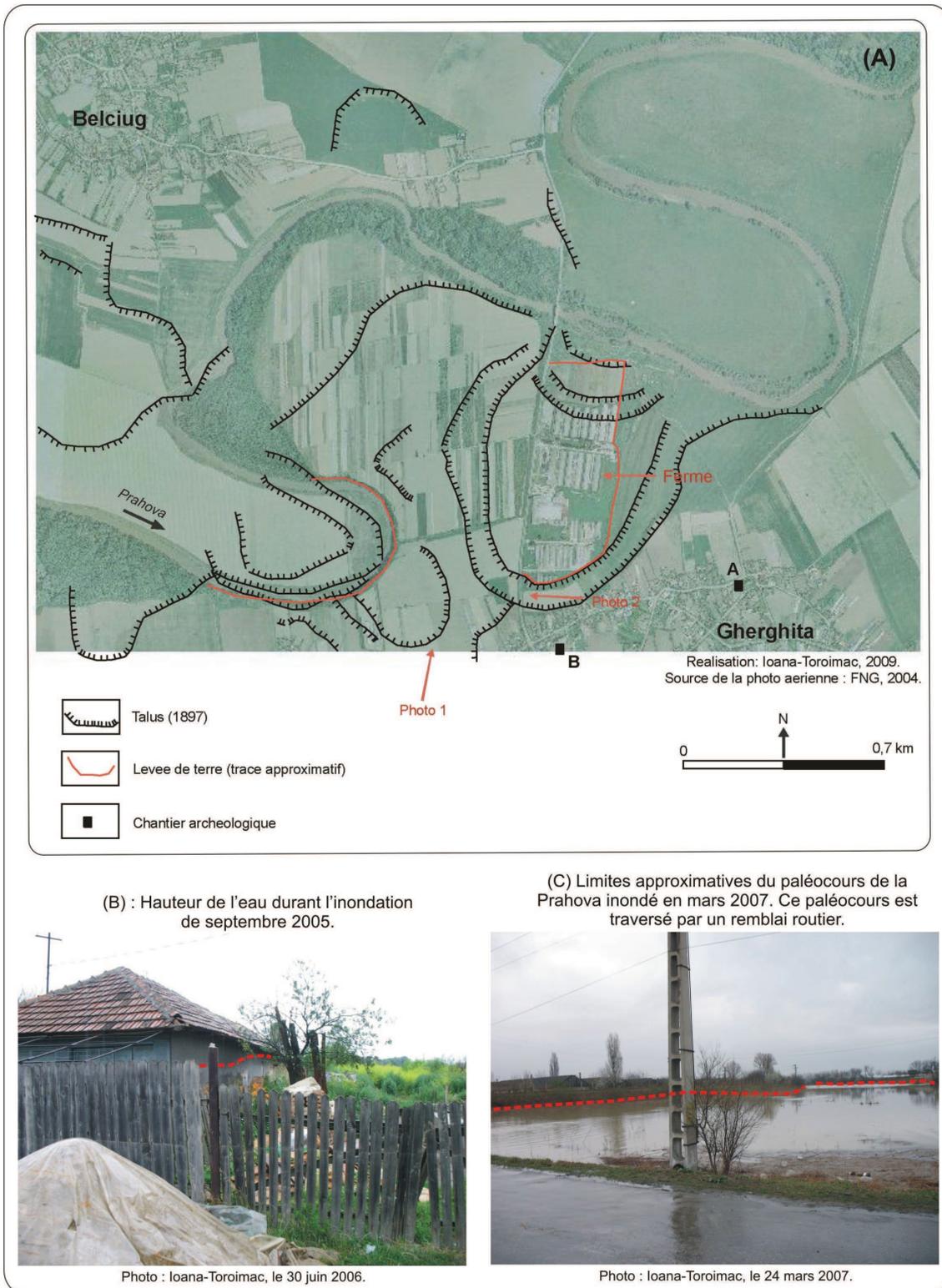
la Prahova situé dans le nord-ouest de la commune ; elle a une hauteur de 1,5 m et actuellement il n'est plus possible de distinguer, du point de vue topographique, cet ouvrage par rapport à la berge de la Prahova. Un autre système de levées de terre, de forme rectangulaire et de 1,5 m de hauteur, protège actuellement la ferme.

Suite au débordement de la Prahova de septembre 2005, 2 maisons ont été complètement détruites (cf. Figure 88 B) et 82 ont été abîmées dans une proportion de 70% ; ces maisons se situent dans le nord-ouest de la commune. Les bâtiments de la ferme n'ont pas subi de dégâts. Mais l'eau a inondé 207 ha de pâturages et 180 ha cultivés en maïs, ainsi que 300 t de blé d'un grenier appartenant à une société commerciale. La levée de protection de la rive gauche de la Prahova a été affectée sur 200 m de longueur (informations communiquées par la Mairie de Gherghița, le 29 septembre 2005). L'inefficacité de cette levée de terre peut être expliquée par deux variantes : soit elle est mal adaptée aux caractéristiques de la rivière, soit elle a subi des détériorations après sa construction. Cette deuxième hypothèse est confirmée par les habitants de la commune ; d'après leurs témoignages, la terre a été localement prélevée de la levée de terre pour être utilisée ailleurs, ce qui expose la commune aux inondations. Etant donné son recouvrement par la végétation, il n'est pas possible de déterminer ces endroits et de confirmer cette hypothèse.

L'inondation par débordement de la Prahova de mars 2007 a abîmé quelques maisons du nord-ouest de la commune et a affecté des pâturages et des terrains agricoles dans le périmètre de la commune de Gherghița, selon nos observations de terrain ; les terrains agricoles n'étaient pas encore cultivés à cette période de l'année quand l'inondation s'est produite, donc les dégâts ont été mineurs.

A partir des éléments communs de ces inondations, une question se pose : quels sont les facteurs qui déterminent l'inondation de la partie du nord-ouest de la commune de Gherghița ? La réponse se retrouve dans l'analyse morphologique de cette zone, qui appartient à l'espace de liberté de la rivière. Les maisons construites dans le nord-ouest de la commune, ainsi que la ferme se trouvent dans des paléo-cours de la Prahova (cf. Figure 88 A, C). Ces paléo-cours redeviennent fonctionnels en cas d'inondation, puis l'eau se retire vers le chenal principal.

Le Rapport officiel des pluies abondantes tombées à la fin du mars 2007 élaboré par la SGA Prahova, ne mentionne pas les inondations par débordement de la Prahova à Gherghița.



**Figure 88. Position de la localité de Gherghița par rapport aux paléo-cours de la Prahova. Ces paléo-cours sont inondables. La maison de la photo 1, située dans un paléo-cours de la Prahova, a été fortement abîmée par le débordement de la Prahova en septembre 2005. Sur la photo 2, on voit un paléo-cours de la Prahova ; il est délimité par le village à droite et par des levées de terre, le séparant d'une ferme, à gauche ; le paléo-cours se poursuit de l'autre côté du remblai routier ; l'ensemble du paléo-cours a été inondé en mars 2007, ainsi qu'en septembre 2005.**

Conformément au PATN (2002) et au PATJ Prahova (2004), le département de la Prahova a été affecté par des inondations importantes entre 1996 et 1998. Les causes déclencheurs de ces inondations ont été les pluies abondantes de longue durée. Des causes anthropiques ont favorisé les inondations : le dépôt des déchets ménagers et des débris aux bords du chenal fluvial, le manque d'entretien de la végétation poussant sur les berges du cours d'eau ; le manque d'entretien des ouvrages hydrotechniques dont le rôle était d'atténuer les crues et de protéger contre les inondations. Conformément au PATJ Prahova (2004), la Prahova inonde par ses débordements les localités de Stăncești, de Piatra et de Stejaru. Les torrents formés sur les versants ont causé des inondations à Bușteni et à Comarnic, qui, à leur tour, ont affecté les voies de transport traversant ces localités.

L'ensemble des observations effectuées sur le terrain durant les années de doctorat et particulièrement entre les années 2005 et 2007, quand plusieurs vagues de crues et d'inondations ont affecté la vallée de la Prahova, indique que :

- la Prahova a débordé à Sinaia, à Puchenii Miroslăvești, à Fânari, à Palanca, à Gherghița, à Belciug, à Tufani, à Brazii, à Adâncata et à Patru Frați ; ces inondations ont produit des dégâts dans les localités de Sinaia, de Palanca, de Gherghița, de Belciug, de Tufani et d'Adâncata. Or à Piatra et à Stejaru, il est peu probable que les inondations aient affecté des enjeux socio-économiques, parce que les deux localités se trouvent sur des terrasses, à plus de 6 m de hauteur par rapport à la bande active ;
- les torrents formés sur les versants ont affecté également les localités d'Azuga et Sinaia.

Dans ce contexte, on se pose la question : pourquoi l'absence d'informations concernant les débordements et les dégâts associés ? On a trouvé plusieurs réponses possibles à cette question. 1) La Prahova n'a pas subi de fortes inondations entre 1975 et 2005, ce qui fait que la base « moderne » de données contient peu d'informations. 2) Le PATN (2002) et le PATJ (2004) Prahova se base sur des données qui s'étendent sur trois ans (1996, 1997, 1998), ce qui n'est pas suffisant pour l'analyse des phénomènes hydrologiques. 3) La création de la base des données concernant les inondations et les dégâts associés dépend de la collaboration entre deux acteurs : chaque situation d'inondation est analysée selon l'expérience et la disponibilité des élus locaux ; ultérieurement ces informations sont transmises à la SGA départementale, qui élabore le rapport de situation en collaboration avec le CJSU ; ces rapports entrent ultérieurement dans les bases de données départementale et nationale, utilisées pour

l'aménagement du territoire. Des problèmes dans cette collaboration pourraient être responsables de l'état de la base de données concernant les inondations et les dégâts associés. En conclusion les plans actuels d'aménagement du territoire national et départemental reposent sur des bases de données incomplètes. Donc, par les observations faites dans ce chapitre de la thèse, on souhaite de souligner l'importance de la création d'une base de données minutieuse concernant les dégâts faits par les phénomènes et les processus de dynamique de la rivière, ce qui permettrait de prendre des décisions pertinentes pour la gestion et l'aménagement durable de la rivière et de son espace.

#### *3.3.4.3. La pollution de l'eau de la Prahova – un danger supplémentaire*

L'analyse de la problématique de la pollution de la Prahova est fortement liée aux inondations (Trușeș, 1998). Nous partons de l'hypothèse qu'en cas d'inondation et d'accident de pollution, le lit d'inondation de la rivière sera également pollué, ce qui affecterait la biodiversité, l'agriculture et donc la santé de la population. En ce sens nous proposons une brève investigation de l'exposition à la pollution de la Prahova. Cette analyse se base sur des observations de terrain, sur des références bibliographiques et sur les rapports de qualité de l'eau publiés par l'APM Prahova (2007).

Afin de vérifier la qualité de l'eau de la Prahova, l'APM Prahova fait des prélèvements et des analyses biochimiques de l'eau. Les sites surveillés se trouvent à l'entrée de la Prahova dans le département, en aval des localités d'Azuga, de Bușteni, de Sinaia, de Comarnic, de Tinosu et, pour certains types d'analyses, d'Adâncata. Les analyses effectuées concernent la composition chimique et biochimique, la teneur en oxygène, fer, ammonium, nitrites, nitrates, phosphore et phosphates. Les résultats obtenus sont comparés à des valeurs standards, ce qui permet la classification de l'eau des rivières dans les catégories de qualité I, II, III, IV, eaux dégradées conformément à la Directive 161/2006. Les analyses des paramètres biochimiques de la Prahova indiquent la détérioration de la qualité de l'eau notamment en aval de Tinosu. A partir de cette localité, l'eau a une qualité de catégorie III pour tous les paramètres analysés (cf. Figure 89). Le Teleajen à la station de Moara Domnească, juste avant la confluence avec la Prahova, se caractérise par une qualité précaire de l'eau ; l'eau atteint même la catégorie IV pour l'ammonium. Pourtant il y a peu de paramètres analysés à la station d'Adâncata sur la Prahova, qui se trouve en aval de cette confluence. Les catégories de qualité biochimique sont en relation avec l'état écologique de la rivière ; l'état écologique se réfère à la structure et au fonctionnement des écosystèmes aquatiques, qui dépend des paramètres

hydromorphologiques, physico-chimiques et biologiques (Directive Cadre de l'Eau 2000/60/EC). Sur la base stricte des paramètres biochimiques, la Prahova a un état écologique bon et moyennement bon, notamment essentiellement en aval de la localité de Tinosu. L'APM Prahova (2007) constate une amélioration de la qualité de l'eau et donc de son état écologique depuis l'année 2002.

Selon l'APM Prahova, il y a 25 sources principales de pollution ; elles sont liées à l'industrie (pétrochimie, papeterie, alimentation et évacuation de l'eau, alimentaire).

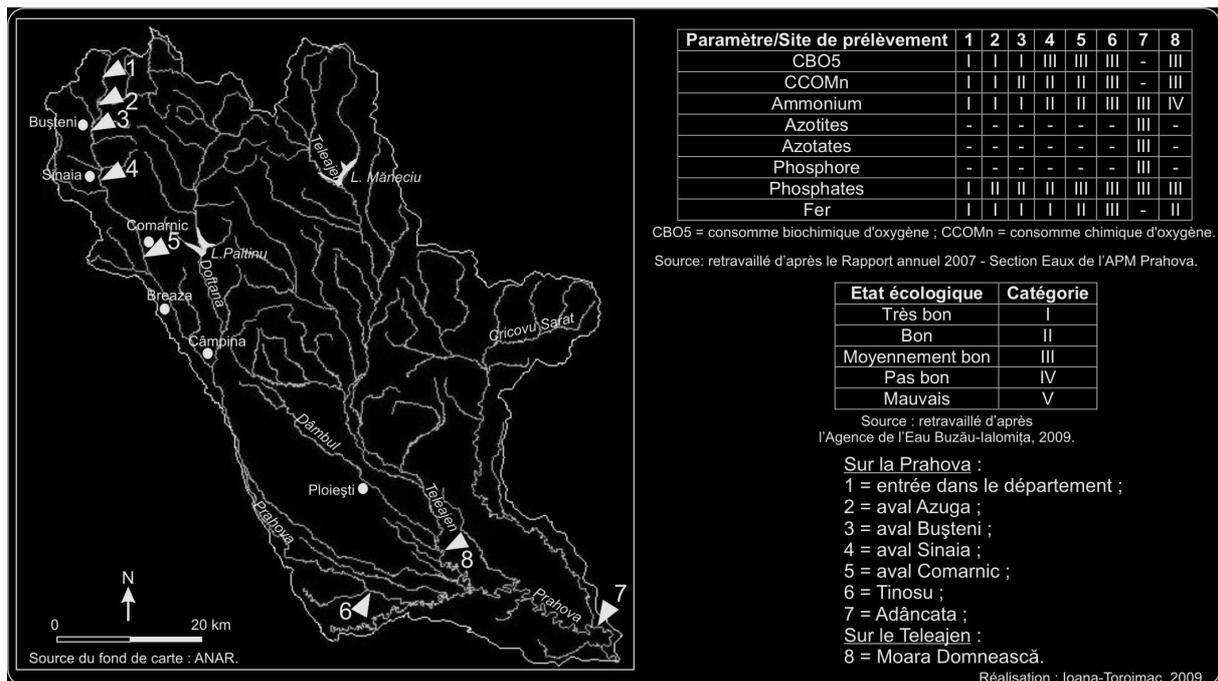


Figure 89. Caractérisation de la qualité biochimique et de l'état écologique de la Prahova aux sites surveillés par l'APM Prahova.

La Prahova carpatique est exposée à la pollution par des ordures ménagères. C'est l'exemple de la crue de mars 2007. Suite aux précipitations abondantes, les écoulements torrentiels formés sur les versants ont transporté vers le cours principal des déchets ménagers et en particulier des sacs et des bouteilles en plastique. Après le passage de la crue, les déchets ont été déposés et se sont accumulés sur les berges de la Prahova, en créant un paysage désolant (cf. Photo 11). Durant le reste de l'année, aucune autorité n'est intervenue pour nettoyer et donc pour régler cette situation, qui risque de se reproduire. Afin d'expliquer cet aspect, nous proposons une hypothèse qui se base sur le développement du tourisme dans la vallée carpatique de la Prahova. Après 1990 et la chute du régime communiste, en relation avec la décentralisation et l'augmentation des préoccupations pour les loisirs, le tourisme s'est développé rapidement ; de nouvelles infrastructures touristiques (hôtels, villas, pistes de ski)

ont été mises en place et le nombre de touristes a augmenté. Mais il est fort possible que les besoins nés de cet essor touristique n'aient pas été gérés de façon adéquate. Quelques exemples indiquent cette situation : les poubelles situées sur les chemins de randonnée et dans les lieux de camping ne sont pas suffisantes (ou elles ne sont pas assez fréquemment vidées) pour le grand nombre de touristes. La sensibilisation et l'éducation des touristes est insuffisante : ils continuent à utiliser les chenaux fluviaux pour déverser leurs ordures ménagères ou ils cachent les ordures ménagères sous des pierres. En conclusion, par différents moyens, les ordures ménagères peuvent se retrouver dans l'eau de la Prahova et ensuite être transportées en aval.



**Photo 11. Accumulation des déchets sur la berge gauche de la Prahova à Sinaia suite au passage de la crue du mars 2007.**

Les eaux ménagères représentent un autre problème. A l'échelle du bassin de la Prahova, fonctionnent 19 stations d'épuration, qui appartiennent essentiellement aux grandes villes et une fosse septique (à Comarnic). Une estimation préliminaire faite à partir des rapports de l'APM Prahova (2007) indique qu'environ 57% de la population du département est raccordée aux stations d'épuration. En conclusion le reste, soit 43%, est susceptible de polluer les ressources d'eau. De plus des accidents de pollution peuvent se produire, comme ce fut le cas le 13 mai 2009 : suite à des précipitations abondantes, la station d'épuration de Ploiești, appartenant à la RASP de Ploiești (Régie Autonome de Services Publiques), a été obligée de

déverser les eaux usées. L'onde de pollution par les eaux ménagères s'est propagée, en moins de 24 heures, dans le Dâmbu, puis dans le Teleajen, et plus en aval dans la Prahova et dans l'Ialomița. La pollution a affecté notamment la faune ; les poissons les plus grands ont été retrouvés morts. Afin de diminuer la pollution en aval de la confluence Ialomița-Prahova, un débit supplémentaire d'eau a été déversé du barrage-réservoir de Dridu dans l'Ialomița. Cette information a été fournie par les représentantes régionales de l'ANAR et par la Garde d'Environnement Prahova et transmise par plusieurs journaux (Media Fax, 2009).

Effectivement, dans un système caractérisé par une gestion précaire de l'eau plusieurs localités sont confrontées aux problèmes de pollution de l'eau potable ; un ou plusieurs paramètres ne correspondent pas aux normes (sur 101 localités analysées) : dans 95 cas, l'eau potable est contaminée par des bactéries, dans 48 cas par des nitrates, dans 23 cas par des nitrites dans 19 cas par de l'ammoniac, dans 10 cas par une turbidité élevée, dans 10 cas par une oxydabilité<sup>19</sup> élevée, dans 4 cas par du cadmium, dans 3 cas par de l'aluminium, dans 3 cas par différents substances organiques, dans 2 cas par du plomb et dans 2 cas par des chlorures.

Les recherches de Rîșnoveanu *et al.* (2001) vont dans le même sens ; d'après ces auteurs, les vers tubicifides<sup>20</sup> sont parmi les espèces dominantes de macroinvertébrés dans la rivière Prahova ; leur abondance est liée aux eaux ménagères et industrielles. Or les excréments des vers tubicifides contiennent de l'ammonium et du phosphate. En fonction de la température de l'eau, la quantité de ces deux substances excrétées peut varier. En conclusion ces organismes peuvent contribuer et même perturber les cycles de l'azote et du phosphore avec des effets aussi bien sur les biocénoses que sur les biotopes (Postolache *et al.*, 2006).

Un autre problème peut être lié à la pollution du sol dans le bassin de la Prahova. Sous l'action des précipitations, la pollution du sol est susceptible d'affecter la nappe phréatique et l'eau des rivières. Les principaux polluants sont les produits pétroliers et les métaux lourds et les principales sources de pollutions sont les zones industrielles. Les produits pétroliers proviennent de l'industrie pétrochimique développée dans le bassin de la Prahova. Conformément aux rapports de l'APM Prahova (2007) les principales sources de pollution sont les raffineries de pétrole situées à Câmpina et à Ploiești. Les rapports d'APM Prahova indiquent deux types de pollution du sol : par des déchets pétroliers qui ne sont pas déposés

---

<sup>19</sup> Propriété de s'oxyder.

<sup>20</sup> Vers endobenthiques qui tolèrent des variations très importantes des conditions physico-chimiques.

dans des endroits préparés au préalable et par la pollution historique en relation avec la capacité du sol de se régénérer. Plusieurs sites surveillés situés autour de ces raffineries dépassent le seuil d’alerte pour la pollution du sol avec des produits pétroliers, mais se trouvent au-dessous du seuil d’intervention. Conformément aux mêmes rapports, les alentours de la ville de Ploiești, ainsi que la route DN1/E60 sont pollués avec des métaux lourds (nickel, zinc, cuivre) de provenance industrielle et qui se concentrent sur les premiers 10 cm de sol et avec du plomb, associé à l’émission du plomb par les gaz d’échappement. Les émissions de métaux lourds sont en général associées aux émissions de sulfates, nitrites, nitrates et dioxyde de carbone, qui sont responsables de l’acidité des pluies et donc de l’acidité du sol et des ressources en eau. Les rapports de APM Prahova (2007) ne fournissent d’informations ni sur la superficie polluée, ni sur l’emplacement exact des sites pollués, mais ils précisent qu’il n’y a pas eu d’accident de pollution durant les dernières années.

### **3.3.5. Conclusions**

L’objectif de ce chapitre a été d’investiguer les enjeux liés à la dynamique de la Prahova. Les observations de terrain ont montré que les aménagements anthropiques qui se trouvent dans l’espace de liberté de la Prahova sont affectés par l’érosion latérale, par l’incision et l’aggradation du chenal fluvial, par des inondations et ils pourraient être affectés par des problèmes de pollution aussi. La présence des débris divers et des déchets ménagers est un problème récurrent tout le long du fil d’eau. La plupart de ces problèmes est résolue par des travaux d’ingénierie (ouvrages de protection : endiguements, gabions, seuils de stabilisation) ; le problème des débris et des déchets est en général ignoré.

Les enjeux liés à la dynamique de la rivière indiquent que la Prahova tend à réoccuper son espace malgré les moyens de protection mis en place. De plus ces moyens de protection sont susceptibles de perturber la dynamique naturelle de la rivière, comme on l’a vu dans la deuxième partie de la thèse. Dans ce contexte il est nécessaire de s’interroger sur comment gérer et aménager la rivière et son espace d’une manière durable. En ce sens on renvoie à des solutions proposées par Piégay et al. (1997, 2000, 2005), Bravard (2000), de Gabor et Șerban (2004) : le maintien de l’érosion des berges des cours d’eau aussi bien pour le bon fonctionnement des écosystèmes riverains, que pour l’alimentation en charge solide du cours d’eau ; l’adaptation de la société aux crues et aux inondations par le maintien de la zone inondable, partie composante de l’espace de liberté de la rivière, ce qui est favorise le bon fonctionnement des milieux naturels riverains.

## **3.4. Les zones humides alluviales de la Prahova et leur gestion**

### **3.4.1. Introduction**

« Les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eaux marines dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres » ; c'est la définition des zones humides proposée dans la Convention de Ramsar (1971, appliquée à partir de 1975). A part la typologie de la Convention de Ramsar, d'autres typologies des zones humides ont été proposées ultérieurement (Dugan, 1990 ; Barnaud, 1995 ; Van Oudheusden, 2005). Barnaud et Richard (1993) proposent une liste des zones humides plus explicite. Selon eux « les zones humides correspondent aux marais, marécages, roselières, tourbières, prairies humides, marais agricoles, landes et bois marécageux, forêts alluviales et ripisylves marécageuses, mares y compris temporaires, étangs, bras morts, vasières, lagunes, prés salés, marais salicoles... Elles se trouvent en lisière de sources, de ruisseaux, de fleuves, de lacs, en bordure de mer, de baies et d'estuaires, dans les deltas, dans les dépressions de vallées ou dans les zones de suintement à flanc de collines ». Donc cette notion de zone humide inclut des milieux variés, mais leurs caractéristiques communes sont la présence de l'eau et le caractère de transition entre les milieux aquatiques et les milieux terrestres (Barnaud et Richard, 1993). Depuis la Convention de Ramsar, les zones humides suscitent un intérêt particulier étant donné leurs caractéristiques écologiques et socio-économiques. La Roumanie a adhéré à la Convention de Ramsar, ce qui a ouvert une nouvelle étape de la politique concernant la conservation, la protection et la reconstruction des zones humides ; le document a été ratifié par la loi 5/1991 (Ioana-Toroimac et Vergne, 2005) ; Romanescu (2008) estime que les conditions climatiques et morphologiques de la Roumanie ont permis l'installation d'une variété importante de zones humides. Les zones humides protégées actuellement sont : le Delta du Danube, Le Corridor Vert du Danube Inférieur, Le Petit Île de Brăila (sur le Danube), le Marais de Satchinez dans la Plaine d'ouest du pays (MM, 2000). D'autres réserves naturelles protègent la flore et/ou la faune de certaines zones humides.

La plupart des typologies énumérées ci-dessus considèrent que les cours d'eau (permanents et temporaires) représentent des types particuliers de zones humides, sans tenir compte du fait que certains lacs, mares et marais sont associés au fonctionnement des cours d'eau. La

législation française propose, en relation avec les eaux courantes, plusieurs types de zones humides suivants : les bordures des cours d'eau et les plaines alluviales dans le cadre des SDAGE ; les ripisylves, les forêts alluviales, les prairies inondables, les roselières, les cariçaies, la végétation submergée dans le cadre des SAGE (Barnaud, 1995). Piégay *et al.* (2003) proposent la notion de zone humide « riveraine » pour les milieux de rive des cours d'eau (en particulier pour la forêt riveraine). Nienhuis *et al.* (1998) propose la notion de zones humides « alluviales », qui se base sur le concept d'espace pour les rivières ; elles incluent les types de zones humides associées aux eaux courantes énumérées antérieurement. On considère que les deux notions sont adaptées aux types de zones humides analysées dans ce chapitre. On a choisi d'utiliser la deuxième notion (zones humides alluviales) pour mieux souligner l'approche hydrogéomorphologique de la thèse. La mosaïque formée par les zones humides alluviales est récemment apparue comme intéressante aussi bien au niveau écologique, que paysager, patrimonial, hydraulique, social, économique... (Piégay, 1996). Les zones humides alluviales ont essentiellement un rôle de zone-tampon (Fustec et Lefeuvre, 2002 ; Barnaud et Fustec, 2007). Les zones humides subissent les débordements du cours d'eau et stockent une partie de l'eau par infiltration ; en même temps, elles diminuent la vitesse de l'eau par leur rugosité ; c'est pour cette raison que les corridors végétaux sont pris en compte dans la gestion des risques d'érosion et d'inondation (Piégay et Bravard, 1997). Les zones humides représentent aussi un filtre pour les sédiments et pour le bois mort. Par exemple, dans le cas des ripisylves, lorsque les flux sont très actifs, deux phénomènes se manifestent : érosion marginale intense et l'exportation d'arbres de toutes tailles suite à la cassure de leurs troncs ; lorsque les flux sont d'importance moyenne, l'exportation d'arbres est ralentie et les sédiments les plus grossiers se déposent ; lorsque l'énergie est encore plus faible, l'érosion marginale affecte les sédiments fins antérieurement déposés (Piégay, 1996). Les zones humides alluviales représentent aussi un filtre pour les nutriments (surtout à base d'azote), qu'elles stockent après les débordements, et généralement pour les polluants (Pinay, 1996, cité par Piégay, 1996).

**Ce chapitre propose d'analyser les zones humides alluviales situées dans l'espace de liberté de la Prahova, par une approche géographique, afin de mettre en évidence leurs caractéristiques naturelles liées à l'évolution de la rivière et de donner un aperçu de leurs gestion. Les méthodes privilégiées sont l'étude cartographique diachronique et la télédétection. A cette occasion on souhaite mettre en évidence l'apport de ces méthodes dans l'analyse des zones humides alluviales.**

### 3.4.2. Démarche méthodologique

Afin de répondre à la problématique énoncée, la démarche méthodologique consiste en deux étapes : 1) l'investigation des caractéristiques naturelles des zones humides alluviales de la Prahova en relation avec son évolution ; 2) l'analyse de leur gestion. Plusieurs outils sont disponibles pour l'identification des zones humides : l'analyse de la végétation et/ou des sols, l'analyse topographique, la télédétection... Dans cette démarche méthodologique, on a choisi de travailler à partir des deux dernières méthodes. En connaissant les caractéristiques morphologiques de l'espace de liberté de la Prahova, la télédétection permet de distinguer les zones dont la surface est humide. Les avantages de cette méthode sont la possibilité d'analyser une superficie étendue et la rapidité de l'analyse. Sa précision dépend du moment de prise de vue des photos aériennes. La gestion des zones humides alluviales dérivent essentiellement de l'évolution de l'occupation du sol.

#### 3.4.2.1. Calcul des indices de végétation par la télédétection

Cette étape repose sur l'analyse des images satellites Landsat. Le programme Landsat a été lancé par la NASA en 1972 ; son objectif est de fournir un suivi multispectral des secteurs terrestres pour l'évaluation des ressources, pour la surveillance des changements environnementaux... Les applications Landsat sont diverses, dans le domaine des sciences de la terre, dans les applications commerciales et militaires. Ces images sont mises à la disposition du public par le programme Global Land Cover Facility, un programme américain, en collaboration entre l'Administration Nationale pour l'Aéronautique et l'Espace des États-Unis (NASA) et l'Université de Maryland. Au cours du temps, Landsat a eu plusieurs capteurs. Le capteur MSS (*Multispectral Scanner*) acquiert les images en quatre canaux (2 dans le visible, 2 dans le Proche Infrarouge et l'Infrarouge) à une résolution de 79 mm. Le capteur TM (*Thematic Mapper*) fournit sept canaux spectraux (3 dans le visible, 1 dans le Proche Infrarouge, 2 dans le Moyen Infrarouge et 1 dans l'Infrarouge Thermique) à une résolution de 30 mm (et de 120 mm pour la bande Infrarouge Thermique). Le capteur ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) est utilisé depuis 1999 ; il a 8 bandes spectrales et il est muni d'une version améliorée de la bande infrarouge thermique. Chaque bande a ses propriétés (cf. Tableau 24). Chacune d'entre elles peut être analysée séparément et/ou dans des combinaisons à trois. Ces combinaisons offrent une vision inédite de la surface de la Terre. Par exemple, la combinaison entre les bandes 3, 2, 1 met en évidence les couleurs naturelles. La combinaison 753 donne des pseudo-couleurs, plus accentuées que celles

naturelles. Des combinaisons comme 432 ou 453 sont spécifiques pour l'étude de la végétation (activité végétale ou différences entre les types de végétation).

Bandes	Résolution spatiale (m)	Résolution spectrale ( $\mu\text{m}$ )
1 (Bleu-Vert)	30	0.45-0.52
2 (Vert)	30	0.53-0.61
3 (Rouge)	30	0.63-0.69
4 (Proche Infrarouge)	30	0.78-0.90
5 (Moyen Infrarouge)	30	1.55-1.75
6 (Infrarouge thermique)	60	10.4-12.5
7 (Moyen Infrarouge)	30	2.09-2.35
8 (Panchromatique)	15	0.52-0.90

**Tableau 24. Les bandes radiométriques des images ETM+ LANDSAT. Source : National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2009.**

Dans cette analyse, les images choisies sont de type ETM+ et elles ont été prises respectivement le 6 mai 2000 et le 14 octobre 2001. On a choisi une image de printemps, durant la saison végétale, afin de travailler sur une meilleure réflectance de la végétation, ainsi qu'une image d'automne, afin de pouvoir comparer l'évolution de la couverture végétale entre les deux saisons. La couverture végétale est analysée par deux indices : NDVI et NDWI.

1) L'Indice de Végétation Différence Normalisée (**NDVI** ou *Normalized Difference Vegetation Index*) est calculé comme le rapport normalisé de la différence entre la réflectance en proche-infrarouge et la réflectance acquise dans la bande spectrale rouge du capteur (Rouse *et al.*, 1973 ; Tucker, 1979), en tenant compte du fait que la végétation absorbe la radiation électromagnétique dans la région visible et la reflète dans le presque infrarouge. L'absorption et la réflectance peuvent être mesurées et la différence calculée. L'indice NDVI donne un aperçu de la densité du feuillage et de la proportion de sol effectivement couverte par la végétation (Grégoire, 1990). C'est une méthode éprouvée, aussi bien pour l'estimation des caractéristiques de croissance de la végétation, que pour les rendements de récolte.

Pour les images Landsat ETM+, cet indice est calculé selon la formule :

$$\text{NDVI} = (\text{bande4} - \text{bande3}) / (\text{bande4} + \text{bande3}),$$

où les bandes 3 et 4 sont les bandes respectivement rouge et proche infrarouge.

L'indice NDVI varie théoriquement entre -1 et 1 ; la végétation terrestre typique possède des valeurs entre 0,1 et 0,6 ; les valeurs les plus réduites (< 0,1) correspondent au sable, à la neige ou aux roches. Les valeurs modérées, entre 0,2 et 0,3, représentent des pâturages et les valeurs élevées (0,6-0,8) indiquent la présence d'espaces boisés (Weier et Herring, 1999).

2) La teneur en eau de la végétation est évalué de manière normalisée par l'indice normalisé différentiel de l'eau (**NDWI** ou *Normalized Water Index*). C'est un indice sans dimension qui indique la présence ou l'absence de l'eau et qui est calculé en comparant la lumière solaire à ondes courtes et le proche infra-rouge reflété par la surface (Gao, 1996).

Pour les images Landsat, cet indice est calculé par la formule :

$$\text{NDWI} = (\text{bande 4} - \text{bande 5}) / (\text{bande 4} + \text{bande 5}),$$

où les bandes 4 et 5 sont les bandes respectivement proche infrarouge et moyen infrarouge.

Les valeurs de l'indice NDWI varient entre -1 et 1. Par exemple la superficie d'un barrage-réservoir se caractérise par des valeurs de l'NDWI de 0,2-0,4 (étant donné les processus d'eutrophisation), tandis que les roches nues se caractérisent par des valeurs de l'indice entre -0,2 et -0,1 (Nasipuri et Chatterjee, 2009).

Afin de faciliter la compréhension des différences spatiales des valeurs des deux indices, une méthode de classification non-supervisée a été appliquée. Elle regroupe automatiquement les pixels dont les radiométries sont proches les unes des autres, selon des critères ne faisant pas appel à une référence *a priori*. L'algorithme utilisé pour la classification non-supervisée est ISODATA (*Iterative Self-Organizing Analysis Technique*) (Ball et Hall, 1965). Le nombre de classes est choisi par l'utilisateur. Dans un premier temps l'algorithme analyse l'ensemble des pixels afin de déterminer entre quelles valeurs de réflectance ils varient ; dans un deuxième temps, en fonction de ces valeurs, l'algorithme établit les caractéristiques principales des classes ; dans un troisième temps, les pixels sont attribués à une certaine classe qui se caractérise par les valeurs les plus proches ; dans un quatrième temps, les moyennes des classes sont recalculées en fonction des pixels attribués (Jensen, 1996). Ce processus se répète automatiquement plusieurs fois jusqu'au dernier pixel. L'interprétation des classes est faite par l'utilisateur. Cette méthode a déjà montré son efficacité pour la détermination des classes des indices NDVI et NDWI, ce qui a permis de mettre en évidence les particularités des différents milieux (Hu, 2007).

D'une manière générale, ces deux indices contribuent à la compréhension de la phénologie des forêts (Delbart *et al.*, 2005). Par exemple, l'indice NDWI est sensible aux changements de la teneur en eau liquide des canopées de la végétation (Gao, 1996). En même temps ils permettent d'isoler les zones contrastées afin de mieux comprendre les caractéristiques de la végétation (Gond *et al.*, 2003 ; Gond et Brognoli, 2005 ; Jackson *et al.*, 2004). Ces deux paramètres ont déjà été utilisés pour l'analyse des zones humides, qui sont des milieux très productifs et se caractérisent donc par des valeurs élevées de l'indice NDVI et par un caractère hétérogène, variant en fonction de la saison (Alard *et al.*, 2002). Gond *et al.* (2004)

proposent d'identifier les mares à partir de la différence entre les deux indices (NDVI-NDWI). Ces indices ont permis d'identifier les cours d'eau éphémères dont le lit est occasionnellement occupé par l'eau (Yoshida, 2005), et de délimiter les zones d'expansion potentielle de la zone humide (IFEN, 2005).

#### *3.4.2.2. Valorisation de l'étude cartographique diachronique*

L'étude cartographique diachronique permet de suivre l'évolution de la superficie et de l'occupation du sol de ces zones humides alluviales. On rappelle que, dans cette étude cartographique diachronique, les données utilisées sont *i)* des plans militaires élaborés d'après des levés de terrain de la période 1897-1902) deux séries de cartes topographiques élaborées d'après des levés de terrain des années 1954-1955 et 1977-1980) des photos aériennes de la période 2003-2005. La méthodologie de superposition de ces documents est expliquée dans la démarche méthodologique de la deuxième partie de cette thèse (cf. § 2.2.). L'analyse se focalise sur certains éléments représentés sur ces documents et qui se trouvent à l'intérieur de l'espace de liberté de la rivière ; en préfigurant les résultats de la recherche, ces éléments sont la forêt (fourrés inclus), les mares/lacs, les marais, les prairies/près/pâtures. Les particularités de ces représentations seront expliquées ultérieurement dans le texte. Cette démarche méthodologique diachronique permet, d'une part, de comprendre comment ces zones humides alluviales se sont formées et, d'autre part, de comprendre les logiques de leur gestion au 20<sup>ème</sup> siècle.

Ce chapitre de la thèse exploite aussi les observations de terrain et les enquêtes menées auprès des habitants.

#### **3.4.3. Mosaïque des zones humides alluviales de la Prahova**

Afin de passer à la présentation des résultats obtenus, il est nécessaire de prendre quelques précautions dans l'analyse de ces images Landsat et des indices calculés : 1) la résolution des images permet de faire seulement une analyse à grande échelle ; un pixel est caractéristique pour une superficie supérieure à 900 m<sup>2</sup> ; 2) les types d'occupation du sol (l'extension des terrains agricoles, morcelés et portant des cultures différentes, et l'extension de la zone bâtie), qui ont des réflectances proches de celles des mosaïques fluviales, rend difficile la compréhension des résultats. En conséquence, **seules les classes extrêmes des classifications ISODATA sont interprétées.**

Au contraire, l'avantage de l'analyse des images Landsat, par rapport à l'analyse des photos aériennes par exemple, consiste dans le fait qu'**elle permet de comprendre le fonctionnement des zones humides alluviales en relation avec le régime hydrologique**. Il faut également tenir compte du fait que la végétation est soumise aux saisons climatiques (et en particulier thermiques) ; de plus chaque espèce végétale a son propre comportement.

Cette analyse se focalise sur le tronçon Zalhanaua-Dridu pour quatre raisons : 1) dans les Carpates et dans les Subcarpates, le fond de la vallée est relativement peu large et la réflectance est compliquée par les nombreuses interventions anthropiques ; 2) le tronçon qui s'étend entre la confluence Prahova-Doftana et la localité de Zalhanaua se caractérise par des marges végétalisées occupées par une végétation essentiellement herbeuse qui se caractérise par une réflectance faible, raison pour laquelle les résultats ne sont pas concluants ; 3) les marges de la bande active sont occupées par une végétation forestière en aval de la localité de Zalhanaua ; l'analyse par télédétection, à une résolution de 30 m, donne des résultats pour cette formation végétale en fonction du développement de sa canopée ; 4) dans le secteur à méandres il est intéressant de suivre l'évolution de la végétation des méandres abandonnés de la Prahova, considérés en général comme des annexes fluviales du cours d'eau.

Le tronçon Zalhanaua-Dridu a été séparé en onze sous-tronçons afin de pouvoir analyser sa longueur entière. Pour chaque sous-tronçon, on a pris en compte : 1) des combinaisons en pseudo-couleurs 753 des images Landsat ; 2) la classification en cinq classes selon la méthode ISODATA de l'indice NDVI ; 3) la classification en cinq classes selon la méthode ISODATA de l'indice NDWI ; 4) la classification en sept classes selon la méthode ISODATA de la différence entre les indices NDVI et NDWI. Chacune de ces images a un certain rôle : 1) les images Landsat servent de repère ; 2) la classe supérieure de l'indice NDVI indique les formations végétales les plus productives et qui se caractérisent par une activité chlorophyllienne intense ; 3) la classe supérieure de l'indice NDWI indiquent les formations végétales avec une teneur importante en eau ; 4) les classes extrêmes de différence entre les deux indices NDVI-NDWI indiquent, d'une part, les formations végétales très productives avec un faible contenu en d'eau et, d'autre part, les éléments peu productifs, mais dont le contenu en eau est important. L'ensemble de ces images doit être analysé afin de comprendre le fonctionnement de la mosaïque écologique fluviale.

Afin de valider les résultats obtenus, les caractéristiques du cours d'eau sont analysées ; il se caractérise par une activité végétale peu intense, par un contenu en eau important et donc par une valeur faible de la différence NDVI-NDWI.

L'analyse des images Landsat (cf. Figure 90 – Figure 100) met en évidence trois types principaux de formations végétales qui composent la mosaïque écologique fluviale de la rivière Prahova : **la ripisylve, les mares, les marais et les pâtures**. L'interprétation et la validation des résultats se font à partir des autres documents cartographiques.

#### 3.4.3.1. Ripisylves

La **ripisylve** représente un écosystème forestier qui borde un chenal fluvial ; elle est liée à la présence d'une nappe phréatique peu profonde et elle est inondée de façon régulière ou exceptionnelle ; son existence, sa composition floristique et son extension spatiale sont dépendantes des écoulements superficiels et phréatiques (Patou, 1984). Selon le même auteur, la ripisylve est formée de plusieurs sous-systèmes écologiques très spécifiques par leurs caractères structuraux (composition floristique, organisation spatiale...), leur régime hydrique, leurs caractères géomorphologiques et pédologiques. En général, la ripisylve est constituée d'une mosaïque composée de forêts denses, forêts clairsemées, fourrés, landes boisées, landes, prairies, pelouses... (Piégay *et al.*, 2003). La ripisylve est un compartiment terrestre de l'hydrosystème, qui est très dynamique, renouvelé et rajeuni naturellement grâce aux crues et à l'érosion (Boyer *et al.*, 1998). La notion de ripisylve a plusieurs équivalents (forêt riveraine, forêt alluviale, forêt inondable, corridor forestier...), mais de signification diverse, qui sont utilisés en fonction de l'intérêt pour les différents domaines de recherche (Piégay *et al.*, 2003).

Conformément à l'analyse des images Landsat, la ripisylve représente la formation végétale qui se caractérise par l'activité la plus intense ; la teneur en eau de cette formation végétale est très importante aussi. L'intensité de l'activité végétale et le contenu en eau diminue de mai en octobre. La différence NDVI-NDWI a des valeurs moyennes. Par rapport aux forêts continentales, la ripisylve a une certaine particularité : en automne, elle a une activité végétale moins intense et elle perd plus facilement son contenu en eau. Pourquoi cette particularité ? Parce que les ripisylves représentent une mosaïque de forêts dont la densité, l'âge, la composition floristique et l'importance des fourrés varient. Les ripisylves sont naturelles et anthropiques et composées essentiellement de *Populus nigra*, *Populus alba*, *Salix alba*, *Salix nigra*, *Alnus nigra*.

La superficie forestière a augmenté depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (cf. Tableau 25), en relation avec les contraintes naturelles et anthropiques (voir §3.4.4.1. et 3.4.4.2.).

Tronçon/secteur	1897-1900 Superficie (km <sup>2</sup> )	1954-1955 Superficie (km <sup>2</sup> )	1977-1980 Superficie (km <sup>2</sup> )	2003-2005 Superficie (km <sup>2</sup> )
Tronçon en tresses, divagant entre Zalhanaua et Puchenii Miroslăvești	4,5	5,2	6,2	7,1
Secteur à méandres entre Puchenii Miroslăvești et la confluence Ialomița-Prahova	10,8	14,7	16,2	16,5

**Tableau 25. Evolution de la ripisylve du tronçon Zalhanaua - confluence Ialomița-Prahova au 20<sup>ème</sup> siècle. Les superficies forestières sont calculées à partir des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.**

#### 3.4.3.2. Mares et marais

La mare représente une petite étendue d'eau stagnante, dans une dépression naturelle ou artificielle, de faible profondeur (Dictionnaire Trésor de la Langue Française, 2009). Le marais représente un type de zone humide riche en végétation palustre (Manneville *et al.*, 2006). L'étang représente une étendue d'eau généralement stagnante, d'une faible profondeur, située dans une cuvette naturelle ou creusée par l'homme (Dictionnaire Trésor de la Langue Française, 2009).

On a pu distinguer une mare et huit marais situés dans l'espace de liberté de la Prahova dans le secteur à méandres ; dans le tronçon en tresses on a pu identifier des étendues d'eau, qui correspond à des étangs formés par l'accumulation de l'eau dans les anciennes fosses de ballastières (cf. Figure 94-Figure 100).

Les étangs et la mare ont en général le même comportement spectrale que le cours d'eau ; elles se caractérisent par une activité végétale peu intense, par un contenu en eau important et donc par une valeur faible de la différence NDVI-NDWI. Etant donné leur extension peu importante, les étangs ne sont pas visibles sur toutes les classifications ISODATA réalisées. Ils se voient surtout sur la composition de bandes 753 et sur les images montrant la différence NDVI-NDWI (valeur très faible, égale à l'eau de la rivière).

La **végétation de marais**, installée temporairement dans des chenaux fluviaux abandonnés, se caractérise par une activité végétale intense et par une teneur importante en eau au printemps. En automne, elles ont une activité moins intense et une teneur en eau moins importante. Comme dans le cas de la forêt, la différence NDVI-NDWI a des valeurs moyennes. Cette évolution est probablement due au régime hydrologique et aux variations de profondeur de la nappe phréatique. En mai, la fonte de la neige et les précipitations

relativement abondantes font que le cours d'eau est en régime de hautes eaux. En octobre, comme effet de l'évapotranspiration élevée de la saison chaude et sous l'influence d'une quantité peu importante de précipitations, le cours d'eau est en phase de basses eaux. La profondeur de la nappe phréatique varie probablement en relation avec le régime hydrologique : elle remonte au printemps et baisse en automne. En conséquence, au printemps la nappe phréatique remonte en formant des marais ; jusqu'en octobre ces marais s'assèchent.

Afin de comprendre leur fonctionnement, on a mené une brève analyse sur l'évolution de ces zones entre 1900 et 2005.

Les étangs 1, 2, 3 sont le résultat de l'activité d'exploitation des graviers et des sables de l'ancienne bande active de la Prahova (cf. Figure 51 de la deuxième partie de la thèse). D'autres étangs se retrouvent en amont du tronçon analysé, donc au nord de la localité de Zalhanaua.

La **mare** de Puchenii Mirosălăvești persiste tout le long de l'année, mais sa superficie diminue du printemps l'automne. Comment cette mare s'est-elle formée ? En 1897, la Prahova formait un chenal à méandres qui fonctionnait dans une bande d'alluvions et recevait un affluent (le Poienari) sur sa rive droite. Entre 1987 et 1954, la Prahova recoupe son chenal fluvial et abandonne sa bande latérale d'alluvions dans ce tronçon. Par contre, la confluence ne se déplace pas. En conséquence, l'eau apportée par l'affluent s'accumule en formant une mare. Quelques temps avant 1954, la mare est séparée de la Prahova par une levée de terre. Sur ces derniers kilomètres, l'affluent a été dévié et transformé en canal ; mais son ancien chenal naturel a conservé un cours d'eau temporaire. La mare continue à exister ; elle fonctionne probablement en relation avec le régime hydrologique de cet affluent et les variations de la nappe phréatique (cf. Figure 103).

Les marais 2, 3, 4 et 5 se sont formés dans les chenaux des méandres recoupés de la Prahova. Malgré la dynamique très active du secteur à méandres de la Prahova avant 1954, on estime que très peu de marais se sont formés. Quelle explication pour cette situation ? Les méandres abandonnés ne sont plus en relation avec la nappe phréatique liée au chenal fluvial actuel. L'isolement des méandres abandonnés est probablement dû à l'accumulation des bouchons alluviaux, qui ferment les méandres recoupés et abaissent le niveau de la nappe phréatique. Le marais 4 s'est formé dans le chenal abandonné d'un méandre recoupé de la Prahova à l'endroit de l'ancienne confluence Prahova-Teleajen. Le marais de l'Ialomița s'est formé dans le chenal abandonné de l'Ialomița, juste avant l'ancienne confluence avec la Prahova ; on rappelle que le cours de l'Ialomița a été réorienté après la construction du barrage-réservoir de Dridu. Le marais de l'Ialomița communique probablement par la nappe

phréatique avec la rivière Prahova. Le marais de la Maia s'est formé dans l'ancien chenal de cet affluent de la Prahova ; en effet le cours de la rivière Maia a été bloqué anthropiquement, afin de créer un étang utilisé pour le bétail et pour l'irrigation et, depuis peu de temps, pour la pêche sportive aussi.

La végétation spécifique à ces marais est constituée essentiellement d'espèces de laïche (*Carex riparia*) de petite taille, d'espèces de roseau (*Phragmites australis*) et de massette (*Typha angustifolia* et *Typha latifolia*).

#### 3.4.3.3. Près et pâtures

Les rives des cours d'eau sont en général occupées par des pâtures, des prairies et des près. Les prairies représentent des terrains couverts de plantes herbacées, fourragères, consommées sur place par les bestiaux, ou coupées pour être mangées à l'état vert ou une fois séchées. Les pâtures sont des prairies naturelles où les bestiaux vont à l'herbe (celle-ci n'est jamais assez haute pour être fauchée). Les près sont des terres humides non labourées, destinées à être fauchées (George, 1970).

Les plans militaires n'indiquent aucune de ces formations végétales. Les cartes topographiques font la distinction entre les pâtures et les prairies/près, qui sont analysées ensemble ; étant donné le fait qu'une hachure est utilisée, il est difficile de tracer précisément leurs limites. La distinction est assez délicate, même à partir des photos aériennes : on peut faire la distinction entre les pâtures/près/prairies naturelles et les prairies cultivées et fauchées. On a observé sur le terrain que les prairies/près naturelles ne sont pas fauchées, et on a observé également qu'en général, les herbes sont peu hautes, raison pour laquelle on utilisera ici le terme de pâture.

La distinction entre les pâtures et les prairies cultivées est possible grâce aux images Landsat. En comparant les résultats des classifications des images Landsat, on a pu observer que les pâtures ont un comportement spectral commun, tandis que les terrains agricoles sont très fragmentés et très variés quand à leur réflectance. Les pâtures se caractérisent par une activité végétale relativement importante (mais moins intense que la forêt et que la végétation de marais). La différence NDVI-NDWI indique qu'elles ont une activité végétale toujours importante en automne, même en cas d'absence de ressources en eau et de régime hydrologique en phase de basses eaux, donc qu'elles sont moins influencées par le fonctionnement hydrologique de la Prahova. Les prairies cultivées fauchées se caractérisent par une différence NDVI-NDWI très faible en octobre, ce qui indique que l'activité végétale

est très faible aussi. On observe donc que les pâtures ont une extension importante sur les rives de la Prahova.

<b>Zone humide</b>	<b>Année 1897-1899 (plans militaires)</b>	<b>Année 1954 (cartes topographiques)</b>	<b>Année 1977/1980 (cartes topographiques)</b>	<b>Années 2000-2001 (images satellite Landsat)</b>	<b>Années 2003-2005 (photos aériennes)</b>
<b>Etangs 1</b>	Non-existante	Non-existante	Non-existante	Existante	Existante
<b>Etang 2</b>	Non-existante	Non-existante	Non-existante	Existante	Existante
<b>Etangs 3</b>	Non-existante	Existante	Non-représentée	Existante	Existante
<b>Mare 1</b>	Non-existante	La mare s'était déjà formée.	La mare existe toujours.	La mare existe toujours.	La mare existe toujours.
<b>Marais 1</b>	Non-existante ; elle correspond à la bande latérale d'alluvion du secteur à méandres.	Elle correspond à un méandre de la Prahova.	Le méandre a été recoupé ; un marais est resté en place.	Végétation de marais	Végétation de marais
<b>Marais 2</b>	Mare formée probablement suite au recoupement d'un méandre.	Cours temporaire d'eau	Pas de représentation particulière	Végétation de marais	Végétation de marais
<b>Marais 3</b>	Non-représentée	Non-représentée	Non-représentée	Végétation de marais	Végétation de marais
<b>Marais 4</b>	Mare formée suite au recoupement d'un méandre	La mare a disparu ; un marais est resté en place.	Marais	Végétation de marais	Végétation de marais
<b>Marais 5</b>	Non-représentée	Cours temporaire d'eau à la base de la terrasse, probablement dans un méandre recoupé	Non-représentée	Végétation de marais	Végétation de marais
<b>Marais 6</b>	Non-représentée	Non-représentée	Non-représentée	Végétation de marais	Végétation de marais
<b>Marais de la Maia</b>	Chenal fluvial de la rivière Maia	Mare	Mare	Végétation de marais	Végétation de marais
<b>Marais de l'Ialomița</b>	Chenal fluvial de la rivière Ialomița	Chenal fluvial de la rivière Ialomița	Chenal fluvial de la rivière Ialomița	Végétation de marais	Végétation de marais
<b>Cours d'eau temporaires en relation avec le chenal principal</b>	3	7	-	-	-

**Tableau 26. Evolution des zones humides (mares, marais, étangs, cours temporaires d'eau) du secteur méandres de la Prahova à partir des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM, des images Landsat et des photos aériens du FNG.**

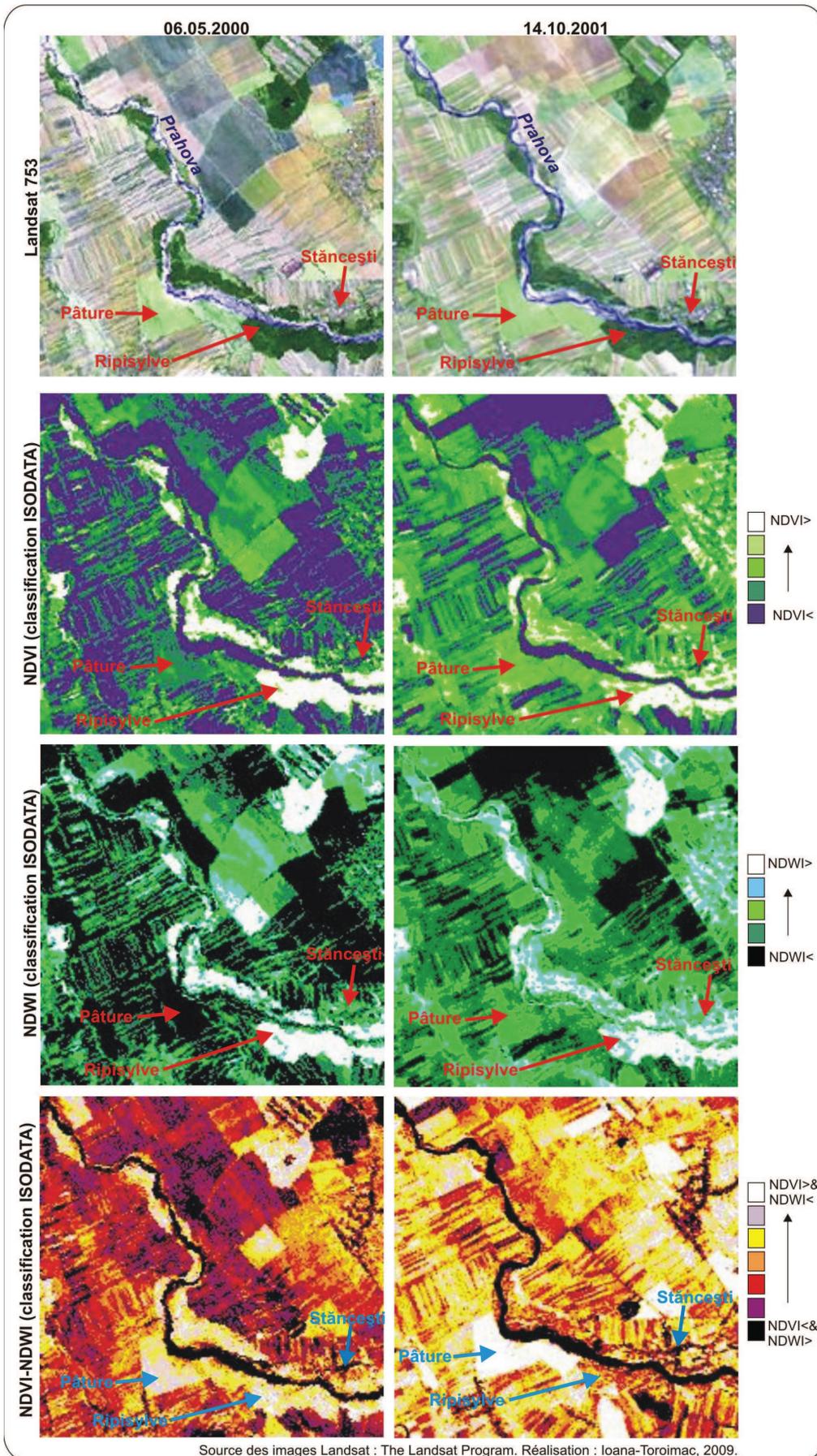


Figure 90. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 1.

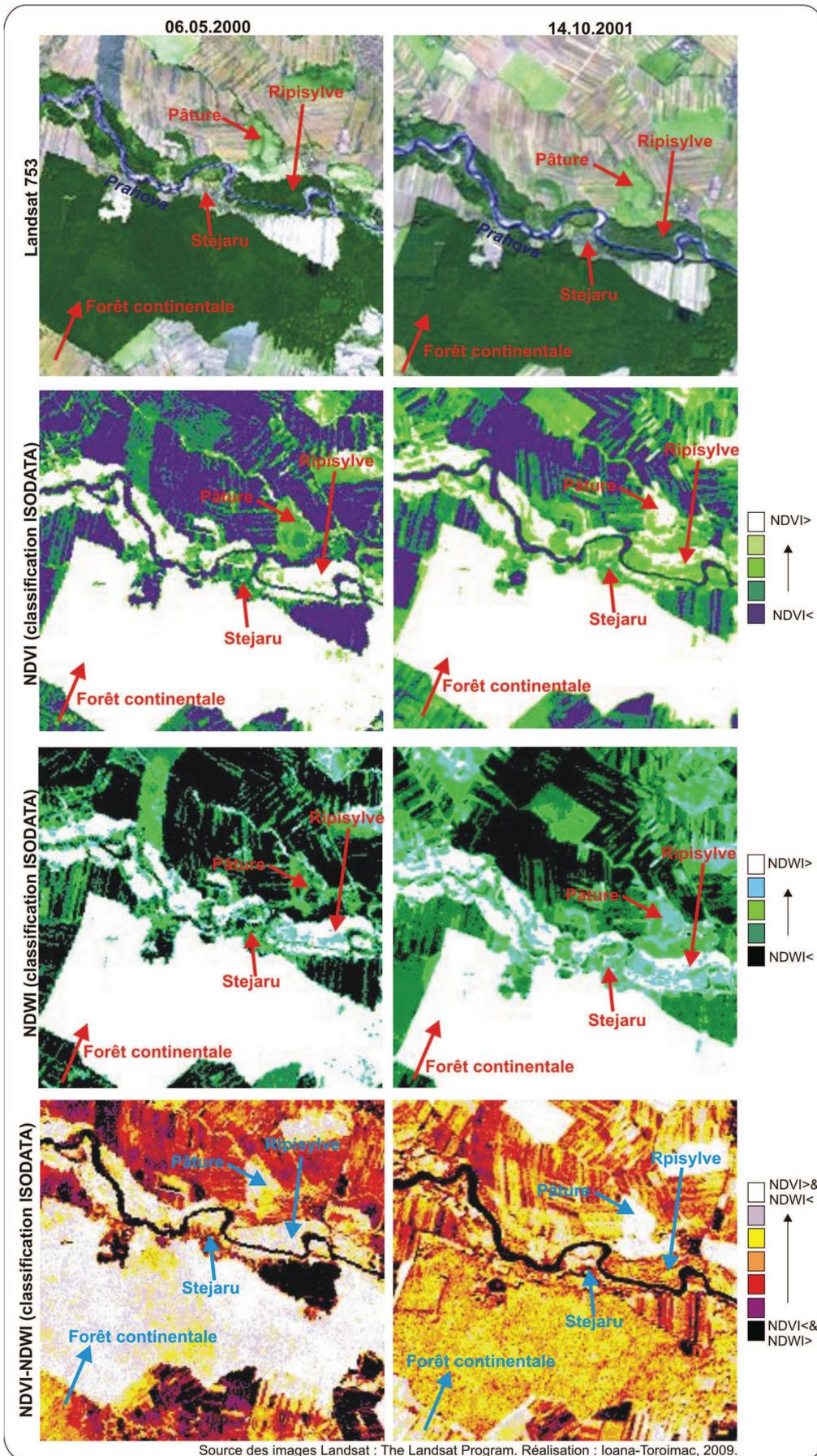


Figure 91. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 2.

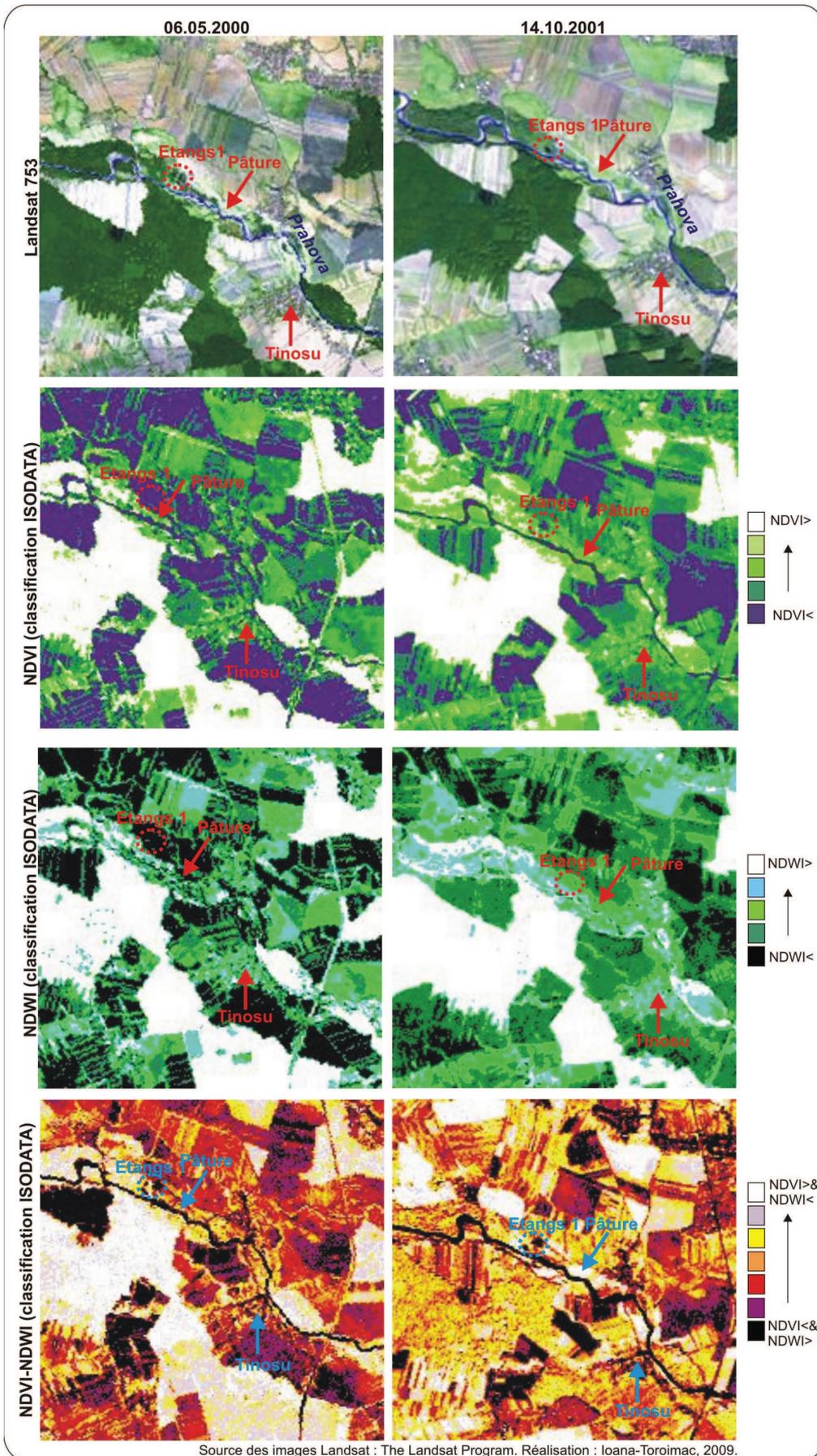


Figure 92. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 3.

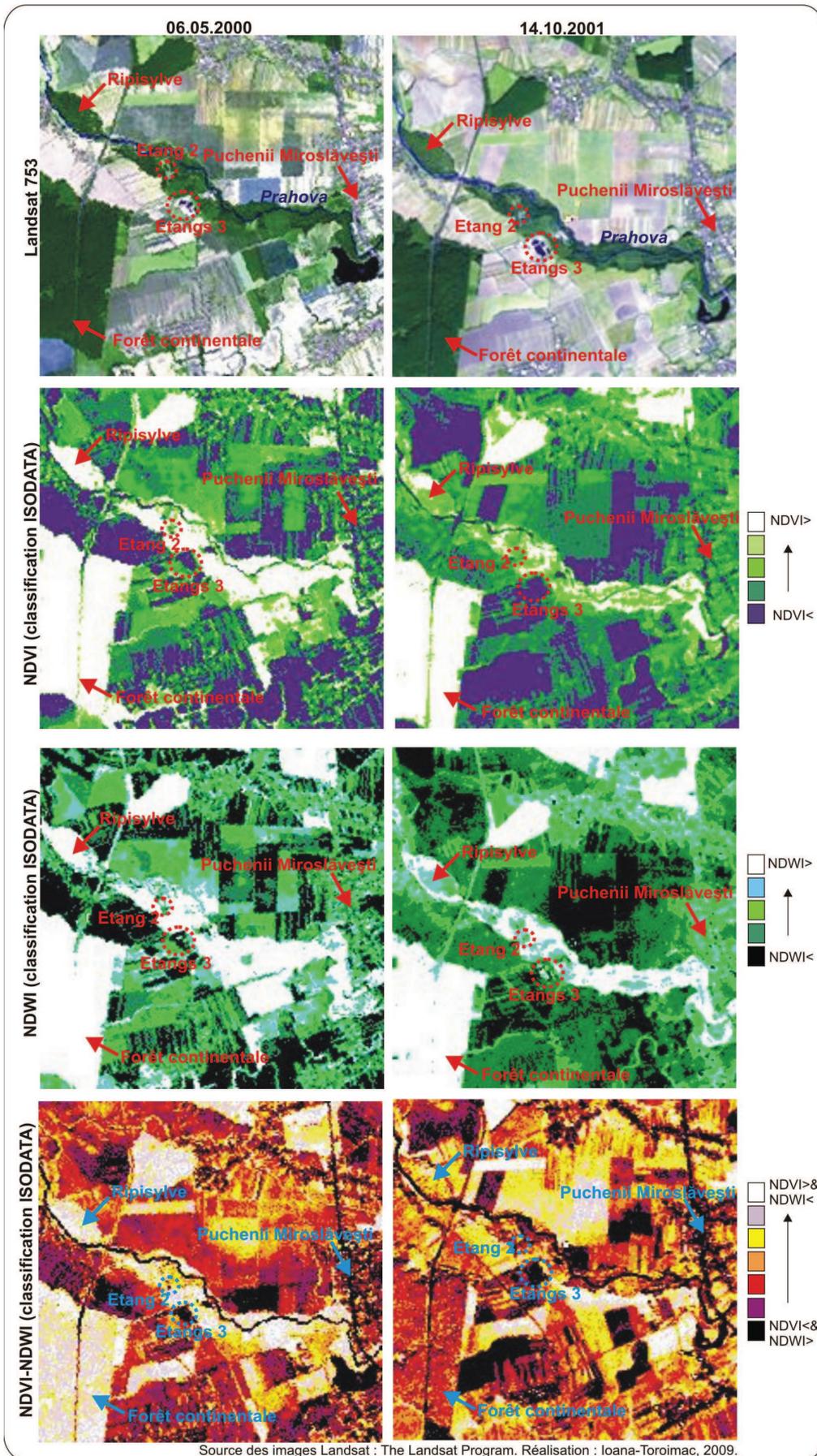


Figure 93. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 4.

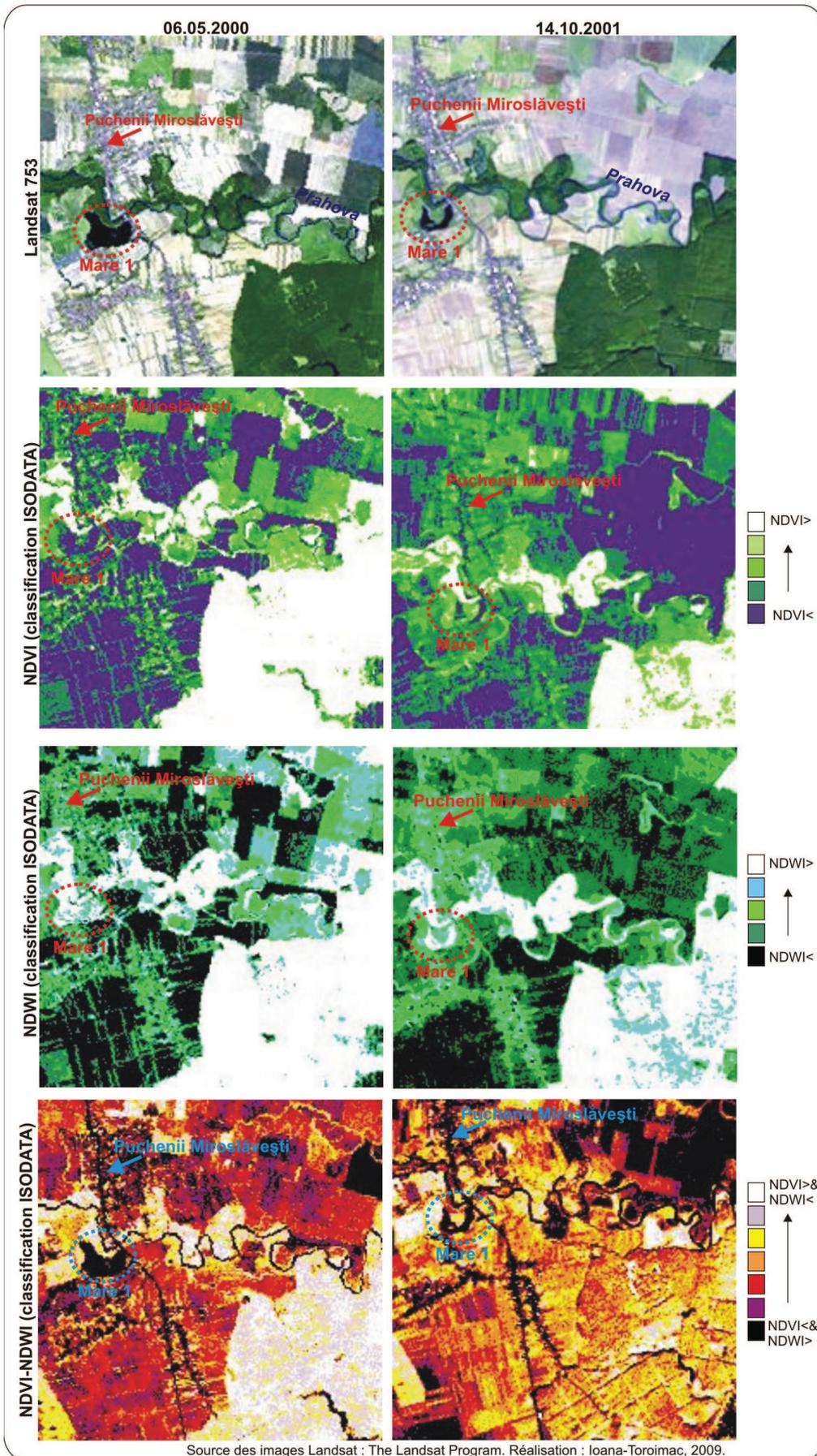


Figure 94. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 5.

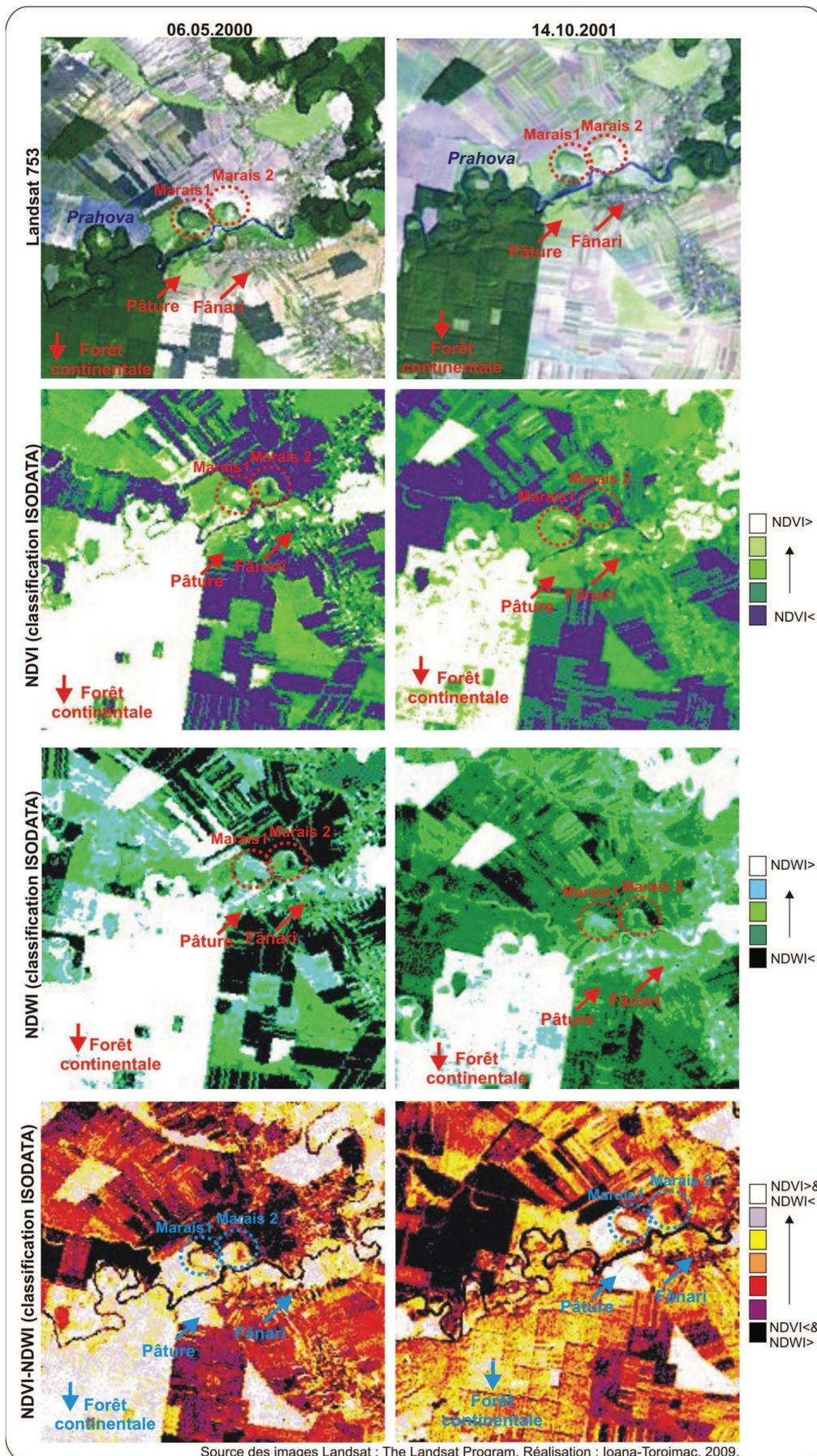


Figure 95. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 6.

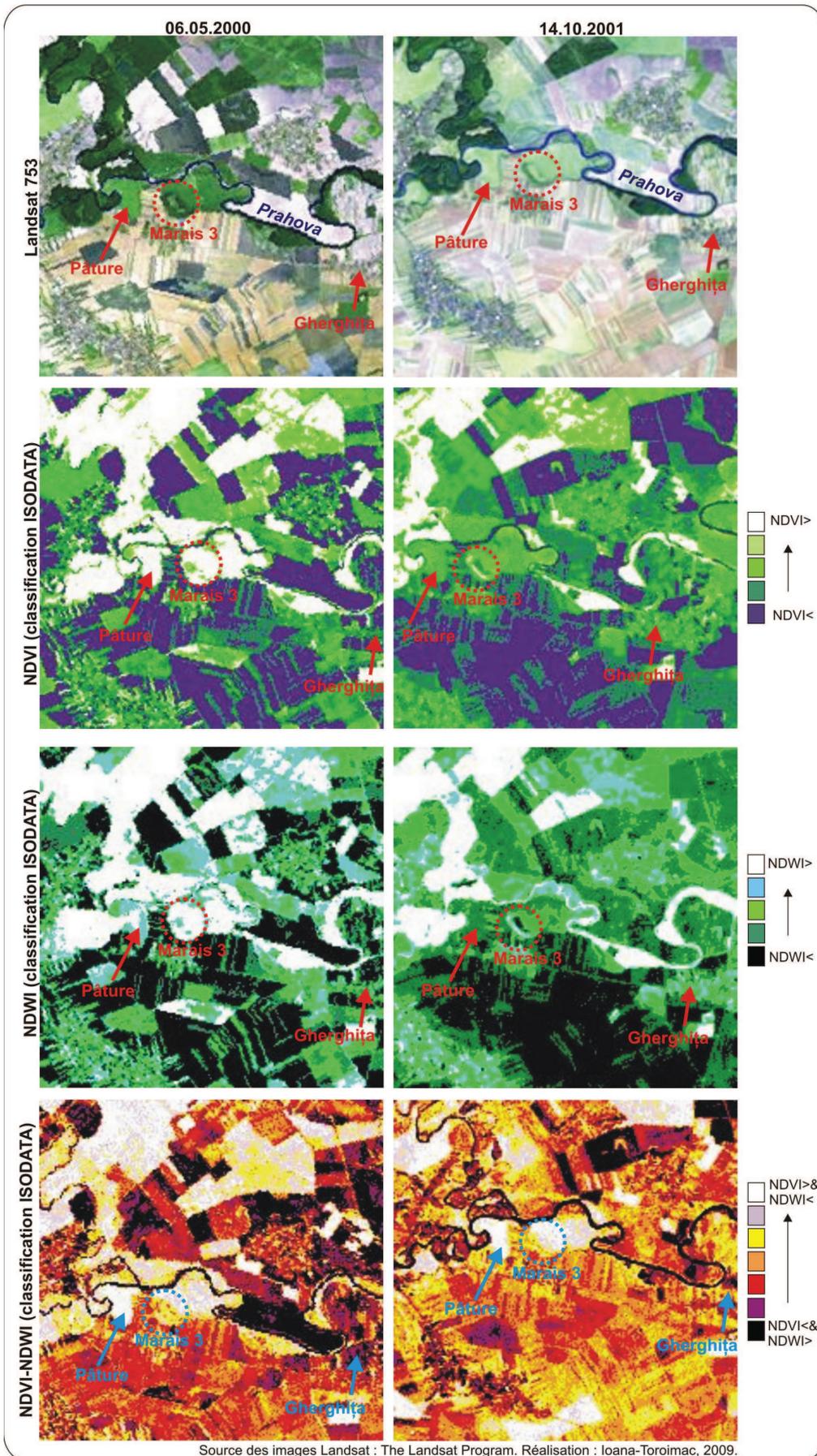


Figure 96. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 7.

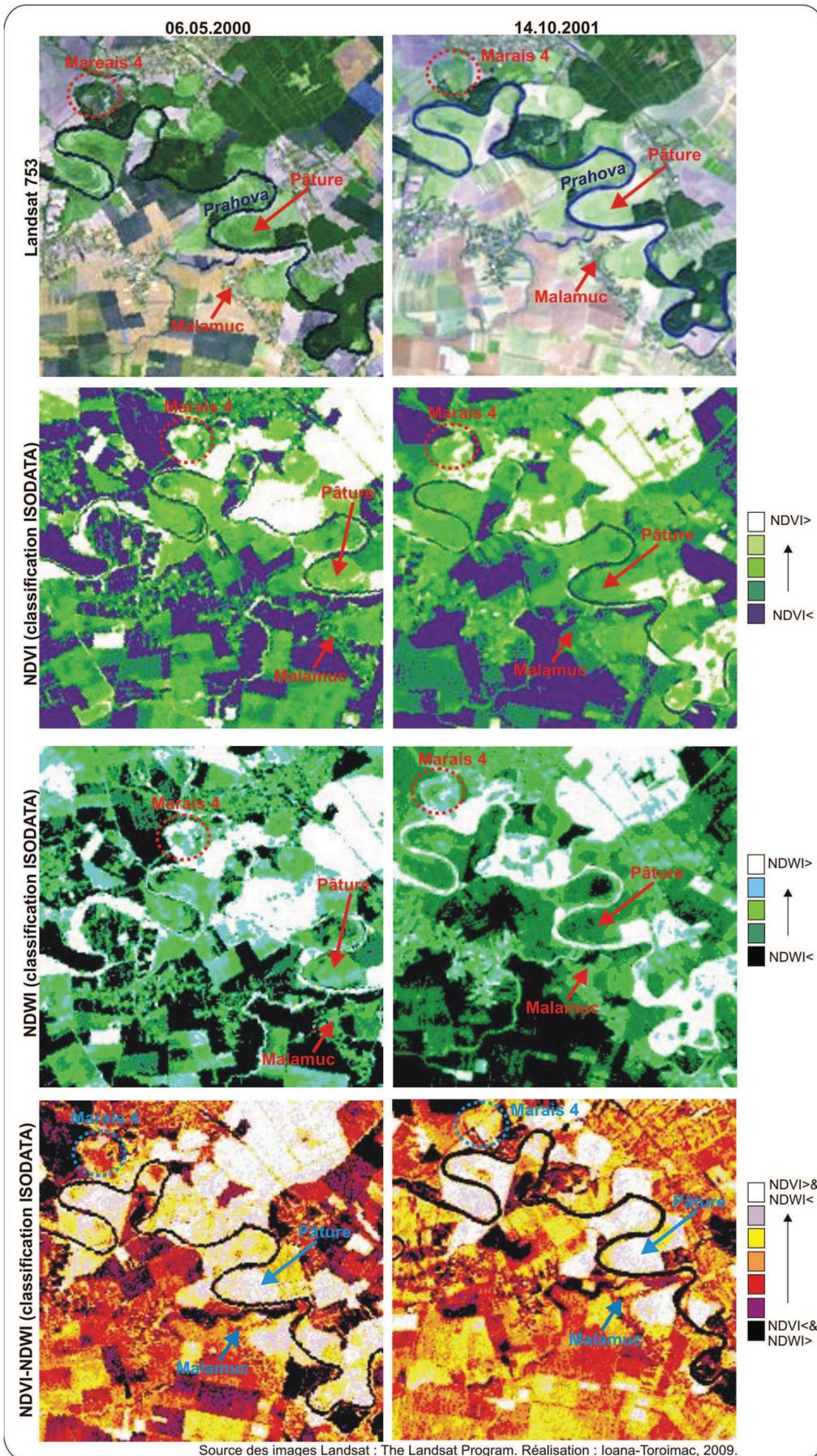


Figure 97. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 8.

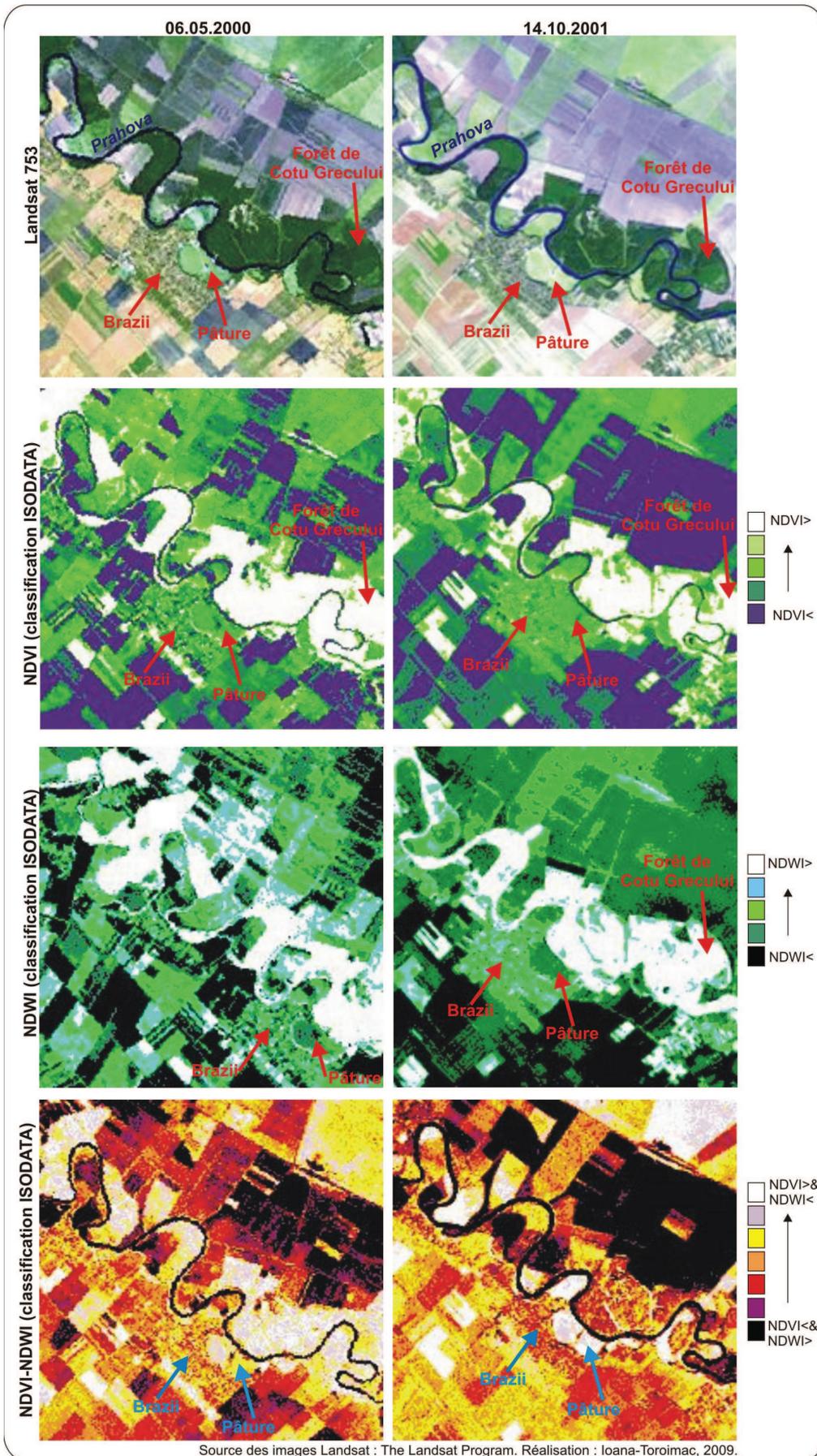


Figure 98. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 9.

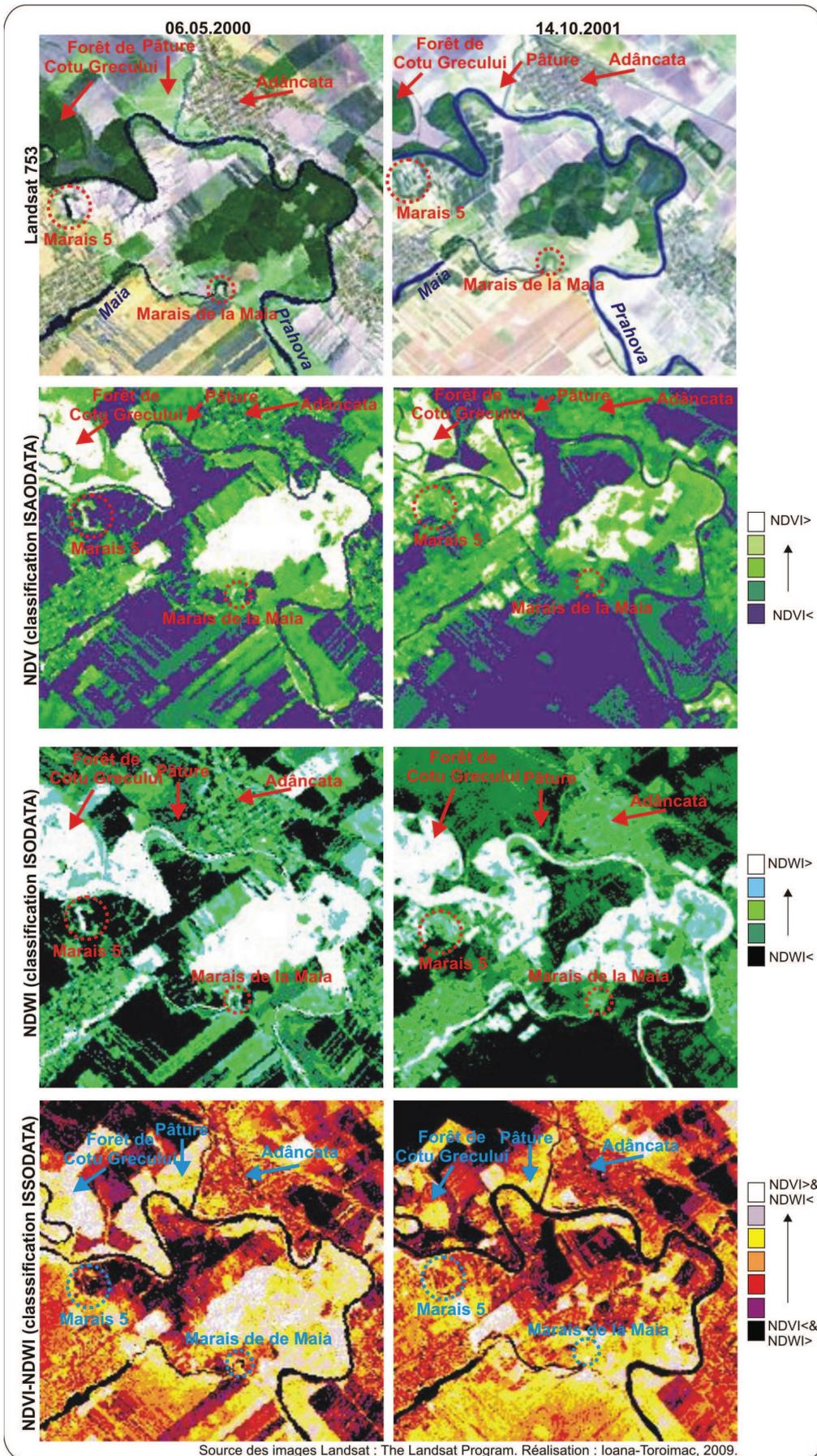


Figure 99. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 10.

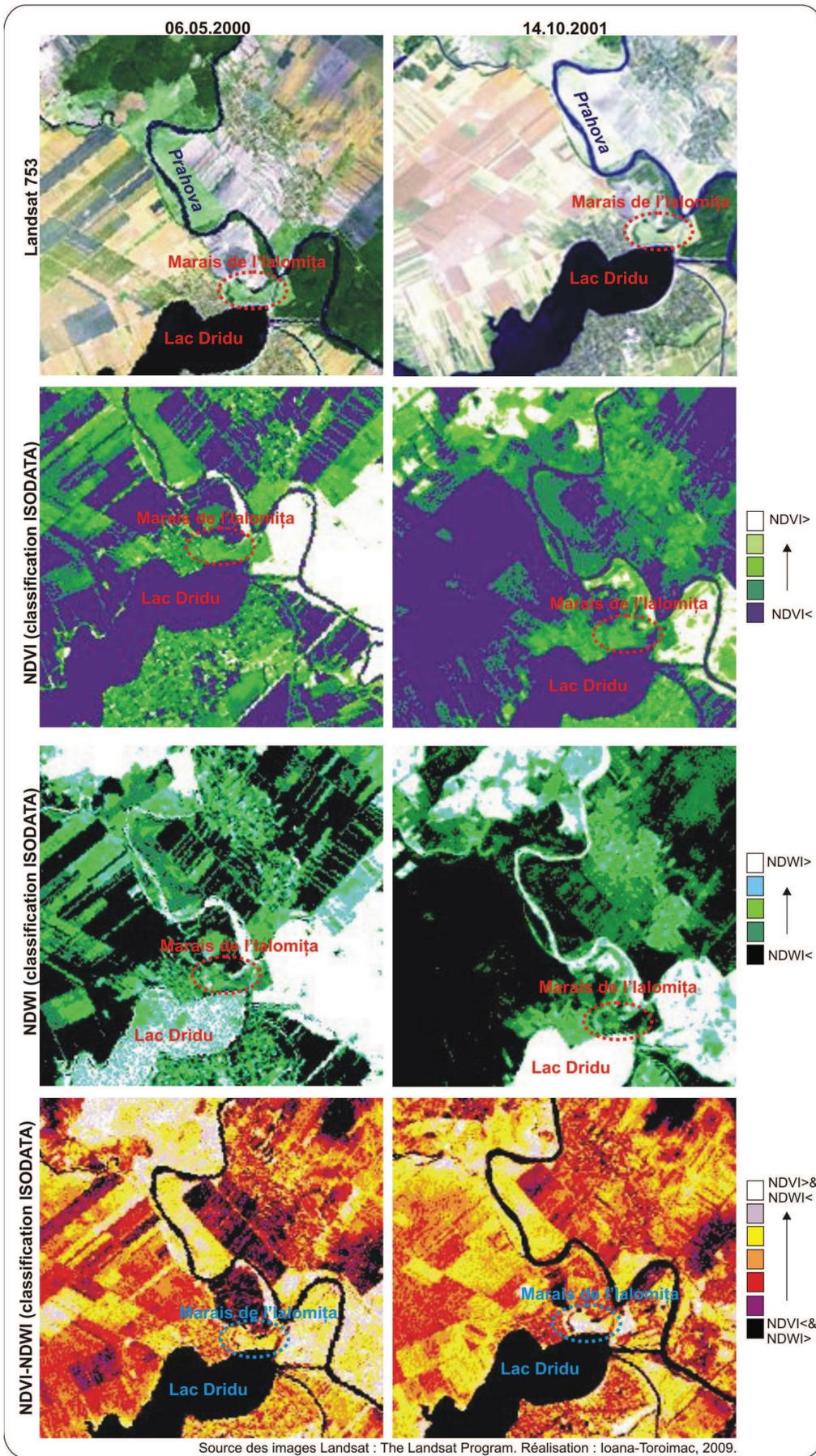


Figure 100. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 11.

### 3.4.4. Quelle gestion des zones humides alluviales de la Prahova ?

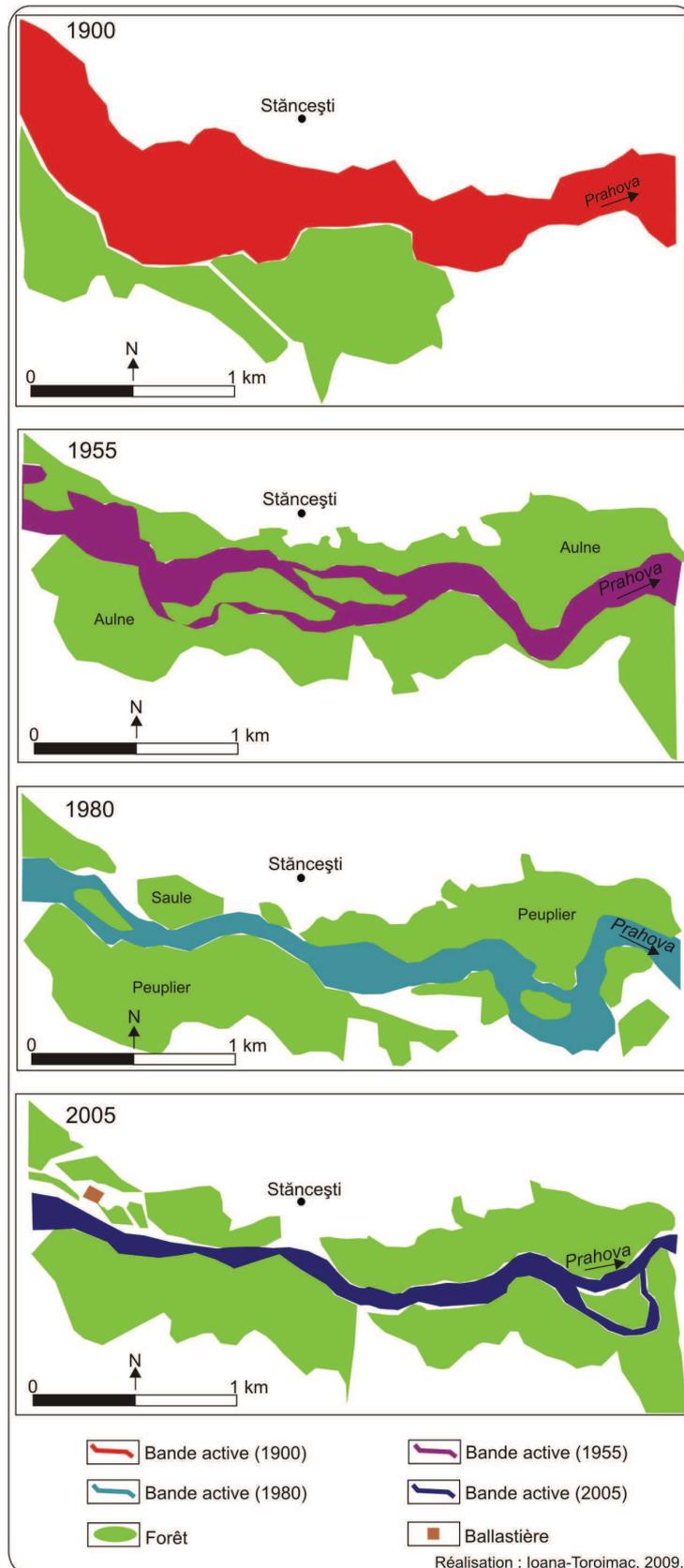
#### 3.4.4.1 Ripisylve du tronçon en tresses - conservation de cette zone-tampon

Les forêts riveraines des cours d'eau en tresses sont considérées comme dynamiques, car elles sont rajeunies par les débordements des cours d'eau et dominées par des espèces pionnières (Kondolf *et al.*, 2006). Dans le cas des plusieurs rivières alpines françaises, elles ont été mises en place en relation avec le rétrécissement (naturel et anthropique) des bandes actives de tressage. Par exemple dans le cas de l'Eygues inférieur, le rétrécissement naturel de la bande active de tressage, la diminution de la pression anthropique dans la plaine alluviale et l'endiguement de la rivière, ont permis aux forêts de coloniser les chenaux fluviaux abandonnés entre la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Mais récemment, les mêmes forêts ont été morcelées suite à l'exploitation des graviers, aux pratiques agricoles et aux pratiques touristiques de récréation. Tout cela indique que ces forêts sont finalement le résultat de certaines activités anthropiques ; mais étant donné leur rôle de zone-tampon, il est nécessaire de les préserver et de les restaurer.

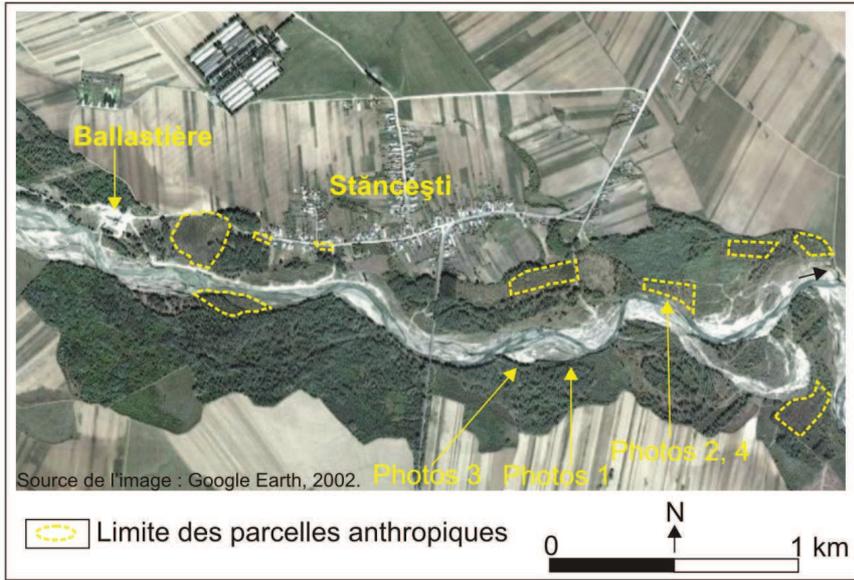
Comme on a déjà remarqué, les ripisylves du secteur en tresses (et divaguant) de la Prahova sont une conséquence du rétrécissement de la bande active. Par exemple à Stăncești, en 1900, la forêt se développait exclusivement sur la berge droite de la bande active (cf. Figure 101). En 1955, elle colonisait les deux rives et certains bancs alluviaux ; mais la superficie de la forêt qui occupait la rive droite avait diminué probablement en relation avec l'extension des terrains arables. En 1980, la ripisylve avait été morcelée localement suite à l'évolution latérale du cours d'eau. Conformément aux cartes topographiques, des reforestations ont été réalisées entre 1955 et 1980. En 1955, la ripisylve était formée surtout d'espèces d'aulnes. Les espèces d'aulnes s'adaptent sur des dépôts d'alluvions stratifiés ou sur des sols alluviaux stratifiés, où la nappe phréatique est accessible (Diaconu *et al.*, 1971). En 1980, la ripisylve était constituée essentiellement de peuplier. Les reforestations de Stăncești sont confirmées dans les travaux de Gheorghe (2005). Après 1980, les exploitations des graviers et des sables se multiplient. Ces exploitations morcellent la ripisylve. C'est l'exemple de la ballastière qui fonctionne au sud-ouest de Stăncești. La mosaïque d'espèces, de densités et de dimensions est mise en évidence sur une image de Google Earth (cf. Figure 102). Cette mosaïque explique donc les variations de NDVI et de NDWI de la forêt occupant l'ancienne bande active surtout à Stăncești, à Stejaru et à Tinosu (cf. Figure 90, Figure 91, Figure 93).

Par leur position, les parcelles anthropiques indiquent la volonté de renforcer le rôle de zone-tampon de cette forêt ; les parcelles restituent la compacité de la forêt dans les périmètres morcelés ou elles bordent la bande active en empêchant théoriquement sa migration latérale (cf. Figure 102). Mais les plantations anthropiques situées très près du cours d'eau ne protègent pas suffisamment les berges contre l'érosion et contribuent à la formation d'embâcles de bois mort par l'arrachage de ces arbres ; par contre, si elle étaient situées plus loin du cours d'eau, ces plantations poseraient beaucoup moins de problèmes (Boyer *et al.*, 1998).

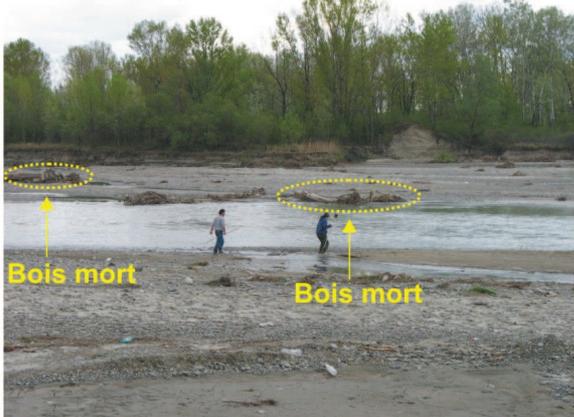
La ripisylve de Stăncești est rarement inondée par le débordement de la Prahova à cause des dimensions importantes de la bande active actuelle par rapport aux débits de crues. La crue de mars 2007 a provoqué l'érosion des berges de la Prahova ; en conséquence des arbres ont été arrachés et déposés dans la bande active. C'est essentiellement des troncs et des branches qui proviennent du tronçon Zalhanau-Stăncești où la bande active de la Prahova est bordée d'arbres. On rappelle qu'entre la confluence avec la Doftana et la localité de Zalhanau, les marges de la bande active sont exclusivement occupées par une végétation herbeuse ; de plus on n'a pas observé de bois mort dans la bande active de la rivière en amont de Zalhanau. Par contre, on n'a pas observé de bois morts transportés par le cours d'eau et déposés à l'intérieur de la forêt, ce qui est un autre indicateur de l'absence de fortes crues récentes. Après la crue de mars 2007, ces bois morts sont restés dans la bande active. On a pu remarquer, en discutant avec le personnel de SGA Prahova, que les bois morts sont en général perçus, classiquement, comme un élément de risque d'embâcle. Mais sur ce tronçon de la Prahova le bois mort n'a pas été enlevé, parce qu'il n'y a pas d'enjeu socio-économique potentiellement exposé à ce type de risque. Mais on a pu observer que la population locale prélève ce bois mort qui, après séchage, est utilisé pour le chauffage. En général le bois mort agit de trois façons sur les écoulements : 1) il constitue des freins aux écoulements ; 2) il modifie la distribution latérale des vitesses ; 3) il favorise les débordements, pouvant ralentir le temps de transfert et ainsi diminuer les pics des crues (Gippel, 1995). Depuis le début des années 1980, les spécialistes américains ont proposé de laisser en place le bois mort pour une revalorisation des ressources piscicoles, pratique adoptée ultérieurement par les états européens aussi (Gippel *et al.*, 1994, cités par Boyer *et al.*, 1998). De plus le bois mort peut être un agent de modification des formes du chenal et donc de diversification des milieux (Boyer *et al.*, 1998).



**Figure 101. Evolution de la ripisylve de Stăncești en relation avec le rétrécissement de la bande active de la Prahova. Les éléments de la légende sont tracés à partir des plans militaires, des cartes topographiques de la DTM et des photos aériennes du FNG.**



**Forêt (naturelle) de peuplier**  
Photo 1 (Ioana-Toroimac, 15.04.2007)



**Forêt (anthropique) de peuplier**  
Photo 2 (Ioana-Toroimac, 15.04.2007)



Photo 3 (Ioana-Toroimac, 27.10.2008)

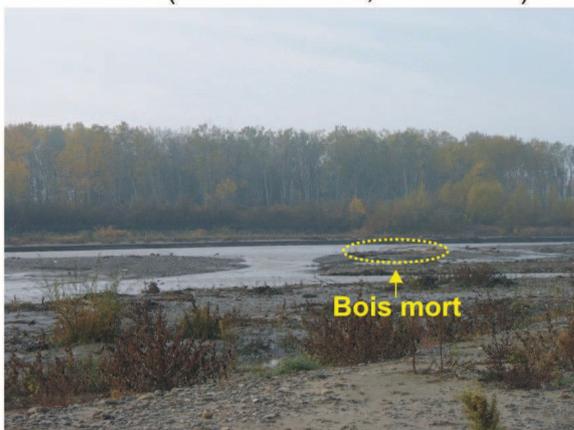


Photo 4 (Ioana-Toroimac, 27.10.2008)



Réalisation : Ioana-Toroimac, 2009.

**Figure 102. Mosaïque de la ripisylve à Stăncești.**

#### 3.4.4.2. Les marais de la Prahova - logiques multiples de gestion

Du point de vue anthropique, on a remarqué deux logiques principales de gestion des marais : 1) la rupture de la connectivité avec la rivière ; 2) la reforestation, selon le principe de la zone-tampon, afin de protéger les terrains agricoles voisins contre les inondations et la migration latérale du cours d'eau ; 3) l'exploitation agricole partielle en conservant les caractéristiques naturelles du marais. A la fin des années 1960, la Roumanie a mené une politique active d'assèchement et de poldérisation des zones humides afin de bonifier ces terrains et de les utiliser en agriculture ; le plus affecté a été le lit du Danube (Romanescu, 2008). Le lit de la Prahova n'a pas été soumis à cette politique.

1) **Rupture de la connectivité latérale avec le cours d'eau.** C'est le cas de la mare de Puchenii Mirosălvești. On a expliqué dans un paragraphe antérieur (voir §3.4.3.2.) comment cette mare s'est formée. Après l'apparition de la mare, une levée de terre a été créée afin de la séparer du cours de la Prahova. La levée de terre a 11 m de largeur et 3 m de hauteur (d'après la carte topographique de 1977). Malgré la politique de mise en valeur de la connectivité latérale des rivières, cette levée de terre fonctionne encore à présent. La mare est utilisée pour des activités de pêche non-organisée, à l'échelle locale.

2) **Reforestation des zones humides après 1955.** La mise en place de la logique de reforestation des zones humides est évidente pour le méandre de Cotu Grecului<sup>21</sup> (voir l'évolution du chenal sur la Figure 84 du chapitre 1 de la troisième partie), faisant partie de l'espace de liberté de la Prahova (cf. Figure 85 du même chapitre). En 1897, la partie centrale de ce méandre était couverte par la forêt, probablement en continuité avec la forêt terrestre voisine, que la rivière traversait. En 1954, ce chenal de la Prahova est occupé par un cours d'eau temporaire ; le méandre avait été recoupé ; la partie sud-est du méandre est occupée par le même type de végétation forestière, tandis que, dans le nord-ouest, des alignements d'arbres bordent le cours temporaire d'eau. La diminution de la superficie forestière est probablement due à des déforestations ; cela est confirmé par la « disparition » des forêts voisines antérieurement représentées sur les cartes. En 1977, la majeure partie de ce méandre recoupé était couverte par une végétation forestière anthropique (peupliers de 16 m de hauteur, diamètre de 20 cm et distance moyenne entre les arbres de 3 m d'après la carte topographique de 1977) ; seule la partie du sud-est est restée naturelle, étant couverte par des

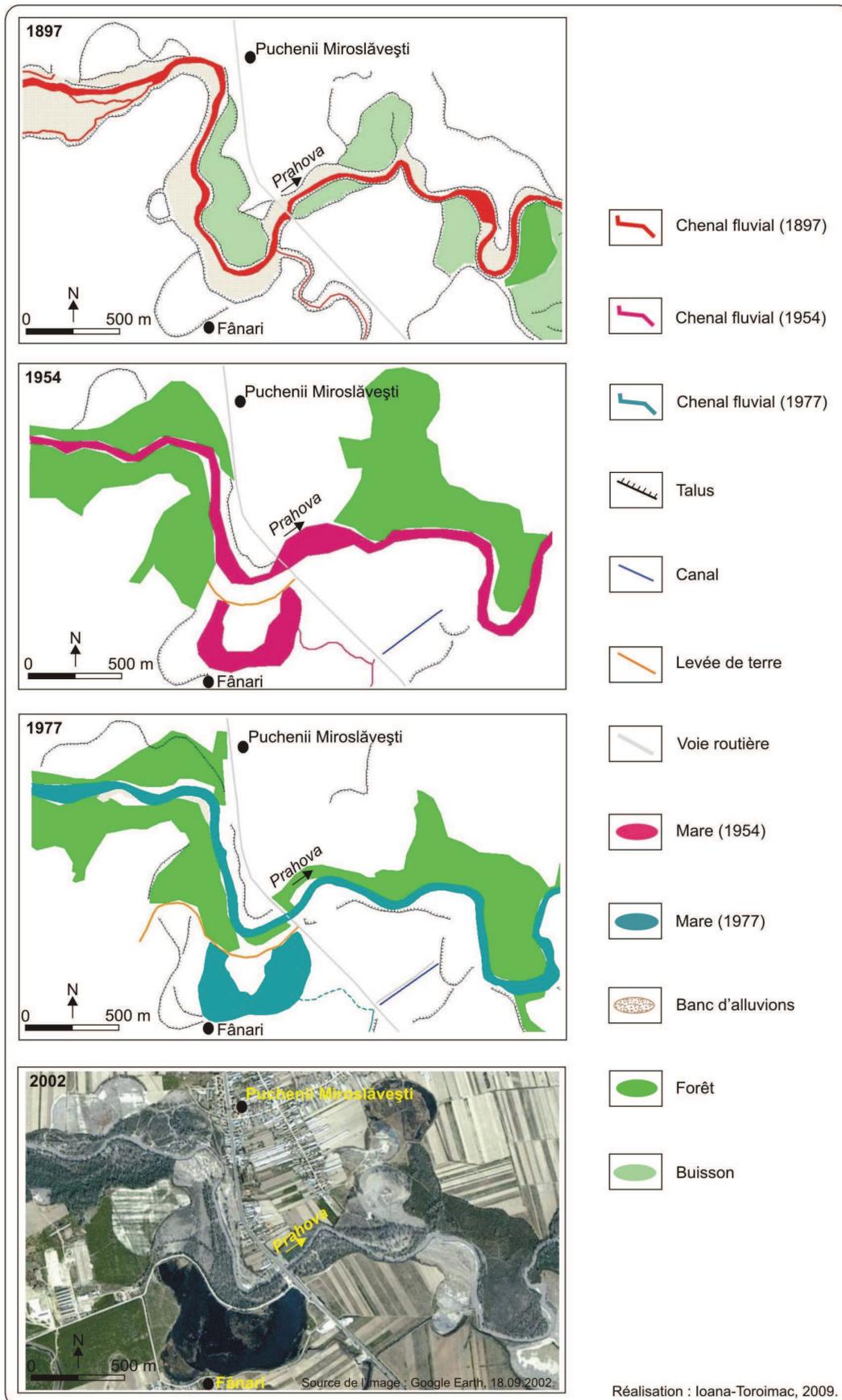
---

<sup>21</sup> Le mot « cotu » est un synonyme archaïque du mot « méandre » ; en conséquence Cotu Grecului signifie le Méandre du grec.

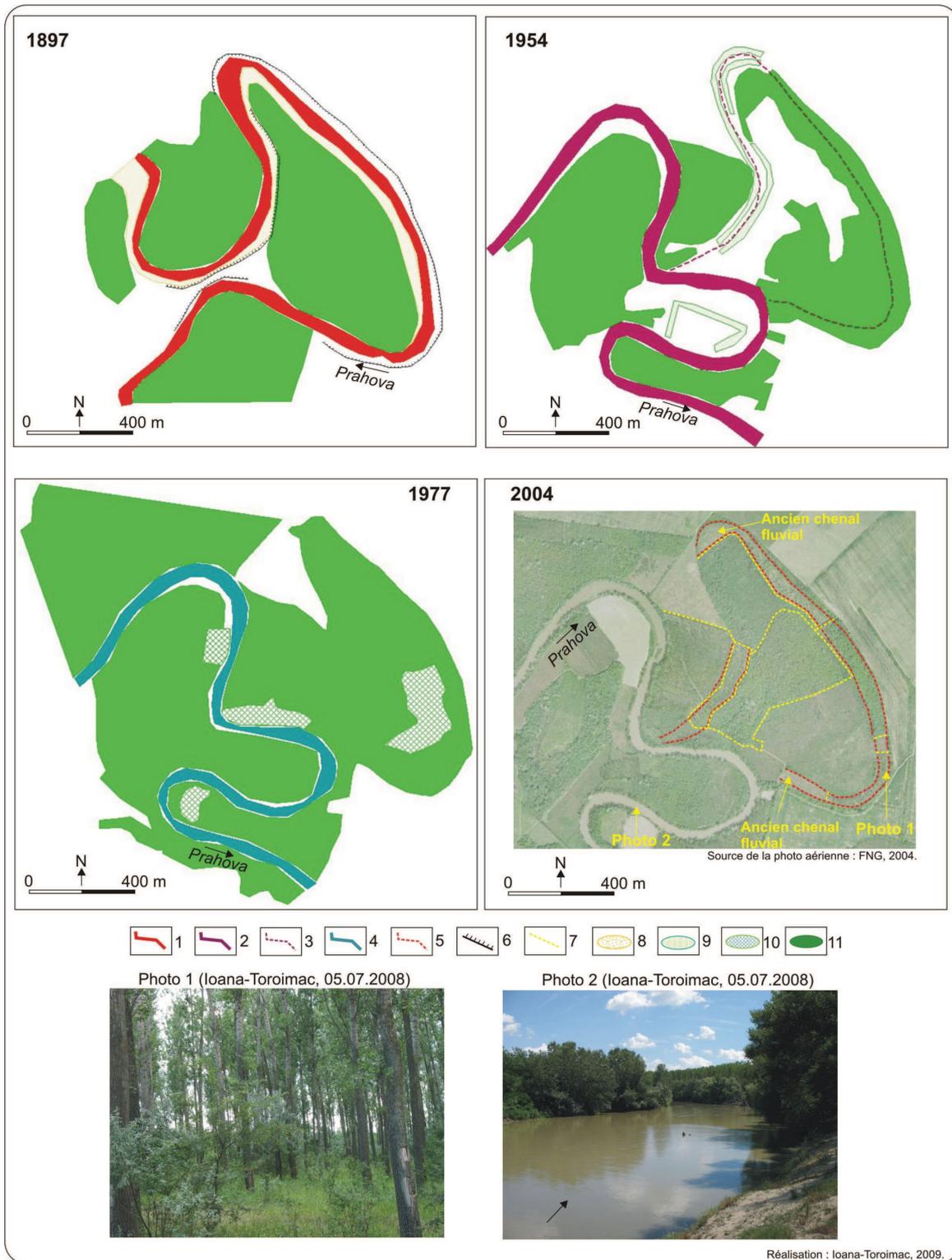
fourrés. Les photos aériennes de 2004 mettent en évidence plusieurs parcelles forestières anthropiques ; le caractère anthropique est déduit de la position régulière des arbres, ainsi que de l'existence d'une seule espèce dominante (*Populus nigra*). De fait, pour ces caractéristiques (vivant longtemps, formant de longues racines secondaires qui stabilisent le sol, se régénérant très bien par semis), le peuplier est très courant dans les ripisylves (Boyer *et al.*, 1998). Le peuplier est une espèce adéquate pour les dépôts stratifiés (plus ou moins fins) et où la nappe phréatique est accessible (Diaconu *et al.*, 1971), raison pour laquelle cette espèce est utilisée aussi pour des reboisements anthropiques. On remarque que les bordures d'arbres situés sur les berges de la Prahova le long de ce tronçon sont naturelles et formées essentiellement de saules (*Salix alba*, *Salix nigra*). Localement, l'ancien chenal fluvial peut être reconstitué. Pourtant les images Landsat analysées antérieurement (cf. Figure 99) ne détectent pas d'occupation spécifique aux marais. En conclusion, en 1954, le chenal du méandre recoupé de Cotu Grecului s'était probablement transformé en marais, avec un fonctionnement temporaire dépendant du régime hydrologique et de la nappe phréatique. Mais l'accumulation d'alluvions et la mise en place anthropique de la végétation forestière a provoqué la disparition de cette caractéristique et donc d'un des marais de la Prahova.

De fait, cette logique de reforestation des espaces fluviaux a commencé en Roumanie dans les années 1960 dans le but de les protéger contre les inondations. Actuellement la Régie Nationale des Forêts de Roumanie (ROMSILVA, 2009) considère que 31% des forêts nationales ont pour rôle de protéger les eaux (par rapport à 42% pour la protection du sol, 11% pour l'agrément et la récréation, 10% pour la conservation de la biodiversité, 6% pour la protection contre les facteurs climatiques et les facteurs nocifs industriels).

Selon Piégay (1995, 1996), limiter l'entretien du cours d'eau en amont pour ralentir l'onde de crue en aval par des reforestations est une solution envisagée par certains gestionnaires pour les bassins versants peu peuplés et qui s'inscrit dans une logique de préservation de la dynamique quasi-naturelle des cours d'eau. Mais on a montré dans la deuxième partie de la thèse que les forêts alluviales ont contribué à l'incision du chenal fluvial de la Prahova. En conséquence il est nécessaire de trouver l'équilibre entre l'entretien des zones-tampons des cours d'eau, leur dynamique hydrogéomorphologique et la conservation des marais.



**Figure 103. Evolution de la mare de Puchenii Miroslăvești entre 1897 et 2002. Les éléments de la légende sont tracés à partir des plans militaires et des cartes topographiques de la DTM.**



**Figure 104.** Reforestation du méandre recoupé de Cotu Grecului, comme logique de gestion d'un marais alluvial. Les éléments de la légende sont tracés à partir des plans militaires et des cartes topographiques de la DTM. 1 = chenal fluvial en 1897 ; 2 = chenal fluvial en 1954 ; 3 = cours d'eau temporaire en 1954 ; 4 = chenal fluvial en 1977 ; 5 = limite du chenal fluvial du méandre recoupé qui s'observe actuellement ; 6 = talus ; 7 = limite des parcelles forestières ; 8 = banc alluvial ; 9 = alignement d'arbres ; 10 = forêt peu dense formée d'arbres petits ; 11 = forêt.

3) Afin d'expliquer la logique d'**exploitation agricole des méandres recoupés**, on propose l'exemple du marais 4 (cf. Figure 97). Le marais 4 se trouve au sud de la localité de Drăgănești ; son évolution a été mise en évidence sur la Figure 57 de la deuxième partie de la thèse. En 1855 l'actuel marais appartenait au chenal de la Prahova, qui formait un méandre. Le méandre a été recoupé avant 1897 et un lac est resté en place ; à ce moment-là, la partie centrale du méandre était occupée par une végétation buissonnante (cf. Figure 105). On observe que le chenal de l'ancien méandre n'est plus relié au chenal principal ; cette situation s'explique par le fait que les alluvions apportées et déposées par la Prahova ont bouché le chenal de ce méandre. Ultérieurement, en 1954 et en 1977, l'ancien lac est représenté en tant que marais, occupée par une végétation spécifique. Afin de couper définitivement le contact entre le chenal de l'ancien méandre et le chenal principal de la Prahova, des forêts (de *Populus nigra*) ont été mises en place anthropiquement. Les habitants racontent que, dans les années 1970, étant donné les caractéristiques naturelles de la région, la partie centrale de l'ancien méandre avait été aménagée (canaux d'irrigation) pour la riziculture. Mais ce projet n'a jamais été finalisé. Actuellement la partie centrale du méandre est utilisée pour la culture de la luzerne (*Medicago sativa*) (cf. Figure 105). Étant donné l'accumulation d'alluvions et l'exploitation agricole (labour de la terre), le chenal de l'ancien méandre ne peut plus être reconstitué dans la partie ouest du paléo-méandre. Dans la partie est, l'ancien chenal est colonisé par une végétation spécifique aux marais (*Carex riparia*) et à la ripisylve (*Salix alba*).

Un exemple ressemblant est celui du marais de l'Ialomița, qui s'est formé dans le cours abandonné cette rivière, suite à la construction du barrage-réservoir de Dridu. Bien qu'il n'y ait pas eu d'intervention, la zone adjacente est utilisée en agriculture, comme pâturage pour le bétail (cf. Figure 106).

Bien qu'une politique de re-connexion latérale des cours d'eau soit menée à l'échelle nationale, il n'y a pas encore de projet qui envisage la conservation et la protection des zones humides alluviales de la Prahova.

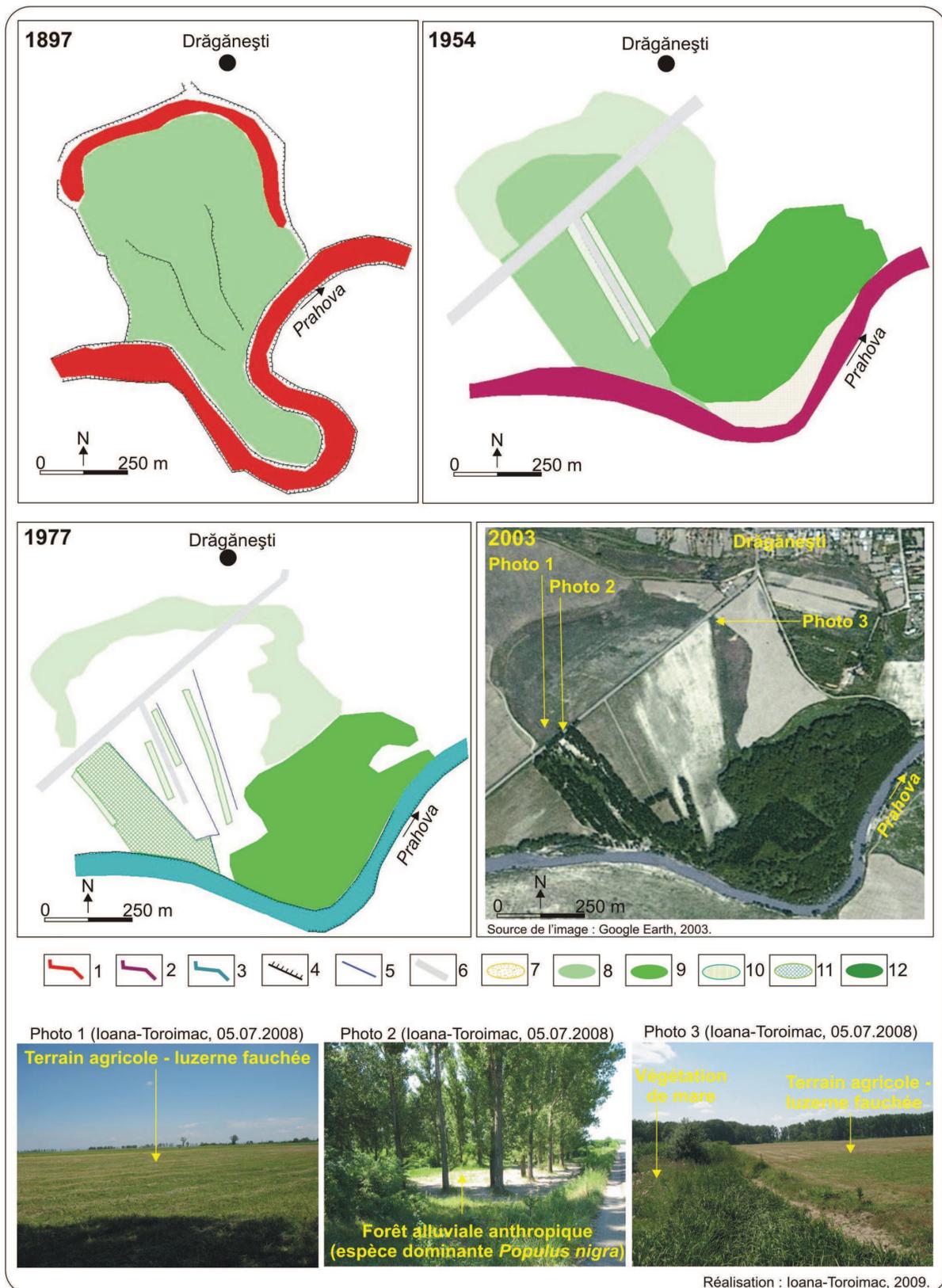


Figure 105. Marais située au sud de la localité de Drăgănești, formé dans un méandre recoupé. Les éléments de la légende sont tracés à partir des plans militaires et des cartes topographiques de la DTM. 1 = chenal fluvial en 1897 ; 2 = chenal fluvial en 1954 ; 3 = chenal fluvial en 1977 ; 4 = talus ; 5 = canal d'irrigation ; 6 = voie routière ; 7 = banc alluvial ; 8 = marais ; 9 = prairie ; 10 = alignement d'arbres ; 11 = fourrée ; 12 = forêt.

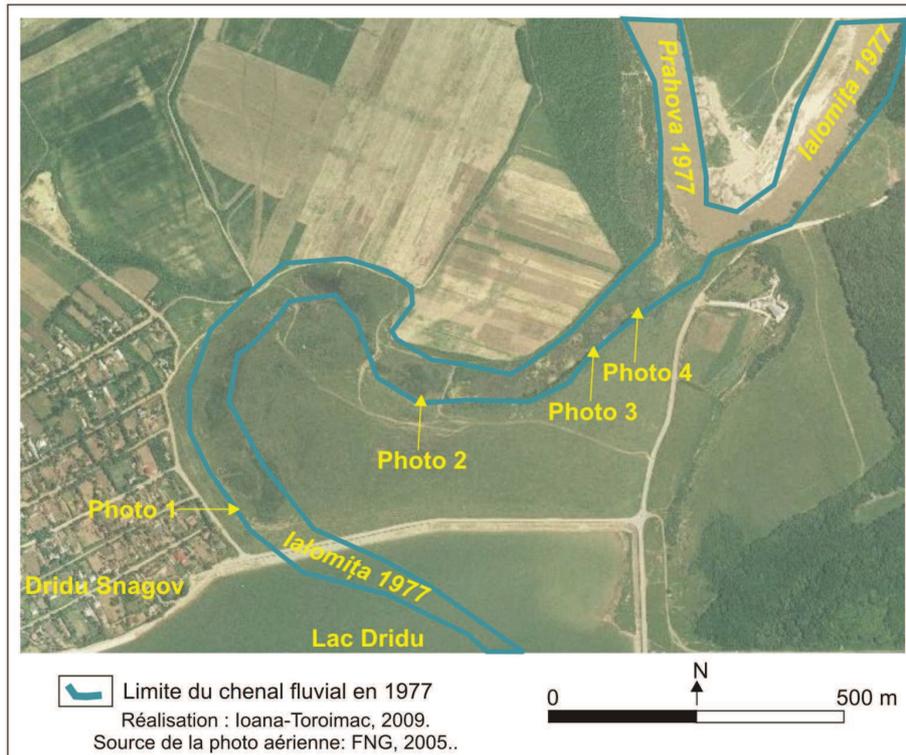


Photo 1 (Ioana-Toroimac, 19.09.2006)



Photo 2 (Ioana-Toroimac, 19.09.2006)



Photo 3 (Ioana-Toroimac, 19.09.2006)



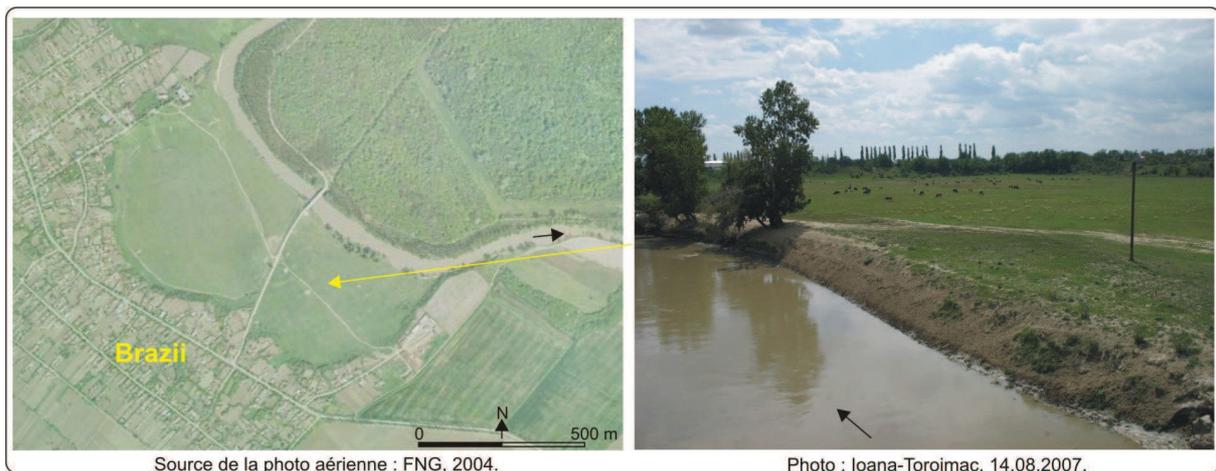
Photo 4 (Ioana-Toroimac, 19.09.2006)



**Figure 106. Marais de l'Ialomița - formée dans le chenal de l'Ialomița après la construction du barrage-réservoir de Dridu. Le chenal fluvial de 1977 est tracé à partir des cartes topographiques de la DTM.**

### 3.4.4.3. Pâtures utilisées pour l'élevage du bétail

Les observations de terrain ont permis d'identifier une logique principale de gestion des pâtures de la Prahova. Les pâtures, constituées d'herbes courtes, sont utilisées pour l'élevage du bétail. Selon Seffer *et al.* (2008), le pâturage extensif peut être rendu compatible avec une gestion équilibrée de la végétation par le maintien des zones-refuges permettant de conserver une certaine diversité faunistique et floristique. L'ouverture du milieu par le pâturage et le piétinement des animaux favorisent le développement d'espèces compétitives pour la lumière et donc la diversité faunistique aussi. Afin d'assurer un pâturage extensif efficace il faut tenir compte aussi bien des caractéristiques des parcelles (accès, point d'eau...), que des races les mieux adaptées. La fauche est une pratique utilisée essentiellement pour les prairies cultivées avec des plantes fourragères (exemple : la luzerne), comme dans le cas du méandre recoupé, situé au sud de la localité de Drăgănești, présenté dans un paragraphe antérieur (voir §3.4.4.2.). Mais il faut tenir compte du fait que la fauche est une autre méthode adéquate pour la conservation et la protection des prairies alluviales. Par exemple le report des dates de fauches (meilleure protection des couvées et maintient des plantes à floraison tardive) et la mise en place de pratiques de fauche plus adaptées (fauche « sympa », à partir du centre de la parcelle et à vitesse réduite lors des derniers tours, afin de laisser le temps aux oiseaux de s'enfuir). Les mêmes mesures de gestion ont été prises en Lorraine et Marne et Loire (France) afin de conserver les espèces spécifiques aux prairies alluviales (Muller, 2002).



**Figure 107. Pâtures alluviales de la Prahova et leur utilisation pour l'élevage du bétail.**

### 3.4.5. Conclusions et perspectives de l'usage des zones humides alluviales

Le but de ce chapitre a été d'analyser les zones humides alluviales de la rivière Prahova afin de mettre en évidence leurs caractéristiques naturelles et leur gestion.

L'étude cartographique diachronique, ainsi que la télédétection ont permis l'identification de la mosaïque de zones humides alluviales dans l'espace de liberté du tronçon Zalhanaua – confluence Ialomița-Prahova.

- une ripisylve naturelle, dont la mise en place est le résultat du rétrécissement de la bande active de la Prahova et de la diminution de son activité latérale ;
- une ripisylve anthropique ; les reforestations anthropiques ont visé le renforcement du rôle de zone-tampon des forêts riveraines ;
- des étangs formés sur la place des ballastières abandonnées et qui se trouvent dans l'ancienne bande de tressage ;
- une mare (à Puchenii Mirosălăvești), formée par l'apport d'un affluent de la Prahova, suite au déplacement de son chenal ;
- plusieurs marais qui correspondent à des chenaux abandonnés des méandres recoupés ;
- des pâtures.

L'apport de l'analyse des images satellite Landsat consiste dans le fait qu'elle a permis d'identifier des zones humides qui n'étaient pas représentées sur les cartes topographiques. En même temps la télédétection permet de comprendre l'activité végétale ; par exemple la végétation de marais a une très forte activité végétale au printemps, mais en automne, durant la phase de basses eaux de la Prahova, lorsque les précipitations sont peu importantes en quantité, son activité végétale, ainsi que la teneur en eau sont quasiment nulles.

On a pu constater également les points positifs et négatifs de la gestion des zones humides alluviales de la Prahova. Les points négatifs sont : la rupture de la connectivité latérale entre la mare de Puchenii Mirosălăvești et le chenal actuel de la rivière par la construction d'une levée de terre ; la transformation de certaines zones riveraines de l'espace de liberté de la rivière en terrains agricoles ; le morcellement de la ripisylve par les exploitations des graviers et des sables. Mais en général les zones humides alluviales sont conservées et protégées d'une manière correcte : les ripisylves sont réhabilitées avant de les laisser évoluer librement ; les marais sont en général conservés, bien qu'ils soient entourés par des terrains agricoles ; les prairies alluviales servent de pâturages pour le bétail ; le fait que certains chenaux abandonnés aient été reboisés peut se justifier par le rôle de zone-tampon de la forêt face à la dynamique

du cours d'eau. Malgré cette gestion relativement sage du milieu riverain, on a pu observer que les zones humides alluviales de la Prahova ne font pas l'objet d'un intérêt particulier.

Etant donné leur multifonctionnalité, la gestion des zones humides alluviales traverse depuis quelque temps une période de transition, d'une logique d'exploitation à une logique de conservation et de protection (Piégay et Cossin, 1998). Toutes les méthodes d'entretien et de réhabilitation de la mosaïque des zones humides alluviales se réfèrent à la préservation de la dynamique fluviale et donc à la préservation de l'instabilité des formes alluviales (Piégay, 1996). Dans le même sens, Leopold (1960) soutient le concept de naturalité et de protection des rivières aussi bien pour leur dynamique naturelle, que pour l'intérêt du public et ouvre ainsi une nouvelle perspective de recherche. Les zones humides alluviales sont aussi des éléments de patrimoine qui peuvent être exploitées pour leurs fonctions paysagère et récréative (Malanson, 1993). Leopold (1969) prend en compte 46 variables qui pourraient être utilisées pour l'évaluation du paysage fluvial, parmi lesquelles des variables physiques (largeur, profondeur du chenal, vitesse de l'eau...), des variables biologiques (la couleur de l'eau, la turbidité, la présence des algues et d'autres plantes qui indiquent ou pas la pollution de l'eau...), des variables anthropiques enfin (routes d'accès, création des points de vue, occupation du sol, absence/présence des déchets). Donc la gestion et la promotion des zones humides alluviales sont importantes dans le cadre d'une politique locale orientée vers le tourisme rural ; ces zones ont un potentiel récréatif intéressant : randonnées pédestres et équestres, VTT<sup>22</sup> aires de pique-nique... En conséquence, dans les zones rurales ou forestières, des paysages de proximité peuvent être modelés pour les rendre plus attractifs et plaisants.

---

<sup>22</sup> Vélo Tout Terrain.

### 3.5. Conclusions de la troisième partie

Le but de cette partie de la thèse a été d'analyser les conséquences de la dynamique de la Prahova. Cette partie a été organisée en trois chapitres, qui permettent de connaître tout d'abord l'extension de l'espace utilisé par la rivière pour sa dynamique (évolution récente et fonctionnement actuel) et ensuite l'occupation du sol de cet espace. Les conclusions sont organisées à l'inverse afin de montrer l'importance de cette partie de la thèse pour la gestion de la rivière.

Le troisième chapitre de cette partie porte sur les zones humides alluviales qui se trouvent dans l'espace fluviale de la Prahova. Les résultats de ce chapitre doivent être liés aux résultats de la deuxième partie de la thèse. L'étude cartographique diachronique et la télédétection mettent en évidence les caractéristiques de ces zones humides, qui sont en général le résultat des ajustements latéraux de la Prahova. Les ripisylves naturelles se sont mises en place suite au rétrécissement de la bande active ou suite à la diminution de l'activité latérale du cours d'eau (par exemple la diminution de la magnitude et de la fréquence des inondations). La mare de Puchenii Mirosălăvești s'est formée suite au déplacement latéral du chenal de la Prahova. D'autres mares ont été créées anthropiquement par l'extraction des graviers et des sables des bandes de tressage abandonnées. Certains méandres abandonnés se sont transformés en marais ; le fonctionnement de ces marais est lié au régime hydrologique de la rivière ; par exemple, en octobre, en phase de basses eaux, les marais sont secs, tandis que les ripisylves et les pâtures continuent leur saison végétale. Des pâtures couvrent les marges de la bande active et le lit d'inondation. La forêt est gérée de deux manières : 1) localement des reforestations ont été réalisées afin de renforcer son rôle de zone-tampon ; la plupart de ces reforestations ont été réalisées entre 1954 et 1980, selon les cartes topographiques ; 2) localement et surtout récemment, la forêt a commencé à être morcelée par l'exploitation des graviers et des sables. En ce qui concerne les marais, ils sont généralement conservés dans leur état naturel. Seule la mare de Puchenii Mirosălăvești est délimitée par une levée de terre, qui empêche sa connexion avec le cours d'eau. Localement les pâtures ont été transformées en terrains agricoles. En ce qui concerne leurs usages, les pâtures sont utilisées pour l'élevage du bétail et la mare de Puchenii Mirosălăvești est utilisée pour la pêche locale. On n'a pas pu constater une autre utilisation de ces zones humides. C'est pour cette raison qu'on suggère leur utilisation durable pour des activités éducatives et touristiques.

Dans le deuxième chapitre de cette partie, on a observé que la rivière, par sa dynamique, met en danger certains enjeux socio-économiques qui se trouvent dans son espace fluvial. Conformément aux observations de terrain, des tronçons des voies de transport qui longent la vallée de la Prahova, des quartiers résidentiels et des terrains agricoles sont affectés par des inondations, par l'érosion latérale et par l'incision des chenaux fluviaux. Les principales mesures prises pour la protection contre ses aléas sont de type structurel (hydraulique) : des levées de terre protègent contre les inondations, des gabions protègent contre l'érosion latérale et des seuils de stabilité protègent contre l'incision.

Dans ce contexte il est nécessaire de conserver l'espace fluvial de la rivière pour assurer le fonctionnement des zones humides pour leur multifonctionnalité et pour prévenir le risque lié à la dynamique de la rivière. C'est pour cette raison qu'on propose d'appliquer le concept d'espace de liberté de la rivière pour la Prahova. Ce concept est repris de l'aménagement français et il est expliqué dans le premier chapitre de cette partie. La délimitation de cet espace dépend des ajustements historiques latéraux des chenaux fluviaux et de l'extension de la zone inondable. Cette méthode donne des résultats surtout pour les rivières à forte dynamique latérale ; c'est pour cette raison qu'elle est adéquate pour la Prahova.

La conservation de son espace de liberté pour assurer la connectivité latérale du cours d'eau répond aux objectifs de l'Union Européenne et de l'ANAR en Roumanie, tels qu'ils ont été présentés dans l'introduction de cette partie.

## **CONCLUSIONS GÉNÉRALES**



Le but de la thèse a été d'analyser la dynamique de la Prahova afin de contribuer à une meilleure connaissance de la dynamique des rivières de montagne. La Prahova (193 km de longueur ; 3754 km<sup>2</sup> ; débit module avant l'embouchure d'environ 26,4 m<sup>3</sup>/s pour la période 1961-2002) est caractéristique pour les Carpates roumaines par la succession des styles fluviaux.

La thèse est orientée sur quatre directions principales de recherche, dont les résultats principaux sont présentés ci-dessous.

**L'évolution de la Prahova depuis ~1855** se caractérise par :

- le rétrécissement de la bande active de tressage durant la période analysée ; par exemple la largeur moyenne du tronçon en tresses (et divagant) a baissé de 48,7% entre 1900 et 1980 ; ce processus s'est intensifié après 1980, quand la largeur de la bande active a diminué encore de 43 % ;
- une métamorphose fluviale se manifeste sur deux tronçons : 1) un tronçon subcarpatique d'environ 8 km qui perd son caractère tressé et se transforme en un tronçon à chenal unique ; 2) le tronçon Piatra-Puchenii Miroslăvești (8 km) qui se transforme d'un tronçon aux chenaux divagants en un tronçon à chenal unique ;
- les mêmes tronçons (ainsi que d'autres tronçons subcarpatiques) sont affectés par l'incision du chenal fluvial ;
- les méandres libres et ancrés de la Prahova se caractérisent par une dynamique très active entre 1855 et 1955 qui s'est manifestée par des extensions, rotations, translations et recoupements ; depuis 1955 et surtout depuis 1980, cette dynamique est moins active.

**Actuellement**, la Prahova forme quatre secteurs fonctionnels :

- un secteur à un chenal unique et sinueux dans les Carpates ;
- un secteur à ébauches de tresses et à tresses dans les Subcarpates et dans la Plaine de Ploiești ;
- un secteur à chenal unique et sinueux dans la Plaine de Ploiești (entre les localités de Piatra et de Puchenii Miroslăvești) ;
- un secteur à méandres dans la Plaine de Gherghița.

**Causes de l'évolution de la Prahova.** La reconstitution de l'évolution du tronçon Piatra-Puchenii Miroslăvești permet de comprendre les causes de l'évolution de la Prahova ; en effet

ce tronçon correspond au passage d'un véritable secteur à tresses (en amont de Piatra) et à un secteur à méandres (en aval de Puchenii Mirosălăvești). En 1902, la bande active était déjà en rétrécissement, situation indiquée par les buissons qui avaient déjà colonisés ses marges. En l'absence d'activités humaines qui auraient pu déterminer la diminution des flux liquide et solide (de fond), il s'avère que ce processus de rétrécissement est naturel et il s'est probablement mis en place à la fin du PAG. En effet, en l'état actuel des recherches, dans le nord des Carpates orientales roumaines, le PAG se termine vers 1840 (Popa et Kern, 2008). Ce processus de rétrécissement se poursuit entre 1902 et 1980, quand une ripisylve se met en place sur les deux rives du cours d'eau. A partir des années 1960, dans le cadre d'une politique de reforestation des bassins versants en vue de diminuer les crues, cette ripisylve est entretenue par des reboisements locaux. Après 1970, des barrages-réservoirs ont été construits dans la partie supérieure du bassin versant. Après 1980, l'activité d'extraction de graviers et de sables s'intensifie dans la bande de tressage abandonnée dans les Subcarpates et dans la Plaine de Ploiești. Suite au développement de la ripisylve et aux activités anthropiques, en 2005, la Prahova forme un chenal unique qui est localement incisé. Mais il est difficile de séparer l'impact de chaque facteur sur l'évolution d'ensemble de la Prahova.

Le rétrécissement de la bande active a été constaté aussi pour la rivière Doftana, affluent de la Prahova, en amont de la localité de Teșila, où l'impact anthropique est relativement peu important. Cela confirme le fait que ce processus est d'origine naturelle.

Par leur évolution, la Prahova et la Doftana contribuent à la compréhension de l'évolution récente des rivières montagneuses carpatiques vers le rétrécissement ou même la disparition de leurs bandes actives de tressage.

**Conséquences de l'évolution de la Prahova.** Les ajustements latéraux de la Prahova ont déterminé : 1) dans le secteur en tresses et dans le secteur à méandres, le développement de la ripisylve et des pâtures ; 2) dans le secteur à méandres, l'apparition de mares et de marais dans les chenaux abandonnés des méandres recoupés. La migration latérale du cours d'eau par l'érosion des berges met en danger la route DN1/E60 en quelques points, dans les Carpates et dans les Subcarpates, où cette voie de transport emprunte l'espace de liberté de la rivière. Les ajustements verticaux des chenaux de la Prahova mettent en danger les ponts routiers et ferroviaires traversant la rivière. De plus des quartiers résidentiels (exemples : à Sinaia et à Gherghița), ainsi que des tronçons de voies routières et des terrains agricoles, situés dans l'espace de liberté, sont soumis aux débordements de la Prahova.

**Apport de l'approche hydrogéomorphologique pour la gestion de la rivière et l'aménagement de son espace de liberté.** L'approche hydrogéomorphologique de la dynamique de la rivière confirme la nécessité de prendre en compte la connectivité longitudinale et latérale pour le bon fonctionnement (quasi-naturel) de la Prahova. Elle permet de comprendre que les perturbations (d'origine naturelle ou anthropique) survenues dans la partie amont du bassin versant se ressentent également dans la partie aval. Cela est confirmé par le rétrécissement de la bande active tout le long de la rivière et par le ralentissement de la dynamique des méandres de la Prahova, en relation, entre autre, avec les sources de sédiments carpatiques et subcarpatiques. En même temps, toutes les tentatives pour bloquer la dynamique latérale du cours d'eau (par endiguement) sont susceptibles de perturber le fonctionnement des milieux riverains en faisant disparaître leurs fonctions de zones humides, d'où la nécessité de préserver l'espace de liberté de la rivière. De ce point de vue, la gestion de la Prahova dans les plaines de Ploiești et de Gherghița peut être jugée comme pertinente, parce que la connectivité latérale du cours d'eau est en général assurée. Pourtant, dans les Carpates, à cause des interventions anthropiques, la situation est dramatique : la Prahova a peu d'espace de liberté pour évoluer latéralement et les milieux naturels riverains sont peu étendus ; de plus les enjeux socio-économiques situés dans l'espace de liberté de la rivière sont susceptible d'être affectés par la dynamique de la rivière (érosion des berges, débordements...). En conclusion, l'approche hydrogéomorphologique répond aux demandes de la législation européenne concernant le bon fonctionnement (quasi-naturel) des hydrosystèmes, ainsi qu'à la prévention du risque associé à la dynamique de la rivière.

### **L'évolution de la Prahova : quel avenir ?**

**Développement du Corridor (de transport) Pan-Européen IV.** Ce corridor de transport traverse les Carpates (et les Subcarpates) par la vallée de la Prahova. Son développement envisage la construction d'une autoroute et la modernisation d'une voie ferrée. Conformément au PATJ Prahova (2004), l'autoroute traversera la Prahova en amont de la confluence Prahova-Teleajen, puis elle longera la vallée de la Prahova entre Câmpina et Predeal. Entre Câmpina et Comarnic, l'autoroute épousera le tracé de l'actuelle route DN1/E60, qui traverse localement l'espace de liberté de la Prahova. Entre Comarnic et Predeal, un nouveau tracé sera construit sur les versants et dans le fond de la vallée de la Prahova. Conformément au PATJ Prahova (2004), la construction de l'autoroute imposera des aménagements supplémentaires pour la stabilisation des versants et pour la rectification des cours d'eau. Le même projet précise que, afin de diminuer l'impact possible sur l'environnement, certaines

mesures de prévention seront prises : le choix d'un tracé qui évite les zones soumises à l'érosion ; la diminution de la vitesse de l'eau sur les versants ; la mise en place de rideaux d'arbres qui protègent contre le ruissellement sur les versants ; la diminution de la pollution de l'eau liée à l'autoroute par le drainage des eaux par des canaux spéciaux et par l'utilisation de matériaux imperméables.

**Changements climatiques et conséquences prévisibles en Roumanie.** Le programme PRUDENCE utilise des données météorologiques et hydrologiques de la période 1961-1990 afin d'obtenir des prévisions pour la période 2071-2100 (Jol, 2007). Les résultats pour la Roumanie sont présentés par Ghioca (2006). La température de l'air augmentera de 3,3-5,5°C pour le scénario A2 et de 3,9-4,5°C pour le scénario B2<sup>23</sup>. Les cumuls de précipitations augmenteront ou baisseront entre +15% et -30% pour le scénario A2 et entre +28% et -13% pour le scénario B2. Les plus importantes quantités mensuelles de précipitations seront enregistrées en mars (et non plus en juin comme pendant la période 1961-1990). Les cumuls mensuels de précipitations les moins abondants seront enregistrés en novembre. Les précipitations estivales diminueront jusqu'à 91% en juillet. En ce qui concerne l'écoulement, il diminuera jusqu'au 60% à l'échelle annuelle et de 38 à 98% pour la période avril-août. L'écoulement maximal se produira en janvier-avril (en comparaison avec avril-mai pour la période 1961-1990) et l'écoulement minimal, en août (en comparaison avec septembre-octobre pour la période 1961-1990).

En conséquence, dans ce contexte de modifications anthropiques et naturelles, les tendances actuelles de l'évolution de la Prahova s'accroîtront probablement.

---

<sup>23</sup> Les scénarios climatiques se divisent en quatre familles (A1, A2, B1, B2) selon les hypothèses d'évolutions des facteurs qui influencent l'émission des gaz à effet de serre (IPCC, 2001).

## Bibliographie

- Administrația Națională Apele Române. 2009. *Proiect de Plan de Management al Bazinului hidrografic Buzău-Ialomița – versiune preliminară 2008*. <http://www.rowater.ro/dabuzau/Documente%20Consultarea%20Publicului/Forms/AllItems.aspx>.
- Agencia de Protecția Mediului Prahova. 2008. *Raport privind starea factorilor de mediu în anul 2007*. [http://www.deeffect.ro/anpm/st\\_med\\_2007.html](http://www.deeffect.ro/anpm/st_med_2007.html).
- Alard D. (Eds.), 2002. Zones humides de la basse vallée de la Seine. *Programme Scientifique Seine Aval*, 15, 36.
- Allen J.R.L., 1977. Changeable rivers: some aspects of their mechanics and sedimentation. In Gregory Y K., *River channel changes*, Wiley, Chichester, 15-45.
- Allen J.R.L., 1982. Free meandering channels and lateral deposits. *Sedimentary structures: their character and physical basis*, 2, 53-100.
- Amoros C., Petts G.E., 1993. Bases conceptuelles. In Amoros C., Petts G.E. (Eds.), *Hydrosystèmes fluviaux*. Editions Masson, Paris, 3-17.
- Apostol L., Amăriucăi M., 2005. The exceptional torrential rains in the summer of 2004, in the counties of Neamț and Bacău, as a special situation in the period 1991-2004. *Romanian Journal of Climatology*, 1, 57-71.
- Armaș I., Manea G., 2002. Artificializarea peisajului și vulnerabilitatea terenurilor la alunecări de teren în sectorul subcarpatic al văii Prahovei. *Comunicări de Geografie*, VI, 31-38.
- Armaș I., Damian R., Osaci-Costache G., 2003. *Vulnerabilitatea versanților la alunecări de teren în sectorul subcarpatic al Văii Prahovei*. Editura Fundației România de Măine, București.
- Armaș I., Osaci-Costache G., Gogoășe N., Damian R., 2007. Assessing stream channel evolution in the context of global change: Subcarpathian Prahova Valley, Romania. *Programme and Abstract*. 12<sup>th</sup> Belgium-France-Italy-Romania Geomorphological Meeting, 61-62.
- Arnaud-Fassetta G., 2003. River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena*, 51, 141-172.
- Arnaud-Fassetta G., Cossart E., Fort M., 2005. Hydro-geomorphic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Guil catchment (Queyras, Southern French Alps). *Geomorphology*, 66, 41-67.
- Arnaud-Fassetta G., Fort M., 2008. The integration of functional space in fluvial geomorphology, as a tool for mitigating flood risk. Application to the left-bank tributaries of the Aude River, Mediterranean France. *4th ECRR Conference River Restoration*. 314-322.
- Assani A.A., Stichelbout E., Roy A.G., Petit F., 2006. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada). *Hydrological processes*, 20, 3485-3501.

- Badea L., Gâștescu P., Velcea V. (Eds.), 1983. *Geografia României. Volumul I. Geografia fizică*. Editura Academiei R. S. R., Bucuresti, 663.
- Bagnold R.A., 1960. Sediment discharge and stream power: a preliminary announcement. *US Geological Survey Circular*, 421.
- Bagnold R.A., 1977. Bedload transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13, 303-312.
- Baker V.R., Costa J.E., 1987. Flood power. In Mayer L., Nash J. (Eds.), *Catastrophic flooding*, Allen and Unwin, Boston, 1-21.
- Ball G.H. et Hall D.J., 1965. *ISODATA, a novel method of data analysis and pattern classification*. Technical Report, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, U.S.A.
- Barnaud G., Richard D., 1993. *Les zones humides, un patrimoine irremplaçable, une responsabilité partagée*. MNHN, 4.
- Barnaud G., 1995. Typologie nationale des zones humides applicables aux SDAGE-SAGE, MNHN-ESNM, 12.
- Barnaud G., Fustec E., 2007. *Comment préserver les zones humides : pourquoi ? comment ?*. Editions Quae, Versailles, 230.
- Bartholy J., Pongracz R., Molnar Z. 2004. Classification and analysis of past climate information based on historical documentary sources for the Carpathian Basin. *International Journal of Climatology*, 24, 1759-1776.
- Battiau-Queney Y., 1999. Relief, tectonique, érosion en Nouvelle Zélande d'après de récentes publications. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, 73-84.
- Beechie T., Liermann M., Pollock M., Baker S., Davies J., 2006. Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river system. *Geomorphology*, 78, 124-141.
- Beltrando G., Zaharia L., 2009. Episodes hydro-pluviométriques extrêmes, types de circulation atmosphérique associés en Roumanie. *Actes du XXIIème Colloque Internationale de Climatologie*.
- Bendjourdi H., Wenh P., Guérin R., Pastre J.F., 2002. Riparian wetlands of the middle reach of the Seine River (France): historical development, investigation and present hydrologic functioning. A case study. *Journal of Hydrology*, 263, 131-155.
- Berindei D., Adăniloaie N., 1967. *Reforma agrară din 1864*. Editura Academiei R.S.R., București, 363.
- Bertoldi W., Zanoni L., Tubino M., 2009. Assessment of morphological changes induced by flow and flood pulses in a gravel bed braided river: the Tagliamento River (Italy). *Geomorphology*, article in press.
- Best J.L., Bristow C.S. (Eds.), 1993. *Braided Rivers*. Geological Society, London, 419.
- Bethemont J., 1993. La société au miroir du fleuve. *Actes du Colloque Le fleuve et ses métamorphoses*, 13-16.
- Björkman L., Feurdean A., Wohlfarth B. 2003, Lateglacial and Holocene forest dynamics at Steregoiu in the Gutâiului Mountains, NW Romania. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 124, 79-111.

- Blujdea V., 2000. *Cercetări ecofizionologice în cerete și gârnițete afectate de fenomenul de uscare*. Teza de Doctorat în Silvicultură. Universitatea Transilvania din Brașov.
- Blujdea V., 2007. Studiu privind percepția asupra impactului schimbărilor climatice asupra pădurilor. *Anale ICAS*, 48, 3-11.
- Boroneant C., Ionita M., 2005. Non-stationary influence of ENSO and NAO on the precipitation over Romania. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 01104.
- Boroneant C., 2007. Trends in indices of daily precipitation extrêmes in Romania, 1961-2005. *Geophysical Research Abstracts*, 9, 10832.
- Boyer M., Piégay H., Ruffinoni C., Citterio A., Bourgery C., Caillebote P., 1998. *La gestion des boisements de rivières. Fascicule 1: Dynamique et fonctions de la ripisylve. Guide Technique n°1*, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 42.
- Bravard JP, Fagot P., Gadiolet P., Magne M., 1989. Etude de dendrochronologie dans le lit majeur de l'Ain : la forêt alluviale comme descripteur d'une « métamorphose fluviale ». *Revue de géographie de Lyon*, 64, 4, 213-223.
- Bravard J.P., 1991. La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières ?. *La Houille Blanche*, 7-8, 515-521.
- Bravard J.P., Gilvear D.J., 1993. Structure hydro-géomorphologique des hydrosystèmes. In Amoros C., Petts G.E. (Eds.), *Hydrosystèmes fluviaux*. Editions Masson, Paris, 83-103.
- Bravard J.P., Petts G.E., 1993. Interférence avec les interventions humaines. In Amoros C., Petts G.E. (Eds.), *Hydrosystèmes fluviaux*. Editions Masson, Paris, 233-253.
- Bravard J.P., Amoros C., Pautou G., Bornette G., Bournaud M., Creuzé des Châtelliers M., Gibert J., Peiry J.L., Perrin F.J., Tachet H., 1997. River incision in south-east France: morphological phenomena and ecological effects. *Regulated Rivers: Research and Management*, 13, 75-90.
- Bravard J.-P., 1998. Le temps et l'espace dans les systèmes fluviaux, deux dimensions spécifiques de l'approche géomorphologique. *Annales de Géographie*, 3-15.
- Bravard, J.P., Peiry J.L., 1999. The CM image as a tool for the classification of alluvial suites and floodplains along the river continuum. In Marriott S.B., Alexander J. (Eds.), *River floodplains*. Geological Society Special Publication, 163, 259-268.
- Bravard J.P., Landon N., Peiry J.L., Piégay H., 1999. Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers. *Geomorphology*, 31, 291-311.
- Bravard J.P., 2000. Les extrêmes hydrologiques : handicaps réductibles ou composantes patrimoniales à sauvegarder?. In Bravard J.P. (Eds.), *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie*, Editure SEDES, 5-14.
- Bravard J.P., Petit F., 2000. *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Editions Armand Colin, Paris, 222.
- Bravard J.P., 2002. Les réponses des systèmes fluviaux à une réduction des flux d'eau et de sédiments sous l'effet du reboisement en montagne. *La Houille Blanche*, 3, 68-71.
- Bravard J.P., 2009. Discontinuities in braided patterns: the River Rhône from Geneva to the Camargue delta before river training. *Geomorphology*, article in press.

- Brice J.C., 1964. *Channel patterns and terraces of the Loup River in Nebraska*. United States Geological Society, Paper 422 D, 41.
- Brice J.C., 1984. Planform properties of meandering rivers. In Elliot C.M. (Eds.), *Proceedings of the Conference Rivers '83*. American Society of Civil Engineering, New Orleans, 1-15.
- Bridge J.S., 1993. The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers. In Best J.L., Bristow C.S. (Eds.), *The Geological Society*, London, 23-71.
- Brinson M.M., 1990. Riverine forests. In Lugo A.E., Brinson M.M., Brown S. (Eds.), *Forested Wetlands*, Elsevier Science, 87-141.
- Brookes A., 1987. River channel adjustments downstream from channelization works in England and Wales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 337-351.
- Brookes A., 1988. *Channelized rivers: perspectives for environmental management*. Wiley and Sons, Chichester, 366.
- Busuioc A., Von Storch H., 1996. Changes in winter precipitation in Romania and its relation to the large - scale circulation. *Tellus*, Series A, Dynamic meteorology and oceanography, 48, 4, 538-552.
- Busuioc A., Boroneant C., Baciuc M., Dumitrescu A., 2008. *Observed temperature and precipitation variability in Romania*. Southeast European Climate Outlook Forum, <http://meteo.hr/SEECOF08/day2/2-19.pdf>.
- Church M., Gilbert R., 1975. Proglacial fluvial and lacustrine environments, In Jopling A.V., McDonald, B.C. (Eds.), *Glaciofluvial and glaciolacustrine sedimentation*, Special Publication, 23, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 22-100.
- Church M., Jones D., 1982. Channel bars in gravel-bed rivers. In Hey R.D., Bathurst, J. C., Thorne, C. R. (Eds.), *Gravel bed rivers*, Wiley and Sons, Chichester, 291-338.
- Comitetul Județean pentru Situații de Urgență, 2007. *Raportul de sinteză privind protecția la inundații, fenomene meteorologice periculoase (precipitații abundente) din perioada 22-24.03.2007 în județul Prahova*, Societatea de Gospodărire a Apelor Prahova, 20.
- Consiliul Județean Prahova, 2009. *Planul de amenajare al teritoriului județean Prahova*. [http://www.cjph.ro/index.php?\\_init=amenajare.patj&](http://www.cjph.ro/index.php?_init=amenajare.patj&).
- Cosandey C (Eds.), 2003. *Les eaux courantes. Géographie et environnement*. Belin, Paris, 240.
- Coteț P., 1976. *Câmpia Română. Studiu de geomorfologie integrată*, Ceres, Bucurest.
- Cubizolle H., 1996. La morphodynamique fluviale dans ses rapport avec les aménagements hydrauliques : l'exemple de la Dore au XXème siècle (Massif central français). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 1, 67-81.
- Davies T.R., 1997. Long-term management of facilities on an active alluvial fan - Waiho River fan, Westland, New Zealand. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 36, 2, 127-145.
- Decamp H., Naiman R.J., 1989. L'écologie des fleuves. *La Recherche*, 208, 310-313.
- Delbart N., Kerboat L., Le Toan T., Lhermitte J., Picard G., 2005. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote sensing of environment*, 97, 1, 26-38.

- Departement of Conservation of New Zealand, 2009. <http://www.doc.govt.nz/>.
- Departement of Natural Ressource of Tulalip Tribes, 2009. <http://www.tulalip.nsn.us/>.
- De Roo A., Odjik M., Schmuck G., Koster E., Lucieer A., 2001. Assessing the effects of land use changes on flood in the Meuse and Oder Catchment. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26, 7-8, 593-599.
- Diaconu M., Traci C., Mihalache V., Bogdan N., 1971. Cercetari privind valorificarea prundisurilor din albiile majore ale râurilor prin culturi forestiere. *Analele ICAS*, 28, 1, 135-150.
- Diaconu C., Șerban P., 1994. *Sinteze și regionalizări hidrologice*. Editura Tehnică, București, 388.
- Dictionnaire Le Trésor de la Langue Française, 2009. <http://atilf.atilf.fr/tlfi.htm>.
- Dinu M., Cioacă A., 1987. Morfotectonica Subcarpaților Vâlcii și Vrancei. *Lucrările Seminarului Dimitrie Cantemir*, 7, 17-26.
- Dister E., Gomer D., Obrdlik P., Petermann P., Schneider E., 1990. Water management and ecological perspectives of the upper Rhine's floodplains. *Regulated Rivers: Research and Management*, 5, 1-15.
- Dobre R., 2007. Dinamica albiei și raportul cu infrastructura feroviară în sectorul Câmpina-Predeal. *Comunicări de Geografie*, XI, 111-118.
- Dugan P.J. (Eds.), 1990. *Wetland Conservation: a Review of Current Issues and Required Action*. IUCN, Gland, 96.
- Durand P., 2000. Approche méthodologique pour l'analyse de l'évolution des littoraux sableux par photo-interprétation. Exemple des plages situées entre les embouchures de l'Aude et de l'Hérault (Languedoc, France). *Photo-Interprétation*, 1, 2, 3-17.
- Dury G.H., Hails J.R., Robbie H.B. 1963. Bankfull discharge and magnitude-frequency series. *Australian Journal of Science*, 26, 123-124.
- Dury G.H., 1969. Hydraulic geometry. In Chorley R.J. (Eds.). *Water, Earth and man*, Methuen, London, 331-330.
- Dury G.H., 1973. Magnitude-frequency analysis and channel morphology. In Morisawa M. (Eds.). *Fluvial Geomorphology*, SUNY, Binghamton, 91-121.
- Egozi R., Ashmore P., 2008. Defining and measuring braiding intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 2121-2138.
- Faton J.M., Landon N., Piégay H., 1997. *La dynamique naturelle au service de la gestion d'un cours d'eau. Exemple de la Drôme*. Forum du gestionnaire des espaces naturels du 18 mars 1997 à l'UNESCO à Paris, <http://ramieres.val.drome.reserves-naturelles.org/forumges.html>.
- Ferguson R.I., 1981. Channel forms and channel changes. In Lewin J. (Eds.), *British rivers*, Allen and Unwin, London, 90-125.
- Ferguson R.I., 1987. Hydraulic and sedimentary controls of channel pattern. In Richards K. (Eds.), *River Channels, Environment and Process*. Blackwell, London, 130-155.
- Feurdean A., Bennike O., 2004, Late Quaternary palaeontological and palaeoclimatological reconstruction in the Gutâiului Mountains, northwestern Romania. *Journal of Quaternary Science*, 19, 8, 809-827.

- Feurdean A., Wohlfarth B., Bjorkman L., Tantau O.B., Willis K.J., Farcas S., Robertson A.M., 2007. The influence of refugial population on Late glacial and early Holocene vegetational changes in Romania. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 145, 305–320.
- Forreman T.T., 1995. *Land Mosaics: the Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press, Cambridge, 632 p.
- Frossard P.A., Lachat B., Paltrinieri L., 1998. Davantage d'espace pour nos cours d'eau - pour l'homme et la nature. Contribution à la protection de la nature en Suisse, *Pro Natura*, 20, 48.
- Fustec E., Lefeuvre J.C. (Eds.), 2002. *Fonctions et valeurs des zones humides*. Editions Dunod, Paris, 448.
- Gabor O., Șerban P., 2004. Conviețuind cu viiturile. *Revista Hidrotehnica*, 2-3, București.
- Gao B., 1996. NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266.
- Gautier E., 1992. *Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviales dans le bassin du Büech (Alpes du Sud)*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Nanterre, 439.
- Gautier E., Piégay H., Bertaina P., 2000. A morphological approach of fluvial dynamics oriented towards hydrosystem management: case study of the Loire and Allier rivers. *Geodinamica Acta*, 1, 29-43.
- Gălie A., Popovici F., *Continuitatea râului. Amenajări pentru migrația peștilor. Zome umede și lunci inundabile*. Dezbateri Publică - Implementarea Directivei Cadru Apă 60/2000, <http://www.rowater.ro/dacrisuri/Documente%20Repository/Directive%20Europene/PLAN%20MANAGEMENT%20DAC/Consult.particip.publicului/public%20hymo1.pdf>
- George P. (Eds.), 1970. *Dictionnaire de la géographie*. Editions PUF, Paris, 448.
- Gheorghe M., 2005. *Câmpia Ploieștiului. Studiu geografic cu privire specială asupra riscurilor naturale și tehnogene*. Teză de Doctorat în Geografie, Universitatea din București.
- Gerstengarbe F.W., Werner, P.C., 2005 : *Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2004)*. In PIK Report n°100, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 153, [www.pik-potsdam.de](http://www.pik-potsdam.de).
- Ghioca M., 2005a. *Spatial and temporal variability of Romanian precipitation and river flows on the winter period in connection with the North Atlantic Oscillation*, BALWOIS 2005 Conference, [http://balwois.com/balwois/administration/full\\_paper/ffp-559.pdf](http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-559.pdf).
- Ghioca M., 2005b. Study of the meteorological and hydrological drought in Romania. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 7, 01082.
- Ghioca L., 2006. Utilizarea SIG în evanluarea schimbărilor climatice din România. *Geographia tehnica*, 1, 73-78.
- Gippel C.J., 1995. Environmental hydraulics of large woody debris in streams and rivers. *Journal of environmental engineering*, 388-395.
- Giurăscu C., 1975. *Istoria pădurii românești din cele mai vechi timpuri și până azi*, Editura Ceres, Bucurest, 388.
- Global Land Cover Facility, 2009. <http://www.landcover.org./index.shtml>.

- Glova G.J., 1988. Fish density variations in the braided Ashley River, Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 22, 9-15.
- Gond V., Feau C., Pain-Orcet M., 2003. Télédétection et aménagement forestier tropical : les pistes d'exploitation. *Bois et Forêts des tropiques*, 275, 29-36.
- Gond V., Bartholeme E , Ouattara F., Nnonguierma A., Bado I., 2004. Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT4. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 5, 987-1004.
- Gond V., Brongnoli C., 2005. Télédétection et aménagement du territoire : localisation et identification des sites d'orpaillage en Guyane française. *Bois et Forêts des Tropiques*, 286, 5-13.
- Graaf W.H., Altinakar M.S., 2000. *Hydraulique fluviale. Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 627.
- Greco F., Comănescu L., 1998. Dynamics of slide-affected slopes in the Prahova valley subcarpathian sector. *Analele Universitatii din Oradea, Seria Geografie-Geomorfologie*, VIII-A, 103-115.
- Greco F., Comănescu L. Săndulache I., 2001. Evolution of human impact on landslides in the Prahova Valley Subcarpathians (Breaza Zone). *Analele Universității București, Anul L*, 37-44.
- Greco F., Osachi-Costache G., Ioana-Toroimac G., 2008. Dynamics tendency of some minor riverbeds in the Curvature sub-Carpathians. *Programme and Abstracts of 13<sup>th</sup> Belgium-France-Italy-Romania Geomorphological Meeting*.
- Greco F., Comănescu L., Dobre R., Ghiță C., Ioana-Toroimac G., Vișan, M., 2008. Importance des déséquilibres morpho-hydrologiques pour les sites archéologique. Etude de cas dans la vallée du Danube. *ARGU (Archeological Reports Ghent University)*, sous-presses.
- Grégoire J.M., 1990. Effects of the dry season on the vegetation canopy of some river basins of West Africa as deduced from NOAA-AVHRR. *Hydrological Sciences Journal*, 35, 3, 323-338.
- Gregory K., 1987. The power of nature-energetics in physical geography. In Gregory K. (Eds.), *Energetics of physical environment. Energetic Approches to Physical Geography*. Wiley and Sons, Chichester, 1-31.
- Grigore M., Marin I., 1982. Elemente de morfologie dinamică specific din Câmpia Titu-Gherghița-Sărata. *Buletinul Societății Științifice de Geografie*, VI.
- Grove J.M., 1988. *The Little Ice Age*. Methuen, London, 498.
- Gurnell A.M., Petts G.E., Hannah D.M., Smith B.P.G., Edwards P.J., Kollmann J., Ward J.V., Tocker K., 2000. Wood storage within the active zone of a larger European gravel-bed river. *Geomorphology*, 34, 55-72.
- Hickin E.J., 1972. Pseudomeanders and point dunes - a flume study. *American Journal of Science*, 272, 762-799.
- Hickin E.J., Nanson G.C., 1975. The character of channel migration of the Beatton River, Northeast British Columbia, Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 86, 487-494.

- Hickin E.J., 1978. Mean flow-structure in meanders of the Squamish River, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, 1833-1849.
- Hooke J.M., 1977. The distribution and nature of changes in river channel patterns. The example of Devon. In Gregory K.J. (Eds.), *River channel changes*, Wiley and Sons, Chichester, 265-280.
- Hooke J.M., 2007a. Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river. *Geomorphology*, 84, 277-296.
- Hooke J.M., 2007b. Complexity, self-organisation and variation in behaviour in meandering rivers. *Geomorphology*, 91, 236-258.
- Hooke J.M., 2008. Temporal variations in fluvial processes on an active meandering river over a 20-year period. *Geomorphology*, 100, 3-13.
- Hu Z., 2007. Using NDVI differencing and temporal logic to enhance ISODATA classification in urban environments. *GIScience & Remote Sensing*, 44, 1, 48-67.
- Hubert P., 2005. La prédétermination des crues. *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 219-227.
- HydroSciences Montpellier, 2009. <http://www.hydrosciences.org/spip.php?rubrique48>.
- Ichim I., Bătucă D., Rădoane M., Duma D., 1989. *Morfologia și dinamica albiilor de râu*. Editura Tehnică, București, 408.
- IFEN, 2005. *Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des gravières*. IFEN, 134.
- Iftimoaie C., 2003. Originile și evoluția serviciului topografic militar român. *Revista Academiei Forțelor Terestre*, 1, [http://www.armyacademy.ro/reviste/1\\_2003/d12.pdf](http://www.armyacademy.ro/reviste/1_2003/d12.pdf).
- Ikeda I., 1989. Sedimentary controls on channel migration and origin of point bars in sand-bedded meandering rivers. In Ikeda S., Parker G. (Eds.), *River meandering*, Water Resources Monograph, 12, 51-68.
- Institutul de Memorie Culturală, 2009. *Bunuri clasate în patrimoniul naționale nobil*. [http://www.cimec.ro/p/Clasate/ARP\\_7300200\\_7-124.jpg](http://www.cimec.ro/p/Clasate/ARP_7300200_7-124.jpg)
- Institutul Național de Statistică, 2009. <http://www.insse.ro/>.
- Ioana-Toroimac G., Verge V., 2005. Historique de la politique de conservation des zones humides en Roumanie et enjeux actuels pour principaux sites, *Aestuaria*, 9, Codemaris, 475-488.
- Ioana-Toroimac G., Zaharia L., Beltrando G., 2006. La perception des risques hydro-météorologiques: le cas des inondations de septembre 2005 dans la vallée de la Prahova (Roumanie). *Actes du XIXème Colloque Internationale de Climatologie*, Paris, 322-327.
- Ioana-Toroimac G., 2007. Détermination du style fluvial. Etude de cas : la rivière Prahova, *Revista de geomorfologie*, 9, 87-94.
- Ioana-Toroimac G., Beltrando G., Planchon O., Zaharia L., 2007. Typologie des situations météorologiques associées à des forts épisodes pluvieux dans le bassin versant de la Prahova, *Actes du XXème Colloque Internationale de Climatologie*, 324-329.
- Ioana-Toroimac G., 2008. Viitura râului Prahova din martie 2007: de la cauzele pluviometrice la consecințele morfogenetice și socio-economice. *Comunicări de Geografie*, XII, acceptat.
- Jordan I., 1963. *Toponimia românească*. Editura Academiei R.P.R., București.

- Issar, A. S., 2003. *Climatic changes during the Holocene and their impact on hydrological systems*. Cambridge University Press, 150.
- Jackson T.J., Chen D., Cosh M., Li F., Anderson M., Walthall C., Doriaswamy P., Hunt E.R., 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*, 92, 475-482.
- Jensen J.R. 1996. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 318.
- Kern Z., Popa I., 2007. Climate-growth relationship of tree species from a mixed stand of Apuseni Mountains, Romania. *Dendrochronologia*, 24, 109-115.
- Klimek K., Latocha A., 2007. Response of small-mid mountain rivers to human impact with particular reference to the last 200 years; Eastern Sudetes, Central Europe. *Geomorphology*, 92, 147-165.
- Klingeman P.C., Beschta R.L., Komar P.D., Bradley J.B. (Eds.), 1998. *Gravel-bed rivers in the environment*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, 882.
- Knighton D., 1984. *Fluvial forms and processes*. Arnold, London, 218.
- Knighton A.D. and Nanson G.C., 1993. Anastomosis and the continuum of channel pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 613-625.
- Kondolf G.M., Piégay H., Landon N., 2002. Channel response to increased and decreased bedload supply from land-use change: contrasts between two catchments. *Geomorphology*, 45, 35-51.
- Kondolf G. M., Montgomery D.R., Piégay H., Schmitt L., 2003. Geomorphic classification of rivers and streams. In Kondolf G.M., Piégay H. (Eds.), *Tools in fluvial geomorphology*, John Wiley and Sons, Chichester, 171-204.
- Kondolf G.M., Piégay H., Landon N., 2006. Changes in the riparian zone of the lower Eygues River, since 1830. *Landscape Ecology*, 22, 3, 367-384.
- Korpak J., 2007. The influence of river training on mountain channel changes (Polish Carpathian Mountains). *Geomorphology*, 92, 166-181.
- Lach J., Wyzga B., 2002. Channel incision and flow increase of the Upper Wisłoka River, Southern Poland, subsequent to the reforestation of its catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 445-462.
- Ladon N., Piégay H., Bravard J.P., 1998. The Drôme river incision (France): from assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, 43, 119-131.
- Latocha A., 2009. Land-use changes and long-term human-environment interactions in a mountain region (Sudetes Mountains, Poland). *Geomorphology*, 108, 48-57.
- Lamb H.H., 1995. *Climate, History and the Modern World*. Routledge, London, 433.
- Lamentowicz M., Cedro A., Galka M., Goslar T., Mioth-Szpiganowicz G., Mitchell E.A.D., Pawlyta J., 2008. Last millennium palaeoenvironmental changes from a Baltic bog (Poland) inferred from stable isotopes, pollen, plant macrofossils and testate amoebae. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 265, 93-106.
- Landon N., Piégay H., 1994. L'incision de deux affluents subméditerranéen du Rhône : la Drôme et l'Ardèche. *Revue de Géographie de Lyon*, 1, 63-72.

- Landon N., Piégay H., 1999, Mise en évidence de l'ajustement d'un lit fluvial à partir de documents d'archives : le cas de la rivière Drôme, *Revue de Géographie Alpine* 3, 67-86.
- Landon N., Piégay H. et Bravard J.P., 1998. The Drôme River incision (France): from assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, 43, 119-131.
- Leopold L.B., Maddock T., 1953. *The hydraulic geometry and stream channels and physiographic implications*. Geological Survey Professional, Paper 252, United States Gouvernement Printing Office, 57.
- Leopold L.B., 1954. *Determination of hydraulic elements of rivers by indirect methods*. Geological Survey Professional, United States Gouvernement Printing Office, 30.
- Leopold L.B., Wolman M.G., 1957. *River channel patterns: braided, meandering and straight*. Rap. tech. US Geological Survey, US government printing office, Washington, 76.
- Leopold L.B., 1960. The Conservation Attitude. Part C. *Conservation and Water Management*, Geological Survey Circular, 414, Washington, 15-19.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P., 1964. *Fluvial processes in geomorphology*. W.H. Freeman, San Francisco, 522.
- Leopold L.B., 1969. Landscape Esthetics, *Natural History*, 37-45.
- Le Roy Ladurie E., 1983. *L'histoire du climat depuis l'an mil*. Editions Flammarion, Paris, 450.
- Leteinturier B., Engels P., Petit F., Chiffaut A., Malaisse F., 2000. Morphodynamisme d'un tronçon de Loire bourbonnaise depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 239-252.
- Liébault F., Piégay H., 2001. Assesement pf channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France. *Geomorphology*, 36, 167-186.
- Liébault F., Piégay H., 2002. Causes of the 20<sup>th</sup> century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444.
- Liébault F., Gomez B., Page M., Marden M., Peacock D., Richard D., Trotter C.M., 2005. Land-use change, sediment production and channel response in uplands regions. *River Research and Applications*, 21, 739-756.
- Macovschi, 1946. Evoluția vieții industriale de pe valea superioară a Prahovei. *Memoriile Secțiunii Științifice*, Seria III, XIII, 11, 1-27.
- Malanson G.P., 1993. *Riparian landscapes*. Cambridge University Press, Cambridge studies in ecology, Cambridge, 296.
- Malavoi J.R., Souchon Y., 1996. Dynamique fluviale et dynamique écologique, *La Houille Blanche*, 176, 6/7, 98-107.
- Malavoi J.R., Bravard J.P., Piégay H., Hérrouin E., Ramez P., 1998. *Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau*. Guide technique n°2, SDAGE RMC, 39.
- Malik I., 2005. Rates of lateral channel migration along the Mala Panew River (southern Poland) based on dating riparian trees and coarse woody debris. *Dendrochronologia*, 23, 29-38.
- Manneville O., Vergne V., Villepoux O. (Eds.), 2006. *Le monde des tourbières et des marais*. Editions Delachaux et Niestlé, Paris, 320.

- Marston R.A., Jirel J., Pautou G., Piégay H., Bravard J.P., Arneson C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, 13, 121-131.
- Marston R.A., Bravard J.P., Green T., 2003. Impacts of reforestation and gravel mining on the Malnant River. Haute-Savoie, French Alps. *Geomorphology*, 55, 65-74.
- Maruszczak H., 1997. Changes of the Vistula river course and development of the flood plain in the border zone of the South-Polish uplands and Middle-Polish lowlands in historical times, *Landform Analysis*, 1, 33-39.
- Masson M., 1983. *Essai de cartographie des champs d'inondation par photo-interprétation*. Rapport CETE Aix en Provence - STU, 47.
- Masson G., Garry G., Ballais J.-L., 1996. *Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique*. Editions Villes et Territoires, Paris, 100.
- Media Fax, 2009. <http://www.mediafax.ro/>.
- Mihăilescu V., 1966. *Dealurile și câmpiile României*. Editura Științifică, București.
- Millet L., Arnaud F. ; Heiri O., Magny M., Verneaux V., Desmet M., 2009. Late-Holocene summer temperature reconstruction from chironomid assemblages of Lake Anterne, northern French Alps. *The Holocene*, 19, 2, 317-328.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2008. <http://www.verkeerenwaterstaat.nl/>.
- Ministerul Dezvoltării Regionale și Locuinței, 2009. *Planul de amenajare a teritoriului național*. Ministerul Dezvoltării Regionale și Locuinței, 84, <http://www.mie.ro/index.php?p=1081>.
- Ministerul Mediului, 2006, *Raport privind efectele inundațiilor și fenomenelor meteorologice periculoase produse*. Ministerul Mediului, 40, [http://www.mmediu.ro/departament\\_ape/gospodarirea\\_apelor/inundatii/raport\\_cmsu.pdf](http://www.mmediu.ro/departament_ape/gospodarirea_apelor/inundatii/raport_cmsu.pdf).
- Ministry of Civil Defence and Emergency Management, 2002. *Waiho River Flooding Risk Assessment*. Ministry of Civil Defence and Emergency Management, 44.
- Miramont C., Guilbert X., 1997. Variations historiques de la fréquence des crues et de la morphogénèse fluviale en Moyenne Durance. *Géomorphologie : relief, processus et environnement*, 4, 325-338.
- Miramont C., Jorda M., Picjard G., 1998. Evolution historique de la morphogénèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la Moyenne Durance (France du sud-est). *Géographie physique et Quaternaire*, 52, 3, 1-13.
- Molnar P., Ramirez J.A., 2002. On downstream hydraulic geometry and optimal energy expenditure: case study of the Ashley and Taieri Rivers. *Journal of Hydrology*, 259, 105-115.
- Morisawa M., 1985. *Rivers*. Longman, New York, 222.
- Moroșanu B., 2008. *Deformațiile liniare relative în sistemele de proiecție Stereografic 1970, Gauss-Krüger, UTM și comparații între acestea*. <http://earth.unibuc.ro/articole/deformatii-liniare-in-sistemele-proiectie>.
- Mosley M.P., Duncan M.J. 1992. Rivers. In Selby M.J., Soons J.M. (Eds.), *Landforms of New Zealand*, Longman Paul Auckland, 92-106.

- Muller S., 2002. Diversity of management practices required to ensure conservation of rare and locally threatened plant species in grasslands: a case study at a regional scale (Lorraine, France). *Biodiversity and Conservation*, 11, 7. 1173-1184.
- Musy, 2005. *Cours Hydrologie générale*. <http://echo.epfl.ch/e-drologie/>.
- Mustăţea A., 1996, *Viituri excepţionale pe teritoriul României*, Editura Tipografica S.C. Onesta Com. Prod. 94 S.R.L., Bucureşti, 2005.
- Mutihac V., 1990, *Structura geologică a teritoriului României*, Editura Tehnică, Bucureşti.
- Naiman R.J., Decamps H. (Eds.), 1990. *The ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones*. Man and the Biosphere Series, 4, 316.
- Nagy B., Kern Z., Bugya E., Kohan B., 2004. Investigations of the postglacial surface-evolution in the alpine region of the Călimani Mountains - with an outlook to the cirque region of the Rodnei Mountains. *Analele Universităţii de Vest din Timişoara, Geografie*, XIV, 101-118.
- Nanson G.C., Knighton A.D., 1996. Anabranching rivers: their cause, character and classification. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2, 217-239.
- Nanson G.C., Croke J.C., 1992. A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4, 459-486.
- Nasipuri P., Chatterjee A., 2009. Land use around Maithon reservoir: a study from high-resolution ASTER data. *Current Science*, 97, 1, 25-27.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009. [http://www.csc.noaa.gov/crs/rs\\_apps/sensors/landsat.htm](http://www.csc.noaa.gov/crs/rs_apps/sensors/landsat.htm).
- Navratil O., 2005. *Débit à pleins bords et géométrie hydraulique : une description synthétique de la morphologie du cours d'eau pour relier le bassin versant et les habitats aquatiques*. Thèse de Doctorat en Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement, Institut National Polytechnique de Grenoble, 308.
- Nedelcu A. Ş., 2000, *Valea Prahovei şi sistemul ei fluvial*, Teză de doctorat în Geografie, Universitatea din Bucureşti.
- Neill C.R., 1978. *Hydraulic and Morphologic Character of Athabasca River near Fort Assiniboine - the Anatomy of a Wandering Gravel Bed River*, Report REH/73/8. Alberta Research Council, Highway and River Engineering Division, Edmonton, 23.
- Newson M.D., Clark M.J., Sear D.A., Brookes A. 1998. The geomorphological basis for classifying rivers. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 8, 415-430.
- Nicolae C., Roşu C., Dumitru D. 2001. Consideraţii privind reconstrucţia ecologică a pădurilor din Lunca Dunării. *Revista Pădurilor*, 6.
- Nicolussi, K., Patzelt, G. 1996: Reconstructing glacier history in Tyrol by means of tree-ring investigations. *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 32, 207-215.
- Niculescu G., 1960. Câmpia piemontană înaltă a Cricovului Dulce (Observaţii geomorfologice). *Probleme de geografie*, VII, 109-130.
- Niculescu G., 1984. *Valea Prahovei*. Editura Sport-Turism, Bucarest, 274.
- Nienhuis P.H., Leuven R.S.E.W., Ragas A.M.J. (Eds.), 1998. *New concepts for sustainable management of rivers basins*. Backhuys Publishers, Leiden.

- Nolan K.M., Lisle T.E., Kelsey H.M., 1987. Bankfull discharge and sediment transport in northwestern California. In Beschta R., Blinn T., Grant G.E., Swanson F. J, Ice G.G. (Eds.), *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim (Proceedings of the Corvallis Symposium, August 1987)*, International Association of Hydrological Sciences Publication, 165, 439-449.
- Nunally N.R., 1967, Definition and identification of channel and overbank deposits and their respective roles in flood-plain formation. *Professional Geographer*, 19, 1-4.
- Olteanu S., Grigore N., Hoinărescu C., 2001. *Raport arheologic - 2001, comuna Gherghița, județul Prahova*. <http://www.cimec.ro/arheologie/newcronica2000/indici/cca2000-cronica-g.htm>.
- Onac B.P., Constantin S., Lundberg J., Lauritzen S.E., 2002. Isotopic climate record in a Holocene stalagmite from Urșilor Cave (Romania). *Journal of Quaternary Science*, 17, 4, 319-327.
- Oprea M., 2006. Aspecte privind scurgerea maximă în bazinul superior al râului Prahova. *Comunicări de Geografie*, X, 259-262.
- Orghidan N., 1969. *Văile transversale din România. Studiu geomorfologic*. Editura Academiei, București, 188.
- Osaci-Costache G., 2000. Principalele hărți ale Munteniei în perioada 1860-1980, cu privire specială asupra Muscelor Argeșului. *Analele Universității din București*, 133-141.
- Osaci-Costache G., Ene M., 2007. Implications of the land use change on the slopes dynamics in the Subcarpathians (Romania). Retrospective cartographic contributions. *Programme and Abstracts of 12<sup>th</sup> Belgium-France-Italy-Romania Geomorphological Meeting*. 39-40.
- Parcul Natural Lunca Joasă a Prutului Inferior, 2009. <http://www.luncaprut.ro/>.
- Pardé M., 1933. *Fleuves et rivières*. Editions Colin, Paris, 224.
- Pascu M., 1999. *Cercetări privind influența regularizării radicale a albiilor de râuri asupra stabilității unor construcții aferente și a mediului înconjurător-cu referire la bazinul hidrografic al râului Prahova*. Rezumatul tezei de doctorat, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi, Iași, 51.
- Patou G., 1984. L'organisation des forêts alluviales dans l'axe rhodanien entre Genève et Lyon; comparaison avec d'autres systèmes fluviaux. *Documents de cartographie écologique*. 43-64.
- Peiry J.L., 1988. *Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un cours d'eau intra-montagnard: l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie)*. Thèse de Doctorat en Géographie et Aménagement, Université Jean Moulin Lyon 3, 376.
- Peiry J.L., Salvador P.G., Nouguier F., 1994. L'incision des rivières dans les Alpes du Nord: état de la question. *Revue de Géographie de Lyon*, 69, 1, 47-56.
- Petit F., 1995. Régime hydrologique et dynamique fluviale des rivières ardennaises. In Demoulin A. (Eds.). *L'Ardenne. Essai de Géographie physique*, Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale, Université de Liège, 194-223.
- Petit F., Poinart D., Bravard J.P., 1996. Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France ("canal de Miribel"). *Catena*, 26, 209-226.

- Petrea D., Rus I., Petrea R., 2006. Restructurări plan-spațiale în evoluția recentă a albiei Crișului Repede (între Ciucea și Oradea). *Revista de geomorfologie*, 8, 35-44.
- Petrea D., Rus I., Surdeanu V., Irimus I.A., Cocean P., Petrea R., 2007. Spatial restructurations in the recent evolution of the Crișul Repede alluvial channel. *Program and Abstract*, 12<sup>th</sup> Belgium-France-Italy-Romanian Geomorphological Meeting, 90.
- Pettitt A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of Applied Statistical Science*, 28, 2, 126-135.
- Piégay H., 1995. *Dynamiques et gestion de la ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône (l'Ain, l'Ardèche, le Giffre, l'Ouvèze et l'Ubaye), XIX<sup>ème</sup> - XX<sup>ème</sup> siècles*. Thèse de Doctorat de Géographie et Aménagement. Université Paris IV -Sorbonne, 529.
- Piégay H., 1996. La forêt d'inondation de cinq rivières du bassin rhodanien : de la notion de patrimoine écologique à celle « d'espace-tampon ». *Annales de Géographie*, 105, 590, 347-368.
- Piégay H., Barge O., Bravard J.P., Landon N., Peiry J.L., 1996. Comment délimiter l'espace de liberté des rivières ? Congrès de la Société Hydrotechnique de France, 24<sup>ème</sup> Journées de l'Hydraulique, *L'eau, l'homme et la nature*, 275-284.
- Piégay H., Cuaz M., Javelle E., Mandier P., 1997. Bank erosion management based on morphological, ecological and economical criteria on the Galaure River, France. *Regulated Rivers: research and Management*, 12, 433-448.
- Piégay H., Bravard J.P., 1997. The reactions of a mediterranean riparian forest to a major hydrological event, the 1 in 400 year flood (22.09.1992) in the Ouvèze river, Drôme-Vaucluse, France. *Earth Surface, Processes and Landforms*, 22, 31-43.
- Piégay H., Cossin M., 1998. Réflexions préliminaires à un diagnostic paysager des hydrosystèmes fluviaux. *Revue de géographie de Lyon*, 73, 4, 273-284.
- Piégay H., Stroffek S., 2000. La "gestion physique" des rivières dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : des extrêmes...au milieu. In Bravard J.P. (Eds.), *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie*, Editure SEDES, 247-274.
- Piégay H., Pautou G., Ruffinoni C., 2003. *Les forêts riveraines des cours d'eau. Ecologie, fonctions et gestion*. Institut pour le développement forestier, Paris, 464.
- Piégay H., Darby S.E., Mosselman E., Surian N., 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to management bank erosion. *River Research and Applications*, 21, 773-789.
- Piégay H., Grant G., Futoshi N., Trustrum N., 2006. Braided rivers management: from assessment of river behaviour to improved sustainable development. In Sambrook Smith (Eds.), *Braided rivers. Process, deposits, ecology and management*, 257-275.
- Pișota I., Zaharia L., 1994. Bazinul Prahovei - considerații privind regimul hidrologic. *Analele Universității București*, XLIV, 67-76.
- Pișota I., Zaharia L., 1995. *Hidrologie. Lucrări practice*. Editura Universității din București.
- Pișota I., Zaharia L., Diaconu D., 2005. *Hidrologie*. Editura Universitară, București, 256.
- Planchon O., 2005. A propos des excès pluviométriques d'été dans le centre - ouest de l'Europe. In Lamarre D. (Eds.), *Les risques climatiques*, Belin, 129-145.

- Popa I., Kern Z., 2009. Long-term summer temperature reconstruction inferred from tree-ring records from Eastern Carpathians. *Climate Dynamics*, 32, 7-8, 1107-1117.
- Popp N., 1929. Valea Prahovei între Predeal și Florești. Observații antropogeografice. *Buletinul Societății Regale Române de Geografie*, XLVIII, 185-258.
- Popp N., 1939, *Subcarpații dintre Dambovița și Prahova. Studiu geomorfologic*, Societatea Regală de Geografie, București.
- Posea G., Velcea V., Cojocaru D., 1963. *Geomorfologie*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 172.
- Postolache C., Rîșnoveanu G., Angheluță V., 2006. Nitrogen and phosphorous excretion rates by tubificids from the Prahova River (Romania). *Hydrobiologia*, 553, 121–127.
- Radu M., 2008, Hydrographic changes in the lower basin of Dâmbovița (the Lungulețu area – junction with Colentina) in the XVIII-XX centuries. *Present Environment and Sustainable Development*, 2, 367-277.
- Rădoane M., Rădoane N., 2005. Dams, sediment sources and reservoir silting in Romania. *Geomorphology*, 71, 112-125.
- Rădoane N., Rădoane M., Amăriucăi M., 2006a. Observații asupra variabilității hidrologice a râului Prut. *Analele Universității Ștefan cel Mare Suceava*, Secțiunea Geografie, XV, 11-23.
- Rădoane M., Rădoane N., Cristea I., 2006b. Granulometria depozitelor de albie ale râului Prut între Oroftena și Galați. *Revista de geomorfologie*, 8, 53-64.
- Rădoane M., Rădoane N., 2007. *Geomorfologie aplicată*, Editura Universității din Suceava, Suceava, 377.
- Rădoane M., Rădoane N., Cristea I., Gangevici-Oprea D., 2008a. Evaluarea modificărilor contemporane ale albiei râului Prut pe granița românească. *Revista de Geomorfologie*, 10, 57-71.
- Rădoane M., Rădoane N., 2008b. Răspunsul unei albiei adâncite în roci coezive la acțiunea factorilor de control naturali și antropici. *Studii și Cercetări de Geografie*, sous-presses.
- Râmbu N., Boroneant C., Buta C., Dima M., 2002. Decadal variability of the Danube river flow in the lower basin and its relation with the North Atlantic Oscillation. *International Journal of Climatology*, 22, 10, 1169-1179.
- Regia Națională a Pădurilor ROMSILVA, 2009. <http://www.rosilva.ro/>.
- Réménieras G., 1999. *L'hydrologie de l'ingénieur*. Edition Eyrolles, Paris, 456.
- Reuther, A., Urdea, P., Geiger, C., Ivy-Ochs, S., Niller, H., Kubik, P., Heine, K., 2007. Late Pleistocene glacial chronology of the Pietrele Valley, Retezat Mountains, Southern Carpathians constrained by <sup>10</sup>Be exposure ages and pedological investigations. *Quaternary International*, 164-165, 151-169.
- Rinaldi L., 2003. Recent channel adjustment in alluvial rivers of Tuscany, central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 587-608.
- Rinaldi M., Wyzga B., Surian N., 2005. Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 21, 805-828.
- Richards K., 1982. *Rivers: form and alluvial process*. Methuen, London, 358.

- Riley S.J., 1972. Comparison of morphometric measures of bankfull. *Journal of Hydrology*, 17, 1-2, 23-31.
- Rîșnoveanu, G., Postolache C., Vădineanu A., 2001. Nitrogen and Phosphorous Excretion Rates by Tubificids from the Danube River. In Weber J. (Eds.), *Biogeochemical Processes and Cycling of Elements in the Environment*, Wroclaw, 205-206.
- Rollet A.J., 2007. *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain*. Thèse de Doctorat en Géographie et Aménagement. Université Jean Moulin Lyon 3, 305.
- Romanescu G., 2008. *Inventarierea și tipologia zonelor umede și a apelor adânci din Grupa Nordică a Carpaților Orientali*. Editura Terra Nostra, Iași, 100.
- Roșu C., 2001, Cu privire la specificul condițiilor pedoclimatice și fenomenelor de declin al pădurilor din Câmpia Română și reconstrucția ecologică a acestora. *Revista de Știința Solului*, 1.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.
- Rus I., 2008. Scurt istoric al măsurătorilor terestre în România. <http://earth.unibuc.ro/articole/scurt-istoric-al-masuratorilor-terestre-in-romania>.
- Rus I., Balint C., Crăciunescu V., Costantinescu Ș., Ovejanu I., Bartos-Elekes Z., 2009. Automated georeference of the 1: 20 000 Romanian maps under Lambert-Cholesky (1916-1959) projection system. *Geophysical Research Abstracts*, 11, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-3581-2.pdf>.
- Rust B.R., 1978. A classification of alluvial channel systems. In Miall A.D. (Eds.), *Fluvial Sedimentology*, Memoirs of the Canadian Society of Petroleum Geologist, 5, 187-198.
- Sacerdoțeanu A., 1971. Începuturile orașului Gherghița. In *File din trecutul istoric al județului Prahova*, Muzeul de Istorie al județului Prahova, 31-53.
- Salvador P.G., 1991. *Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère (Bassin de Malville et Ombilic de Morains, Bas-Dauphiné)*. Thèse de Doctorat en Géographie. Université Jean Moulin Lyon 3, 498.
- Salmi T., Määtä A., Anttila P., Ruoho-Airola T. and Amnell T., 2002. *Makesens 1.0. Mann-Kendall test and Sen's slope estimates for the trend of annual data*. Version 1.0, Freeware. Finnish Meteorological Institute, Helsinki, [www.fmi.fi/organization/contacts\\_25.html](http://www.fmi.fi/organization/contacts_25.html).
- Sambrook Smith G.H., Best J.L., Bristow C.S., Petts G.S. (Eds.), 2006. *Braided rivers. Process, deposits, ecology and management*. Blackwell Publishing, Malden, 390.
- Schumm S.A., 1968. *River adjustment to altered hydrologic regimen-Murrumbidgee River and palaeochannels, Australia*. United States Geological Survey Professional Paper, 598, 65.
- Schumm S.A., 1969. River metamorphosis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 6352, 255-273.
- Schumm A.S., 1977. *The fluvial system*. Willey and Sons, New York, 388.
- Schumm S.A., Meyer D.F., 1979. Morphology of alluvial rivers of the Great Plains. *Great Plains Agricultural Council*, 91, 9-14.
- Schumm, S.A., 1985. Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13, 5-27

- Schumm S.A., 1977. *The fluvial system*. Wiley and Sons, New York, 338.
- Scurtu I., Stănescu-Stanciu T., Scurtu G.M., 2002. Istoria românilor între anii 1918-1940. <http://ebooks.unibuc.ro/istorie/istorie1918-1940/>.
- Scarwell H.J., Laganier R., 2004. *Risque d'inondations et aménagement durable des territoires*. Presses Universitaires Septentrion, 240.
- Schmitt L., 2000. *Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace*. Thèse de Doctorat en Géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 217.
- Schmitt L., Maire G., Nobelis P., Humbert J., 2007. Quantitative morphodynamic typology of rivers : a methodological study based on the French Upper Rhine basin : *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1726-1746.
- Seffer J., Janak M., Sefferova Stanová V. 2008. *Management models for habitats in Natura 2000 Sites. 6440 Alluvial meadows of river valleys of the Cnidion dubii*. European Commission, 20.
- Spaliviero M., 2003. Historic fluvial development of the Alpine-foreland Tagliamento River, Italy, and consequences for floodplain management. *Geomorphology*, 52, 317-333.
- Simionescu A., 2000. *Starea pădurilor din România în intervalul 1986-2000*. Editura Musatinii.
- Snijders JP., Hallot E., Houbrechts G., Petit F., 2006. Approche méthodologique pour la délimitation des espaces de liberté des rivières du massif ardennais. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 48, 7-17.
- Speight, J.G., 1965. Flow and channel characteristics of the Angabunga River, Papua. *Journal of Hydrology*, 3, 16-36.
- Starkel L., 1983. The reflection of hydrologic changes in the fluvial environments of the temperate zone during the last 15 000 years. In Gregory K.J. (Eds.), *Background to Palaeohydrology*, Wiley and Sons, Chichester, 213-235.
- Starkel, L. 2002. Change in the frequency of extreme events as the indicator of climatic change in the Holocene (in fluvial systems). *Quaternary International*, 91, 25-32.
- Starkel L., 2005. Role of climatic and anthropogenic factors accelerating soil erosion and fluvial activity in Central Europe. *Studia Quaternaria*, 22, 27-33.
- Starkel L., 2006. Clustering of extreme rainfalls and evolution of fluvial systems in the Holocene. *Studia Quaternaria*, 23, 23-28.
- Stăncioiu M., Breaza M., 1989. *Noul cântec al Prahovei*. Editura Sport-Turism, Bucurest, 128.
- Suffert J.D., 1972. Les inondations catastrophiques de mai 1970 en Roumanie : données climatiques et hydrologiques. *Revue Géographique de l'Est*, 2-3, 12, 249-263.
- Surian N., 1999. Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 1135-1151.
- Surian N., Rinaldi M., 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channel in Italy. *Geomorphology*, 50, 307-326.

- Surian N., Cisotto A., 2007. Channel adjustments, bedload transport, and sediment sources in a gravel-bed river, Brenta River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1641-1656.
- Surian N., 2002. Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes. *Geomorphology*, 43, 137-149.
- Șerban P., Gălie A., 2006. *Managementul apelor. Principii și reglementări europene*. Editura Tipored, Bucurest, 302.
- Taillefumier F., Piégay H., 2002, Contemporary land use change in prealpine Mediterranean mountains: a multivariate GIS-based approach, *Catena* 724, 1-30.
- Tetelea C., 2005. *Potențialul geocologic al ecosistemelor acvatice din Parcul Național Porțile de Fier cu privire specială asupra râurilor tributare Dunării*. Teza de Doctorat în Geografie. Universitatea din București, 244.
- The Landsat Program, 2009. <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Tomozeiu R., Stefan S., Busuioc A, 2005. Winter precipitation variability and the large – scale circulation patterns in Romania. *Theoretical and Applied Climatology*, Springer Wien, 81, 3-4, 193-201.
- Trufaș Constanța, 1998. *Bazinul hidrografic al Prahovei. Calitatea apelor*. Societatea de Geografie din România, București.
- Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8,127-150.
- Twidale C.R., 2004. River patterns and their meaning. *Earth-Science Reviews*, 67, 159-218.
- United States Geology Survey, 2009. <http://wa.water.usgs.gov/>.
- Union Européenne, 2009. The EU Water Framework Directive - integrated river basin management for Europe. <http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/>.
- Urdea P., 1998. Considerații dendrogeomorfologice preliminare asupra unor forme periglaciare din Munții Retezat. *Analele Universității din Craiova, Geografie*, I, 23-28.
- Urdea P., 2004. The Pleistocene glaciation of the Romanian Carpathians. *Quaternary Glaciations-Extent and Chronology*, 301-308.
- Van Oudheusden R., 2005. *The CORINE Biotopes project. Université d'Utrecht*. 85, [http://www.chem.uu.nl/nws/www/publica/Studentenrapporten/Studentenrapporten2005/I2\\_005-5.pdf](http://www.chem.uu.nl/nws/www/publica/Studentenrapporten/Studentenrapporten2005/I2_005-5.pdf).
- Vâlsan G., 1915. *Câmpia Română*. Buletinul Societății Regale Române de Geografie, XXXVI.
- Vâlsan G., 1939. *Morfologia Văii superioare a Prahovei și a regiunilor vecine*. Buletinul Societății Regale Române de Geografie, 58, 44.
- Velcea V., 1961. *Masivul Bucegi. Studiu geomorfologic*. Editura Academiei RSR, București, 151.
- Velcea V., Velcea I., 1965. *Valea Prahovei*. Editura Științifică, București.
- Velcea V., Niculescu G., 1979. *Prahova. Ghid turistic al județului*. Editura Sport-Turism, Bucurest.
- Vogt H., 1965. Quelques problèmes de méandres de débordement en roche meuble. *Revue de Géomorphologie dynamique*. XV, 4-6, 49-60.

- Yoshida H., 2005. Observation of riparian vegetation in Western Namibia by using NDVI and NDWI derived from SPOT-Vegetation. *African Study Monographs Supplement*, 30, 153-163.
- Warburton J., Davies T.R.H., Mandl M.G., 1993. A meso-scale field investigation of channel change and floodplain characteristics in an upland braided gravel-bed river, New Zealand. In Best J.L., Bristow C.S. (Eds), *Braided Rivers*, Geological Society. London, 241-255.
- Ward J.V., Tockner K., Uehlinger U., Malrd F., 2001. Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for effective river restoration. *Regulated Rivers: Research and Management*, 17, 311-323.
- Wasson J.G., Malavoi J.R., Maridet L., Souchon Y., Paulin L. 1998. *Impacts écologiques de la chenalisation des rivières*. Editions Cemagref, 160.
- Weier J., Herring D., 1999. Measuring Vegetation (NDVI & EVI). [http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation/measuring\\_vegetation\\_1.html](http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.html).
- West Coast Regional Council, 2002. Flooding and riverbed aggradation hazards. *Natural Hazards Review*, 29.
- Wetterzentrale, 2009. <http://www.wetterzentrale.de/>.
- Wohl E.A., Wilcow A., 2005. Channel geometry of mountain streams in New Zealand. *Journal of Hydrology*, 300. 252-266.
- Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35, 6, 951-956.
- Woodyer, K.D. 1968. Bankfull frequency in rivers. *Journal of Hydrology*, 6, 114-142.
- Wyzga B., 1996. Changes in the magnitude and transformation of flood waves subsequent to the channelization of the Raba River, Polish Carpathians. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 749-763.
- Wyzga B., 2001. Impact of the channelization-induced incision of the Skawa and Wisloka Rivers, Southern Poland, of the conditions of the overbank deposition. *Regulated Rivers: Research and Management*, 17, 85-100.
- Zaharia L., 1998. Tendances dans l'évolution des transferts de matières en suspension dans les Subcarpathes de Courbure, en relation avec les modifications du milieu nature. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1, 3-15.
- Zaharia L., 1999. *Resursele de apă din bazinul râului Putna. Studiu de hidrologie*. Editura Universității din București, București, 304.
- Zaharia L., Beltrando G., Bigot S., Oszwald J., Petrache R., 2002. Pluviométrie extrême, en période chaude, dans le bassin versant de la Putna (Roumanie) et contexte atmosphérique régional sur l'Europe Centrale. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 14, 236-244.
- Zaharia L., Beltrando G., Nedelcu G., Boroneant C., Ioana-Toroimac G., 2006, Les inondations de 2005 en Roumanie : une année atypique ?. *Actes du XIXème Colloque Internationale de Climatologie*, Paris, 557-562.
- Zaharia Liliana, Ioana-Toroimac G., 2007. Erosion dynamics-precipitations trends relationship in the Curvature Carpathians region (Romania). *Programme and Abstracts*, 12<sup>th</sup> Belgium-France-Italy-Romania Geomorphological Meeting, 104-105.

- Zaharia L., Ioana-Toroimac G., 2007. Relatia dintre indicii sintetici ai variabilitatii spatio – temporale a precipitatiilor si scurgerii lichide in regiunea Curburii Carpatice si indicele ONA. *Comunicări de Geografie*.
- Zalienski T., 2003. Catastrophic flood effects in alpine/foothill fluvial, system (a case study from the Sudetes Mountains, SW Poland). *Geomorphology*, 54, 293-306.
- Zawiejka J., Wyzga B., 2009. Twentieth-century channel changes of the Dunajec River, southern Poland: patterns, causes and controls. *Geomorphology*, article in press.
- Zanoni L., Gurnell A., Drake N., Surian N., 2008. Island dynamics in a braided river from analysis of historical maps and air photographs. *River Research and Applications*, 24, 1141-1159.

## LISTE DES SIGLES

Sigle	Roumain	Français
ANAR	Administrația Națională Apele Române	Administration Nationale des « Eaux Roumaines »
ANCPI	Agenția Națională de Cadastru și Publicitate Imobiliară	Agence Nationale de Cadastré et de Publicité Immobilière
ANM	Administrația Națională de Meteorologie	Administration Nationale de Météorologie
APM	Agenția de Protecția Mediului	Agence pour la Protection de l'Environnement
CA	Cota de atenție	Cote d'attention
CI	Cota de inundație	Cote d'inondation
CP	Cota de pericol	Cote de danger
CIMEC	Institutul de Memorie Culturală	Institut pour la Mémoire Culturelle
CJSU	Consiliul Județean pentru Situatii de Urgență	Conseil Départemental pour des Situations d'Urgence
INHGA	Institutul Național de Hidrologie și de Gospodărirea Apelor	Institut National d'Hydrologie et de la Gestion des Eaux
INSEE	Institutul Național de Statistică și Studii Economice	Institut National de Statistique et Etudes Economiques
MM	Ministerul Mediului	Ministère de l'Environnement
PAG	Mica Eră Glaciară	Petit Âge Glaciaire
PATN	Plan de Amenajare a Teritoriului Național	Plan l'Aménagement du Territoire National
PATJ	Plan de Amenajare a Teritoriului Județean	Plan d'Aménagement du Territoire Départemental
ROMSILVA	Regia Națională a Pădurilor	Régie Nationale des Forêts
SAGE	Schema de Amenajare și de Gestiune a Apelor	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE RMC	Schema Directoare de Amenajare și de Gestiune a Apelor din bazinul Ron-	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin

	Mediterrana-Corsica	Rhône-Méditerrané-Corse
SGA Prahova	Societatea de Gospodarie a Apelor - județul Prahova	Service de la Gestion des Eaux - département de la Prahova

## GLOSSAIRE

Le Glossaire contient des notions d'hydrogéomorphologie considérées des « mots-clés » de la thèse, qui sont traduit en roumain et en anglais afin de faciliter la compréhension du texte de la thèse. La plupart des notions traduites se retrouvent dans les références bibliographiques utilisées, rédigées en roumain et en anglais. Les notions notées en gris n'ont pas été retrouvées dans les références bibliographiques utilisées et elles représentent des traductions personnelles.

Français	Roumain	Anglais
Aggradation	Agradare	Aggradation
Banc	Ostrov	Bar
Bande active de tressage	Suprafața activă	Braidplain
Berge	Mal	Bank
Crue	Viitură	Flood
Chenaux divagants	Albii divagante	Wandering channels
Chenal à méandres	Albie meandrată	Meandering channel
Chenal à méandres ancrés	Albie cu meander „ancorate”	“Anchored” meandering channel
Chenal à méandres confinés	Albie cu meandre cu posibilități limitate de evoluție laterală	Confined meandering channel
Chenal à méandres libres	Albie cu meander libere	Free meandering channel
Chenal rectiligne	Albie rectilinie	Straight channel
Chenal sinueux	Albie sinuoasă	Sinuuous channel
Chenaux tressés	Albii împletite	Braided channels
Chenaux tressés avec des îles	Albii împletite cu insule	Braided-island channels
Débit	Debit	Discharge
Débit à pleins bords	Debit de umplere	Bankfull discharge
Débit solide des matières en suspension	Debit solid de aluviumi în suspensie	Load sediment discharge
Débit solide de fond	Debit solid de fund	Bedload sediment discharge
Dynamique de la rivière	Dinamica râului	River dynamics
Espace de liberté de la rivière	Spațiu de libertate a râului	Freedom space
Forêt alluviale	Pădure aluvială	Alluvial forest
Incision	Degradare	Incision

Inondation	Inundație	Flood
Lit d'inondation	Luncă inundabilă	Floodplain
Mare	Baltă	Puddle
Marais	Mlaștină	Swamp
Métamorphose fluviale	Metamorfoză fluvială	Fluvial metamorphosis
Ox-bow	Belciug	Ox-bow
Petit Âge Glaciaire	Mica Eră Glaciară	Little Ice Age
Pâture alluviale	Pășune aluvială	Alluvial meadow
Précipitations	Precipitații	Precipitation
Puissance fluviale	Putere fluvială	Stream power
Puissance fluviale spécifique	Putere fluvială specifică	Specific stream power
Recoupement (des méandres)	Autocaptarea (meandrelor)	Cut-off (of meanders)
Recoupement des méandres par déversement	Autocaptare prin repeziș	Chute cut-off
Recoupement des méandres par tangence	Autocaptarea prin strangulare	Neck cut-off
Rétrécissement	Restrângere	Narrowing
Ripisylve	Pădure riverană	Riparian forest
Style fluvial	Tip de albie	Channel patern
Zone humide	Zonă umedă	Wetland

## TABLE DES FIGURES

Figure 1. Directions des flux de matière et d'énergie (A) dans un système fluvial et (B) dans un hydrosystème fluvial. ....	18
Figure 2. Echelle spatio-temporelle des modifications du chenal fluvial. Les modifications associées à l'échelle centennale sont notées en gris. ....	19
Figure 3. Classifications des styles fluviaux selon la charge solide (A) et selon la sinuosité et la multiplicité des chenaux fluviaux (B). ....	23
Figure 4. Position géographique de la rivière Prahova et de son bassin hydrographique en Roumanie. ....	32
Figure 5. Carte des unités de relief et des étages d'altitude du bassin versant de la Prahova..	36
Figure 6. Affluents de la Prahova : (A) longueur ; (B) superficie de leurs bassins versants....	38
Figure 7. Relations entre les variables de contrôle et les variables de réponse dans un hydrosystème fluvial. ....	41
Figure 8. Position des stations météorologiques et hydrologiques dans le bassin de la Prahova. ....	47
Figure 9. Caractéristiques climatiques du bassin versant de la Prahova : (A) diagrammes ombrothermiques ; (B) cumuls maxima de précipitations. ....	51
Figure 10. Relation entre le débit liquide spécifique et l'altitude moyenne du bassin versant pour les stations hydrométriques du bassin versant de la Prahova. ....	54
Figure 11. Variations mensuelles des débits modules de la Prahova et de ses affluents. ....	55
Figure 12. Variations mensuelles des débits modules des matières en suspension de la Prahova. ....	55
Figure 13. Variations mensuelles des débits de pointe de la Prahova. ....	57
Figure 14. (A) Carte des pressions au géopotential de 500 dam (a) et champs de pression en surface (b) sur l'Europe le 2 juillet 1975 à 0 heures GMT ; la Roumanie est représentée en trait rouge. (B) Pluies tombées sur la Roumanie durant la période 1-4 juillet 1975 ; le bassin de la Prahova est représenté en trait rouge. ....	59
Figure 15. Situation météorologique sur l'Europe : le 10-12 septembre 2001, à 0 heures GMT. ....	60
Figure 16. Situation météorologique sur l'Europe : le 11-13 juillet 2005, à 0 heures GMT....	63
Figure 17. Excédent de précipitations mensuelles en juillet 2005 (par rapport à la moyenne de 1961-2000) et zone affectée par des inondations. ....	63
Figure 18. Situation météorologique sur l'Europe : le 18-20.09.2005, à 0 heures GMT. ....	64
Figure 19. Excédent de précipitations mensuelles en septembre 2005 (par rapport à la moyenne de 1961-2000) et zone affectée par des inondations. ....	64
Figure 20. Situation météorologique sur l'Europe : le 22-24.03.2007, à 0 heures GMT. ....	66
Figure 21. Variations spatiales de la quantité de précipitations tombées dans le bassin versant de la Prahova entre le 21 et le 25 mars 2007. ....	66

Figure 22. L'hydrogramme de la crue du mars 2007 aux stations hydrométriques de la Prahova. ....	67
Figure 23. Niveau à pleins bords de la Prahova à : (A) Bușteni ; (B) Stăncești ; (C) Adâncata. ....	74
Figure 24. Schéma de calcul de la superficie et du périmètre de la section mouillée. ....	77
Figure 25. Sites d'observations et de mesures de la largeur et de la profondeur du chenal à pleins bords. ....	82
Figure 26. Profil en travers de la Prahova du 29 mars 2006 à Bușteni, niveau à pleins bords et cotes de protection contre les inondations. ....	84
Figure 27. Profil en travers de la Prahova du 19 janvier 2006 à Câmpina, niveau à pleins bords et cotes de protection contre les inondations. ....	85
Figure 28. Profil en travers de la Prahova du 27 octobre 2007 à Stăncești et niveau et débit à pleins bords de la bande active. ....	86
Figure 29. Profil travers de la Prahova du 27 février 2006 à Prahova, niveau à pleins bords et cotes de protection contre les inondations. ....	87
Figure 30. Profil en travers de la Prahova du 5 janvier 2006 à Adâncata, niveau à pleins bords et cotes de protection contre les inondations. ....	88
Figure 31. Relation entre le débit à pleins bords, la pente de la ligne d'eau et le style fluvial selon Leopold et Wolman (1957) et la place de la Prahova dans cette relation. ....	91
Figure 32. Relation entre le débit à pleins bords, la pente de la ligne d'eau et la granulométrie du lit fluvial selon Ferguson (1987) et la place de la Prahova dans cette relation. ....	91
Figure 33. Relation entre le débit à pleins bords, la largeur du chenal et la pente de la ligne d'eau selon Brookes (1988) et la place de la Prahova dans cette relation. ....	92
Figure 34. Régression logarithmique adaptée au modèle fréquentiel de Pearson III et estimation du temps de retour du débit à pleins bords de la Prahova. ....	93
Figure 35. Causes principales du rétrécissement des chenaux fluviaux. ....	101
Figure 36. Schémas d'estimation de l'indice de sinuosité et du taux d'activité de tressage. .	113
Figure 37. Représentation du chenal fluvial et de la bande active de tressage sur différents documents. ....	115
Figure 38. Trois types de représentation de la bande active sur les plans militaires de fin du 19 <sup>ème</sup> siècle. ....	116
Figure 39. Vallée de la Prahova – tableau du peintre italien Amedeo Preziosi (1816-1882).	117
Figure 40. Styles fluviaux de la rivière Prahova depuis le milieu du 19 <sup>ème</sup> siècle. ....	121
Figure 41. Caractéristiques actuelles du chenal fluvial / des chenaux fluviaux de la Prahova. ....	122
Figure 42. Profil longitudinal de la Prahova (réalisé d'après les cartes topographiques de 1977-1980 de la DTM) et styles fluviaux (en 1900). ....	123
Figure 43. Styles fluviaux en relation avec le profil longitudinal et les processus d'aggradation/incision des rivières de l'est des Carpates orientales. ....	124
Figure 44. Rétrécissement de la bande active de tressage entre 1855 et 1899. ....	126

Figure 45. Largeur de la bande active de la Prahova en 1900, 1955, 1980 et 2005.....	129
Figure 46. Evolution de la bande active de la Doftana entre 1902 et 1980.....	131
Figure 47. Evolution du tronçon Zalhanaua-Puchenii Mirosălăvești et des marges végétalisées durant la période 1900-2005.....	133
Figure 48. Exemple d'incision des chenaux de la Prahova dans les Subcarpates.....	136
Figure 49. Observations sur la constitution de la berge droite de la Prahova au quartier Pietrișu situé au sud de la localité de Poiana Cămpina.....	137
Figure 50. Exemple d'incision du chenal fluvial de la Prahova à Stejaru, dans la Plaine de Ploiești.....	139
Figure 51. Tronçons de la Prahova affectés par la métamorphose fluviale.....	142
Figure 52. Exemples de pseudo-méandrage sur deux tronçons de la Prahova.....	143
Figure 53. Particularité des bancs de convexité de la Prahova - un exemple à Tufani.....	145
Figure 54. Particularité des bancs de convexité de la Prahova - un exemple à Patru Frați...	146
Figure 55. Types de migration latérale ; a) formes simples de migration latérale ; b) forme complexes de migration latérale.....	147
Figure 56. Types de méandres de la Prahova selon leur degré d'irrégularité.....	150
Figure 57. Evolution latérale d'un tronçon à méandres de la Prahova entre 1855 et 2004...	152
Figure 58. Evolution de la confluence Ialomița-Prahova depuis 1855.....	153
Figure 59. Berges constituées de limons d'inondations à Fânari, ce qui montre le rôle des débordements dans l'évolution de la plaine alluviale.....	154
Figure 60. Le lit d'inondation de la Prahova à Patru Frați qui présente des polygones de dessication.....	155
Figure 61. Evolution d'un tronçon à méandres de la Prahova, situé entre les localités de Puchenii Mirosălăvești et de Fânari, et augmentation de la superficie forestière entre 1897 et 1977.....	156
Figure 62. Terrasse du Pléistocène supérieur-Holocène bloquant la migration latérale de la Prahova à Brazii.....	157
Figure 63. Corrélacion entre la longueur d'onde et l'amplitude des méandres de la Prahova (secteur Puchenii Mirosălăvești-confluence Ialomița-Prahova).....	158
Figure 64. Evolution des températures et des précipitations en Roumanie durant le 20 <sup>ème</sup> siècle.....	163
Figure 65. Ruptures statistiques hydropluviométriques à la Courbure des Carpates.....	166
Figure 66. Position des ballastières le long de la Prahova.....	171
Figure 67. Exploitation de graviers directement du chenal fluvial de la Prahova dans les Carpates, à Poiana Țapului.....	172
Figure 68 (A) Position des principaux barrages, des endiguements (localisation approximative) et des canaux de dérivation de l'eau dans le bassin de la Prahova. Les ouvrages de type gabion ne sont pas pris en compte. (B) Principaux barrages qui fonctionnent dans le bassin de la Prahova.....	176
Figure 69. Rétrécissement de la bande active en aval du barrage de Nedelea.....	177

Figure 70. Levée de terre protégeant les localités voisines contre les débordements de la Prahova : (A) à Gherghița ; (B) à Adâncata. ....	180
Figure 71. Schéma de l'évolution de la Prahova en relation avec les principaux facteurs responsables.....	182
Figure 72. Evolution des concepts de l'aménagement des rivières. ....	188
Figure 73. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon carpatique. A) Extension du lit majeur et de la zone inondable. B) Extension de l'espace de mobilité historique. C) Zones d'érosion à 50 ans dans les conditions hydrologiques actuelles. D) Extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques. ....	197
Figure 74. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon subcarpatique : extension du lit majeur et de l'espace de mobilité historique. ....	199
Figure 75. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon subcarpatique : extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques. ....	200
Figure 76. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon tressé de la Plaine de Ploiești (Nedelea-Aricheștii Rahtivani) : extension du lit majeur et de l'espace de mobilité historique. ....	203
Figure 77. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon tressé de la Plaine de Ploiești (Nedelea-Aricheștii Rahtivani) : extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques. ....	204
Figure 78. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon tressé de la Plaine de Ploiești (à Stâncești): extension du lit majeur, de la zone inondable et de l'espace de mobilité historique. ....	205
Figure 79. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon tressé de la Plaine de Ploiești (à Stâncești) : extension espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques. ....	206
Figure 80. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (à Gherghița) : extension du lit majeur et de la de la zone inondable. ....	208
Figure 81. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (à Gherghița) : extension de l'espace de mobilité historique. ....	209
Figure 82. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (à Gherghița) : extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques. ....	210
Figure 83. Etapes de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (Brazii-Adâncata) : extension du lit majeur et de la de la zone inondable. ....	212
Figure 84. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (Brazii-Adâncata) : extension de l'espace de mobilité historique. ....	213

Figure 85. Etape de délimitation de l'espace de liberté de la Prahova pour un tronçon à méandres de la Plaine de Gherghița (Brazii-Adâncata) : extension de l'espace de liberté de la rivière sous l'influence des contraintes anthropiques. ....	214
Figure 86. Sites présentés dans ce chapitre : en gris – exemples d'enjeux liés aux processus de dynamique fluviale (érosion latérale, incision, aggradation) ; en rouge – exemples d'enjeux liés aux débordements de la Prahova entre 2005 et 2007.....	220
Figure 87. Etude du cas de l'inondation de Sinaia de mars 2007. (A) Schéma de l'occupation du sol dans la vallée de la Prahova. (B) L'accumulation de débris, macro-déchets et branches d'arbres au-dessous du pont ferroviaire a déterminé le débordement de la Prahova en amont ; le pont ferroviaire se trouve en aval par rapport au schéma de la figure A. (C) Perspective vers le périphérique de Sinaia et vers le quartier de Cumpătu ; les débris divers indiquent le passage de la crue ; les sacs de sable sont destinés à protéger la route de déviation de Sinaia. ....	233
Figure 88. Position de la localité de Gherghița par rapport aux paléo-cours de la Prahova...	237
Figure 89. Caractérisation de la qualité biochimique et de l'état écologique de la Prahova aux sites surveillés par l'APM Prahova. ....	240
Figure 90. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 1.....	256
Figure 91. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 2.....	257
Figure 92. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 3.....	258
Figure 93. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 4.....	259
Figure 94. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 5.....	260
Figure 95. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 6.....	261
Figure 96. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 7.....	262
Figure 97. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 8.....	263
Figure 98. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 9.....	264
Figure 99. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 10.....	265
Figure 100. Caractéristiques de la mosaïque écologique fluviale du sous-tronçon 11.....	266
Figure 101. Evolution de la ripisylve de Stăncești en relation avec le rétrécissement de la bande active de la Prahova. ....	269
Figure 102. Mosaïque de la ripisylve à Stăncești.....	270
Figure 103. Evolution de la mare de Puchenii Miroslăvești entre 1897 et 2002.....	273
Figure 104. Reforestation du méandre recoupé de Cotu Grecului, comme logique de gestion d'un marais alluvial. ....	274
Figure 105. Marais située au sud de la localité de Drăgănești, formé dans un méandre recoupé. ....	276
Figure 106. Marais de l'Ialomița - formée dans le chenal de l'Ialomița après la construction du barrage-réservoir de Dridu.....	277
Figure 107. Pâtures alluviales de la Prahova et leur utilisation pour l'élevage du bétail.....	278



## TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Stations météorologiques du bassin versant de la Prahova. ....	47
Tableau 2. Paramètres climatiques utilisés dans ce chapitre. ....	47
Tableau 3. Caractéristiques des bassins versants de la Prahova et de ses affluents aux stations hydrométriques analysées. ....	48
Tableau 4. Paramètres hydrologiques utilisés dans ce chapitre de la thèse. ....	49
Tableau 5. Débits annuels de pointe de la Prahova analysés selon leur mois de production. .	57
Tableau 6. Caractéristiques principales des crues de la Prahova de la période 2001-2007. ..	68
Tableau 7. Situations météorologiques associées aux forts débits de la Prahova. ....	69
Tableau 8. Valeurs des paramètres intermédiaires et du débit à pleins bords aux sections transversales prise en compte sur la Prahova. ....	83
Tableau 9. Valeurs de la puissance fluviale et de la puissance fluviale spécifique aux sections transversales prise en compte sur la Prahova. ....	83
Tableau 10. Débits de pointe (m <sup>3</sup> /s) de la Prahova pour différents temps de retour (méthode utilisée : modèle fréquentiel de Pearson III). ....	92
Tableau 11. Caractéristiques principales des documents utilisés. ....	103
Tableau 12. Plans militaires - feuilles utilisées. ....	105
Tableau 13. Cartes topographiques des années 1950 – feuilles utilisées. ....	106
Tableau 14. Cartes topographiques des années 1970/1980 – feuilles utilisées. ....	106
Tableau 15. Date de la prise de vue des photos aériennes. ....	107
Tableau 16. Récapitulatif des erreurs inhérentes à la méthode. ....	110
Tableau 17. Indices de multiplicité des chenaux fluviaux proposés par plusieurs auteurs. ...	113
Tableau 18. Evolution des méandres de la Prahova entre 1897 et 2005. ....	148
Tableau 19. Paramètres des méandres de la Prahova. ....	148
Tableau 20. Paramètres des méandres de la Prahova en amont de la confluence avec son affluent Teleajen. ....	149
Tableau 21. Paramètres des méandres de la Prahova en aval de la confluence avec son affluent Teleajen. ....	149
Tableau 22. Année de rupture statistique des séries de précipitations annuelles, de débits liquides modules annuels et de débits modules annuels de matières en suspension aux stations météorologiques et hydrométriques de la région de la Courbure des Carpates. ....	165
Tableau 23. Temps de retour des débits annuels de pointe de la Prahova, calculés selon le modèle fréquentiel de Pearson III. ....	168
Tableau 24. Les bandes radiométriques des images ETM+ LANDSAT. ....	247
Tableau 25. Evolution de la ripisylve du tronçon Zalhanaua - confluence Ialomița-Prahova au 20 <sup>ème</sup> siècle. ....	252

Tableau 26. Evolution des zones humides (mares, marais, étangs, cours temporaires d'eau) du secteur méandres de la Prahova.....	255
---	-----

## TABLE DES PHOTOS

Photo 1. Renforcement de la berge droite de la Prahova, suite à l'écroulement de la route DN1/E60.....	223
Photo 2. Réorientation du flux principal de la Prahova par des bancs alluviaux d'origine anthropique.....	223
Photo 3. Renforcement de la berge gauche de la Prahova à Breaza suite à l'écroulement de la route DN1/E60.....	224
Photo 4. Le nouveau pont de type bailey traversant la Prahova à Posada.....	226
Photo 5. Seuil de stabilisation qui a le rôle de protéger le pont ferroviaire de Breaza contre l'incision du chenal de la Prahova.....	226
Photo 6. Pont routier détruit et circulation empêchée entre les localités de Nedelea et de Filipeștii de Târg.....	227
Photo 7. Aménagement en mauvais état à Comarnic.....	229
Photo 8. Aménagement en mauvais état à Poiana Câmpina.....	229
Photo 9. Moyen de protection de la terrasse de Piatra contre l'érosion latérale de la Prahova.....	230
Photo 10. Moyen de protection de la terrasse de Stejaru contre l'érosion latérale de la Prahova.....	231
Photo 11. Accumulation des déchets sur la berge gauche de la Prahova à Sinaia suite au passage de la crue du mars 2007.....	241



## TABLE DES ANNEXES

Annexe 1. Carte géologique du bassin versant de la Prahova.....	328
Annexe 2. Carte des unités de relief que la Prahova traverse.....	329
Annexe 3. Carte des pentes du bassin versant de la Prahova. ....	330
Annexe 4. Carte de l'énergie du relief du bassin versant de la Prahova. ....	331
Annexe 5. Carte de l'occupation du sol du bassin versant de la Prahova. ....	332
Annexe 6. Carte de l'infrastructure du bassin versant de la Prahova - localités, voies routières. .....	333
Annexe 7. Localités de la vallée de la Prahova : situation administrative territoriale, nombre d'habitants, attestation historique, toponymie.....	341



## **ANNEXES**



## **Annexe 1. Caractérisation du bassin versant de la Prahova par des cartes**

Cette annexe propose de compléter les informations concernant le cadre géographique du bassin de la Prahova. Elle contient cinq cartes du bassin versant de la Prahova. Le but de cette annexe est d'aider le lecteur à mieux connaître le terrain d'étude.

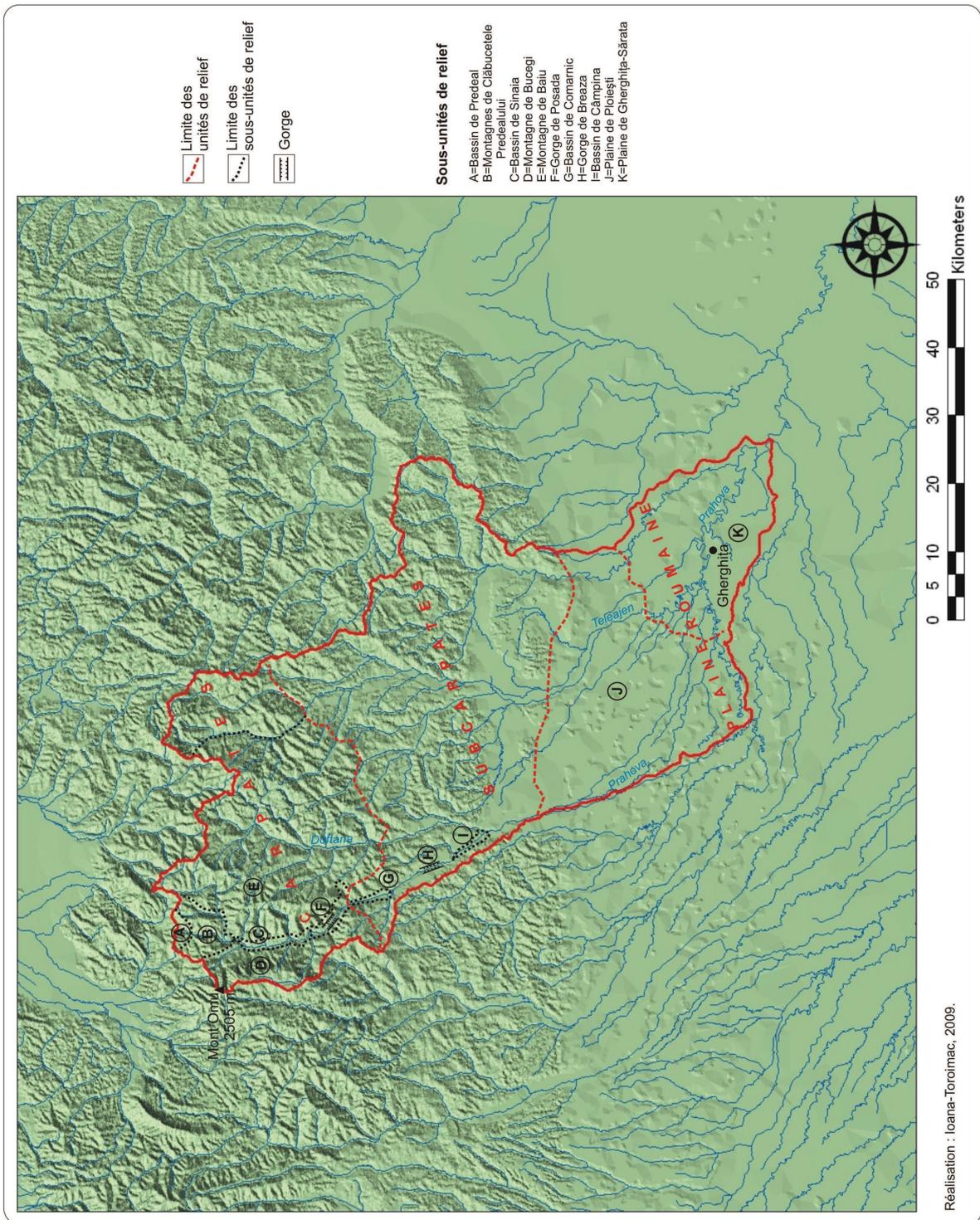
- La carte géologique du bassin de la Prahova (cf. Annexe 1) ;
- La carte des unités de relief traversées par la Prahova (cf. Annexe 2) ;
- La carte des pentes du bassin de la Prahova (cf. Annexe 3).
- La carte de l'énergie de relief du bassin de la Prahova (cf. Annexe 4) ;
- La carte l'occupation du sol du bassin de la Prahova (cf. Annexe 5) ;
- La carte de l'infrastructure routière (cf. Annexe 6).

La carte géologique montre que les autres unités de relief se sont formées en relation avec les Carpates, la Plaine de Gherghița étant la plus récente.

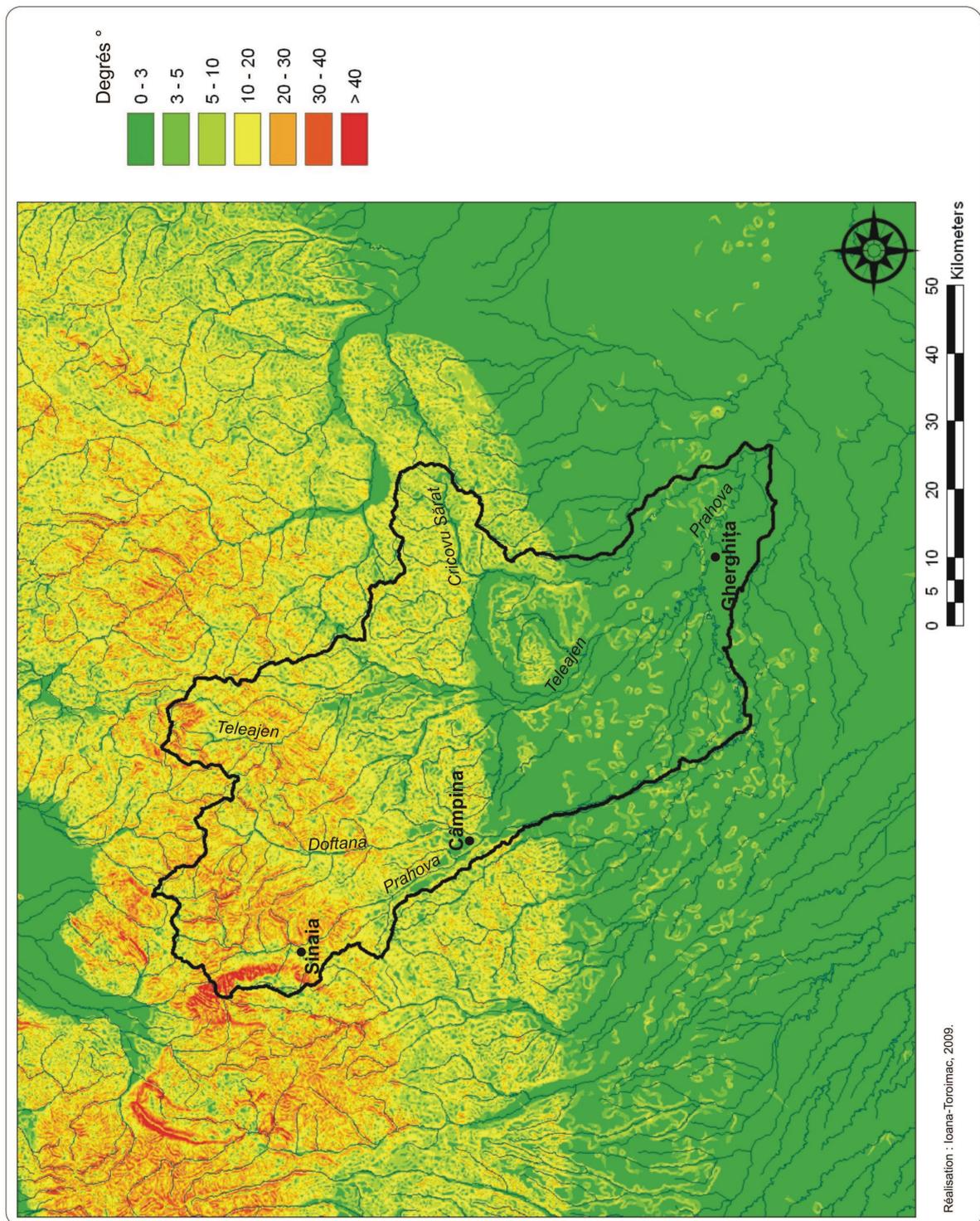
La carte des altitudes (cf. Figure 5), des pentes et de l'énergie de relief aide à comprendre la succession des unités de relief du nord au sud : les Carpates qui se caractérisent par des altitudes supérieures à 1000 m, par une pente forte (qui dépasse 40° sur l'abrupt des Montagnes de Bucegi) et aussi par de fortes énergies de relief (qui dépasse 800 m/km<sup>2</sup> sur l'abrupt des Montagnes de Bucegi). Tous ces paramètres diminuent vers la Plaine de Gherghița, qui se caractérise par une altitude inférieure à 100 m, des pentes faibles (inférieurs à 3°) et une énergie de relief faible (inférieure à 20 m/km<sup>2</sup>).

En ce qui concerne l'occupation du sol, plus de 76% de la superficie du bassin de la Prahova est occupée par des terrains arables non-irrigués. La majeure partie de ces terrains arables se trouve dans la région de plaine. Les vignobles et les verges, qui occupent les versants subcarpatiques, forment ensemble presque 1,3% de la superficie du bassin versant. Les forêts (de feuillus, de conifères, mélangés), concentrées essentiellement dans les Carpates, dans les Subcarpates et le long des cours d'eau traversant la plaine, constituent environ 14,5% de la superficie du bassin hydrographique. Les prairies et les pâtures représentent environ 1,3% de la superficie du bassin versant ; elles se trouvent sur les sommets carpatiques, localement dans les Subcarpates et dans les lits des rivières. L'urbanisation concerne environ

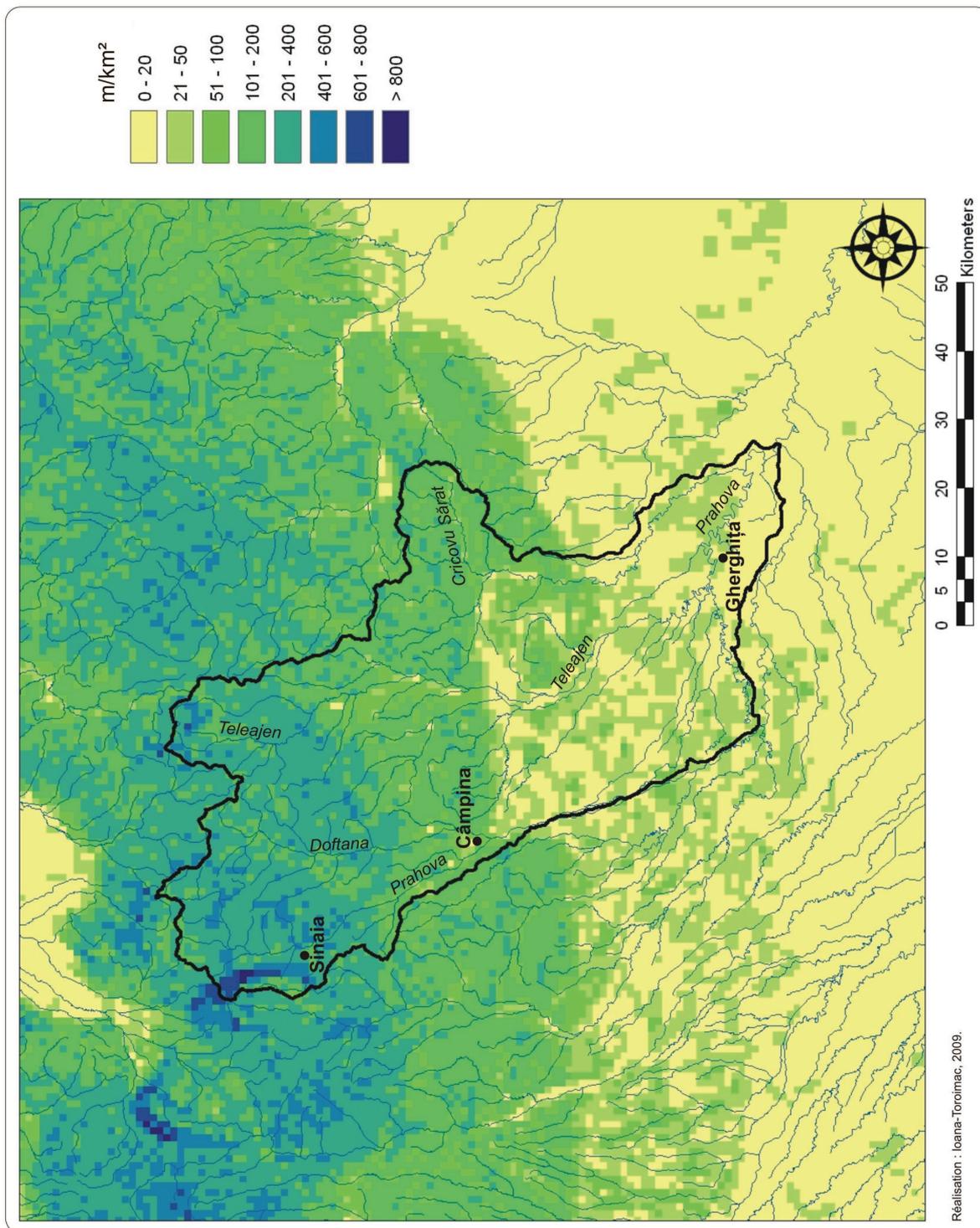




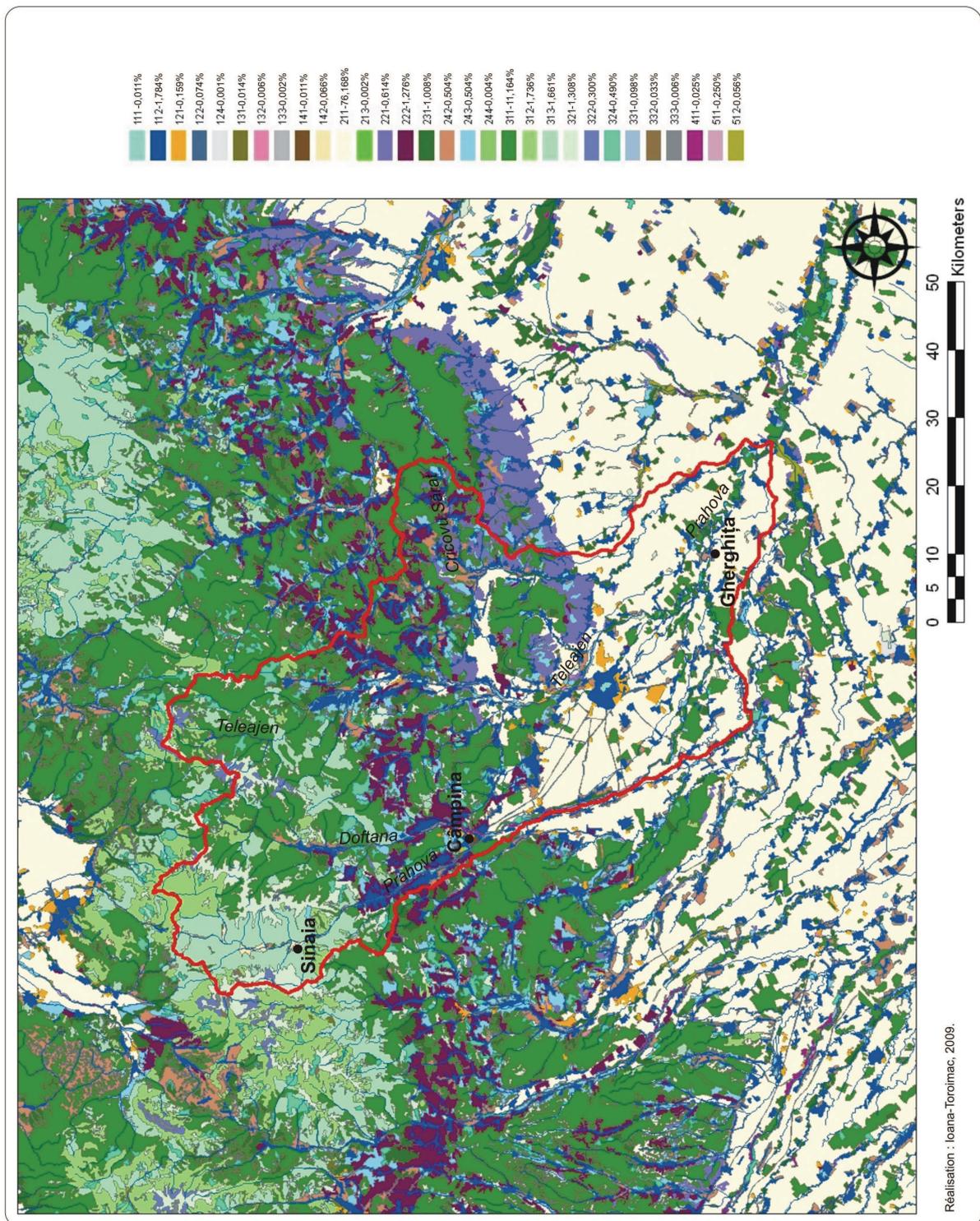
Annexe 2. Carte des unités de relief que la Prahova traverse. Le modèle du terrain est réalisé à partir des courbes de niveau des cartes topographiques 1 : 100 000 couvrant la région. Les limites proposées sont approximatives.



**Annexe 3. Carte des pentes du bassin versant de la Prahova. La carte est réalisée à partir des courbes de niveau des cartes topographiques 1 : 100 000 couvrant la région. Le contour du bassin versant provient de l'ANAR (en trait noir).**

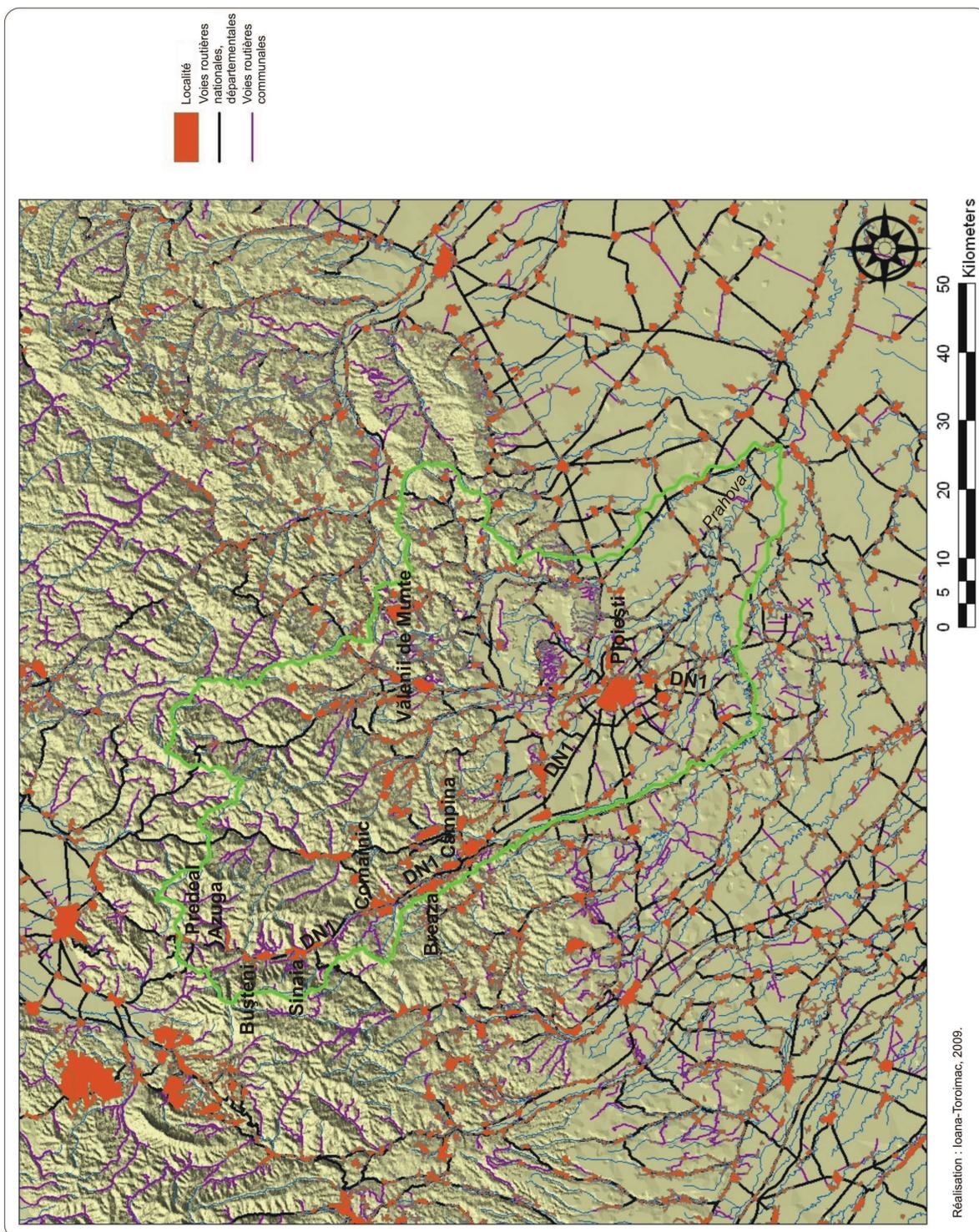


Annexe 4. Carte de l'énergie du relief du bassin versant de la Prahova. La carte est réalisée à partir des courbes de niveau des cartes topographiques 1 : 100 000 couvrant la région. Le contour du bassin versant provient de l'ANAR (en trait noir).



**Annexe 5. Carte de l'occupation du sol du bassin versant de la Prahova. La carte est réalisée à partir du programme Corine Land Cover (2000). Le contour du bassin versant provient de l'ANAR (en trait noir).**

111 = Tissu urbain continu ; 112 = Tissu urbain discontinu ; 121 = Zone industrielle ou commerciale ; 122 = Réseau routier ou ferroviaire et espaces associés ; 124 = Aéroports ; 131 = Extraction de matériaux ; 132 = Décharges ; 133 = Chantiers ; 141 = Espaces verts urbain ; 142 = Equipement sportif ou de loisir ; 211 = Terres arables hors périmètre d'irrigation ; 213 = Rizières ; 221 = Vignobles ; 222 = Vergers et petits fruits ; 231 = Prairies ; 242 = Systèmes culturaux et parcellaires complexes ; 243 = Territoires principalement occupés par l'agriculture, avec présence de végétation naturelle importante ; 244 = Territoires agro-forestiers ; 311 = Forêts de feuillus ; 312 = Forêts de conifères ; 313 = Forêts mélangées ; 321 = Pelouses et pâturages naturels ; 322 = Landes et broussailles ; 324 = Forêt et végétation arbustive en mutation ; 331 = Plages, dunes et sable ; 332 = Roches nues ; 333 = Végétation clairsemée ; 411 = Marais intérieurs ; 511 = Cours et voies d'eau ; 512 = Plans d'eau.



Annexe 6. Carte de l'infrastructure du bassin versant de la Prahova - localités, voies routières. La carte de base est réalisée à partir des courbes de niveau des cartes topographiques 1 : 100 000 couvrant la région. Le contour du bassin versant (en trait noir) et les éléments d'infrastructure proviennent de l'ANAR.



## **Annexe 2. Localités de la vallée de la Prahova : situation administrative territoriale, nombre d'habitants, attestation historique, toponymie**

L'annexe 2 propose un tableau qui contient des informations concernant les localités qui se trouvent dans la vallée de la Prahova. En effet on renvoie plusieurs fois dans le texte à ces localités. En conséquence ce tableau propose d'aider le lecteur à mieux connaître le terrain d'étude et même à mieux comprendre la problématique analysée.

Ce tableau contient le nombre d'habitants des localités concernées (en 2002) et le découpage administratif territorial (soit ville, soit commune, soit village selon la législation roumaine) ; tout le long du texte de la thèse, on a utilisé la notion de « localité » afin de ne pas faire la différence, à chaque occasion, entre les types de découpage administratif territorial, ce qui pourrait rendre le texte difficile pour un lecteur qui ne connaît pas la Roumanie. Le tableau contient aussi des informations historiques et toponymiques. En effet certains noms de localités sont démonstratifs pour la dynamique de la rivière. Si on fait la corrélation entre le nom de la localité et le moment de son attestation dans les documents historiques, on peut obtenir des informations concernant la dynamique de la rivière. Ces informations sont extraites de différentes sources.

- Le découpage administratif territorial et le nombre d'habitants proviennent des données statistiques de l'INSEE.
- Les informations concernant l'attestation documentaire et la toponymie des localités proviennent des brèves informations historiques proposées par les mairies locales, de Popp (1929), de Vâlsan (1939), de Velcea (1961), de Iordan (1963), de Sacerdoțeanu (1971), de Velcea et Niculescu (1979), de Niculescu (1984), de Stăncioiu et Breaza (1989) et du Dictionnaire explicatif de la langue roumaine DEX.
- Les informations concernant les découvertes archéologiques proviennent du Musée d'Archéologie et d'Histoire du département de la Prahova.

Selon ces documents le nom Prahova signifie « cataracte » (d'eau), ce qui signifie que la Prahova était une rivière à forte énergie. Le nom est d'origine slave et il est probablement apparu au 6<sup>ème</sup>-7<sup>ème</sup> siècle après J.C. Effectivement les invasions slaves ont commencé à l'extérieur des Carpates au 6<sup>ème</sup> siècle après J.C. et elles sont mentionnées à l'intérieur de l'arque carpatique au 7<sup>ème</sup> siècle.

Le tableau ci-dessus (cf. Annexe 7) permet de tirer quelques suppositions.

- La localité de Posada, dont le nom signifie « passage étroit », se trouve dans un tronçon de gorge.
- La localité de Câmpina, dont le nom signifie « champs », se trouve sur une terrasse de la Prahova.
- Les localités de la vallée de la Prahova se sont développées en relation avec son rôle d'axe de transport transcarpatique, soit en relation avec la transhumance (exemple : les localités de Comarnic, de Nedelea, de Zalhanaua), soit en relation avec la route de poste qui longeait la Prahova (par exemple les auberges permettaient de manger, de se reposer et de changer les chevaux de poste).
- La localité de Pisculești, dont le nom signifie « sommet », se trouve sur une terrasse.
- La localité de Tinosu se trouve actuellement sur terrasse ; il est fort probable que son nom est lié à un lit fluvial « boueux ».
- La localité de Pucheni se trouvait près d'un chenal fluvial peu profond, ce qui pourrait indiquer que la Prahova formait plusieurs chenaux fluviaux au 16<sup>ème</sup> siècle. Ces deux dernières informations indiquent que : soit 1) la Prahova avait un style fluvial divagant ; elle s'écoulait par plusieurs chenaux sur un lit fluvial constitué d'alluvions plutôt fines, probablement des sables, étant donné le fait qu'actuellement les limons caractérisent le secteur à méandres situé en aval ; soit 2) la Prahova formait des anastomoses. Etant donné le fait que la Prahova est une rivière énergique même à présent, il est fort probable que la deuxième hypothèse soit fautive. En effet au 16<sup>ème</sup> siècle, après la première période du PAG dans les Carpates roumaines (Popa et Kern, 2008), le tressage aurait pu s'intensifier comme dans les Carpates polonaises par exemple (Strakel, 2005), d'où l'apparition des chenaux multiples sur un lit sableux.
- La localité de Belciug, dont le nom signifie « ow-bow », se trouve probablement dans un méandre de la Prahova qui était déjà recoupé au 16<sup>ème</sup> siècle ;
- Le nom d'Adâncata, qui signifie « lieu profond », pourrait être lié à un chenal fluvial déjà abandonné au 18<sup>ème</sup> siècle.

Bien que ces conclusions soient spéculatives, dans certains cas, elles peuvent fournir une idée à partir de laquelle une recherche scientifique peut être développée.

Localité	Découpage administratif territorial	Nombre d'habitants	Les plus anciennes découvertes archéologiques	Attestation documentaire	Toponymie
<b>Predeal</b>	Ville	5615	Néolithique	1705 auberges de la Route de la Prahova	A la base de la colline
<b>Azuga</b>	Ville	6487	-	1800 auberges de la Route de la Prahova	L'ancien nom de la localité est <i>Între Prahove</i> , ce qui signifie <i>Entre les Prahovas</i> ; en effet la localité a apparu à la confluence de la Prahova avec l'Azuga. Pendant longtemps on a considéré que les sources de la Prahova coïncidaient avec cette confluence.
<b>Bușteni</b>	Ville	9699	Néolithique	1800 auberges de la Route de la Prahova	Troncs d'arbres
<b>Poiana Țapului</b>	Commune appartenant à la ville de Bușteni.	2 787	-	1800 auberges de la Route de la Prahova	Clairière du Bouc
<b>Sinaia</b>	Ville	15465	Epoque du Bronze	1581 monastère de Sinaia	Nom associé au Mont Sinai
<b>Posada</b>	Village appartenant à la ville de Comarnic	391	-	Au 17 <sup>ème</sup> siècle	Passage étroit, péage
<b>Comarnic</b>	Ville	13378	Néolithique	1510 en relation avec la transhumance	Compartiment de la bergerie
<b>Breaza</b>	Ville	18863	Epoque du Bronze	1431 en relation avec la transhumance	Bouleau ou Bon homme
<b>Câmpina</b>	Ville	41554	Epoque du	1503	Champs ou

			Bronze, Moyen Age	en relation avec la transhumance	bûcher
<b>Florești</b>	Commune	7421	Moyen Age	16 <sup>ème</sup> siècle	Appartenant à la famille Florescu
<b>Filipeștii de Târg</b>	Commune	2 828	Moyen Age	1510	Appartenant à la famille Filipescu
<b>Brătășanca</b>	Village appartenant à la commune de Filipeștii de Târg	520	-	18 <sup>ème</sup> siècle	-
<b>Ezeni</b>	Village appartenant à la commune de Filipeștii de Târg	89	-	20 <sup>ème</sup> siècle	-
<b>Nedelea</b>	Village appartenant à la commune de Nedelea	2 602	-	17 <sup>ème</sup> siècle	Nom propre de fille, synonyme de bergère
<b>Ariceștii Rahtivani</b>	Commune	2763	Latène	19 <sup>ème</sup> siècle	Appartenant à la famille Aricescu, qui s'occupait des chevaux du voïvode roumain
<b>Zalhanaua</b>	Village appartenant à la commune de Mănești	612	Latène, Post- romane, Moyen Age	17 <sup>ème</sup> siècle en relation avec la transhumance	Abattoir
<b>Stăncești</b>	Village appartenant à la commune de Târgușoru Vechi	597	-	16 <sup>ème</sup> siècle	Appartenant à la famille Stăncescu
<b>Piatra</b>	Village appartenant à la commune de Mănești	256	-	19 <sup>ème</sup> siècle	Pierre
<b>Stejaru</b>	Village appartenant à la commune de Brazi	211	-	19 <sup>ème</sup> siècle	Chêne
<b>Tinosu</b>	Commune	1270	Epoque du Bronze, Latène, cité dace 2 <sup>ème</sup> siècle av. J.C	Cité dace 2 <sup>ème</sup> siècle av. J.C	Boueux
<b>Pisculești</b>	Village appartenant à la commune de	659	Néolithique	18 <sup>ème</sup> siècle	Sommet

	Tinosu				
<b>Pucheni</b>	Commune	1532	-	1513	L'ancien nom de la localité est <i>Răstoaiica</i> ; le mot <i>răstoaca</i> est un archaïsme qui désigne un chenal fluvial peu profond desséché.
<b>Fânari</b>	Village appartenant à la commune de Gorgota	360	-	18 <sup>ème</sup> siècle	Au foin
<b>Palanca</b>	Village appartenant à la commune de Râfov	189	-	17 <sup>ème</sup> siècle	Tombé par terre
<b>Independența</b>	Village appartenant à la commune de Gherghița	223	Halstatt, Moyen Âge	17 <sup>ème</sup> siècle	Indépendance
<b>Belciug</b>	Village appartenant à la commune de Gherghița	727	-	Au 17 <sup>ème</sup> siècle	Le nom de la localité signifie « ox-bow ». D'après les habitants le nom Belciug est en fait le nom d'un ancien boyard roumain qui avait des propriétés dans la région. Par contre les cartes anciennes, ainsi que le relief vallonné (présence des chenaux abandonnés) dans une région de plaine plate indiquent probablement un cours abandonné de la Prahova.
<b>Gherghița</b>	Commune	905	Néolithique ; Epoque du Bronze, Moyen Âge	1453	Le nom du village est associé à Saint George.
<b>Ungureni</b>	Village appartenant à la commune de Gherghița	386	-	17 <sup>ème</sup> siècle en relation avec la transhumance	Hongrois. Ce nom est donné souvent aux villages créés

					par les bergers qui venaient de Transylvanie, en transhumance, avec leurs troupeaux de moutons, vers la vallée du Danube.
<b>Drăgănești</b>	Commune	1 210	Néolithique, période post-romane	1526	Appartenant à la famille Drăgănescu
<b>Hătcărău</b>	Village appartenant à la commune de Drăgănești	510	Moyen Age	1451	-
<b>Tufani</b>	Village appartenant à la commune de Drăgănești	97	-	18 <sup>ème</sup> siècle	Arbustes
<b>Malamuc</b>	Village appartenant à la commune de Gherghița	256	-	18 <sup>ème</sup> siècle	Le nom de la localité est associé à l'hôpital psychiatrique construit dans le village au 18 <sup>ème</sup> siècle et déplacé ultérieurement près de Bucarest.
<b>Răsimincea</b>	Village appartenant à la commune de Răsimincea	337	-	17 <sup>ème</sup> siècle	-
<b>Brazii</b>	Commune	1309	-	18 <sup>ème</sup> siècle	Le nom actuel signifie « les sapins ». L'ancien nom de la localité était Rădulești, ce qui signifie « appartenant à la famille Rădulescu ».
<b>Adâncata</b>	Commune	2130	-	18 <sup>ème</sup> siècle	Lieu profond
<b>Patru Frați</b>	Village appartenant à la commune	985	-	18 <sup>ème</sup> siècle	Quatre frères

	d'Adâncata				
--	------------	--	--	--	--

**Annexe 7. Localités de la vallée de la Prahova : situation administrative territoriale, nombre d'habitants, attestation historique, toponymie. Sources des informations : INSEE (2002), Mairies locales, Popp (1929), Vâlsan (1939), Velcea (1961), Iordan (1963), Sacerdoțeanu (1971), Velcea et Niculescu (1979), Niculescu (1984), Stăncioiu et Breaza (1989), Dictionnaire explicatif de la langue roumaine, Musée d'Archéologie et d'Histoire du département de la Prahova.**