



HAL
open science

Structures spatiales en hydrographie continentale

Jean-Stéphane Bailly

► **To cite this version:**

Jean-Stéphane Bailly. Structures spatiales en hydrographie continentale. Hydrologie. Univ. Montpellier, 2016. tel-01344955

HAL Id: tel-01344955

<https://hal.science/tel-01344955>

Submitted on 12 Jul 2016

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Université de Montpellier

École doctorale GAIA : Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement,
Terre, Eau (ED 584)

Structures spatiales en hydrographie continentale

Jean-Stéphane BAILLY

AgroParisTech UMR LISAH
648 rue J-F. Breton 2 place Viala
F-34093 Montpellier F-34060 Montpellier

Mémoire

constitué en vue de l'obtention du diplôme d'
HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES
Filière Sciences de la Terre et de l'Eau

soutenu le :
JJ MM 2016

Préambule

Ce mémoire d'HDR comprend deux parties, dans l'ordre attendu par l'école doctorale GAIA : une première partie factuelle de 15 pages qui présente un résumé de ma carrière incluant les indicateurs demandés par l'école doctorale puis une seconde partie de 37 pages hors références, 'explicative', qui fait le bilan de mes travaux scientifiques et présente mes perspectives de recherche.

Ce mémoire est également accompagné d'annexes consignées dans un document séparé qui contient une sélection de tirés à part de 12 articles de revue à comité de lecture.

Je tiens dans ce préambule à remercier et exprimer toute ma reconnaissance aux étudiants que j'ai eu la chance d'encadrer, à mes mentors, mes collègues, mes directeurs et présidents successifs.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté de lire ma prose et d'assister à la soutenance de ce mémoire.

A tous, un immense **MERCI**

Jean-Stéphane Bailly

Table des matières

| | | |
|-----------|--|-----------|
| I | Résumé de carrière | 3 |
| 1 | Curriculum Vitae | 4 |
| 2 | Stages, Collaborations et Contrats de recherche | 5 |
| 3 | Expertises | 6 |
| 4 | Activités de formation | 8 |
| 5 | Activités d'encadrement | 9 |
| 6 | Liste des publications indexées | 12 |
| | | |
| II | Démarche scientifique personnelle | 18 |
| 7 | Introduction | 18 |
| 8 | Bilan des travaux | 23 |
| 8.1 | Identification de structures de réseaux hydrographiques | 23 |
| 8.1.1 | Structure de réseaux hydrographiques par télédétection | 23 |
| 8.1.2 | Simulation de structures de réseaux hydrographiques | 31 |
| 8.2 | Structures spatiales et incertitudes réductibles | 37 |
| 8.2.1 | Modélisation d'incertitudes spatiales | 39 |
| 8.2.2 | Propagation d'incertitudes spatiales | 42 |
| 8.3 | Impacts hydrologiques des réseaux hydrographiques | 46 |
| 8.3.1 | Observations hydrologiques distribuées <i>in situ</i> | 46 |
| 8.3.2 | Explorations <i>in silico</i> | 47 |
| 9 | Perspectives de recherche | 50 |
| 9.1 | Identification de structures spatio-temporelle de réseaux hydrographiques . . | 52 |
| 9.1.1 | Identification à partir de données de télédétection | 52 |
| 9.1.2 | Modélisation spatio-temporelle | 52 |
| 9.2 | Structures spatio-temporelles et incertitudes : résolutions et échantillonnages optimaux | 54 |
| 9.3 | Impacts hydrologiques de réseaux hydrographiques : exploration théorique des lois d'échelle structure-fonction | 54 |

Première partie

Résumé de carrière

1 Curriculum Vitae

| | | | | | |
|---|---|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|
| Informations personnelles | | | | | |
| Nom(s) / Prénom(s) | Bailly, Jean-Stéphane | | | | |
| Adresse(s) | 648 rue Jean-François Breton, 34090 Montpellier, France | | | | |
| Téléphone(s) | 33-499612809 | | | | |
| Courrier(s) électronique(s) | bailly@agroparistech.fr | | | | |
| Nationalité(s) | Française | | | | |
| Date de naissance | 15 Février, 1969 | | | | |
| Poste actuel | Enseignant-Chercheur en Géographie Physique, ICPEF¹, Département SIAFEE², AgroParisTech | | | | |
| Formation | | | | | |
| 2007 | Doctorat en Hydrologie, Université de Montpellier II, France | | | | |
| 2002 | DEA en Biostatistiques, Université de Montpellier II, France | | | | |
| 1992 | Ingénieur d'Agronomie, ENSSAA de Dijon, France | | | | |
| Expériences | | | | | |
| Depuis 2011 | Co-responsable du master "Eau et Agriculture" http://www.agroparistech.fr/Eau-et-agriculture-3179.html | | | | |
| Depuis 2007 | Enseignant-chercheur en géographie physique https://www.researchgate.net/profile/Jean-Stephane-Bailly AgroParisTech, Département SIAFEE, UMR LISAH, Montpellier, France | | | | |
| 1999-2007 | Expert télédétection en Hydrologie spatialisée ENGREF, Montpellier, France | | | | |
| 1995-1999 | Responsable BTSA Gestion et Maîtrise de l'eau (Gemeau) Enseignant en économie et hydraulique agricole EPLFPA, Saintes, France | | | | |
| 1993-1994 | Expert télédétection junior en occupation des sols Regional Center of Remote Sensing, Nairobi, Kenya | | | | |
| Distinctions | Meilleur article 2006. Mathematical Geosciences http://cosmo-mg.mcgill.ca/journal/best-papers | | | | |
| Compétences | | | | | |
| Langue(s) maternelle(s) | Français | | | | |
| Autres langues(s) | | | | | |
| <i>Auto évaluation Niveau européen</i> ^(*) | | | | | |
| Anglais | | | | | |
| Espagnol | | | | | |
| | Comprendre | | Parler | | Écrire |
| | Écouter | Lire | Prendre part à une conversation | S'exprimer oralement en continu | |
| | C1 | C1 | C1 | C1 | C1 |
| | A2 | B1 | B1 | B2 | A2 |

^(*) Niveau du Cadre européen commun de référence (CECR)

2 Stages, Collaborations et Contrats de recherche

Séjours scientifiques

| Année | Lieu | Durée | Résultat significatif |
|-------|-----------------------------|-----------|---|
| 2012 | Università di Padova (It) | 1 semaine | Intervention lors d'une école d'été EGU |
| 2013 | Université de Rimouski (Ca) | 1 semaine | Organisation d'une session aux IGARSS 1 Chap. Ouvr. ¹ |
| 2015 | Università di Padova (It) | 1 semaine | Soumission d'un projet EnviMED 1 ACL ² |

TABLE 1 – Séjours scientifiques

Collaborations non-académiques productives

Mes collaborations scientifiques sont nombreuses et diffuses et mes productions sont toutes collectives. Par conséquent, seules les collaborations en dehors du monde académique (industries, services d'état et collectivités) sont résumées dans le tableau 2.

| Années | Partenaire | Résultats significatifs |
|-----------|-------------------|---|
| 2007-2010 | SHOM ³ | 3 ACL |
| 2008-2013 | EADS-Astrium | 2 thèses co-financées, 6 ACL |
| 2010-2012 | Plan Rhône | 1 guide méthodologique |
| 2013-2015 | ONEMA | 1 thèse co-financée, 1 guide méthodologique |

TABLE 2 – Collaborations non-académiques productives

Contrats de recherche

Les 26 contrats de recherche et recherche-développement auxquels j'ai participé sont consignés dans le tableau 3. Le taux de réussite aux projets soumis est de 70% (mais sur de petits projets avec une subvention médiane par projet d'environ 20 k€). 75 % de mes projets sont des projets de recherche (R) et 25 % sont des projets de recherche-développement (RD). 11% de mes projets sont internationaux.

1. Chapitre d'ouvrage collectif

2. Article de revue à Comité de Lecture

3. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

| Année | Titre.Court | Mots.Clés | Appel.Offre | Rôle | Principaux Partenaires | Durée | Catégorie | Subvention (k€) | |
|-------|-------------|----------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------|-----------------|-------|
| 1 | 2015 | CARTEAUX | Téledétéction – réseaux | CHERCHEUR-AVENIR-LR | Partenaire | HSM LIRMM | 2 | RD | 98.5 |
| 2 | 2015 | RESIST | Téledétéction – hydraulique | DS-APT | Coord. | Uni. Padova GEAU | 1 | R | 3.50 |
| 3 | 2014 | MEXICO-IUMA | Analyse de sensibilité – Spatial | INRA-PS | Resp. Tâche | EMMAH SYSTEM | 2 | R | 26.0 |
| 4 | 2014 | THUB | Téledétéction –réseaux | PNTS | Partenaire | HSM LCPC | 2 | R | 15.0 |
| 5 | 2014 | URBIetORBI | Hydrologie Paysage | PEPSI-CNRS-MOMIS | Resp. Tâche | CNRS Avignon | 2 | R | 5.0 |
| 6 | 2013 | HYDROECO | Hydrologie Paysage | INRA-PS | Resp. Tâche | GEAU AMAP | 2 | R | 32.0 |
| 7 | 2012 | FLASH | LiDAR – Bathymétrie | SAMUEL-CHAMPLAIN | Coord. | Uni. Rimouski IRSTEA | 2 | R | 13.4 |
| 8 | 2012 | PARCEL-THR | Téledétéction – réseaux | PNTS | Resp. Tâche | ENSEGID | 2 | R | 10.0 |
| 9 | 2012 | FIP | Hydrologie Paysage | ONEMA-INRA | Coord. | IRSTEA | 3 | RD | 185.0 |
| 10 | 2012 | ALMIRA | Hydrologie Paysage | ANR | Resp. Tâche | BRGM INAT IAV INRGREF | 3 | R | 320.0 |
| 11 | 2011 | 3D-SOBLA | LiDAR – Bathymétrie | TOSCA-CNES | Resp. WP | Uni. Brest | 2 | R | 20.0 |
| 12 | 2011 | HYDRO-Pleiades | Téledétéction – réseaux | ORFEO-RCT-CNES | Coord. | MATIS | 1 | R | 3.0 |
| 13 | 2010 | HYD-THR | Téledétéction – Paysage | PNTS | Coord. | CNRS Meudon | 2 | R | 14.1 |
| 14 | 2010 | SENSIFLOOD | Incertitudes-Inondations | FEDER-PLAN RHONE | Resp. WP | GEAU | 3 | RD | 120.0 |
| 15 | 2010 | HYDRO-Pleiades | Téledétéction – réseaux | ORFEO-CNES | Coord. | CESBIO | 2 | R | 6.0 |
| 16 | 2008 | HYDRODIN | Téledétéction – hydraulique | ILEE | Resp. Tâche | GEAU | 2 | R | 19.8 |
| 17 | 2008 | MUSYCAL | Capteurs distribués hydrologie | ILEE | Coord. | IMFT EMA | 2 | R | 19.8 |
| 18 | 2008 | FLASH-FLOOD-Pleiades | Téledétéction – hydraulique | RT-CNES | Resp. WP | EMA | 3 | RD | 210.0 |
| 19 | 2007 | EPI | Incertitudes-Inondations | PUCA-MEDDEM | Resp. WP | GEAU COSTEL | 2 | RD | 100.0 |
| 20 | 2007 | PITI | Capteurs distribués hydrologie | Region Auvergne | Resp. WP | IMFT | 2 | RD | 23.0 |
| 21 | 2006 | EXFOLIO | LiDAR – Hydrologie | TOSCA-CNES | Resp. WP | MATIS | 2 | R | 60.0 |
| 22 | 2006 | FLIMAP | LiDAR – Hydrologie | APR-RDT-MEDD | Coord. | UR HYAX | 2 | RD | 12.0 |
| 23 | 2005 | BALAFF | LiDAR – Bathymétrie | PNTS | Coord. | SHOM IFREMER | 2 | R | 10.0 |
| 24 | 2004 | MOBHIDIC | Capteurs distribués hydrologie | ACI-ECCO-INSU | Resp. Tâche | | 3 | R | 57.0 |
| 25 | 2001 | ATS2-IFN | Téledétéction – Paysage | ATS-CNES-PLEIADES | Resp. WP | IFN | 1 | R | 5.0 |
| 26 | 2000 | LiDAR-GREF | LiDAR – Hydrologie | PNTS | Coord. | MATIS | 2 | R | 30.0 |

TABLE 3 – Liste des contrats de recherche (mise à jour : 26 novembre 2015)

3 Expertises

Organisation de colloques, sessions et écoles d’été

| Date | Événement | nb. participants | Rôle |
|------|---|------------------|---------------------|
| 2016 | ISARA ⁴ Biennial Symposium : ”Spatial Accuracy” | 120 | Organisateur |
| 2016 | EGU NH6.1 session : ”Remote Sensing & Hazards” | 30 | Chairman |
| 2014 | IEEE IGARSS session WE4.12 : ”LiDAR ⁵ Applications in Aquatic Ecosystems” | 30 | Chairman |
| 2014 | Colloque Francophone ”Drones et moyens légers aéroportés d’observation” | 60 | Comité scientifique |
| 2013 | EGU Summer School ”Understanding Earth-Surface Processes in the Alpine Environment from High Resolution Topography” | 30 | Comité scientifique |
| 2006 | Atelier REGLIS : ”LiDAR et surfaces continentales” | 60 | Comité organisation |

TABLE 4 – Organisation de manifestations scientifiques

| | Date | Doctorant | École Doctorale | Rôle |
|---|------|-----------------------|-----------------|-------------|
| 1 | 2012 | Tristan Allouis | SIBAGHE | Examinateur |
| 2 | 2012 | Nathalie Saint-Geours | I2S | Encadrant |
| 3 | 2012 | Florent Levavasseur | SIBAGHE | Encadrant |
| 4 | 2012 | Nathalie Thommeret | ED434 (Paris) | Encadrant |
| 5 | 2012 | Hani Abdallah | I2S | Encadrant |

TABLE 5 – Jurys de thèse

Jury de thèse

Activités d'édition et relecture

Mis à part ma participation depuis peu au comité de rédaction de la *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection* (RFPT)⁶ <http://www.sfpt.fr/rfpt/index.php/RFPT/>, mes activités d'édition scientifique sont une activité de relecteur (*reviewer*) occasionnel pour un ensemble de revues consignées par année depuis 2008 dans le tableau 6.

| Année | Reuves |
|-------|---|
| 2015 | IEEE JSTARS (2), RFPT, ISPRS |
| 2014 | JARS, RFPT (2), IEEE TGRS, ISPRS, EST, IJAEIS |
| 2013 | ESPL, Geomorphology, IEEE GRSL, Journ. of Geophy. Research, NHESS |
| 2012 | ESPL, IEEE TGRS, Journ. Hydrol., Remote Sensing, Journ. of Dig. Earth |
| 2011 | RSE (2), HESS, NHESS, IEEE TGRS, IEEE GRSL |
| 2010 | IEEE GRSL, ISPRS, IJAEIS |
| 2009 | IEEE TGRS |
| 2008 | EPSL, RFPT |

TABLE 6 – Relectures d'articles effectuées depuis 2008 (Nombre d'articles, si > 1, indiqué entre parenthèses)

Instances et évaluations diverses

| Années | Évaluations diverses |
|----------------|---|
| 2007-2009 | Évaluation de dossiers de bourses doctorales ABIES |
| 2010-2011 | Évaluation projets ANR (Systema, Blanc) |
| 2008,2010 | Évaluation projets GICC |
| 2011-2012 | Évaluation projets DIM-R2DS (Ile de France) |
| 2013 | Évaluation projets DAAD (Bourses Académiques Allemandes) |
| 2012,2013,2014 | Évaluation articles IEEE IGARSS (10 à 12) |
| Années | Instances diverses |
| 2007-2012 | Membre du Groupe Mission CNES - LiDAR spatial |
| 2008-2013 | Animateur du Groupe Thématique Hydrologie - CNES-Pleiades |
| 2013-2015 | Membre du Bureau élargi du département SIAFEE-AgroParisTech |
| 2014-2015 | Membre du comité de direction AgroParisTech-Montpellier |
| 2015 | Responsable de l'équipe "Sols et Paysages" de l'UMR LISAH |

TABLE 7 – Participation à instances et évaluations diverses

4. International Spatial Accuracy Research Association

5. Light Detection And Ranging

6. Revue créée en 1959 anciennement dénommée "Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie"

4 Activités de formation

Je suis IPEF⁷ sur une fonction d'enseignant-chercheur. Je suis responsable de l'UFR "Information Géographique pour les Territoires et l'Environnement" (IGTE). Je suis également co-responsable du parcours "Eau et Agriculture" de la mention de Master "Sciences de l'Eau" (LMD4 2015-2019), co-accréditée par l'Université de Montpellier, Montpellier Supagro et AgroParisTech. Mes enseignements actuels, précisés pour les 8 dernières années scolaires en figure 1, comportent 4 grands ensembles :

- des activités de formation continue sur des domaines scientifiques (public de chercheurs, spécialistes et bureaux d'étude),
- des activités d'encadrement et d'évaluation de travaux de masters et mastères spécialisés,
- des activités d'enseignement initial en master, mastère spécialisé et formation doctorale,
- une activité d'ingénierie pédagogique au quotidien (organisation), pas toujours comptabilisée dans les réalisés pédagogiques (Fig. 1), incluant une veille et soumission de projets à appel d'offre compétitif pour renforcer les formations en cours (Tab. 8).

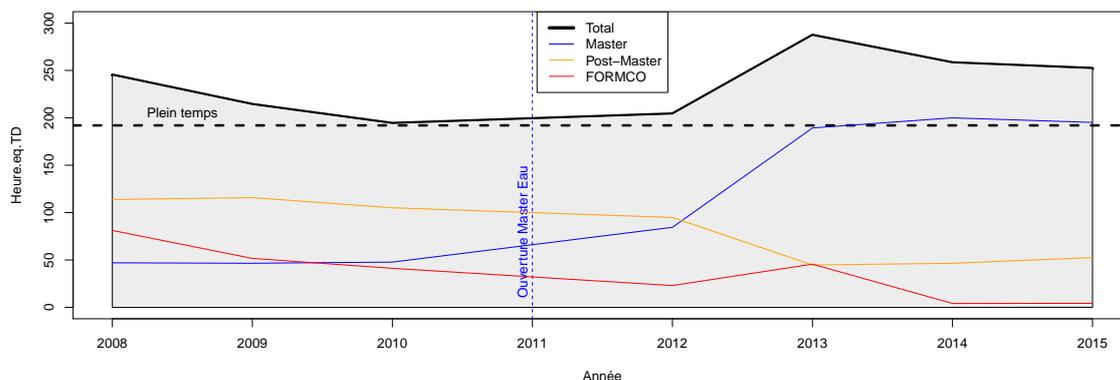


FIGURE 1 – Réalisés pédagogiques sur la période 2008-2015 (2011 interpolée).

Thématiquement, mes enseignements en "face à face" sont orientés vers les statistiques appliquées à l'analyse spatiale et à l'environnement et sur les méthodes d'exploration numérique de modèles.

| | Année | Titre Court | Appel Offre | Rôle | Principaux Partenaires | Succès |
|---|-------|----------------|----------------|------------|---|--------|
| 1 | 2015 | FREAMED | AUF | Resp. WP | IAV, INAT, INRGREF, SupAgro, Univ. ElKhemis | NON |
| 2 | 2015 | HALLEHYDRAU | CPER | Partenaire | SupAgro, UM | OUI |
| 3 | 2013 | Master WATSCAR | Erasmus-Mundus | Resp. WP | KU Leuven, VU Brussels, ITC Enschede, SupAgro | NON |
| 4 | 2013 | OMJ-EA | OMJ | Coord. | IAV, INAT | OUI |

TABLE 8 – Liste des réponses sur appel à projet de formation compétitif (mise à jour : 26 novembre 2015)

7. Ingénieur des Ponts de Eaux et de Forêts

5 Activités d'encadrement

J'ai eu l'occasion d'encadrer 1 stage post-doctoral, 6 doctorants et 26 étudiants de niveau M2, détaillés dans les sous-sections suivantes.

Encadrement de stages post-doctoraux

| Année | Nom | Titre | Durée | Co-Encadrants | Publications |
|-------|-----------------|--|---------|-----------------------------|----------------|
| 2013 | Valérie Laurent | QUASIUS : Quality and Uncertainty Assesment for Spatial Indicators of Urban Sprawl | 18 mois | N. Saint-Geours, J-P. Chery | 2 ACL (soumis) |

TABLE 9 – Tableau des encadrements de stage post-doctoral

Comités de pilotage de thèse

| Années | Doctorant | École Doctorale | Laboratoire(s) |
|----------------|-----------------------|-----------------|----------------|
| 2014-2015 | Manizheh Pourrahmati | I2S | TETIS |
| 2014-2015 | Jeanne Dollinger | SIBAGHE | LISAH |
| 2013-2014-2015 | Ibrahim Fayad | I2S | TETIS |
| 2012-2013 | Lamia Ziane | I2S | ITAP |
| 2010-2011 | Nathalie Saint-Geours | I2S | TETIS-GEAU |
| 2010-2011 | Florent Levavasseur | SIBAGHE | LISAH |
| 2009-2010-2011 | Hani Abdallah | I2S | TETIS |
| 2011 | Rouba Ziade | SIBAGHE | TETIS |
| 2008-2009-2010 | Nathalie Thommeret | ED434 | TETIS |
| 2009-2010 | Pauline Brémond | EDEG | GEAU |
| 2009-2010 | Denis Maréchal | SIS488 | TETIS-LGEI |
| 2009 | Lionel Bouvet | SIBAGHE | LISAH |

TABLE 10 – Tableau des participations à comité de thèse

Co-encadrement de thèses de doctorat

TABLE 11 – Tableau des encadrements de thèses soutenues

| Année | Doctorant | Titre | ED | Directeur(s) | Co-Encadrants | Co-publications | Situation | Note |
|-------|-----------|-----------------------|---|---------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---|
| 1 | 2012 | Nathalie Saint-Geours | Analyse de sensibilité de modèles spatialisés - Application à l'analyse cout-bénéfice de projets de prévention des inondations | I2S | C. Lavergne | F. Grelot | 5 ACL ^a , | Ingénieur R&D ITK 1er Prix de thèse GDR-Mascot- NUM |
| 2 | 2012 | Florent Levavasseur | Structure du paysage et fonctionnement hydrologique. Application aux réseaux de fosses en zone viticole méditerranéenne | SIBAGHE | P. Lagache- rie | F. Colin, A. Biarnès | 4 ACL, | IR ^b INRA ADR BAGHE 2010-2012 |
| 3 | 2012 | Hani Abdallah | Potentiel des capteurs LIDAR satellitaires pour le suivi altimétrique et bathymétriques des surfaces en eau continentales et côtières | I2S | N. Baghdadi | 4 ACL, | MdC ^c Univ. Antonin | |
| 4 | 2012 | Nathalie Thommeret | Analyse spatiale et modélisation des réseaux de ravines en secteurs de forte dissection. Effets d'échelle et non linéarités | ED434 (Paris) | C. Puech, B. Kayser | 2 ACL, | MdC ESGT | |
| 5 | 2011 | Denis Maréchal | Utilisation de l'imagerie satellitale à très haute résolution spatiale pour l'aide à la caractérisation du fonctionnement hydrologique des réseaux hydrographiques. Application à des bassins événements soumis aux crues éclair. | SIS ED488 | C. Puech, S. Sauvagnargues | P-A. Ayrat 1 ACL | IR IRSTEA contractuel | |
| 6 | 2008 | Denis Feurer | Géométrie 3D des lits de rivière par stéréophotogrammétrie à travers l'eau | SIBAGHE | C. Puech, A. Viau | Y. LeCoa- rer | 1 ACL, | IR IRD |

^a. Article à Comité de Lecture

^b. Ingénieur de Recherche

^c. Maître de Conférence

Encadrement de travaux de niveau Master 2

| | Année | Stagiaire | Titre | Formation | Co-Encadrant(s) | Publications |
|----|-------|-----------------------|--|--|------------------------|----------------|
| 1 | 2015 | Alberto Bolletin | Comparative study between SFM and TLS for the estimation of vegetation frontal area in open channels | Universita di Padova | F. Vinatier | |
| 2 | 2014 | Miloud Mezian | Apport de l'analyse fonctionnelle pour l'estimation de variables environnementales à partir de formes d'onde LiDAR | Université de Montpellier 2, Master 2 Physique et Ingénierie | N. Baghdadi | |
| 3 | 2014 | Cyril Portal | Implémentation de modules de géotraitements libres dans les outils d'analyse coût-bénéfice de projet de réduction du risque d'inondation | Université de Montpellier 2, Master 2 Geomatique | F. Grelot | |
| 4 | 2014 | Hanane Radoui | Potentiel de cartographie des réseaux de fossés et de leur densité à l'échelle de la région Languedoc-Roussillon | AgroParisTech, Master Eau | | |
| 5 | 2013 | Khawla Benitou | Végétation de fond de canal et rugosité : Test d'un nouveau protocole expérimental | AgroParisTech, Master Eau | G. Belaud, F. Vinatier | |
| 6 | 2013 | Anis Bouhdaoui | Effet d'une géométrie de fond irrégulière sur l'estimation bathymétrique à partir de formes d'ondes LiDAR | Université de Montpellier 2, Master Physique et Ingénierie | N. Baghdadi | 1 ACL |
| 7 | 2011 | Choukri Osman | Télé-détection et Cartographie des aménagements linéaires des paysages cultivés dans le Bassin versant de la Peyne | AgroParisTech-SILAT | | |
| 8 | 2010 | Adeline Bellet | Analyse de l'organisation spatio-temporelle des aménagements hydro-agricoles des paysages cultivés méditerranéens | Université de Grenoble | A. Biarnès | |
| 9 | 2010 | Mathias Guin | Est-ce qu'un calage-validation multi-critère et multi-local améliore les performances d'un modèle hydrologique distribué événementiel de crue ? | ENGEES | R. Moussa | |
| 10 | 2010 | Nicolas Lemarquand | Qualification des données satellitaires IceSAT pour l'altimétrie des cours d'eau en France continentale | ESGT | N. Baghdadi | 2 ACL |
| 11 | 2010 | Élodie Paris | Fusion de données topographiques pour la réalisation d'un MNT - Application à la modélisation de la crue du Niger | INSA - Strasbourg | G. Belaud | |
| 12 | 2009 | Carmen Games-Puertas | Caractérisation de l'eau et de la végétation de la surface à partir des données LIDAR du satellite ICESAT | Universidad Politecnica de Madrid | N. Baghdadi | |
| 13 | 2008 | Florent Panissod | Qualification de MNT LiDAR pour l'érosion : de la forme d'onde à la grille régulière. Application aux badlands de Draix | INSA-Strasbourg | S. Durrieu | 1 ACL |
| 14 | 2007 | T. Allouis | Analyse et traitement de trains d'ondes de retour LiDAR bathymétrique : application aux lames d'eau de faibles épaisseur | ESIEA | | 2 ACL |
| 15 | 2007 | Adermus Joseph | Qualification des données topographiques LIDAR haute résolution | AgroParisTech-SILAT | P. Mériaux | |
| 16 | 2007 | Sergio Reyes-Castillo | Cartographie des profondeurs d'eau en rivière par imagerie spatiale | Université de Montpellier 2, Master BGEA | C. Puech | |
| 17 | 2006 | J. Bourges | Caractérisation en unités hydromorphologiques du lit mineur de le Durance par imagerie THRS | EFREI | C. Puech | |
| 18 | 2006 | Audrey Lesaignoux | Modélisation et simulations de trains d'ondes LIDAR vert : application à la détection de faibles lames d'eau en rivière | Université de Montpellier 2 | | 1 ACL, 2 Conf. |
| 19 | 2004 | Lolita Arrighi | Stéréophotogrammétrie appliquée aux zones immergées pour la reconstitution de la topographie de lit de rivières : application à la durance | ENGEES | C. Puech | |
| 20 | 2004 | Claudia Dittrich | Développement d'une méthode d'interpolation curviligne dans le système d'information géographique ArcGIS pour l'analyse spatiale | Fachhochschule Fulda | N. Cadic | |
| 21 | 2003 | Anne-Lise Beauland | Élaboration de modèles numériques de surface et de terrain en zone rurale fortement aménagée à partir de données LiDAR | Université Paris VI | | |
| 22 | 2003 | Laetitia Comoretto | Analyse des chemins de l'eau d'un petit bassin rural sur MNT THR | Université de Montpellier 2 | | |
| 23 | 2003 | Djallal Saidouni | Qualité et classification de données LiDAR multiéchos pour l'extraction de réseaux d'écoulement en bassin rural aménagé | INSA - Strasbourg | | |
| 24 | 2002 | Dante Corti | Caractérisation de couverts forestiers à très haute résolution spatiale | ENGREF-SILAT | S. Durrieu | 1 conf. |
| 25 | 2002 | Séverine Prat | Caractérisation de végétation régulières par télé-détection à très haute résolution spatiale : Application à l'analyse texturale de parcelles viticoles | Université de Clermont Ferrand | P. Couteron | |
| 26 | 2000 | Sihem Sammoudi | Étude des connectivités des surfaces parcellaires aux fossés aide à la compréhension du fonctionnement hydrologique des marais atlantiques - Apports et limites de la télé-détection | Université Montpellier 2 | C. Puech | |

TABLE 12 – Tableau des encadrements de stages de niveau M2

6 Liste des publications indexées

Synthèse bibliométrique

Les tableaux 13 et 14 synthétisent ma production scientifique ainsi que les quelques métriques usuelles qui y sont attachées. Par la suite seuls les articles de revues à comité de lecture (référencés dans le WOK⁸ ou non) et ouvrages sont listés, par ordre chronologique.

| Type | Nombre |
|--------------------------------------|--------|
| 1 ACL référencés dans le WOK | 39 |
| 2 ACL non-référencés dans le WOK | 17 |
| 3 Ouvrages et chapitres d'ouvrages | 4 |
| 4 Conférences avec actes | 34 |
| 5 Conférences sans actes | 34 |
| 6 Rapports d'expertise et techniques | 12 |

TABLE 13 – Production scientifique (mise à jour : 26 novembre 2015)

| Métrique | Valeur |
|------------------------------|--|
| H-index | 14 |
| Nombre Citations depuis 2010 | 548 |
| Article le plus cité | 66 |
| IF ⁹ moyen | 2.34 |
| IF maximum | (<i>Progress in Physical Geography</i>) 3.59 |
| IF minimum | (<i>Int. Journal of Remote Sensing</i>) 1.14 |

TABLE 14 – Citations (selon ©Google Scholar le 26 novembre 2015)

Liste des articles de revues à comité de lecture référencées WOK

- ¹P. MONESTIEZ, J. BAILLY, P. LAGACHERIE et M. VOLTZ, « Geostatistical modelling of spatial processes on directed trees : application to fluvisol extent », *Geoderma* **128**, 3-4, 179–191 (2005).
- ²J. BAILLY, P. MONESTIEZ et P. LAGACHERIE, « Modeling spatial variability along drainage networks with geostatistics », *Mathematical Geosciences* **38**, Best paper award 2006, 515–539 (2006).
- ³J. BAILLY, M. ARNAUD et C. PUECH, « Boosting : a classification method for remote sensing », *International Journal of Remote Sensing* **28**, 1687–1710 (2007).
- ⁴J. BAILLY, P. LAGACHERIE, C. MILLIER, C. PUECH et P. KOSUTH, « Agrarian landscapes linear features detection from lidar : application to artificial drainage networks », *International Journal of Remote Sensing* **29**(12), 3489–3508 (2008).

8. Web Of Knowledge

9. Facteur d'Impact (IF) d'après ©JCR-Impact-Factors-List-2013

- ⁵C. DELENNE, S. DURRIEU, G. RABATEL, M. DESHAYES, J. BAILLY, C. LELONG et P. COUTERON, « Textural approaches for vineyard detection and characterization using very high spatial resolution remote-sensing data », [International Journal of Remote Sensing](#) **29**, 1153–1167 (2008).
- ⁶D. FEURER, J. BAILLY, C. PUECH, Y. LECOARER et A. VIAU, « Very high resolution mapping of river immersed topography by remote sensing », [Progress in Physical Geography](#) **32**, 1–17 (2008).
- ⁷A. BIARNÈS, J. BAILLY et Y. BOISSIEUX, « Identifying indicators of the spatial variation of agricultural practices by a tree partitioning method : the case of weed control practices in a vine growing catchment », [Agricultural Systems](#) **99**, 105–116 (2009).
- ⁸F. BRETAR, A. CHAUVE, J. BAILLY, C. MALLET et A. JACOME, « Terrain surfaces and 3d landcover classification from small footprint full-waveform lidar data : application to badlands », [Hydrology and Earth System Sciences](#) **13**, 1531–1544 (2009).
- ⁹V. SOTI, A. TRAN, J. BAILLY, C. PUECH, D. LOSEEN et A. BEGUE, « An assessment of optical earth observation systems performances for detection and monitoring of water bodies in arid areas », [International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation](#) **11**, 344–351 (2009).
- ¹⁰T. ALLOUIS, J. BAILLY, Y. PASTOL et C. LEROUX, « Comparison of lidar waveform processing methods for very shallow water bathymetry using raman, near-infrared and green signals », [Earth Surface Processes and Landforms](#) **35**, 640–650 (2010).
- ¹¹J. BAILLY, Y. LECOARER, P. LANGUILLE, C. STIGERMARK et T. ALLOUIS, « Geostatistical estimation of bathymetric lidar errors on rivers », [Earth Surface Processes and Landforms](#) **35**, 1199–1210 (2010).
- ¹²N. THOMMERET, J. BAILLY et C. PUECH, « Extraction of thalweg networks from dtms : application to badlands », [Hydrology and Earth System Sciences](#) **14**, 1527–1536 (2010).
- ¹³H. ABDALLAH, J. BAILLY, N. BAGHDADI et N. LEMARQUAND, « Improving the assessment of icesat water altimetry accuracy accounting for autocorrelation », [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing](#) **66**, 833–844 (2011).
- ¹⁴T. ALLOUIS, S. DURRIEU, P. CHAZETTE, J. BAILLY, P. FLAMAND et P. COUTERON, « A medium-footprint lidar for tree height and planting pattern assessment », [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing](#) **66**, 92–102 (2011).
- ¹⁵N. BAGHDADI, N. LEMARQUAND, H. ABDALLAH et J. BAILLY, « The relevance of GLAS-ICESat elevation data for the monitoring of river networks », [Remote Sensing](#) **3**, 708–720 (2011).
- ¹⁶J. BAILLY, F. LEVAVASSEUR et P. LAGACHERIE, « A stochastic algorithm to reconstruct artificial drainage networks from incomplete remote sensing delineations », [International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation](#) **13**, 853–862 (2011).
- ¹⁷A. CRABIT, F. COLIN, J. BAILLY, H. AYROLES et F. GARNIER, « Soft water level sensors for characterizing the hydrological behaviour of agricultural catchments », [Sensors](#) **11**, 4656–4673 (2011).

- ¹⁸H. ABDALLAH, N. BAGHDADI, J. BAILLY, Y. PASTOL et F. FABRE, « Wa-lid : a lidar waveform simulator for waters », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **9**, 744–748 (2012).
- ¹⁹P. LAGACHERIE, J. BAILLY, P. MONESTIEZ et C. GOMEZ, « Using scattered soil sensing field surveys to map the soil properties of a region. an example with airborne hyperspectral imagery », *European Journal of Soil Science* **63**, 110–119 (2012).
- ²⁰F. LEVAVASSEUR, J. BAILLY, P. LAGACHERIE, F. COLIN et M. RABOTIN, « Simulating the effects of spatial configurations of agricultural ditch drainage networks on surface runoff from agricultural catchments », *Hydrological Processes* **16**, 3393–3404 (2012).
- ²¹N. SAINT-GEOURS, C. LAVERGNE, J. BAILLY et F. GRELOT, « Change of support in spatial variance-based sensitivity analysis », *Mathematical Geosciences* **44**, 945–958 (2012).
- ²²H. ABDALLAH, J. BAILLY, N. BAGHDADI, N. SAINT-GEOURS et F. FABRE, « Potential of space-borne lidar sensors for global bathymetry in coastal and inland waters », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **6**, 202–216 (2013).
- ²³L. ABADY, J.-S. BAILLY, N. BAGHDADI, Y. PASTOL et H. ABDALLAH, « Assessment of quadrilateral fitting of the water column contribution in lidar waveforms on bathymetry estimates », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **11**, 813–817 (2014).
- ²⁴N. BAGHDADI, M. E. HAJJ, J. S. BAILLY et F. FABRE, « Viability statistics of glas-icesat data acquired over tropical forests », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **5**, 1658–1664 (2014).
- ²⁵N. BAGHDADI, G. LEMAIRE, I. FAYAD, J.-S. BAILLY, Y. NOUVELLON, C. LEMOS et R. HAKAMADA, « Testing different methods of forest height and aboveground biomass estimations from icesat-glas data in eucalyptus plantations in brazil », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **7**, 290–299 (2014).
- ²⁶A. BOUHDAOUI, J.-S. BAILLY, N. BAGHDADI et L. ABADY, « Modeling the water bottom geometry effect on peak time shifting in lidar bathymetric waveforms », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **11**, 1285–1289 (2014).
- ²⁷I. FAYAD, N. BAGHDADI, J.-S. BAILLY, N. BARBIER, V. GOND, M. E. HAJJ, F. FABRE et B. BOURGINE, « Canopy height estimation in french guiana using lidar icesat/glas data », *Remote Sensing* **6**, 11883–11914 (2014).
- ²⁸I. FAYAD, N. BAGHDADI, V. GOND, J.-S. BAILLY, N. BARBIER, M. ELHAJJ et F. FABRE, « Coupling potential of icesat/glas and srtm for the discrimination of forest landscape types in french guiana », *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **33**, 21–31 (2014).
- ²⁹S. J. GUMIERE, J.-S. BAILLY, B. CHEVIRON, D. RACLOT, L. L. BISSONNAIS et A. N. ROUSSEAU, « Evaluating the impact of the spatial distribution of land management practices on water erosion : case study of a mediterranean catchment », *Journal of Hydrologic Engineering* **20**, On line (2014).
- ³⁰F. LEVAVASSEUR, A. BIARNÈS, J. BAILLY et P. LAGACHERIE, « Time-varying impacts of different management regimes on vegetation cover in agricultural ditches », *Agricultural Water Management* **140**, 14–19 (2014).

- ³¹N. SAINT-GEOURS, J.-S. BAILLY et F. GRELOT, « Multi-scale spatial sensitivity analysis : application to a flood damage assessment model », *Environmental Modelling & Software* **60**, 153–166 (2014).
- ³²N. THOMMERET, J. BAILLY, J. BARDET, C. PUECH et B. KAISER, « Les dimensions fractales de réseaux vectoriels : méthodes d’estimation et robustesse des résultats », *Cybergeo : European Journal of Geography Systems, Modelling, Geostatistics, On line* (2014).
- ³³N. BAGHDADI, G. le MAIRE, J.-S. BAILLY, Y. NOUVELLON, K. OSÉ, M. ZRIBI, C. LEMOS et R. HAKAMADA, « Evaluation of alos/palsar l-band data for the estimation of eucalyptus plantations aboveground biomass in brazil », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **8**, 3802–3811 (2015).
- ³⁴J. DOLLINGER, C. DAGES, J.-S. BAILLY, P. LAGACHERIE et M. VOLTZ, « Managing ditches for agroecological engineering of landscape. a review », *Agronomy and sustainable development* **35**, 999–1020 (2015).
- ³⁵F. LEVAVASSEUR, P. LAGACHERIE, J. BAILLY, A. BIARNÈS et F. COLIN, « Spatial modeling of man-made drainage density of agricultural landscapes », *Journal of Land Use Science* **10**, 256–276 (2015).
- ³⁶A. OGILVIE, G. BELAUD, C. DELENNE, J.-S. BAILLY, J.-C. BADER, A. OLEKSIK, L. FERRY et D. MARTIN, « Decadal monitoring of the niger inner delta flood dynamics using modis optical data », *Journal of Hydrology* **523**, 368–383 (2015).
- ³⁷M. R. POURRAHMATI, N. BAGHDADI, A. A. DARVISHSEFAT, M. NAMIRANIAN, S. M. M. TEHRANI, I. FAYAD, J.-S. BAILLY et V. GOND, « Capability of glas/icesat data to estimate forest canopy height and volume in mountainous forests of iran », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **99**, OnLine (2015).
- ³⁸N. SAINT-GEOURS, F. GRELOT, J.-S. BAILLY et C. LAVERGNE, « Ranking sources of uncertainty in flood damage modelling : a case study on the cost-benefit analysis of a flood mitigation project in the orb delta, france », *Journal of Flood Risk Management* **8**, 161–176 (2015).
- ³⁹F. LEVAVASSEUR, J. BAILLY et P. LAGACHERIE, « Are ditch networks optimized for mitigating rill erosion in cultivated mediterranean landscapes? a digital experiment », *Land Use Policy* **50**, 441–448 (2016).

Liste des articles de revues à comité de lecture non référencées WOK

- ,
- ¹M. ARNAUD, J. BAILLY, G. BOURGEON et C. PUECH, « Le boosting : une méthode de classification non paramétrique », *Revue Internationale de Géomatique* **12**, 399–420 (2002).
- ²J. BAILLY, C. PUECH et J. MASSE, « Applications de l’imagerie à très haute résolution spatiale pour le suivi de l’hydromorphie du marais atlantique de bourgneuf », *Photo-interprétation* **1**, 22–30 (2003).
- ³C. PUECH, D. DARTUS, J. BAILLY et ESTUPINA-BORREL, « Hydrologie distribuée, télédétection et problèmes d’échelle », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* **172**, 11–21 (2004).

- ⁴D. RACLOT, C. PUECH, N. MATHYS, B. ROUX, A. JACOME, J. ASSELINE et J. BAILLY, « Photographies aériennes prises par drone et modèle numérique de terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de draix. », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* **1**, 7–20 (2005).
- ⁵A. LESAIGNOUX, J. BAILLY, T. ALLOUIS et D. FEURER, « Épaisseur d'eau minimale mesurable en rivière sur fronts d'ondes lidar simulés », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* **186**, 48–53 (2007).
- ⁶F. GRELOT, J. BAILLY, C. BLANC, K. ERDLLENBRUCH, P. MÉRIAUX, N. SAINT-GEOURS et R. TOURMENT, « Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice : enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations », *EAT Ingénieries numéro spécial*, 95–108 (2009).
- ⁷C. PUECH, N. THOMMERET, B. KAISER, J. BAILLY, A. JACOME, F. REY et N. MATHYS, « Mnt à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : des données aux tests d'application », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* **2**, 141–152 (2009).
- ⁸T. ALLOUIS, J. BAILLY, Y. PASTOL et C. L. ROUX, « Utilisation conjointe de trains d'ondes lidar vert et infrarouge pour la bathymétrie des eaux de très faible profondeurs », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* **191**, 52–61 (2010).
- ⁹F. PANISSOD, J. BAILLY, S. DURRIEU, A. JACOME, N. MATHYS, M. CAVALLI et C. PUECH, « Qualification de modèles numériques de terrain lidar pour l'érosion : application aux badlands de draix », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* **192**, 50–57 (2010).
- ¹⁰C. PUECH et J. BAILLY, « Cheminement des eaux superficielles et télédétection pour la modélisation hydrologique distribuée », *La Houille Blanche* **3**, 39–44 (2010).
- ¹¹N. LEMARQUAND, N. BAGHDADI et J. BAILLY, « Étude de la précision du satellite lidar glas-icesat pour l'altimétrie des eaux continentales », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* **2**, 45–52 (2011).
- ¹²N. SAINT-GEOURS, C. LAVERGNE, J. BAILLY et F. GRELOT, « Analyse de sensibilité de sobol d'un modèle spatialisé : application à l'outil acbde d'évaluation du risque d'inondation », *Journal de la Société Française de Statistique* **152**, 24–46 (2011).
- ¹³P. MARTIN, J. BAILLY et F. CERNESON, « Approche des relations entre eau et agriculture à agroparistech », *POUR - Revue du Groupe de Recherche pour l'Éducation et la Prospective* **213**, 203–214 (2012).
- ¹⁴C. PUECH, S. DURRIEU et J. BAILLY, « Airborne lidar for natural environments : researchs and applications in france », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* **200**, 54–68 (2012).
- ¹⁵C. DELENNE, J.-S. BAILLY et M. DESHAYES, « Testing the relevance of daily modis data to monitor mediterranean shrubland canopy water content with temporal cross-correlation analyses », *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems* **4**, 1–19 (2013).

¹⁶D. MARÉCHAL, P. AYRAL, J. BAILLY, C. PUECH et S. SAUVAGNARGUES-LESAGE, « Sur l'origine morphologique des écoulements par l'analyse d'observations hydrologiques distribuées. application à deux bassins versants cévenols (gard, france) », *Géomorphologie: relief, processus, environnement* **1**, 47–62 (2013).

¹⁷V. C. E. LAURENT, N. SAINT-GEOURS, J.-S. BAILLY et J.-P. CHÉRY, « Simulating geometric uncertainties of impervious areas based on image segmentation accuracy metrics », *South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics* **3**, Special Issue : 5th GEOBIA, 37–40 (2014).

Chapitres d'ouvrages collectifs

¹J. BAILLY, A. BIARNÈS et P. LAGACHERIE, « Headway in spatial data handling », in *Headway in spatial data handling*, sous la dir. d'A. RUAS et C. GOLD (Springer : Berlin Heidelberg, Montpellier, 2008) chap. Spatial simulation of agricultural practices using a robust extension of randomized classification tree algorithms, p. 91–108.

²A. JACOME, C. PUECH, D. RACLOT, J.-S. BAILLY et B. ROUX, « Extraction d'un modèle numérique de terrain à partir de photographies par drone », in *Extraction et gestion des connaissances spatio-temporelles. applications à la géomatique pour la gestion des territoires*, sous la dir. de C. RNTI (Cépaduès, 2008) chap. 6, p. 79–100.

³P. LAGACHERIE, C. GOMEZ, J. BAILLY, F. BARET et G. COULOUMA, « The use of hyper-spectral imagery for digital soil mapping in mediterranean areas », in *Digital soil mapping, bridging research, environmental application, and operation*, t. 2, sous la dir. de J. BOETTINGER, A. E. HARTEMINK et D. W. HOWELL, Progress in Soil Science II (Springer : Berlin Heidelberg, 2010) chap. 8, p. 93–102.

⁴J.-S. BAILLY, P. J. KINZEL, T. ALLOUIS, D. FEURER et Y. L. COARER, « Fluvial remote sensing for science and management », in *Fluvial remote sensing for science and management*, sous la dir. de P. E. CARBONNEAU et H. PIÉGAY (John Wiley & Sons, Ltd, 2012) chap. Airborne LiDAR Methods Applied to Riverine Environments, p. 141–161.

Deuxième partie

Démarche scientifique personnelle

7 Introduction

Je suis ingénieur agronome spécialisé sur l'eau vue par le génie rural de formation initiale, avec des expériences en télédétection appliquée à l'environnement en sortie d'école. Débarqué de l'enseignement technique agricole à l'ENGREF¹⁰ début 2000, j'ai d'abord trempé dans une soupe primitive en hydrologie spatialisée, où j'ai vite senti le besoin de mieux mesurer et représenter l'incertain, souvent sous-évalué, sinon oublié. Cela m'est apparu particulièrement marqué en spatial, de par la nature des données collectées, malgré tout imprécises et/ou incomplètes, ou à cause de la faiblesse des démarches de modélisation (pas que spatiales), même déterministes (identification statistique de paramètres). Je me suis donc vite intéressé aux incertitudes dites "réductibles" selon la typologie des incertitudes proposée par WALKER, HARREMOËS et al. [34] [62], où l'incertain, le hasard, n'est que l'alibi de notre ignorance ou de notre manque de moyens. J'ai alors choisi de renforcer mes compétences disciplinaires en modélisation statistique par la réalisation en 2002 d'un DEA en biostatistiques, point de départ de ma carrière scientifique, puis une thèse en 2007 en hydrologie spatialisée mais avec une forte composante méthodologique sous la direction de Claude Millier, bio-mathématicien. On peut donc me voir comme un "jeune" scientifique.

La compréhension de l'effet des hétérogénéités spatio-temporelles de surface sur la réponse hydrologique et l'adaptation par l'homme de ces hétérogénéités (pour une meilleure performance environnementale, une meilleure performance économique, etc) représentent un des enjeux majeurs de l'hydrologie qui dépasse le cadre de la seule recherche académique. Dans cette problématique très générale, j'ai aujourd'hui une place au sein d'un triangle "eau, statistiques et télédétection" mais avec ma racine disciplinaire bien ancrée en statistiques, en **géostatistiques** au sens large. Je suis donc plutôt ce que les anglo-saxons appellent un géographe physique, avec un objet d'étude privilégié : la géométrie des réseaux hydrographiques de surface dans les milieux cultivés ou naturels continentaux (**hydrographie**¹¹ **continentale**).

Ce choix d'objet de recherche a trois origines. La première vient d'une simple attirance en hydrologie pour l'hydraulique de surface (l'eau qui se "voit") et de ma proximité de départ avec un spécialiste des "chemins de l'eau". La seconde repose sur un impact supposé important des propriétés de réseaux hydrographiques (*drainage networks*) sur les transferts hydrologiques, hydrochimiques, sédimentaires et hydro-écologiques. Dans la communauté hydrologique, le concept de connectivité hydrologique qui émerge depuis les années 2000 revendique en particulier cette importance [24] et regroupe désormais les recherches sur les transferts hydrologiques au sens large. Pour reprendre une typologie récente de ce concept réalisée par BRACKEN, WAINWRIGHT et al. [145], mes activités de recherche sont centrées

10. École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts

11. vue comme la branche de la géographie ayant pour objet l'étude et la description des mers, des lacs et des cours d'eau présents à la surface du globe <http://www.cnrtl.fr/definition/hydrographie>

sur la connectivité hydrologique "structurelle" et "statique", conditionnée par le relief (*terrain connectivity*) et plus particulièrement sur la connectivité "directe", c.-à-d. concentrée en surface et supportée par les réseaux de cours d'eau, canaux et ravines, par opposition à la connectivité diffuse [40]. Ce choix considère enfin que la modification des réseaux par l'aménagement, les pratiques d'entretien (l'homme comme agent "géomorphique" selon PASSESALACQUA, BELMONT et al. [183]) offre des leviers d'action sur le contrôle et la modification des flux hydrologiques au sens large (eau, solutés, sédiments) comme hydro-écologiques [13, 83, 92, 170]. Ce dernier point rend vivace la part de génie rural qui m'a formé.

A l'instar de la météorologie, de l'écologie, je considère l'hydrologie comme une science phénoménologique qui s'intéresse à la représentation de flux hydriques (et éléments associés) internes et aux limites d'une matrice donnée vue comme un système, quelle que soit cette matrice (du continent à la carotte de sol). Cette vision de l'hydrologie, un peu dégagée de la vision unique de l'exutoire et donc du bassin versant, me semble être en phase avec des demandes sociétales plus ou moins émergentes (risques hydro-climatiques, eau verte [49], éco-hydrologie [28]) et où les sorties hydrologiques d'intérêt ne seraient plus au seul exutoire mais bien distribuées sur tout un espace, mais surtout où les flux hydrologiques sont également à considérer au premier ordre pour l'explication de la répartition d'autres ressources qui en dépendent : biomasse, biodiversité, sol, etc [176].

Au cœur de cette vision se pose alors le problème de la représentation de la structure spatiale¹² de la matrice étudiée, dont le résultat peut être réduit, quand on travaille sur des échelles dites intermédiaires, sous le terme de "mosaïque paysagère". "Mosaïque" est pris ici par commodité comme le terme imageant l'hétérogénéité spatiale de la matrice et "Paysage" faisant référence à la fois à 1) une dimension spatiale de matrice étudiée (une échelle), 2) au fait que cette hétérogénéité soit d'origine anthropique (paysage construit), dont les fonctions ou valeurs sont anthropo-centrées [96] et 3) au fait que chacun "filtre" les éléments du paysage pertinents selon les fonctions visées. Une hypothèse ici est que la répartition spatio-temporelle des flux qui quantifient les fonctions de la mosaïque et donc sa valeur [96] dépendent fortement de cette géométrisation (structure) de la mosaïque [126].

La définition de la structure de la mosaïque paysagère est abordée préférentiellement sous un angle de pavage de l'espace selon VERBURG, BERKEL et al. [110], la communauté "LUCC"¹³ développant nombre de modèles de types automates cellulaires définis selon un pavage et du fait de l'importance pour cette communauté des problématiques foncières. Pour l'étude de flux dans le paysage (abiotiques comme biotiques), la manière dont les pavés sont connectés (graphes) au travers ou grâce à des éléments physiques et linéaires qualifiés (réseaux) est bien moins fréquemment étudiée et les recherches sur ce point sont prioritaires selon BROWN, BAND et al. [146]. La géométrie des supports de transferts hydriques concentrés de surface dans la mosaïque paysagère, la connectivité "directe, statique et structurelle" [145], supports qualifiés de réseaux hydrographiques au sens large, incluant cours et plans d'eau, ravines, canaux et autres éléments contrôlant les flux de surface (terrasses, par exemple) constituent mes objets d'études, sans choix exclusif de terrains mais toujours à des échelles intermédiaires (mosaïque paysagère). Mon positionnement est donc à la liaison entre la communauté hydrologique travaillant sur la connectivité hydrologique et la communauté LUCC. Il est sur ce que BRACKEN, WAINWRIGHT et al. [145] ont identifié comme étant la

12. On parle aussi de la géométrisation de la matrice étudiée

13. Land Use and Land Cover Change

connectivité du paysage (*landscape connectivity*) pour l'hydrologie ou, au delà du relief, ce sont les éléments linéaires du paysage [83, 92] qui sont au centre des recherches.

Que ce soit pour les "réseaux" ou les "pavés", la définition de la structure de la mosaïque paysagère se heurte généralement à plusieurs verrous. Un premier verrou est l'absence de capteurs performants (verrou technologique). Le cas échéant, un second verrou est la difficulté d'identifier les structures spatiales (motifs) du fait d'observables souvent imprécis et/ou incomplets. De surcroît, pour des espaces en réseaux, cette identification de structures (modèles spatiaux géostatistiques par exemple) pose des questions méthodologiques particulières par rapport aux espaces $2D$ (voir CRESSIE, FREY et al. [48]). Un troisième verrou est l'absence d'un formalisme qui permette d'identifier *a priori* le mode de représentation optimal de la structure compte tenu des données (observables) disponibles sur cette structure, des incertitudes, et des processus que l'on souhaite simuler pour une dimension de matrice donnée (problème de modélisation) [50]. D'un point de vue plus cognitif ou finalisé, notre capacité à comprendre cette structure pour l'extrapoler et raisonner, adapter une nouvelle structure (organisation du paysage optimale) est également interrogée. Ces deux derniers points supposent implicitement d'identifier les liens entre structures et fonctions de la mosaïque paysagère, voire leur loi d'échelle lorsque l'on change l'étendue de la mosaïque étudiée. L'exploration de ces liens est préférentiellement envisagée par observations de terrain nombreuses (*lots of points*) par les chercheurs en connectivité hydrologique [145]. Des travaux par expérimentation numérique, tels ceux de VAN NIEUWENHUYSE, ANTOINE et al. [126], sont une alternative intéressante à ces démarches purement "terrain" nécessitant des moyens importants. Si ces travaux ne permettent bien sûr de découvrir de nouveaux processus, ils permettent cependant de hiérarchiser nos connaissances sur ces liens structure-fonction et ils sont intéressants à ce titre.

Pour déverrouiller tous ces problèmes, on peut ainsi chercher à faire des « allers-retours », de la méthode d'observation en passant par les méthodes d'estimation puis de simulation de structures spatiales jusqu'à l'analyse de sensibilité d'outils numériques qui simulent les flux d'intérêt résultant des structures spatiales simulées. Théoriquement, un cheminement idéal voudrait que l'on parte de l'identification des paramètres clés pour la simulation de flux afin de spécifier les qualités d'observation ou de prédiction spatiale requises (précision, résolution) sur les structures. Mais dans ce cheminement théorique, les structures spatiales des paramètres spatiaux et leurs poids au regard d'autres paramètres sont supposés connus [50] or, dans la pratique ce n'est que rarement le cas, d'où un cheminement moins univoque.

Ce cheminement, réalisé à double sens, entre observation et inférence du lien structure spatiale-fonction hydrologique de la mosaïque paysagère, avec la **modélisation spatiale stochastique** et la **représentation d'incertitudes** comme points de liaison [84], est ma démarche scientifique, focalisée sur la géométrie des réseaux hydrographiques (Fig. 2). La géométrie désigne ici aussi bien le tracé du réseau dans l'espace topographique ou géographique (sa forme), que les propriétés géométriques locales du réseau qui impactent les flux hydrologiques (par exemple, sa largeur).

Pour le premier axe (Fig. 2), l'**identification de structures** spatiales est usuellement abordée de manière exclusive, soit selon une approche purement météorologique (télé-détection)

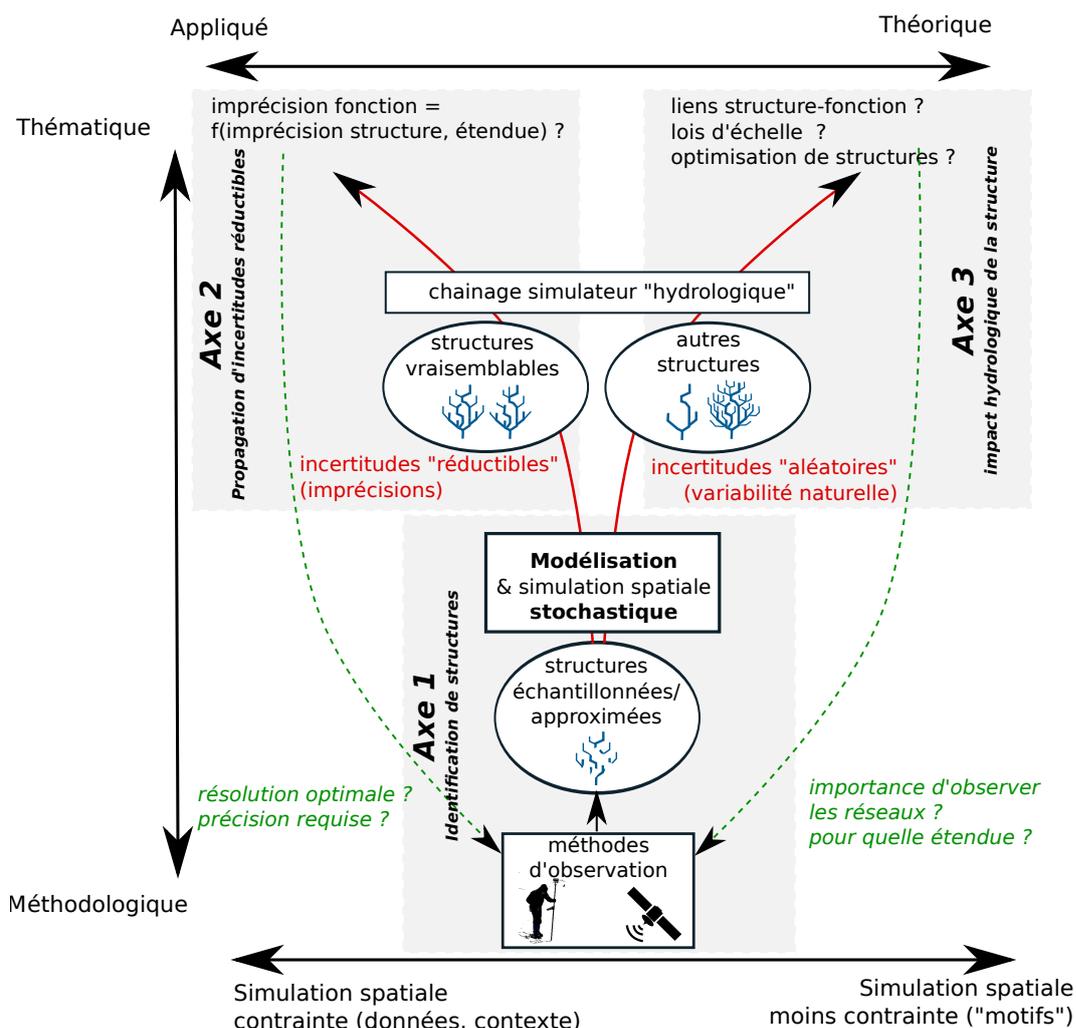


FIGURE 2 – Démarche scientifique personnelle

soit selon une approche de modélisation spatiale probabiliste (géostatistique) sur données spatialement échantillonnées. Une originalité de ma démarche sur cet axe est d'avoir cherché à marier ces deux approches en partant de formalismes proposés par la géostatistique [36, 84], avec toutes les limites que ces formalismes comportent (stationnarité) mais qui permettent d'analyser et de simuler des structures à partir d'observables non exhaustifs et imprécis.

Pour l'une ou l'autre de ces approches, la quantification d'incertitudes de mesure, d'interpolation, n'est pas toujours immédiate (problème de mise à l'échelle entre données, d'anisotropies, d'échantillonnage dans les espaces d'incertitude, etc). J'ai donc, dans un deuxième axe (Fig. 2), développé des méthodes de **représentation** et de **propagation des incertitudes réductibles** sur la structure de réseaux hydrographiques, en me basant entre autre sur des techniques de simulation spatiale [149]. J'ai ainsi cherché à franchir un pas supplémentaire, plus aval sur ces questions d'incertitudes et au delà de la production de cartes : quel est réellement leur impact sur la qualité des processus que l'on veut simuler (Analyse d'incer-

titude)? A l'inverse, la qualité du processus simulé est-il plus sensible aux incertitudes sur la structure spatiale d'un paramètre que d'autres incertitudes sur d'autres paramètres (Analyse de sensibilité)? Et comment ces conclusions diffèrent-elles avec l'étendue spatiale de la mosaïque étudiée? Peut-on, par inversion du problème, apporter des éléments sur le degré de précision et la résolution requis pour la spatialisation d'un paramètre?

Dans un troisième axe (Fig. 2), j'ai essentiellement étendu les approches de simulation spatiale développées, moins conditionnées à un contexte réel et plus basées sur la reproduction de "motifs" pour quantifier à l'aide d' **expériences numériques**, l'**impact hydrologique de structures de réseaux hydrographiques**. Dans une approche plus prospective et cognitive, je me suis dans ce dernier axe, intéressé de fait à des incertitudes non réductibles, aléatoires, (*aleatory*) pour reprendre la typologie d'incertitudes de WALKER, HARREMOËS et al. [34], sur de possibles futurs réseaux.

Le bilan de mes travaux de recherche exposé ci-après suit donc la démarche exposée en figure 2 suivant 3 axes et avec comme fil rouge la modélisation des incertitudes sur la structure spatiale de réseaux hydrographiques, depuis l'observation jusqu'à leur impact sur la représentation de flux (hydriques).

J'expose ensuite mes perspectives de recherche pour les prochaines années qui suivent cette même démarche étendue à une problématique de structure spatio-temporelle des réseaux et se focalisent sur les réseaux hydrographiques anthropiques des milieux cultivés, suivant une posture plus cognitive et moins méthodologique.

8 Bilan des travaux

8.1 Identification de structures de réseaux hydrographiques

Une originalité de ma démarche d'identification de structures de réseaux hydrographiques est d'avoir chercher à marier des approches purement métrologiques (télédétection) et des approches de modélisation géostatistique. Je présente cependant les développements réalisés suivant ces deux approches, bien que dans le détail des développements présentés, on peut percevoir comment une approche nourrit l'autre. Par ailleurs, les méthodes d'observation (capteurs et algorithmes) et les modèles spatiaux à mobiliser diffèrent suivant que l'on étudie le tracé global du réseau ou ses propriétés géométriques locales. Ces deux niveaux de structure des réseaux hydrographiques seront donc présentés également successivement dans les sous-sections suivantes.

8.1.1 Structure de réseaux hydrographiques par télédétection

Tracés de réseaux L'extraction de réseaux à partir de données spatiales est née avec le précambrien des SIG ¹⁴ et des MNT ¹⁵ [5]. Ce tracé peut désormais s'envisager à partir d'informations topographiques (MNT au sens large) issues de multiples capteurs de télédétection (LiDAR, n-uplet d'images optiques spectroscopiques, interférométrie radar), toujours plus résolues, ou plus directement, sur images radars ou optiques (surfaces en eau pour les cours d'eau permanents, objets canalisant les écoulements (fossés, ravines, etc) pour les réseaux plus intermittents [147]).

Tracé de réseaux depuis des MNTs La littérature sur l'extraction de réseaux hydrographiques depuis les MNT est abondante, les algorithmes nombreux et éprouvés pour des MNTs raster [81, 152]. Cependant, même pour ces MNTs raster, il y avait (et il y a toujours) deux questions ouvertes auxquelles je me suis confronté sur ces méthodes : comment, à partir d'un schéma de drainage sur le MNT, quel qu'il soit (schémas D_8 , ρ_8 , $D_\infty \dots$), s'affranchir d'un seuil arbitraire de surface amont drainée pour initier le tracé du réseau vers l'aval ? Ces méthodes sont elles encore applicables à grande échelle, sur les bassins de tête, pour représenter des réseaux fortement contraints par l'aménagement (hydro-agricole) ?

La première question a été explorée au cours de travaux de thèse de THOMMERET [142]. La méthode développée, appliquée aux réseaux de talwegs de badlands sur des MNT métriques, propose un seuil de déclenchement du tracé du réseau lorsque qu'une concavité significative du terrain apparaît, significativité calculée statistiquement au regard de la structure spatiale du bruit sur l'altitude (Fig. 3-a) [109]. Cette méthode reprend l'idée de TARBOTON et AMES [23] selon laquelle une corrélation entre la texture topographique et la densité de drainage permet d'adapter statistiquement le seuil d'initiation du tracé du réseau en fonction de la texture topographique du MNT. Partant de cette idée, TAROLLI et DALLA FONTANA [95] l'ont mise en œuvre en appliquant un seuillage de la courbure du terrain pour identifier les têtes de ravines de bassins de tête des dolomites. La méthode détaillée dans THOMMERET, BAILLY et al. [109] a quant à elle pour avantage 1) de proposer un critère objectif d'initiation du tracé basée sur la texture topographique locale suivant un indice de convergence spécifique

14. Système d'Informations Géographiques

15. Modèles Numériques de Terrain

développé initialement par KISS [37], plus robuste que la courbure en plan du terrain [15, 54], et surtout 2) la méthode proposée minimise les effets liés au bruit sur l'altitude contenu dans le MNT. Ces travaux ont ensuite été poursuivis dans les travaux de thèse de MARÉCHAL [121] qui a cherché à appliquer les mêmes principes (détection de ravines "significatives" sur les versants cévenols puis reconnexion suivant un schéma de drainage arborescent amont-aval) mais suivant un schéma de drainage résultant d'un modèle numérique de terrain représentés par des facettes triangulaires (triangles irréguliers de Delaunay) maillant un nuage de points topographiques (nuages de points LiDAR ou issus de corrélation d'images). Cette méthode a été mise en oeuvre suivant un algorithme, détaillé dans MARÉCHAL, BAILLY et al. [104], proche de celui proposé par ZHOU, PILESJÖ et al. [128] et dont on peut visualiser un résultat en figure 3-b.

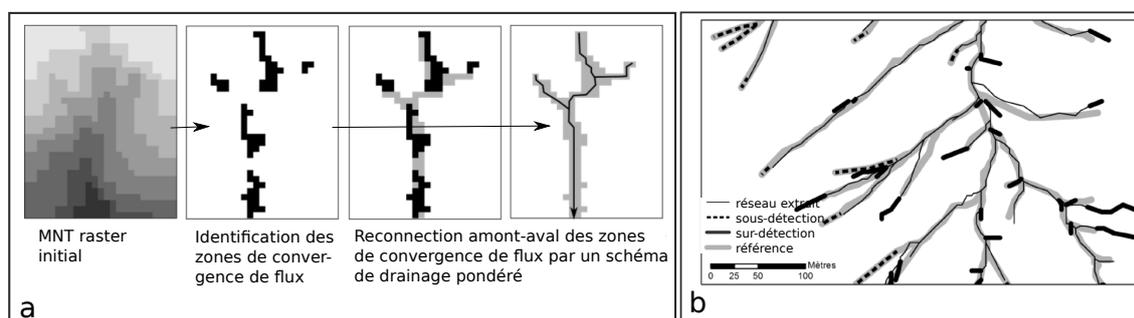


FIGURE 3 – a- Illustration de la méthode d'initiation du tracé de réseau (ravine significative) sur MNT raster [109]; b- Exemple de résultat de tracé automatique obtenu à partir d'un MNT par facettes triangulaires pour un réseau de ravines du bassin du Cartau-Cévennes (30) [121]

Pour la seconde question, je me suis focalisé sur des données soit issues de capteurs LiDAR topographiques aéroportés [64, 82] au début de leur déploiement, en 2001, soit issues de stéréophotogrammétrie à partir d'images hautement résolues [72]. Les schémas usuels d'extraction de réseaux (algorithmes de drainage) à grande échelle sur des milieux fortement aménagés se sont révélés inapplicables [32], du fait du manque de résolutions des MNT par rapport à la dimension des objets 'réseau' et du fait de la perturbation importante de la représentation du terrain par la végétation à cette échelle. J'ai donc cherché à exploiter autrement ces données topographiques hautement résolues en cherchant plutôt à détecter directement les objets qui canalisent les écoulements de surface tels que les **fossés** et **terrasses** [131, 191], sur les paysages viticoles languedociens. Pour les fossés [64], j'ai développé une méthode qui exploite le nuage de points LiDAR [183] à proximité des limites parcellaires fournie par une base de données externe. Des courbes correspondant aux profils de terrain transversaux aux limites parcellaires (Fig. 4-a) sont classées par apprentissage (classifieurs CART et Random Forest) [21] sur la base d'une décomposition de ces courbes par ondelettes. Sur un bassin test comprenant 11 km linéaires de fossés, cette méthode a permis de détecter 60 % du linéaire et laisse donc de larges portions de réseaux déconnectées (Fig. 4-b). Des travaux similaires

récents selon des approches géomorphométriques raster ont révélé une meilleure détection mais dans des contextes de réseaux de fossés beaucoup plus larges et peu végétalisés [169] et sans objectif d'aboutir *in fine* à un réseau connexe. Pour l'extraction de terrasses, j'ai appliqué un algorithme de traitement d'image, 'Line Segment Detector' (LSD) [157] issu de VON GIOI, JAKUBOWICZ et al. [111], sur des images monochromatiques de variations de relief local. Cette méthode a été appliquée en partant de MNT LiDAR ou issus de couples d'images Pleiades. Elle permet de détecter 95 % du linéaire de terrasses sur un MNT LiDAR [191].

Tracé de réseaux à partir d'images optiques L'identification de réseaux hydrographiques à partir d'images de télédétection est largement référencée dans la littérature pour des cours d'eau permanents et plans d'eau de grandes dimensions, compatibles avec la résolution des données de télédétection radar ou optique [135, 19]. Là aussi, les progrès en résolution spatiale des capteurs permettent l'identification d'éléments de réseaux de plus en plus fins, de plus en plus amont. Les principes d'identification des réseaux permanents reposent soit sur une très faible réflectance de l'eau dans le proche-infra-rouge ou de faibles coefficients de rétro-diffusion des ondes radar sur des eaux peu rugueuses en surface. Dans cette mouvance, ma contribution a principalement porté sur l'extraction de surfaces en eau (fleuves, rivières et plans d'eau) à partir d'images optiques Infra-Rouge couleur. J'ai participé au développement de deux approches.

Dans une première approche, des méthodes de classification de segments d'images multispectrales hautement résolues sur des rivières en tresses [63, 69] ont été développées. Dans les travaux de OGILVIE, BELAUD et al. [182], les surfaces en eau étaient extraites selon une approche pixel par simple seuillage d'indices, rapports entre les plans de base dont l'infrarouge (indices NDMI¹⁶, MNDWI¹⁷). L'emploi conjoint de ces rapports qui minimisent les effets de distorsion radiométrique au sein de l'image [93, 182] permet d'identifier des eaux de nature différente (eau libre, eau sous végétation aquatique, eau turbide). L'automatisation de ce type de traitement a par exemple permis de traiter des images hebdomadaires MODIS (résolution de 500m) sur le Delta Intérieur du Niger (DIN) afin d'estimer la dynamique des surfaces en eau et de connectivité du réseau dans la plaine d'inondation au cours de chaque crue annuelle. Les résultats obtenus sont utilisés pour caler et valider un modèle hydraulique du DIN [182].

Dans une deuxième approche, j'ai testé l'extraction directe [45] sur images optiques infrarouge couleur à résolution sub-métrique d'objets du paysage cultivé qui marque la présence de réseaux intermittents : les fossés agricoles et de bords de route. Ces extractions ont été réalisées suivant une grille de photo-interprétation ou suivant un algorithme proposé par CHRISTOPHE et INGLADA [58]. Sur la base de ces explorations peu convaincantes dans le contexte de paysage testé (petits fossés très végétalisés), la possibilité d'utiliser les bases de données historiques de photos aériennes (géo-portail de l'IGN), y compris panchromatiques, a été explorée. Des tests [167] ont été récemment réalisés sur un échantillon de carreaux de 1 km² de la région Languedoc-Roussillon : 70 à 95 % du linéaire de fossés a pu ainsi être correctement identifié avec un taux de sur-détection de 7 % en exploitant notamment des

16. Normalised Difference Moisture Index

17. Modified Normalised Difference Water Index

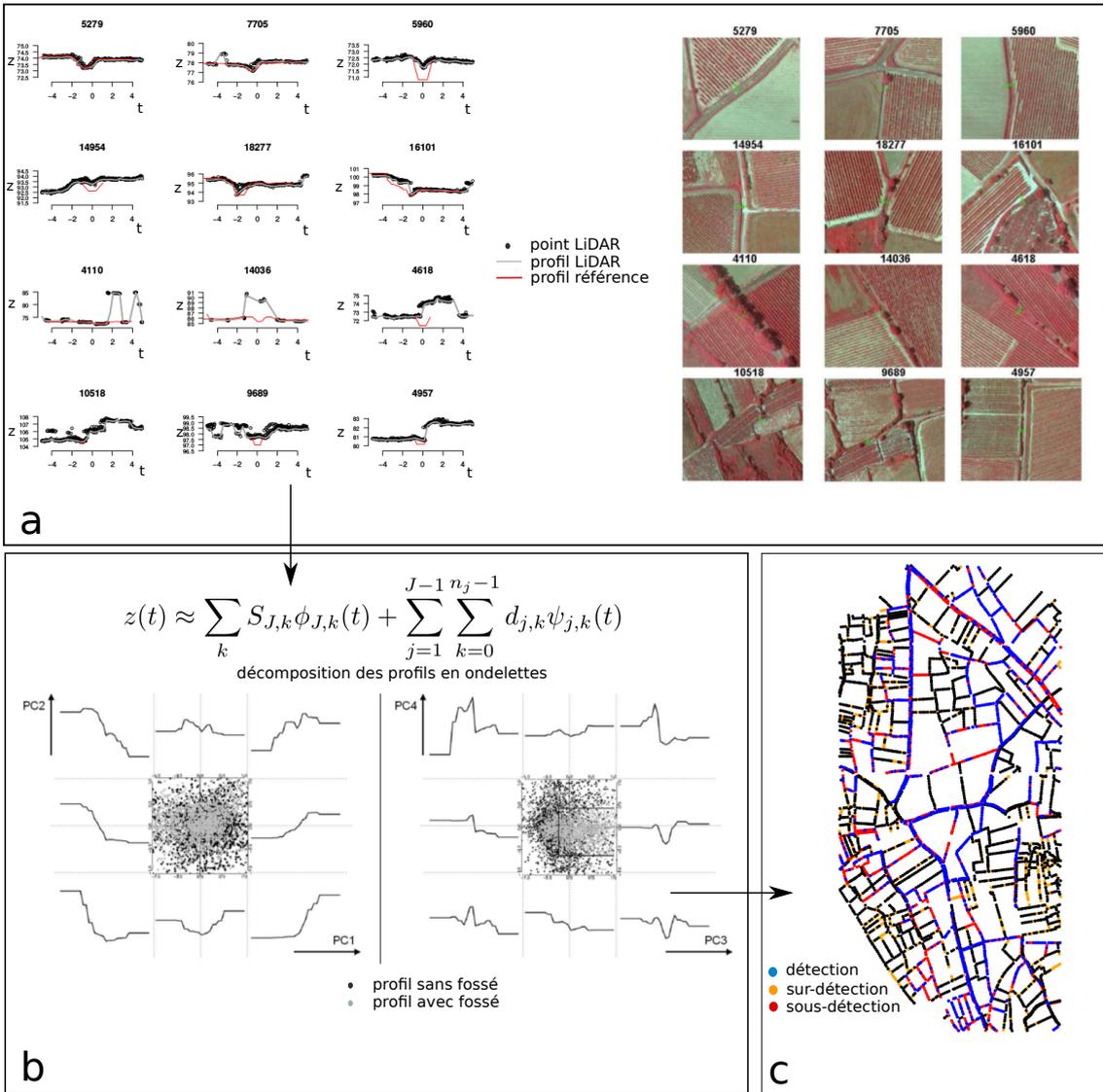


FIGURE 4 – a- Exemples représentatifs de 12 profils LiDAR de terrain $z(t)$ transversaux aux limites parcellaires, avec z altitude en m et t abscisse le long du profil en m b- transformée en ondelettes de Haar des profils puis classification des profils suivant les 2 premiers plans factoriaux des coefficients d'ondelettes c- Résultat de détection obtenu sur les limites parcellaires d'un bassin viticole de 2.6 km^2 (34) [64]

campagnes de photos aériennes sur des périodes peu végétalisées et à faible élévation solaire (effets d'ombre portée linéaire), conditions les plus favorables à l'identification de fossés sur images optiques [45]. Toutefois, ces résultats (non publiés) intégrant des données acquises sur une période large, il est difficile d'identifier la cause des sous ou sur-détections (mauvaise vision ou changement de réseau au cours du temps ?). La question de l'extraction automatique des réseaux de fossés par imagerie THRS optique reste donc ouverte.

Propriétés géométriques locales de réseaux par télédétection Les propriétés géométriques locales intrinsèques des réseaux (largeur de plein bord, profondeur, pente, etc) peuvent signer dans une situation d'équilibre géomorphologique le régime d'écoulement [2, 3, 162]. Elles conditionnent également leurs capacités de stockage et transport hydraulique [88] et donc les conditions de débordement ainsi que potentiellement d'autres processus bio-géochimiques [175] ou hydro-sédimentaires [42], liés au périmètre mouillé ou au rayon hydraulique. En complément, différents types d'observations spatiales permettent de décrire les conditions hydrauliques et d'analyser ces propriétés. L'altimétrie donne ainsi une altitude absolue des surfaces libres, la détection des surfaces en eau indique les limites du terrain correspondant à ces altitudes, la bathymétrie donne une profondeur relative. La combinaison de 2 ou 3 de ces observations permet ainsi de reconstituer localement le relief immergé. L'observation complémentaire de largeurs, de l'altimétrie et de la bathymétrie le long de réseaux hydrographiques contribue donc à une meilleure description physique des réseaux pour simuler leur fonctionnement.

Un de premiers stages d'étudiant que j'ai encadrés a porté sur la cartographie automatique de largeurs de réseaux de canaux et fossés en zone humide à partir d'images hyper-spectrales (CASI) haute résolution [22, 30]. Depuis, des techniques de spatialisation par télédétection optique (passive et active) permettant de reconstituer la cote d'eau (altimétrie LiDAR) [119, 112], la profondeur de l'eau ou la topographie de surface immergées (bathymétrie) le long de surfaces immergées à un instant donné [68] ont été exclusivement investiguées.

En **altimétrie**, j'ai principalement cherché à caractériser les possibilités de suivi des niveaux d'eau par le système LiDAR satellite GLAS-IceSAT. Ce système a été étudié comme alternative de meilleure résolution spatiale aux altimètres RADAR [112, 113] du fait de la faible divergence des faisceaux lasers satellitaire qui apporte une résolution de la mesure à la surface accrue d'un facteur 50 à 100 par rapport aux altimètres radar (empreinte à la surface de 60 m pour les lidar GLAS sur ICESat)¹⁸. Conjointement à d'autres travaux [94, 127], on a observé que pour de grandes surfaces planes, les mesures GLAS moyennées permettent une estimation des niveaux d'eau peu biaisée (-5 cm à + 7 cm). L'analyse réalisée par LEMARQUAND, BAGHDADI et al. [119] a pu démontré que le délai pourtant très court (0.2 s) d'auto-ajustement de la fonction de gain¹⁹ des photodétecteurs du système GLAS lorsque l'on passe d'un milieu peu réfléchissant (berges) à très réfléchissant (eaux calmes avec une visée au quasi-Nadir) dégrade la qualité des premières mesures le long de la trace sur 1.4 km environ. De ce fait, malgré une forte résolution spatiale et une forte cadence de la mesure, une erreur quadratique moyenne de 1.14 m sur l'estimation des niveaux de cours d'eau par GLAS/ICESat a été calculée pour l'ensemble des fleuves et rivières de France métropolitaine d'une largeur supérieure à 60 m [113]. Ces résultats rendent peu applicable le suivi altimétrique de plans d'eau et rivières étroits suivant des systèmes LiDAR spatiaux à gain ajustable.

18. Gain en résolution du LiDAR par rapport au radar qui restera vrai dans l'avenir : 100 m de résolution pour SWOT (radar) et pour 10 m IceSAT-2 (LiDAR)

19. Propriété du récepteur LiDAR qui résume la fonction de transfert entre puissance lumineuse et puissance électrique enregistrée

En **bathymétrie**, j'ai contribué au développement de trois approches de télédétection.

En première approche, dans le travaux de thèse de FEURER [67], la reconstitution du relief immergé de rivières par stéréo-photogrammétrie à travers l'eau a été testée depuis une plate-forme aéroportée rapprochée sur des cours d'eau à fond texturé (galets) et aux eaux peu turbides. Contrairement aux méthodes pionnières développées par FRYER [7] qui introduit un simple facteur correctif pour tenir compte des effets de réfraction à l'interface air-eau, une méthode de correction des mesures brutes détaillée dans FEURER [67] est effectuée utilisant la notion de point apparent (intersection de trajets optiques sans réfraction) et des contraintes *a priori* sur le profil topographique de la rivière (décroissance de l'altitude des points de bordure de lit mouillé de l'amont vers l'aval). Ces contraintes et notions permettent le calcul *a posteriori* des positions de la surface de l'eau qui permettent ensuite de corriger les effets de réfraction des trajets optiques réels à l'interface air-eau, responsables de la dispersion des mesures brutes. La méthodologie développée avec des images sub-centimétriques sur un tronçon du Gardon restitue un relief immergé avec un écart-type d'erreur de mesure en altitude de 3 cm [67]. Dans un cadre plus opérationnel, sur des images de 8 cm de résolution acquises par ULM sur un tronçon de la Durance, un écart-type d'erreur de mesure de l'altitude de 22 cm (sans biais) des surfaces immergées a été observé.

En deuxième approche, je me suis intéressé à la régression de la bathymétrie (approche statistique) à partir d'informations spectrales sur rivière du fait de la loi de LAMBERT [1], c.-à-d. de la décroissance exponentielle de la réflectance dans le visible avec la profondeur d'eau, toutes choses étant égales par ailleurs. Ma contribution sur ce point où désormais la littérature est foisonnante [76, 90] a porté sur deux aspects : l'utilisation d'une imagerie drone offrant une haute résolution de restitution bathymétrique, compatible avec les besoins de modélisation hydro-écologique habitat-poisson [31, 38, 59] et l'utilisation conjointe du trait de rive extrait de l'image dans un modèle d'estimation spatiale de profondeur d'eau suivant un système de cokrigage ou de krigeage à dérive externe [44]. L'image est dans ce cas une co-variable d'interpolation des données bathymétriques terrain et du trait de rive. Les précisions bathymétriques obtenues sur différentes expériences sur la Durance sont comprises entre 7 et 10 cm avec 80 % de variabilité expliquée.

Enfin, en troisième approche, la plus intensément explorée, j'ai cherché à exploiter des signaux de LiDAR vert ou LiDAR bathymétrique [132], soit empiriquement, soit sur des signaux (trains d'onde²⁰) LiDAR simulés par des modèles de transfert radiatif, et ce en ciblant les faibles profondeurs d'eau en rivière. Les méthodes de traitement de données LiDAR bathymétriques reposent sur l'identification dans les trains d'onde des positions temporelles de la surface et du fond de l'eau (informations permettant ensuite le calcul de la profondeur d'eau). Cette identification repose sur des algorithmes de détection de pics ou sur l'ajustement du train d'ondes par un mélange de Gaussiennes [132, 187]. Dans les 2 cas, pour des faibles hauteurs d'eau, les pics de fond et surface se confondent et la bathymétrie est impossible.

Sur la base d'expériences de levés LiDAR bathymétriques aéroportés effectués sur rivière (sur le Gardon, première expérience en Europe) ou sur des eaux littorales (Morbihan, données ©SHOM), de nouveaux algorithmes d'extraction de la bathymétrie des trains d'onde LiDAR pour les faibles profondeurs ont été proposés. Une première méthode détaillée dans AL-

20. puissance lumineuse en fonction du temps

LOUIS, BAILLY et al. [98] fusionne les trains d'onde infra-rouge et vert des capteurs LiDAR bathymétriques pour mieux positionner la surface (Fig. 5-a). Une autre méthode proposée par ABADY, BAILLY et al. [155] ajuste les trains d'onde par des formes mathématiques plus adaptées à la forme théorique des trains d'onde que les Gaussiennes. Enfin, une dernière méthode, supervisée, par régression de courbes basée sur des méthodes factorielles a été également proposée par ALLOUIS, BAILLY et al. [98] puis MEZIAN [165]. Toutes ces méthodes se sont révélées plus performantes pour les faibles profondeurs d'eau (< 2m), profondeurs cibles pour nombre de cours d'eau.

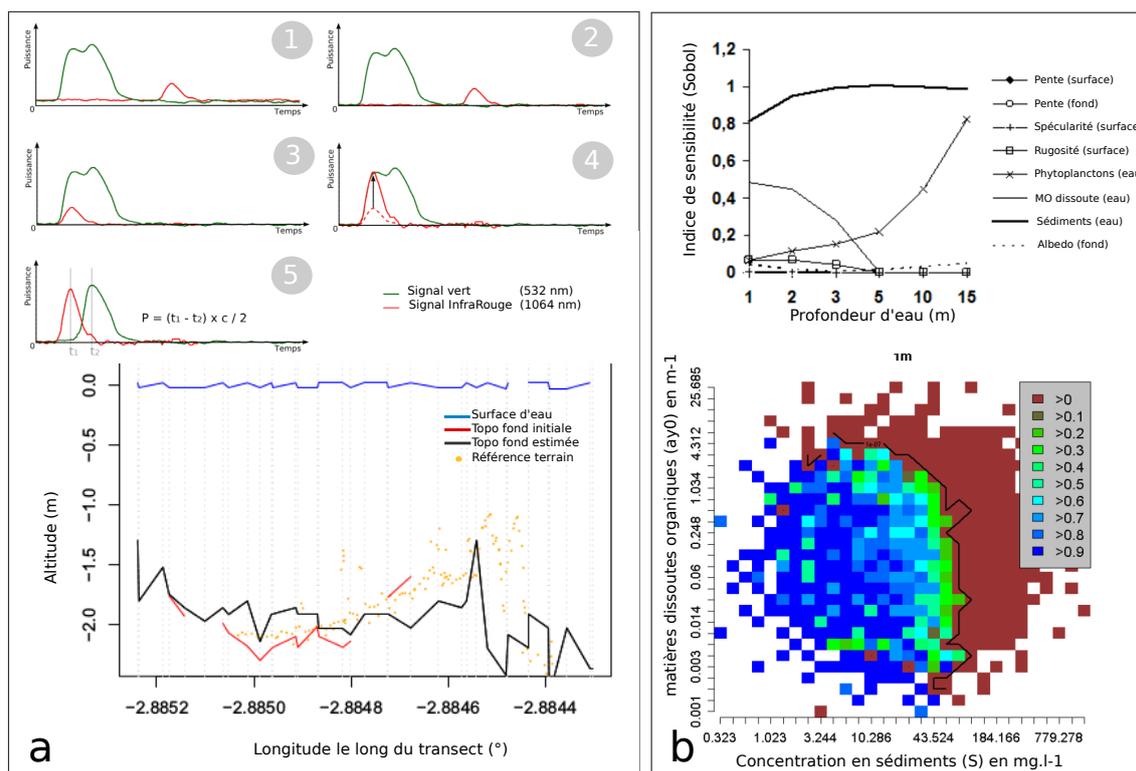


FIGURE 5 – a- (Haut) Principe de la méthode d'estimation bathymétrique " faible profondeur" utilisant conjointement les signaux Infra-Rouge et vert et (Bas) exemple de résultat obtenu sur un transect de fond de mer rocaillieux du Golfe du Morbihan (adapté de ALLOUIS [57]); b- (Haut) Indices de Sensibilité de trains d'onde aux paramètres du milieu (eau) pour un signal vert (532 nm)- (Bas) Probabilité de mesure de la bathymétrie en fonction des deux paramètres du milieu (eau) les plus sensibles pour une profondeur d'eau de 1 m (adapté de ABDALLAH [129])

Afin de rendre mes recherches sur le LiDAR bathymétrique plus génériques (test de différentes conditions du milieu, test de configurations de capteurs, validation de méthodes de traitement des trains d'onde), j'ai ensuite développé un simulateur de trains d'onde LiDAR bathymétrique sur la base d'un modèle de transfert radiatif [52, 130] en partant d'équations de

la littérature [39, 8] et d'hypothèses de modélisation (effets de surface, bruit des détecteurs). Les différentes évolutions de ce simulateur, dénommé Wa-LiD (Water LiDAR), m'ont permis d'explorer successivement les effets de rugosité de surface de l'eau sur la qualité d'extraction bathymétrique des trains d'onde LiDAR dans les travaux de LESAIGNOUX, BAILLY et al. [61] puis MONTES-HUGO, BAILLY et al. [166], les effets de géométrie du fond de l'eau sur le biais d'estimation bathymétrique dans les travaux de BOUHDAOUI, BAILLY et al. [158]. Enfin, dans le travail de thèse de ABDALLAH [129], on a pu tester conjointement les limites instrumentales de différents capteurs, pour différents milieux (Fig. 5-b), et identifier les paramètres critiques des capteurs [130] grâce à une analyse de sensibilité adaptée aux sorties de modèles multivariées (trains d'onde) selon la méthode proposée par LAMBONI, MAKOWSKI et al. [89]. Des explorations récentes en laboratoire ou satellites sur systèmes lasers polarisés [105, 181] semblent offrir de nouvelles perspectives pour la caractérisation de surfaces faiblement immergées par LiDAR.

Synthèse : Structure de réseaux hydrographiques par télédétection

J'ai participé au développement de méthodes de télédétection principalement pour extraire des éléments de réseaux hydrographiques à partir d'informations topographiques et pour estimer la bathymétrie de cours d'eau. Ces développements ont été réalisés sur 13 ans, au cours de 4 thèses et 18 stages de master co-encadrés. Ils ont donné lieu à 23 articles collectifs, avec une bonne visibilité nationale et internationale pour la bathymétrie LiDAR. Je ne me considère pourtant pas pleinement comme un télédécteur et les enseignements que je tire de ce bilan sont 1) que l'apport essentiel me semble venir de la donnée brute, de l'instrument et donc 2) qu'il n'y a donc pas forcément grand chose à espérer (en deçà de la première décimale) sur le renouvellement de méthodes de traitement "aval", même si j'ai aussi baigné un temps dans cette illusion. C'est donc plus vers la valorisation des données de télédétection si imparfaites soit-elles dans des modèles (section 8.1.2), ou vers l'instrument qu'il me semble devoir aller pour progresser.

8.1.2 Simulation de structures de réseaux hydrographiques

Sur la base de mes travaux en télédétection et du bilan que je viens d'en faire, plutôt que de chercher à raffiner des algorithmes de traitements de données, j'ai cherché plus en aval à exploiter un résultat de télédétection imparfait (et certainement perfectible) à l'aide de modélisations et simulations spatiales stochastiques. C'est un point spécifique de ma démarche scientifique.

En prenant exemple sur un champ géostatistique stationnaire $1D$, j'illustre succinctement ci-après comment l'utilisation d'un modèle spatial (stochastique) permet de compléter les données manquantes (observées par télédétection ou non), par estimation ou par simulation conditionnelle, voire de mimer un champ spatial qui reproduit un motif donné, i.e. suivant une approche de simulation purement "motif" (*pattern-based*) [149].

Soit un champ spatial unidimensionnel $Z(x)$ (ou par exemple Z et la largeur et x l'abscisse curvi-linéaire le long du réseau). Z est une variable continue Normale centrée-réduite ($Z \rightarrow (N(0, 1))$) et x désigne un site du domaine considéré ($x \in [0, 100]$). Une image exhaustive du champ spatial $Z(x)$ est connue (Fig 6-a). Ce champ est modélisé par une fonction de covariance spatiale $C(h)$ Gaussienne, avec h distance séparant deux sites de l'espace, de paramètres a (portée pratique) et τ^2 (pépite) :

$$C(h) = (1 - \tau^2) \exp \frac{-h^2}{a}$$

On suppose maintenant ne disposer que de 10 valeurs observées sur Z en 10 sites (Fig 6-a). Sur les figures 6-b, 6-c et 6-d, on illustre les différences de champs simulés ou estimés à partir de ce simple modèle spatial multi-Gaussien pour des valeurs $a = 10$ et $\tau^2 = 0$.

Sur cet exemple, sans parler des différentes techniques sous-jacentes, on peut percevoir les différences d'utilisation d'un modèle spatial, suivant différents algorithmes :

Estimation : on cherche dans ce cas à prédire localement une valeur manquante (interpolation) qui minimise le risque de se tromper (Fig. 6-c). C'est la meilleure prédiction locale possible. En procédant ainsi on ne garantit aucunement de bonnes propriétés du champ reconstitué dont le motif est biaisé (sous-estimation des valeurs extrêmes, sous-estimation du gradient). C'est la technique utilisée lorsque l'objectif du modèle est cartographique ("la" carte est une fin en soi). De plus, on dispose pour chaque valeur estimée en un point d'un intervalle de confiance qui correspond asymptotiquement à la distribution de simulations conditionnelles (enveloppes grises sur les figures 6-c et 6-b).

Simulation conditionnelle : on cherche dans ce cas à mimer la variabilité spatiale du champ observé tout en passant par les points de données (Fig. 6-b). Dans ce schéma d'interpolation, on ne garantit pas de bonnes propriétés de prédiction locale mais on représente explicitement l'incertitude d'interpolation compte tenu de l'information disponible (représentation d'incertitudes réductibles par production d'un jeu de "cartes" aisément utilisable). On remarque également sur la figure 6-c que la moyenne en un point de simulations conditionnelles correspond à l'estimateur de krigeage.

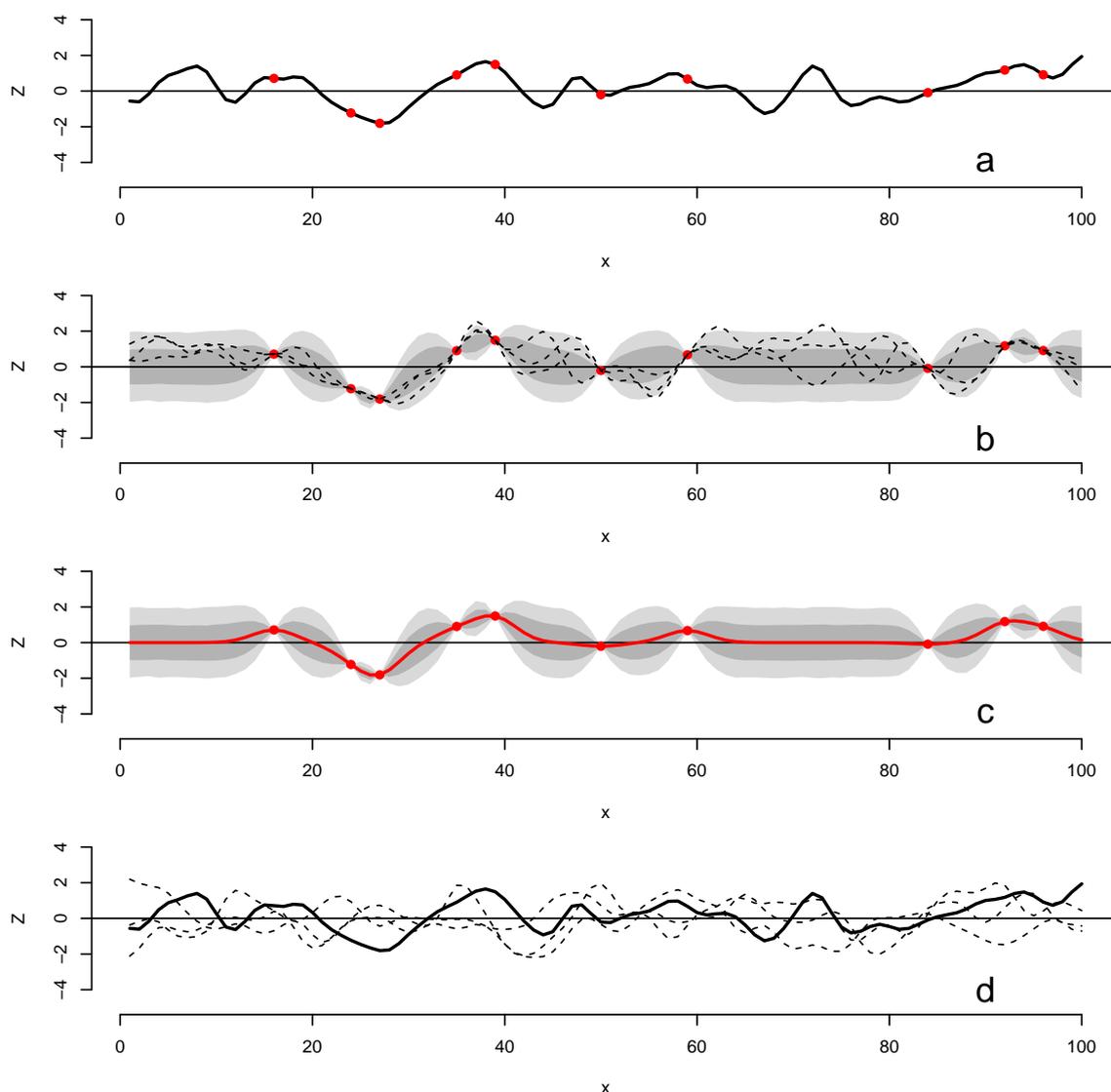


FIGURE 6 – a- "Vrai" champ $Z(x)$ (courbe noire) et 10 sites d'observation (points rouge) ; b- Exemple de 3 simulations conditionnées par les données (en pointillé) sur les 10 sites (et enveloppes à 68% (gris foncé) et 95% (gris clair) des simulations conditionnelles) ; c- Estimation locale par krigeage ordinaire (courbe rouge) à partir des données sur les 10 sites ; d- Exemple de 3 simulations non conditionnelles (en pointillé)

Simulation non conditionnelle : on cherche dans ce cas à reproduire la variabilité spatiale d'un champ (motif) sur la base des paramètres qui la décrivent (Fig. 6-d). C'est un moyen de simuler des motifs spatiaux différents pour ensuite, par exemple, voir quels sont les effets de ce motif si ce champ est un facteur d'entrée d'un modèle de processus.

Par extension, tout modèle qui décrit une variabilité spatiale peut également poursuivre un objectif d'estimation (cartographie), de simulation conditionnelle (incertitudes d'interpo-

lation explicite par production de jeux de cartes), voire de simulation non-conditionnée par des données (pour explorer les effets de la structure du champ).

Dans ce cadre général, comme "la" carte n'était jamais une fin en soi, j'ai donc cherché à développer et/ou utiliser des méthodes de simulation (conditionnelle et non-conditionnelle) sur la géométrie des réseaux hydrographiques. Les méthodes de simulation que j'ai développées peuvent être considérées comme mixtes entre des modèles "motifs" et de modèles à bases de "processus" (déterministes) (dichotomie sur le paysage proposée par TURNER [9]), dans le sens où le motif spatial simulé est généralement celui du résidu de ce qui peut être expliqué ou conceptualisé de manière déterministe.

Simulation de tracés de réseaux Sur la base des résultats de télédétection des fossés de BAILLY, LAGACHERIE et al. [64] exposé en section 8.1.1, j'ai développé une méthode de reconstruction de réseau stochastique qui propose un ensemble de réseaux arborescents probables à partir d'un sous-ensemble de biefs de réseau connus. Cette méthode détaillée dans [114] est une méthode de simulation conditionnelle. Elle repose sur un algorithme itératif stochastique (Fig .7-b) inspiré d'un algorithme de recuit-simulé qui, à chaque itération réalise un processus de branchement amont-aval ou d'élagage aléatoire (Fig .7-a) sur une arborescence. Les cheminements aléatoires se réalisent le long des limites parcellaires et poursuivent une altitude décroissante au bruit sur l'altitude près. Le critère optimisé peut-être mono ou multi-objectifs : il vise une densité cible de réseau et/ou un taux de reconnexion maximal des biefs connus. Un critère d'arrêt peu exigeant de l'algorithme produit plusieurs solutions (réseaux arborescents) sous-optimales, considérées comme équiprobables (Fig .7-c).

Avec un objectif de simulation non conditionnelle et pour explorer le risque d'érosion ravinatoire du sol de parcelles de petits bassins agricoles résultant de différentes configurations de réseaux de fossés (densité et topologie), les travaux de thèse de LEVAVASSEUR [136] ont étendu cet algorithme. A chaque itération de l'algorithme un indicateur simplifié de risque érosif (index SPI²¹) est calculé sur le MNT incrusté par le réseau de fossés construit à l'itération précédente. Cet indicateur est attribué à chaque limite de parcelle (valeur maximale), et la sélection de nouvelles branches de réseau à construire ou élaguer est effectuée sur la base de valeurs croissantes et décroissantes de cet indicateur par limite. Le caractère stochastique résulte de cheminements aléatoires amont-aval dans le graphe des limites de parcelles. Le critère d'arrêt de l'algorithme (là aussi peu exigeant) est une densité cible du réseau.

Avec un objectif de test de différence significative entre dimensions fractales estimées sur des réseaux hydrographiques finis, j'ai ponctuellement co-réalisé d'autres simulateurs non-conditionnels de réseaux hydrographiques stochastiques dans les travaux de thèse de THOMMERET [142]. Une procédure de simulation de réseaux de SCHEIDEGGER [4] (réseaux aléatoires respectant parfaitement les lois de Horton) à partir d'une topographie aléatoire sur plan incliné a été réalisée. A partir d'une collection de réseaux simulés de dimension fractale théorique connue, il devient possible de calculer une distribution de biais d'estimation de paramètres fractals pour des réseaux finis (étendue finie) et décrits suivant une résolution spatiale donnée tels que présentés dans THOMMERET, BAILLY et al. [171].

21. Stream Power Index [10, 162]

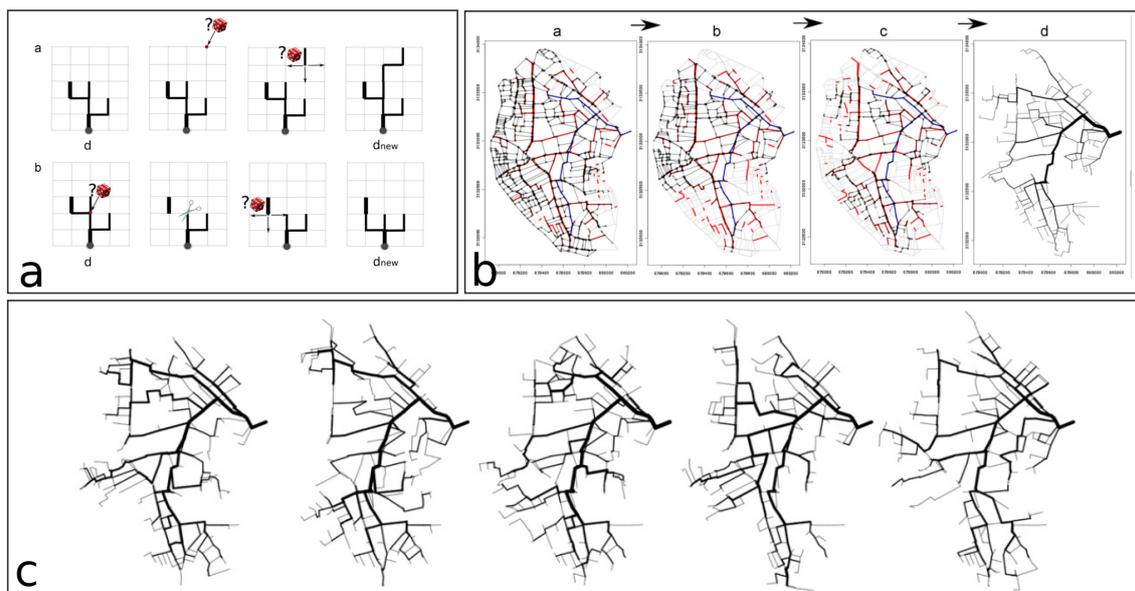


FIGURE 7 – a- Principe de reconnection du réseau de fossé par branchement suivant des marches aléatoires amont-aval (haut) ou suivant un élagage aléatoire (bas) b- Exemple de déroulement itératif (algorithme de recuit-simulé) de reconnection du réseau du bassin du Muscat-34 (2.6 km²) à partir des biefs identifiés par LiDAR (biefs rouges) c- Exemple de 5 réseaux reconstruits équiprobables sur le bassin du Muscat (adapté de BAILLY, LEVAVASSEUR et al. [114])

Simulation de propriétés géométriques locales de réseaux Deux propriétés géométriques localisées de réseau ont été modélisées : la densité de réseaux par carreaux, propriété *a priori* impactante au premier ordre sur le fonctionnement de la mosaïque paysagère et critère cible des simulateurs de tracés présentés précédemment puis la largeur du réseau, caractéristique locale conditionnant le rayon hydraulique et les surfaces d'échanges hydriques (eau libre-sol) au sein des réseaux.

Pour être en mesure de déployer les simulateurs présentés en sous-section 8.1.2 sur des bassins non observés, les travaux de thèse de LEVAVASSEUR [136] ont cherché à développer des modèles corrélatifs de la densité de drainage, par carreaux de 250 m (choix résultant de la densité observée, voir LEVAVASSEUR, LAGACHERIE et al. [180]), et suivant un objectif d'estimation spatiale. Le modèle construit de type régression-krigeage expliquant 61 % de variabilité observée (en calibration) sur différents sites viticoles de la plaine languedocienne : 55 % provenant de la régression de co-variables paysagères (texture du relief, densités de route, densité du parcellaire et érosivité du sol) et 6 % supplémentaire par la structure spatiale du résidu de la régression [180].

Pour la seconde propriété, nous faisons l'hypothèse que sur des réseaux anthropiques et amont, la variabilité spatiale de la largeur de réseaux s'écarte largement des lois géomorphologiques théoriques établies sur des réseaux naturels à petite échelle selon LEOPOLD et MADDOCK JR [3]. Cette hypothèse a été vérifiée récemment au cours de travaux de GUILLEMOT [177] qui montre que sur un bassin aménagé de 30 km², seulement 30% de la variabilité de la largeur

est expliquée par la surface drainée (ainsi que la pente). Sous cette hypothèse, la largeur de réseaux de fossés peut être simulée suivant un modèle proposé par BAILLY, MONESTIEZ et al. [46]. Ce modèle non stationnaire de type régression-krigeage repose sur une covariance spatiale unidimensionnelle amont-aval 1D admissible (Fig. 8-b) dans l'arborescence qui formalise le réseau hydrographique physique. Moyennant une hypothèse d'indépendance conditionnelle (à l'aval) entre branches de réseaux, un schéma séquentiel de simulations conditionnelles 1D aval-amont (Fig. 8-a) a été proposé à partir de ce modèle, produisant une ensemble de réseaux équiprobables (Fig. 8-c). Par simple moyenne d'un nombre important de simulations, ce modèle peut permettre de réaliser une estimation. Pour réaliser une estimation d'une variable portée par un réseau hydrographique, des méthodes alternatives basées sur des moyennes mobiles le long du réseau, (avec hypothèse d'indépendance totale entre branches) ont été proposées par CRESSIE, FREY et al. [48] puis VER HOEF, PETERSON et al. [56]. GARRETA, MONESTIEZ et al. [100] ont depuis unifié ces développements en proposant une typologie selon des modèles amont-aval, modèles aval-amont (dont celui de [46]) ou modèle mixte sur réseaux hydrographiques.

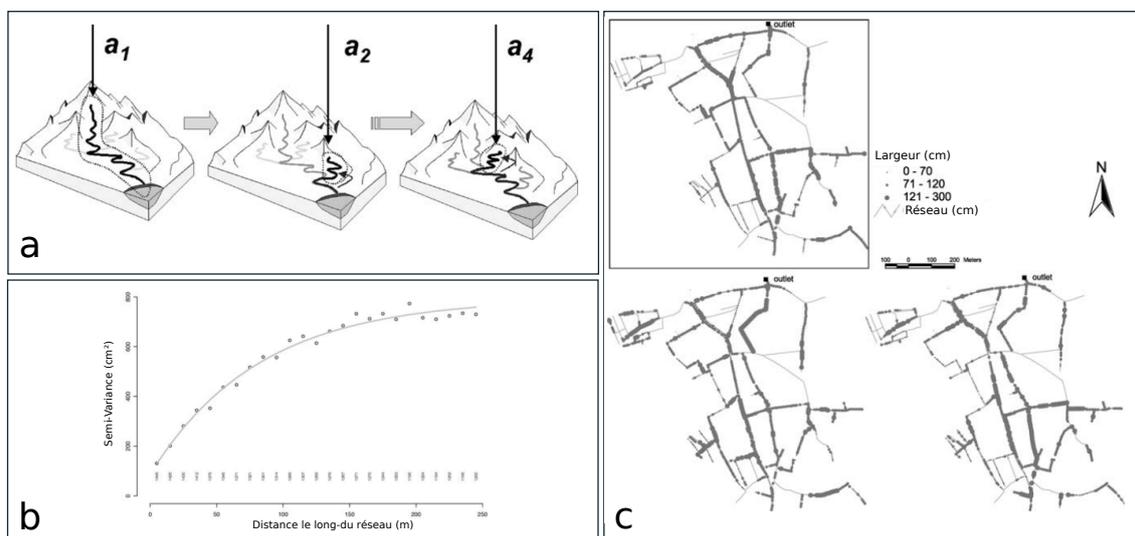


FIGURE 8 – a- Principe de simulation conditionnelle 1D séquentielle aval-amont sur une arborescence b- Variogramme empirique (points) et modèle (trait plein) exponentiel pour la largeur des fossés de Roujan (34) c- Exemple de 2 réseaux obtenus par simulation conditionnelle (bas) en comparaison au vrai réseau (haut) (adapté de BAILLY, MONESTIEZ et al. [46])

Synthèse : Simulation de structures de réseaux hydrographiques

J'ai développé de nouvelles méthodes de simulation spatiale de réseaux (tracé et largeur), pour les réseaux de fossés principalement. Ces développements ont été réalisés soit dans un objectif de reconstruction de réseaux probables à partir d'un sous-ensemble du réseau connu par télédétection, soit dans un objectif de génération de nouvelles configurations de réseaux possibles dans un contexte physique donné. Ils permettent de figurer les incertitudes sur la structure d'un réseau, de manière explicite, ce qui facilite la propagation de ces incertitudes plus en aval dans les modèles hydrologiques (section 8.2). Couplés à un simulateur hydrologique, ils permettent d'explorer numériquement la sensibilité de la mosaïque paysagère au changement de structure du réseau (section 8.3). Ces développements ont été réalisés principalement au cours de 2 thèses. Ils ont donné lieu à 5 articles publiés. Un de mes regrets est que ces développements de simulateurs n'ont pas encore été suffisamment "carrossés", pour les diffuser plus largement.

8.2 Structures spatiales et incertitudes réductibles

Comme indiqué en introduction, l'identification de structures spatiales est généralement (les réseaux hydrographiques n'y échappent pas) entachée d'incertitudes "réductibles" (le terme d'erreur sur les structures). Caractériser ces incertitudes est un exercice d'intérêt pour le "producteur" de données (qualification de ses données - Fig 9-a et 9-b), il l'est surtout pour l'utilisateur qui peut chercher à mesurer l'impact des termes d'erreur des entrées d'un modèle (appelées par la suite "facteurs") sur les sorties (Fig 9-c, 9-d et 9-e), plus pour sa propre connaissance du modèle que pour une communication externe selon PAPPENBERGER et BEVEN [53].

Il y a donc deux grandes étapes d'analyses d'incertitudes sur les structures spatiales de réseaux hydrographiques que j'ai développées : 1) une étape de spécification des incertitudes (modélisation, simulation, raffinement des métriques d'incertitude), déjà largement abordée en fin de section 8.1.2 au travers du développement de méthodes de simulation conditionnelle qui ont, par essence, une double finalité (reconstituer un champ complet et représenter explicitement les incertitudes spatiales), puis 2) une étape de propagation des incertitudes dans un modèle "hydrologique", utilisateur de ces structures.

Pour la première étape, pour un facteur spatialisé, l'incertitude du facteur peut résulter localement de l'observation elle-même (erreur de mesure) en tenant compte ou non de la mise à l'échelle des observations, lorsque les observations à qualifier et les données de référence ne sont pas sur les mêmes supports spatiaux. Elle peut également résulter d'un processus d'interpolation combinée ou non à un processus d'agrégation ou de désagrégation spatiale des observations (erreurs d'interpolation). Ces deux sources d'incertitude se combinent et la théorie géostatistique appliquée aux observations de télédétection (voir sections 8.1.1 et 8.1.2) permet d'en tenir compte. Par exemple, dans les travaux de THOMMERET, BAILLY et al. [109], les observations sont ponctuelles et exhaustives et les incertitudes du champ spatial MNT sont représentées par simulation géostatistique du champ d'erreur du MNT. Dans les travaux de BAILLY, MONESTIEZ et al. [46], les observations de la largeur sont échantillonnées ponctuellement le long du réseau (avec une précision de mesure comprise dans un paramètre spatial appelé "effet de pépite") et les incertitudes du champ largeur interpolé le long du réseau sont représentées par simulations conditionnelles géostatistiques (section 8.1.2). Lorsque l'on se situe sur d'autres champs spatiaux que des champs $2D$, sur des espaces en réseaux liés à un flux, avec ou non des questions de mises à l'échelle des données, de nouvelles questions de quantification des incertitudes locales peuvent se poser. Enfin, on peut également souhaiter quantifier l'incertitude globale d'un réseau (son tracé ou le champ complet de ses propriétés locales). Cette quantification est utile pour choisir, par exemple, un échantillon de réseaux "incertains" (un jeu de cartes), à propager ensuite dans un modèle (choix du jeu de cartes ou échantillon de simulations conditionnelles en figure 9-a).

Pour la deuxième étape, il y a plusieurs degrés sur la question de la propagation de l'incertitude d'un facteur d'entrée spatialisé (X_1 en figure 9) dans un modèle : l'incertitude sur le facteur spatialisé induit-il une grande variabilité sur les sorties du modèle (analyse d'incertitude mono-factorielle) (Fig 9-c) ? Est-ce aussi le cas si les incertitudes de toutes les entrées du modèle sont considérées (analyse d'incertitude multi-factorielle) (Fig 9-d) ? Et finalement,

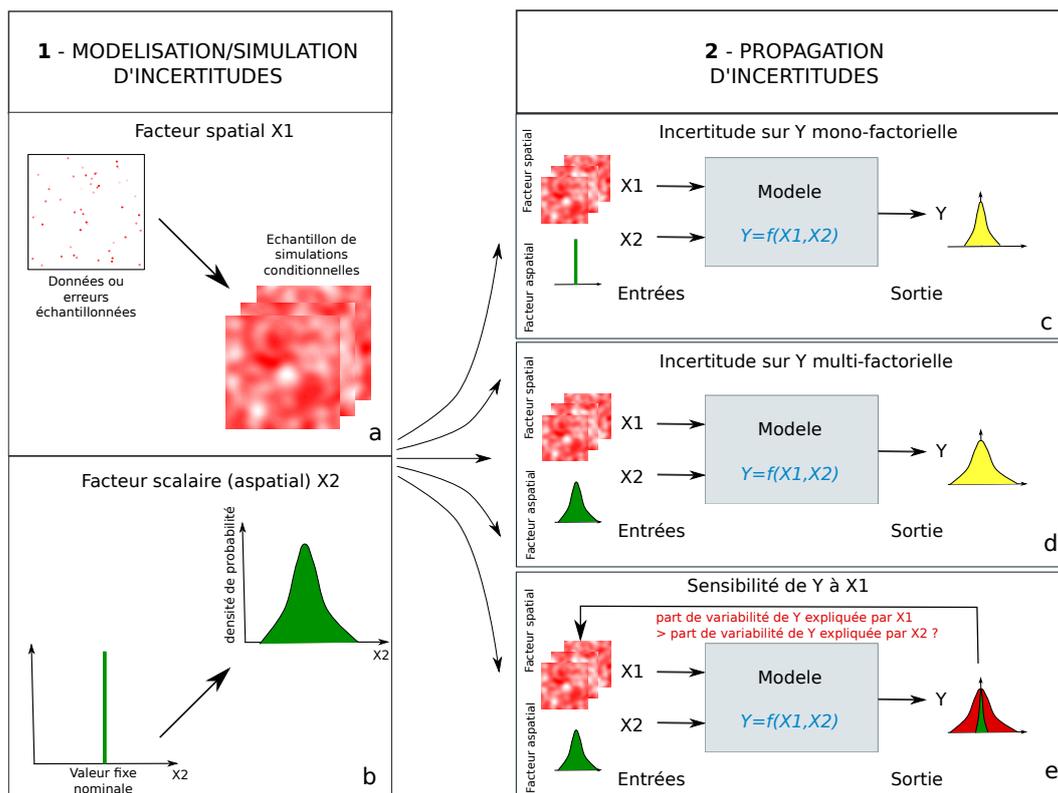


FIGURE 9 – Cadre général des analyses d’incertitudes spatiales développées selon 2 grandes étapes : 1- Modélisation et simulation d’incertitudes (a- facteur spatialisé ; b- facteur scalaire) puis 2- Propagations d’incertitudes (c- mono ou d-multifactorielle) dans un modèle spatialisé ou à l’inverse, e-analyse de sensibilité globale des sorties du modèle aux incertitudes sur ses facteurs d’entrée

est-ce vraiment le facteur spatial le plus critique au regard des incertitudes qui pèsent sur les autres facteurs d’entrée du modèle (analyse de sensibilité schématisée en figure 9-e) ? Autrement dit, l’objectif sous-jacent à ces trois points est la mesure de l’effort qu’il reste à produire en terme de réduction d’incertitudes (terme d’erreur) [34] sur les entrées spatialisées de modèles. Répondre à ces questions suppose en premier lieu de disposer de méthodes de propagation d’incertitudes et d’analyse de sensibilité ”spatiales”, pour des modèles et codes de calcul (boîte noire) qui peuvent coupler plusieurs sous-modèles, être non analytiques et coûteux en temps de calcul [141].

J’ai pu aborder ces deux étapes au cours de différents travaux exposés dans les deux sous-sections suivantes et dans ce même ordre. Pour la première étape, la dichotomie utilisée dans la section précédente entre tracé et propriétés géométriques locales du réseau est quasi-reproduite puisque je distingue ici les travaux qui ont cherché à mieux modéliser, quantifier des incertitudes locales de réseaux des travaux qui se sont intéressés aux incertitudes globales d’un réseau (métriques de dissimilarité globale). Pour la deuxième étape, je ne présente que des analyses réalisées sur la propagation multi-factorielle et l’analyse de sensibilité. Une dernière difficulté, non des moindres, a également été abordée : pour un modèle spatialisé qui

produit une sortie mono-variée mais intégrée sur le domaine spatial étudié (le Y en figure 9), les conclusions en terme de sensibilité de Y à un facteur d'entrée du modèle ne sont certainement pas les mêmes suivant l'étendue spatiale du domaine modélisé. Il convient alors d'explorer une loi d'échelle sur cette sensibilité.

8.2.1 Modélisation d'incertitudes spatiales

Quantifier les incertitudes locales sur réseaux Le problème de quantification d'incertitudes locales se posent surtout lorsqu'une mise à l'échelle de données spatiales est nécessaire. Ce n'est pas un problème propre aux réseaux, il est même généralisé en spatial (l'effet support bien connu des géostatisticiens), mais trop rarement considéré comme le soulève PUECH [20]. Pour illustrer de problème, deux exemples de travaux sont présentés.

Dans le premier exemple, pédagogique, on s'intéresse à la qualification par LiDAR satellite (GLAS-IceSAT) de mesures de niveaux d'eau à l'échelle de lac de grandes dimensions (altimétrie spatiale). En altimétrie LiDAR ou Radar, la moyenne de mesures de niveaux consécutives le long de la trace pour un plan d'eau est systématiquement l'estimation retenue [26, 117]. L'incertitude associée à ce niveau moyen résulte d'un calcul statistique sans considération d'auto-corrélation spatiale (loi de la moyenne de variables aléatoires Gaussiennes, ou loi de Student pour les petits échantillons) [65]. Dans les travaux de ABDALLAH, BAILLY et al. [112], l'auto-corrélation spatiale de l'erreur de mesure du satellite IceSAT-GLAS sur l'ensemble des grands lacs américains pour la campagne IceSAT de 2003 à 2009 a été explorée. Une première surprise a été de constater une auto-corrélation significative de l'erreur de mesure de niveau dans 50 % des cas et pour 60 % de la variance. La portée de corrélation observée est d'environ 1.9 km (0.34 s compte-tenu de la vitesse au sol du satellite) sans que les causalités de cette corrélation (instrumentales ou liées aux états de surface du lac) n'aient pu clairement être identifiées. L'incertitude sur le niveau moyen estimé a ensuite été calculée (la moyenne restant le bon estimateur car l'échantillonnage spatial est dans ce cas régulier) suivant une classique estimation par krigeage de blocs. Les résultats montrent une sous-estimation de l'incertitude du niveau moyen d'un facteur 8 (on passe en moyenne de 1 à 8 cm d'écart-type d'erreur) lorsqu'on ne tient pas compte de l'auto-corrélation spatiale de l'erreur, propre aux données spatiales.

Le deuxième exemple pose une question plus spécifique aux variables sur réseaux. Il s'intéresse à la qualification par LiDAR bathymétrique de la mesure de l'altitude d'un lit de rivière (section du Gardon-30). Une difficulté de cette qualification est également de comparer des données (de référence et acquises par LiDAR) sur les mêmes supports spatiaux (mêmes dimensions, mêmes localisations). Ainsi sur l'expérience Gardon, les caractéristiques de l'instrument LiDAR utilisé et l'altitude de vol produisent des empreintes au sol (support des mesures) selon des pixels de 2.25 m^2 . Sous hypothèse d'homogénéité de la puissance laser sur l'empreinte, on considère la topographie restituée par l'instrument comme une moyenne de la topographie dans l'empreinte. Les mesures de référence terrain (DGPS²²) sont quant à elles ponctuelles. Dans les travaux de BAILLY, LECOARER et al. [99], pour comparer mesures

22. Differential Global Positioning System

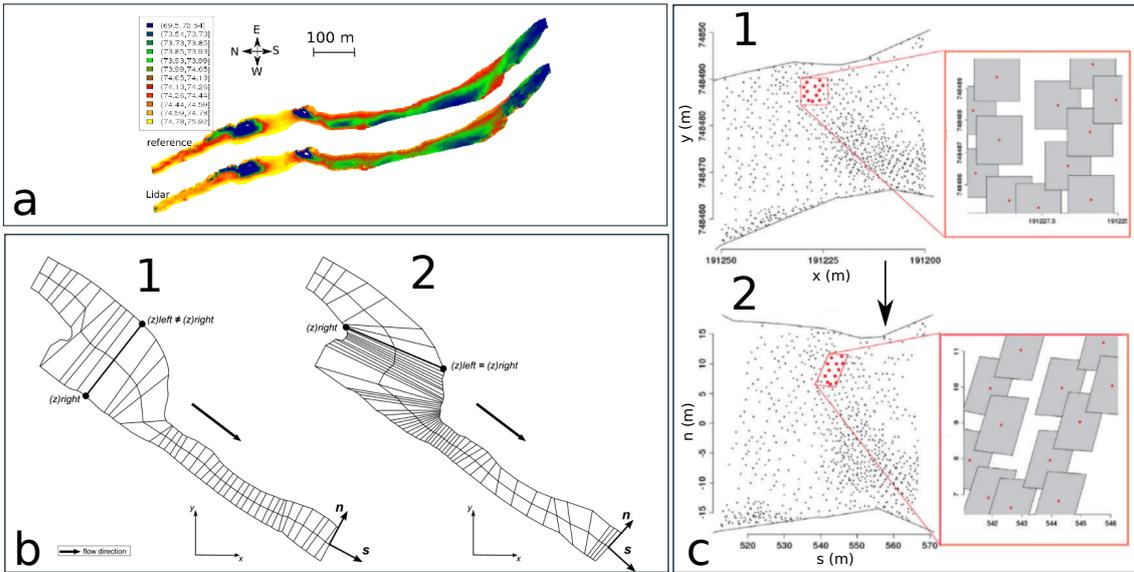


FIGURE 10 – a- Représentation en plan du jeu de données de référence (DGPS) et Lidar bathymétrique sur une section de 1.3 km du Gardon (30) b- Exemple de transformation de repère cartésien (x, y) en repère curvilinéaire (s, n) selon une méthode planimétrique (1) [73] et selon la méthode retenue (2), issue de [14] c- Exemple de transformation de la géométrie des pixels Lidar du repère cartésien (x, y) au repère curvilinéaire (s, n) (adapté de BAILLY, LECOARER et al. [99])

terrain et mesures Lidar sur les mêmes supports, une mise à l'échelle des mesures terrain sur les empreintes Lidar a été au préalable réalisée. Cette mise à l'échelle dans un espace fluvial repose sur trois étapes : 1- une transformation du référentiel cartésien (système de projection Lambert) en un référentiel curvilinéaire adapté aux problèmes d'interpolation anisotropes sur rivière comme évoqué dans MONESTIEZ, BAILLY et al. [43] et LEGLEITER et KYRIAKIDIS [73], 2- le développement d'un modèle non-stationnaire de type régression-krigeage estimé sur les données terrain qui modélise le champ altitude du lit dans le référentiel curvilinéaire puis 3- l'estimation à partir des points terrain par krigeage par blocs sur chaque pixel d'une valeur d'altitude 'terrain', toujours dans le référentiel curvilinéaire (Fig. 10). Au-delà des résultats d'incertitudes eux-mêmes sur la mesure bathymétrique LiDAR, cet exemple montre qu'une qualification de mesures par capteur sur des espaces en réseau peut nécessiter des développements spécifiques.

Quantifier l'incertitude globale de réseaux Comment globalement comparer deux réseaux (hydrographiques) entre eux? Suivant quelle métrique juger de leur dissimilarité? HEIPKE, MAYER et al. [16] ont proposé une métrique appliquée initialement aux réseaux routiers basée sur la double comptabilisation du linéaire d'un réseau intersectant la zone tampon de l'autre réseau et réciproquement. Elle peut-être transférée aux réseaux hydrographiques, mais cette métrique peut alors être qualifiée de purement géographique, dans la mesure où seule la proximité géographique entre segments de deux réseaux intervient. Cette

métrique place donc sur le même plan des erreurs de tracé que l'on soit en aval sur un bief principal ou sur un petit tributaire amont. A l'inverse, il existe un ensemble de méthodes morphométriques venant de la communauté de la vision, basées le plus souvent sur la comparaison de graphes (*Graph Matching Distance*) [25]. Ces méthodes pourraient être remobilisées mais à l'inverse, ces méthodes purement topologiques qui travaillent sur des graphes, négligent le positionnement géographique absolu des réseaux.

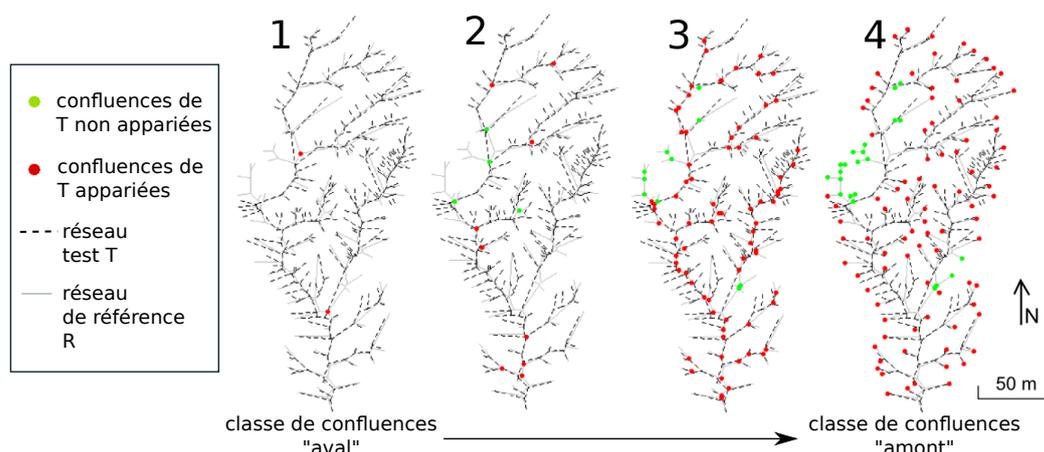


FIGURE 11 – Illustration de la méthode itérative aval amont de THOMMERET, BAILLY et al. [125] par comptage de confluences appariées (points rouges) pour la comparaison quantitative d'un réseau de référence terrain et test (extrait d'un MNT LiDAR) sur le bassin de Draix (04)

Dans ce contexte, les travaux de THOMMERET, BAILLY et al. [125] proposent une nouvelle métrique tenant compte à la fois de la géographie et de la topologie dans le réseau (Fig. 11). La dissimilarité entre deux réseaux hydrographiques repose sur un comptage de confluences appariées après avoir classé les confluences hiérarchiquement de l'aval vers l'amont (suivant leur bi-ordre de Shreeve). L'appariement de confluences des réseaux test T et de référence R est effectué au delà d'un seuil de proximité géographique et lorsque les confluences appartiennent à la même classe de bi-ordres de Shreeve normalisés. Ensuite par analogie avec HEIPKE, MAYER et al. [16], la proximité entre les réseaux T et R est calculée par simple rapport entre M , le nombre de paires de noeuds appariés, et la somme de M , UM_T et UM_R ou UM_T et UM_R désignent respectivement le nombre de noeuds non-appariés du réseau test et de référence. Cette méthode a pour avantage de rester robuste dans le cadre de la comparaison des réseaux arborescents avec des niveaux de détail différents. Elle est également en accord avec l'importance soulignée par MOUSSA, COLIN et al. [122] de bien représenter un réseau par la position des premières confluences aval du réseau (et au delà, les pentes du réseau) pour l'hydrologie de surface.

8.2.2 Propagation d'incertitudes spatiales

L'analyse de sensibilité et d'incertitudes (Fig. 9-d et e) peut se conduire au cours d'une même expérimentation numérique de propagation des incertitudes (exploration de modèle) suivant de multiples réalisations du modèle (Monte-Carlo). Pour des raisons d'efficacité, voire de faisabilité de l'expérience, il convient quelquefois de raisonner le plan d'expérience dans les espaces d'incertitudes des facteurs d'entrée (échantillonner efficacement). Cette question d'optimisation de plan d'expérience n'est pas triviale quand le facteur d'entrée est une carte. Un premier moyen est de chercher à contrôler la dissimilarité (distance) entre les cartes générées qui représentent l'incertitude. Dans SAINT-GEOURS, BAILLY et al. [106], on a cherché ainsi à mieux échantillonner directement le jeu de cartes générées par simulation conditionnelle (champs Gaussiens), suivant une procédure d'échantillonnage (Latin Hypercube) introduites en amont de la réalisation des simulations conditionnelles [18]. Le bénéfice de cette méthode "amont" semble cependant très faible sur la précision des indices de sensibilité calculés, du moins pour de faibles rapports portée d'auto-corrélation sur dimension du domaine ou lorsque la densité de points de conditionnement est importante. Un autre moyen est alors de disposer d'une distance entre cartes générées (dissimilarité globale entre cartes, entre réseaux si on se ramène à mon objet d'étude) pour mieux échantillonner dans cette distribution d'incertitude. On retrouve ici l'intérêt de développer des méthodes de quantification de l'incertitude globale de réseaux, exposée dans la sous-section 8.2.1.

Les travaux en propagation d'incertitudes épistémiques présentés sont issus des exemples explorés au cours des travaux de thèse de SAINT-GEOURS [141]. Dans ces travaux, le modèle hydrologique "spatial" est en fait un modèle économique qui évalue les dommages évités moyens par an (DEMA) sur une plaine d'inondation suite à une mesure de réduction de la vulnérabilité (par exemple, l'implémentation de digues). Pour ce faire, le modèle croise des données sur l'aléa (cartes de hauteurs d'eau pour une collection de crues avant et après aménagement) et des données sur les enjeux avec leur courbes d'endommagement associées (montant des dégâts en fonction de la hauteur d'eau par unité de surface). Sans entrer dans le détail de ce modèle, les facteurs d'entrée relèvent de 4 grands ensembles (2 spatiaux, 2 non spatiaux) : la carte des enjeux, les cartes d'aléa (par exemple, hauteurs d'eau maximales), les périodes de retour des crues et les courbes d'endommagement, avec pour chacun, des lois d'incertitudes spécifiées. La sortie du modèle est le montant des DEMA sur l'étendue géographique considérée (un quartier, une commune, toute la plaine d'inondation). L'intérêt pédagogique de ce modèle ici est qu'il est simple (spatialement additif ou 'vertical') et qu'il comporte des facteurs d'entrée spatiaux et non spatiaux.

Intéressons-nous à un facteur d'entrée spatial, un paramètre géométrique de la plaine d'inondation (un tronçon de réseau hydrographique) : la topographie du terrain. Ce facteur d'entrée est décrit par un MNT. L'incertitude sur le MNT est additionnée à l'incertitude sur la hauteur d'eau en sortie de modèle hydraulique (hypothèse simplificatrice d'indépendance) pour former l'incertitude sur l'aléa. L'incertitude des cotes d'eau maximales en sortie de modèle hydraulique est le plus souvent un bruit blanc, non corrélé spatialement, homogène à l'échelle des casiers hydrauliques comme indiqué dans BAILLY, SAINT-GEOURS et al. [144]. Suite à l'acquisition d'une collection de points de contrôle topographiques, qui ont permis de calibrer un modèle de champ d'erreur sur le MNT, l'incertitude du MNT a été spécifiée par un jeu de simulations conditionnelles de MNT bruités et ensuite de cartes d'aléa bruitées

(Fig. 9-a) suivant les techniques de simulation conditionnelle présentées en section 8.1.2.

Méthodes d'analyse de sensibilité spatiale Une analyse de sensibilité d'un modèle $y = f(x)$ peut-être réalisée analytiquement (par calcul de $\frac{dy}{dx}$) lorsque le code ou les équations du modèle sont dérivables [148] mais dans ce cas la dispersion des facteurs d'entrée ne sont pas pris en compte (sensibilité uniquement des "équations"). A l'opposé, cette analyse de sensibilité peut être réalisée suivant des modèles simplifiés et approchés²³ lorsque les modèles sont coûteux en temps de calcul et non dérivables [139]. Enfin, elle peut être réalisée par criblage ou approche statistique de Monte-Carlo lorsque de multiples réalisations du modèle sont envisageables [80]. Elles peuvent, par exemple, se concrétiser alors par des calculs d'indices de sensibilité de Sobol, qui correspondent à des rapports de variance. Dans SAINT-GEOURS [141], la stratégie envisagée a été d'utiliser une méthode globale de Monte-Carlo pour calculer des indices de Sobol en échantillonnant dans les espaces d'incertitudes des facteurs de manière plus ou moins optimisée (par simple tirage aléatoire, par Latin hypercube, par suite de Sobol, etc). Pour les facteurs spatiaux, on échantillonne dans les jeux de cartes équiprobables ou chaque carte est étiquetée (technique du *Map labelling* proposée initialement par LILBURNE et TARANTOLA [91]). Dans ce cas, le facteur spatial est transformé en un simple paramètre scalaire (numéro d'étiquette) de loi uniforme discrète. C'est une manière (radicale) de réduire la dimension du problème puisque les multiples facteurs spatiaux (valeur du paramètre en chaque point de la carte) deviennent un (la carte). Cette méthode ne dit donc rien de la sensibilité du modèle à l'incertitude en un point de la carte. De plus, l'hypothèse sous-jacente à cette méthode est une équidistance entre cartes du jeu produit par simulation spatiale qui représentent l'incertitude, ce qui est discutable lorsque le rapport largeur du domaine sur portée de corrélation spatiale est élevé, tel qu'exploré dans SAINT-GEOURS, BAILLY et al. [106].

D'un point de vue finalisé, les conclusions de ces travaux montrent pour 3 plaines d'inondation (Delta de l'Orb, plaine de Beaucaire, plaine de la Vilaine à Redon) une bien moindre sensibilité des DEMA aux incertitudes topographiques qu'aux incertitudes sur les périodes de retour des crues [184, 87, 160]. Ceci est intéressant à noter alors que la topographie en zone inondable est une donnée fortement investie en France actuellement et qu'au contraire les stations limnimétriques sur cours d'eau tendent à se réduire.

Loi d'échelle des indices de sensibilité La démarche présentée ci-avant a été reproduite pour différentes résolutions des sorties de DEMA (par carreaux de taille croissante allant de la parcelle à toute la plaine d'inondation). L'évolution des indices de sensibilité de chaque facteur d'entrée pour ces différentes résolutions des sorties du modèle a pu être empiriquement estimée dans les travaux de SAINT-GEOURS, BAILLY et al. [168]. Les résultats sont intuitifs : par "compensation d'erreur" croissante, la sensibilité des paramètres spatiaux décroît avec l'augmentation de la résolution des sorties du modèle et inversement pour les paramètres globaux, non spatiaux (Fig. 12).

23. Encore appelée émulation, méta-modélisation ou réduction de modèle

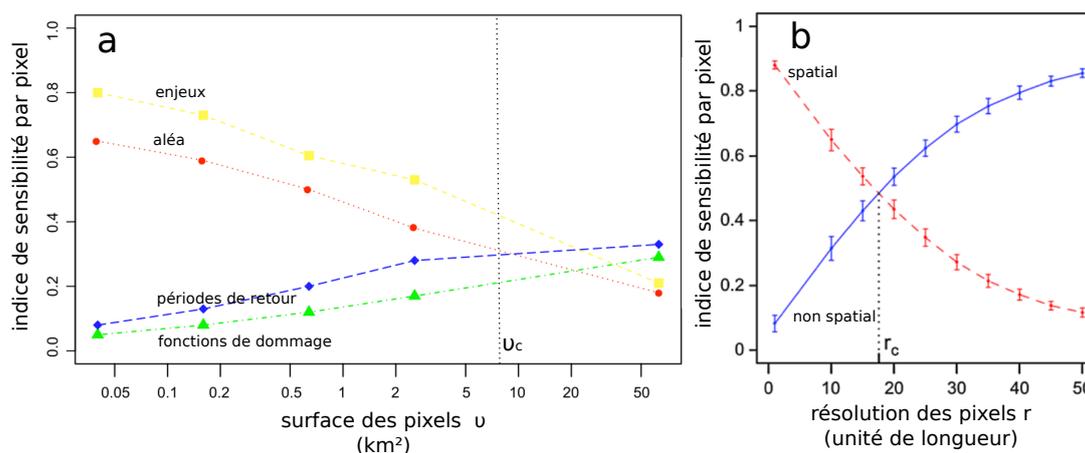


FIGURE 12 – Indices de sensibilité de facteurs spatiaux et non spatiaux en fonction de la résolution des sorties du modèle : a- exemple empirique sur le delta de l’Orb (résolution critique = 6.7 km^2) ; b- exemple théorique (adaptés de SAINT-GEOURS, BAILLY et al. [168] et de SAINT-GEOURS, LAVERGNE et al. [140])

Cette évolution a été formalisée dans l’article de SAINT-GEOURS, LAVERGNE et al. [140], où il a été démontré analytiquement sur un modèle simple, spatialement additif, et pour un champ d’un facteur d’entrée spatial stationnaire, que les rapports d’indices de sensibilité entre facteur spatial et non spatial peuvent être prédéterminés à une résolution donnée ν pour les sorties de modèles. Ce rapport est proportionnel au rapport $\frac{\nu_c}{\nu}$, ou ν_c , résolution critique (celle où la sensibilité des facteurs spatiaux et non-spatiaux est égale), a un comportement déduit des paramètres de la fonction de covariance spatiale qui décrit les incertitudes du facteur spatial : la portée a et l’effet de pépité η^2 . ν_c augmente avec la portée de corrélation a et décroît quand le paramètre de pépité η^2 croît (Fig. 12-b). Ces résultats sont en accord avec la théorie de la régularisation de JOURNAL et HUIJBREGTS [6]. En revanche, cet exemple simple n’est pas tout à fait en accord avec la théorie du changement d’échelle sur la hiérarchie du paysage avancée par BUREL, BAUDRY et al. [11] et repris dans PUECH [20] qui prône un non-continuum (effet seuil) des facteurs influents sur le fonctionnement (écologique) en changeant d’échelle. Le changement plus continu observé ici (Fig. 12-b) peut-être expliqué par la nature continu du champ de variabilité des entrées spatiales et par le comportement assez linéaire du modèle traité (vu au travers de indices de Sobol totaux). Cela démontre au moins que l’effet de seuil n’est pas une règle générale.

Synthèse : Structures spatiales et incertitudes réductibles

J'ai contribué au développement de méthodes pionnières d'analyse de sensibilité spatiale globale et statistique. Une originalité de ces travaux, résultat d'un mariage entre géostatistique et analyse de sensibilité, est l'inférence de loi d'échelles sur les indices de sensibilité spatialisés, inférence possible pour des modèles simples et spatialement additifs. Ces travaux me semblent offrir des perspectives intéressantes pour aborder les problèmes de changements d'échelle en modélisation hydrologique ou le croisement des échelles d'hétérogénéité spatiale de paramètres d'entrée jouent un rôle important. Cependant, les résultats d'analyse de sensibilité requestionnent rapidement la manière dont on a modélisé l'incertitude sur les facteurs d'entrée spatiaux, voire l'incertitude de ce modèle (analyse de sensibilité de l'analyse de sensibilité ou analyse de sensibilité de "second ordre"). J'ai donc aussi cherché à améliorer les méthodes de spécification des incertitudes sur des paramètres géométriques de réseaux hydrographiques. Ces travaux ont été réalisés au sein de 3 thèses, et ont donné lieu à 7 articles.

8.3 Impacts hydrologiques des réseaux hydrographiques

Dans cette section, je montre quels autres profits (appliqués ou cognitifs) on peut tirer du chaînage entre modèles stochastiques de structures de réseaux hydrographiques (section 8.1.2) et modèles hydrologiques, comme dans la section précédente, mais cette fois-ci avec un objectif de quantification de l’impact de la structure de réseaux sur le fonctionnement hydrologique. Comme évoqué en figure 2, on passe ici d’un schéma de représentation du terme d’erreur sur les réseaux (section 8.2) à un schéma d’incertitudes ”aléatoires” sur la structure du réseau. Le modèle spatial stochastique est dans ce cas utilisé pour générer un ensemble de structures de réseaux (qui ne pourraient raisonnablement être testées *in situ*) et par chaînage au simulateur hydrologique, ces expériences numériques multiples permettent d’inférer les liens entre la structure et le fonctionnement hydrologique de la mosaïque paysagère. Un autre objectif qui découle de ces expériences numériques, plus finalisé, est d’explorer et pré-cibler les conditions d’optimisation de la mosaïque paysagère. Des expériences numériques permettent d’explorer le comportement de simulateurs pour lesquels les processus de base mis en équation sont connus mais les multiples couplages et agrégations des processus de base ne sont pas intelligibles et peuvent faire émerger des comportements encore non connus. Il s’agit donc dans ce cas, d’une exploration théorique du lien structure fonction de la mosaïque paysagère. Dans un objectif de contrôle de la validité des simulateurs hydrologiques [151, 47], je présente auparavant dans cette section des approches métrologiques auxquelles j’ai participé basées sur le déploiement dans l’espace de mesures hydrologiques originales, à l’instar des approches développées par BHAMJEE et LINDSAY [115].

8.3.1 Observations hydrologiques distribuées *in situ*

Les travaux d’ OGILVIE, BELAUD et al. [182], évoqués en section 8.1.1 s’inscrivent aussi dans cet objectif. Moyennant des lois surfaces en eau-hauteurs par plan d’eau (utilisant quelques données d’échelles limnimétriques, voire un MNT) pour quelques points du Delta Intérieur du Niger, la série temporelle de surfaces en eau extraite de MODIS peut servir au calage d’un modèle hydraulique à casier. En collaboration avec l’IMFT²⁴, j’ai également participé au développement d’un capteur limnimétrique à coût et encombrement faibles, qui permet d’enregistrer en autonomie une hauteur d’eau sur une période allant de 3 à 6 mois au pas de temps de la minute. J’ai principalement travaillé à la qualification des mesures réalisées dans différentes conditions, et pour différentes versions de ce capteur, qualité consignée dans GHESQUIÈRE [35] GUIN [101] et CRABIT, COLIN et al. [116]. Ce développement technologique a été utilisé pour la classification du fonctionnement de sous-bassins naturels [150] ou petits bassins cultivés [116] dans le Languedoc ainsi que pour le calage multi-local du modèle MHYDAS [101]. Dans les travaux de MARÉCHAL, AYRAL et al. [150], ces observations distribuées ont mis en évidence la dynamique de mise en eau aval-amont de réseaux en tête de bassins cévenols sur une gamme d’événements.

Beaucoup plus récemment et à une toute autre échelle, j’ai initié des travaux qui ont pour objectif une mesure bi-dimensionnelle instantanée de niveaux d’eau soit par stéréophotogrammétrie [172] soit par LiDAR terrestre [173] ou une mesure du front d’avancement de l’eau par caméra infrarouge [173], sur des canaux ou fossés. Ces mesures ont pour finalité

24. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

l'observation des effets de végétalisation des canaux sur la surface libre (régimes permanents et transitoires).

8.3.2 Explorations *in silico*

Sensibilité du fonctionnement hydrologique à la structure du réseau Reprenons ici les travaux LEVAVASSEUR, BAILLY et al. [137] exposés en section 8.1.2 ainsi que ceux de GUMIERE, BAILLY et al. [161]. Pour les seconds, un modèle de simulation stochastique de l'emplacement de bandes enherbées sur un bassin versant a été couplé au modèle MHYDAS-Érosion [118] et au segmenteur paysager GeoMHYDAS [102] afin d'estimer l'effet de la localisation de bandes enherbées (sur parcelles ou entre parcelles et fossés comme situés en figure 13-a) sur le taux de piégeage des sédiments pour différentes étendues de sous-bassins sur la bassin de Roujan (34). Les deux paramètres de contrôle du simulateur de bandes enherbées sont la densité de bandes enherbées sur les emplacements potentiels (paramètre r) et un paramètre de positionnement préférentiel amont ou aval des bandes enherbées (paramètre p variant de -1(aval) à 1(amont)). De multiples évaluations des pertes en sol pour différentes valeurs de r et p ont été testées (pour une averse de 4 heures à 60 mm.h^{-1}). Les résultats en figure 13-b montrent les configurations optimales de placement des bandes enherbées obtenues pour différentes valeurs de r et pour maximiser le taux de piégeage à l'exutoire. L'analyse de sensibilité associée à cette expérience numérique montre que, quelle que soit la dimension du bassin, c'est le paramètre r de densité de bandes enherbées qui influe le plus (pour environ 70 %), et ce de manière quasi linéaire. Le facteur de positionnement amont-aval, du moins sur le référentiel retenu (distance à l'exutoire (Fig. 13-a), influe peu. Pour autant, pour une valeur de r fixée (boîtes à moustaches de la figure 13-b), il existe une variabilité résiduelle de taux de piégeage importante qui ne semble pas liée à une simple position amont-aval.

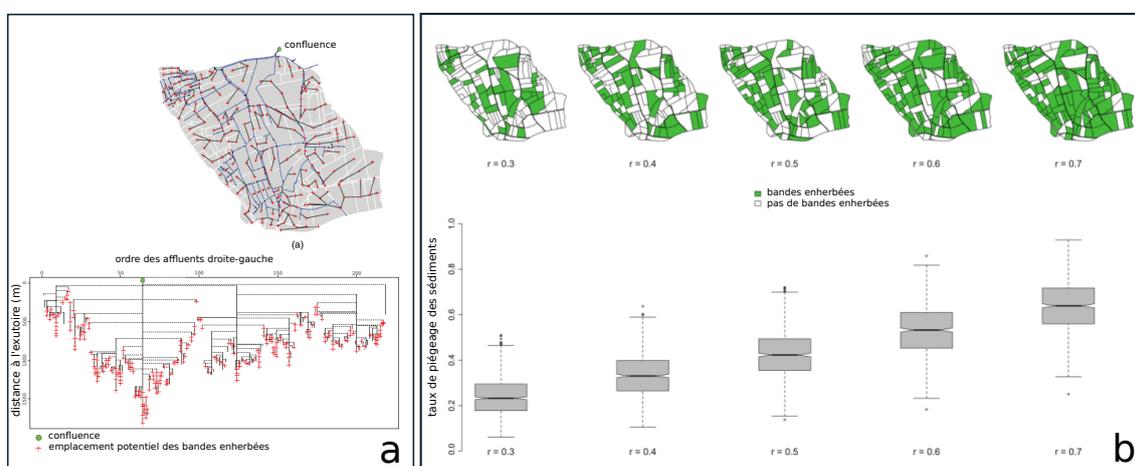


FIGURE 13 – a- Localisation potentielle des bandes enherbées sur le bassin de Roujan en représentation géographique (haut) ou topologique (bas) b- Evolution du taux de piégeage en sédiments en fonction de r (bas) et configuration optimale à r fixé (haut) (adapté de GUMIERE, BAILLY et al. [161])

De même, dans les travaux de LEVAVASSEUR, BAILLY et al. [137], le simulateur stochastique de réseaux de fossés de BAILLY, LEVAVASSEUR et al. [114], uniquement conditionné par les biefs de fossé connus dans la BD-Topo-©-IGN, a été couplé au modèle MHYDAS [27] et au segmenteur paysager GeoMHYDAS [102] afin d’estimer l’effet de la densité et de la topologie de réseaux de fossés 1) sur différentes caractéristiques de l’hydrogramme de crue (volume, temps de concentration, débit maximum) et 2) sur le ruissellement de surface parcellaire. Cette expérience a été analysée pour différentes étendues de sous-bassins de la Peyne (34) et par comparaison aux hydrogrammes générés par le réseau actuel. Les résultats de cette étude (lame de pluie triangulaire de 50 mm en 4 heures) montrent que 1) logiquement, un réseau de fossés plus dense accroît le pic de crue et diminue le ruissellement de surface, que 2) pour le sous-bassin de plus grande étendue (6.4 km²), seule la densité du réseau impacte le ruissellement de surface moyen et l’hydrogramme de crue et inversement 3) que pour les bassins de petites étendues (< 2 km²), c’est la topologie du réseau qui importe puisqu’elle conditionne la surface amont drainée. Par ailleurs, l’analyse de ces expérimentations numériques laissent à penser que le réseau actuel est optimisé pour limiter le ruissellement de surface.

Optimisation spatiale des réseaux Dans les travaux de GUMIERE, RACLOT et al. [118] (Fig. 13-b), l’exploration de situations par couplage de simulateurs stochastiques spatiaux et de modèles mécanistes par filtrage de Monte-Carlo [74] permet d’identifier des configurations spatiales optimales. Ceci dit, les plans d’expérience développés qui n’avaient pas d’objectif initial d’optimisation sont peu efficaces comparés à d’autres méthodes d’optimisation spatiale [60, 133]. Optimiser la géométrie d’un réseau pour maximiser une de ses fonctionnalités, question finalisée, doit se penser par rapport à une situation de référence qu’est la situation actuelle. Avant d’optimiser, il faut donc s’assurer de deux choses : que la fonction hydrologique soit bien sensible au facteur sur lequel on cherche à modifier le réseau (le réseau, levier potentiel) et que la situation actuelle soit sous-optimale (il existe encore des marges de manœuvre). Les travaux de LEVAVASSEUR, BAILLY et al. [189] sont illustratifs à ce titre. Ces travaux résultent d’une phase d’enquête d’une centaine d’agriculteurs confirmant le rôle premier anti-érosif des fossés sur la plaine viticole languedocienne. Dans ces travaux, le simulateur de réseaux de fossés qui cherche à minimiser le risque d’érosion en ravine par parcelle selon l’indice *SPI* (section 8.1.2) est utilisé pour générer une collection de réseaux de différentes densités (différentes longueurs totales) (Fig. 14-a), sur 4 sous-bassins du bassin de la Peyne (34). Cette densité représente ici le coût du réseau pour les agriculteurs (réalisation, maintien), et l’indicateur *SPI* moyen du bassin représente l’efficacité de sa fonction première anti-érosive. Sur la figure 14-b, on peut voir sur les 4 bassins testés que le réseau actuel, résultat probable d’une histoire d’essai-erreurs d’aménagements successifs, a fini par converger vers une configuration optimale au regard du compromis entre coûts liés au réseau (densité) et efficacité de lutte anti-érosive. Il n’y a donc pas grand chose à espérer de la modification du tracé du réseau de fossés pour cette fonction anti-érosive.

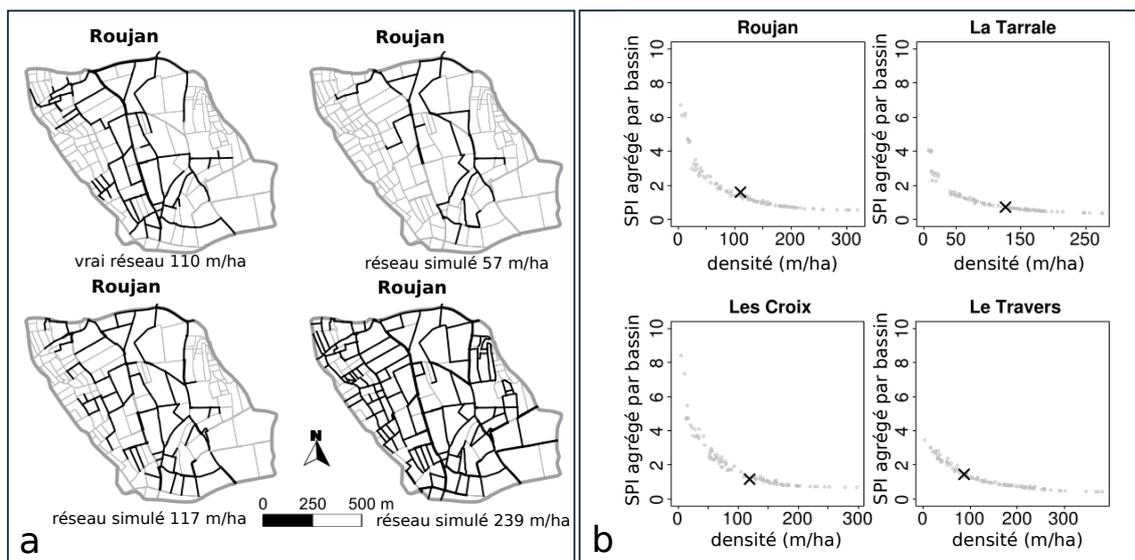


FIGURE 14 – a- Réseaux actuels et simulés pour Roujan ; b- Réseaux simulés (points gris) et réseaux actuels (croix) sur un graphe densité de réseau- SPI agrégé (adapté de LEVAVASSEUR, BAILLY et al. [189])

Synthèse : Impacts hydrologiques de la géométrie des réseaux hydrographiques

Au delà d'une contribution métrologique pour la démultiplication de mesures hydrologiques dans l'espace, ma contribution s'est essentiellement concrétisée par la réalisation d'expériences numériques au travers du chaînage entre simulateurs stochastiques de réseaux et simulateurs hydrologiques mécanistes. J'ai pu ainsi explorer les relations entre structure du réseau (tracé ou propriétés locales) et fonctionnement hydrologique, et commencer à explorer quelques comportements d'échelle de ces relations. Un apport de ces expériences est également d'évaluer l'intérêt de poursuivre un objectif d'optimisation des réseaux par modification d'un réseau de référence. Ces travaux ont été réalisés au sein de deux thèses et ont donné lieu à 4 articles. Cependant, pour gagner en généralité dans les résultats (se dégager du contexte physique particulier du bassin support), il me semble qu'il faut étendre ce type d'expériences en générant conjointement les autres caractéristiques de la mosaïque (reliefs et parcellaires par exemple).

9 Perspectives de recherche

Le bilan de mes activités de recherche révèle une position jusqu'alors essentiellement spatiale et descriptive avec la connaissance et la modélisation hydrologique 'événementielle' en toile de fond. Dans ce bilan, mon originalité scientifique a porté sur deux points : 1) la combinaison de modèles stochastiques spatiaux et de signaux de télédétection pour identifier et simuler des structures de réseaux et 2) le recours à des expériences numériques et analyses de sensibilité spatiales (chaînages entre générateurs de paysage stochastiques et modèles hydrologiques) pour explorer des questions de précision des données ou de comportement émergent du paysage. Par rapport à ce bilan, beaucoup d'éléments me poussent à assurer une continuité méthodologique pour mon projet, pour lequel j'envisage cependant de me focaliser uniquement sur les réseaux hydrographiques des agrosystèmes aux échelles intermédiaires, voire locales (échelles du bief et du paysage) et suivant un positionnement plus cognitif sur des aspects éco-hydrologiques. J'envisage a contrario une réduction de mon activité en télédétection.

Quelques éléments viennent expliquer ces inflexions.

Les réseaux hydrographiques des paysages cultivés sont des réseaux souvent intermittents et quasi exclusivement d'origine anthropique. Ils sont denses dans le paysage (par exemple, réseaux de fossés 2 à 4 fois plus denses que les réseaux de cours d'eau [180]) et à ces titres, ils sont des habitats ou corridors écologiques d'intérêt mais rarement considérés [29, 185] car encore mal connus [71]. L'intensité de leur entretien et donc la variabilité temporelle de leurs propriétés locales, notamment celles liées à la végétation, y est également forte comme l'ont montré LEVAVASSEUR, BIARNÈS et al. [163]. Cette intensité d'entretien, sensible à l'environnement économique, aux dynamiques agraires [55], à la position dans le paysage est susceptible par modification de dégrader ou au contraire d'améliorer les performances hydrologiques, écologiques et économiques des agrosystèmes [13, 170]. Ce sont souvent des objets "neufs" aux échelles de temps géomorphologiques (par création et/ou entretien) et nombre de lois naturelles d'équilibre s'en retrouvent biaisées [108, 51]. Enfin, par comparaison aux fleuves et rivières, leurs fonctions sont souvent ambivalentes, suivant la saison (drainage ou infiltration [85]) ou suivant leur position dans le paysage (accélérateur de crue sur les versants [137] ou ralentisseur dynamique de crue dans la plaine d'inondation [78]). L'analyse bibliographique réalisée par DOLLINGER, DAGES et al. [175] montre bien cette pluralité de fonctions pour les réseaux de fossés. Ce sont, à ces divers titres (fortes variabilités, intermittence, ambivalence, caractère artificiel et donc leviers importants), des objets de recherche hydrologique intéressants (*landscape connectivity*), malléables, mais à considérer en continu, au-delà de

l'événement de crue, pour bien en représenter les diverses fonctions [176].

Un deuxième élément concerne une propriété locale des réseaux qui semble cristalliser nombre de leur fonctions dans les paysages cultivés et sur laquelle je compte m'investir : leur degré de végétalisation. En effet, cette propriété locale semble présenter une forte variabilité sur les pas de temps les plus courts et contrôle nombre de processus qui s'y déroulent, biotiques

comme abiotiques [175, 138, 51, 174]. Les travaux pionniers de LEVAVASSEUR, BIARNÈS et al. [163] ont par exemple permis de mesurer l'importance de cette variabilité temporelle sur des réseaux de fossés du Languedoc et son impact théorique sur le pouvoir de rétention des pesticides. Pour autant ces observations n'ont pas encore été formalisées et elles restent qualitatives. Qui plus est, d'un point de vue finalisé, le contrôle de la végétalisation des réseaux semble un levier d'action particulièrement atteignable, du fait notamment que ces réseaux sont des espaces non-productifs agricoles.

Un troisième élément est lié à mes travaux en télédétection. Comme dit précédemment, l'apport essentiel en télédétection me semble venir de la donnée brute, de l'instrument ou de la valorisation finalisée des données, avec leur imperfection. Une position plus "entre-deux" (que j'ai pu avoir) peut amener à une position d'unique "testeur" au gré des sorties du dernier capteur. Être au plus près de l'instrument (conception) dans l'espoir d'aller vers une meilleure description des caractéristiques physiques des réseaux hydrographiques ou dans l'assimilation de signaux de télédétection dans des modèles me semble plus motivant. On ne peut pas tout faire et je serai sur une position plus en aval, utilisateur des données de télédétection (notamment de MNT hautement résolus) tout en restant en veille sur l'instrumentation LiDAR bathymétrique, pour des questions de caractérisation à haute résolution de surfaces et végétations immergées dans les réseaux des paysages cultivés.

Un quatrième élément vient du fait que, dans mes travaux précédents, j'ai pu être confronté aux limites d'une approche purement spatiale et statique sur les réseaux hydrographiques, en accord avec le statut qui leur est le plus souvent donné dans les modèles hydrologiques "eulériens" spatialement explicites et "événementiels" [27]. Ces limites peuvent être une absence de structure spatiale observée, perturbée par une grande variabilité temporelle (par exemple, le degré de végétalisation des réseaux de fossés dans les travaux de thèse de LEVAVASSEUR [136]) ou encore une dynamique de la structure support des écoulements concentrés comme le montrent les travaux de MARÉCHAL, AYRAL et al. [150], de GHESQUIERE, HALLEMA et al. [70], dynamique encore mal représentée dans les modèles hydrologiques [107] et pour lesquelles des approches de modélisation lagrangiennes alternatives telles celles de REANEY [79] émergent.

Enfin, ma position désormais au sein du LISAH, favorise un recentrage sur des problématiques de connectivité hydrologique dans les paysages cultivés et une position plus cognitive en éco-hydrologie et éco-hydraulique (étude des relations entre dynamiques végétales et hydrodynamique).

Pour l'étude des réseaux hydrographiques des agrosystèmes, des verrous méthodologiques se posent toujours, dans la continuité de ceux que j'ai déjà abordés lors de mon bilan (capacités d'observation, d'identification des paramètres clés, d'identification de leur mode de représentation optimal et de reconfiguration de réseaux). Cependant, plusieurs verrous cognitifs se posent également pour représenter, évaluer les fonctions et réfléchir de nouvelles configurations des réseaux hydrographiques des agrosystèmes [175]. Citons comme exemples notre capacité à représenter les multiples processus hydrologiques [85, 77], géomorphologiques [51, 174], éco-physiologiques [12], écologiques [134, 153] et bio-géochimiques [175] qui s'y déroulent ainsi que leurs interactions ; notre capacité à représenter leur fonctionnement en continu dans le temps (pas uniquement à l'échelle de l'événement) pour bien intégrer les alternances sai-

sonnières de leur fonctionnalité. Ceci suppose donc d'être capable de représenter les évolutions en continu de ces réseaux (dynamique des réseaux), tant du point de vue de leurs propriétés (végétation notamment) que de leur structure, évolution régulièrement forcée par les actes techniques réalisées par les agriculteurs et collectivités [163]. Ceci implique également de comprendre les logiques qui sous-tendent les actes techniques sur ces réseaux.

Nombre importants de ces verrous sont abordés par les différentes équipes du LISAH ou ses partenaires et ma contribution cible les sous-sections présentées ci-après suivant les axes de ma démarche scientifique (Fig. 2) mais appliqués aux structures spatio-temporelles des réseaux hydrographiques des paysages cultivés, sur des temps plutôt "courts" (saison, année). Ces différentes contributions visent à aborder les différents verrous, cognitifs comme méthodologiques, exposés ci-dessus et dans les différentes synthèses de mon bilan.

9.1 Identification de structures spatio-temporelle de réseaux hydrographiques

9.1.1 Identification à partir de données de télédétection

En continuité avec des travaux de télédétection déjà réalisés sur la caractérisation de la végétation mais à une toute autre échelle [33, 156, 159], des méthodes de caractérisation quantitatives et d'analyse spatio-temporelle de deux propriétés à une échelle locale (bief à paysage) de la végétation seront investiguées : la géométrie de la partie épigée de la végétation des réseaux (hauteur, taux de couverture, porosité, volume) par techniques LiDAR et photogrammétries rapprochées (proxy-détection), en conditions émergées mais aussi immergées [66], ainsi que la composition floristique de cette végétation. Cette géométrie impacte au premier ordre les écoulements selon NEPF [138] et ces variables sont soit directement soit indirectement (après transformation par modèles allométriques en biomasse) les données de calage de modèles éco-physiologiques.

Pour la seconde, il s'agit d'observer (par suivi photogrammétrique et relevés) et comprendre les dynamiques (lentes) de populations végétales et mécanismes écologiques sous forçage des modalités et calendriers d'entretien des réseaux. Je ne serais sur ce point qu'en appui aux partenaires écologues (LISAH et autres) sur les techniques d'observation et sur l'analyse spatio-temporelle des données.

Persuadé que les modifications de tracés de réseaux, du moins dans des contextes d'agro-systèmes méditerranéens, ne sont pas continues dans le temps mais se font par "à coup" suite aux événements exceptionnels (qui incitent les acteurs à corriger les réseaux après incision, comblement ou effondrement) et dans un objectif de compréhension des déterminants [170], de mesure et de simulation de la dynamique de tracé de réseaux sur des temps courts, j'envisage d'aller vers une analyse rétrospective de la construction-destruction des réseaux dans les paysages cultivés. Cela suppose entre autre de continuer à développer des méthodes de détection des réseaux (sur MNT hautement résolus notamment) pour retrouver ces informations *a posteriori* sur données historiques (quelques années).

9.1.2 Modélisation spatio-temporelle

Afin d'aller vers une modélisation continue de la dynamique des caractéristiques de réseaux qui permette ensuite de simuler leur ambivalences de fonctionnement au cours du

temps, j’ambitionne de développer une modélisation bio-décisionnelle [103] de l’état de végétalisation des réseaux hydrographiques des agrosystèmes, continue sur l’année et intégrée, à l’instar des travaux de PARE [124]. Cette modélisation couple (interactions) 1) le processus de décision des actes techniques modifiant les dynamiques végétales (opérations d’entretien par curage, brûlis, désherbage et fauche) mais suivant ici plusieurs catégories d’acteurs aux territoires et calendriers différents (collaboration avec des agronomes LISAH et autres), et 2) les interactions entre actes techniques, climat et flux dans le réseau. Pour la modélisation des actes techniques, j’envisage une approche mixte stochastique-déterministe, non par religion, mais parce que sur des éléments non concurrentiels à la production agricole, le caractère non prévisible des actes est bien plus marqué [163].

Cette modélisation doit comprendre également un module écophysologique (solicitation de collaborations sur ce point) qui peut remobiliser des modèles existants (par exemple, la composante éco-physiologique du modèle WEPP [17]) mais qui suppose en amont 1) de disposer de données de calage des modèles pour des espèces ou famille d’espèces propres à ces réseaux (espèces plus ou moins hydrophiles et pas toujours aquatiques), peu ou pas référencées dans la littérature (observations développées en section 9.1.1), 2) de caractériser le ”micro-climat” au sein de ces réseaux intermittents et 3) de paramétrer également une partie racinaire (collaborations avec des pédologues du LISAH). Suivant l’étendue temporelle modélisée (si supérieure à 1 an), cette modélisation pourra aussi chercher à coupler des modèles de processus écologiques observés sous forçage lié aux pratiques d’entretien (dynamiques de population végétale), développés par mes partenaires.

Afin d’être en mesure de transformer des caractéristiques évolutives de végétation de réseaux observées ou simulées en paramètres hydrodynamiques, eux aussi évolutifs, je projette, en collaboration avec des hydrauliciens et écologues, de rechercher des méthodes de pré-détermination des effets de la végétation émergente et immergée sur les écoulements en canaux selon une approche qui restera macroscopique, à l’échelle d’un bief (prédétermination de paramètres de rugosité hydraulique au sens large). Ces travaux ont déjà été entamés pour partie sur des aspects métrologiques [173, 186] qui ont portés sur la caractérisation de la géométrie de la végétation dans des petits canaux (sous-section 9.1.1). La littérature sur le sujet est en plein essor : GREEN [41], NEPF [138], WHITTAKER, WILSON et al. [154] proposent par exemple des formulations de paramètres hydrodynamiques globaux (coefficient de Manning (ou Strickler), facteur de frottement de Darcy-Weisbach, coefficient de traînée) qui intègrent un facteur de blocage du flux par la végétation. Ces formulations permettent d’explicitier un peu plus le sens physique de ces différentes paramètres [164] mais on ne sait encore clairement aujourd’hui si ils s’expriment préférentiellement à l’échelle d’un bief en fonction de la part de hauteur de la section occupée par cette végétation, de la surface frontale (mais laquelle?), de la surface de l’enveloppe ou du volume des végétaux immergés, voire de leur biomasse ou de leur LAI²⁵ [41, 154, 120, 138]. Qui plus est, la flexibilité des végétaux, trait lié à chaque espèce, intervient [188] mais cette flexibilité reste peu explicitée dans ces formulations souvent résultats d’expérimentations réalisées sur cylindres rigides. La flexibilité est alors introduite au travers de facteurs correctifs empiriques (voir WHITTAKER, WILSON et al. [188] ou VERSCHOREN, MEIRE et al. [190]). Un pari ici, déjà évoqué par LUHAR, ROMINGER et al. [75], est qu’il est possible, malgré tout, de prédéterminer ces paramètres hydrodynamiques.

25. Leaf Area Index

miques à partir d’observables sur la végétation (typologies ou proxy-détection) [179], mais par espèce (ou groupe d’espèces suivant leur différents traits [188]) et suivant la hauteur d’eau, voire par type de ”patch”, toute chose étant égale par ailleurs.

9.2 Structures spatio-temporelles et incertitudes : résolutions et échantillonnages optimaux

Observer de manière optimale les caractéristiques de réseaux hydrographiques (choix d’un protocole suivant des critères de résolution, de plan d’échantillonnage et de niveau de bruit de mesure) est une problématique qui relève d’un intérêt pratique, méthodologique et de ”terrain”. C’est une problématique inhérente à toute méthode de représentation spatio-temporelle (faire l’effort d’observation juste nécessaire) et elle finit toujours, selon moi, par émerger même si ce besoin est rarement le premier exprimé. En cartographie, lorsque les structures spatiales sont connues, des méthodes ont été proposées pour optimiser les observations : pour optimiser la résolution spatiale lorsque la carte est issue de données images [50] ou pour optimiser le plan d’échantillonnage spatial initial [143], voire complémentaire lorsque la carte est issue de schémas d’interpolation [86] ou de classification d’images [97]. Une première difficulté vient de l’absence de méthodes qui permettent de raisonner conjointement résolutions et plans d’échantillonnages spatiaux (et encore plus résolutions, plans d’échantillonnages et niveaux de bruit de mesure).

En prenant exemple sur l’application présentée en fin de section précédente (facteur de blocage ”volumique” du canal par la végétation, par exemple), quand l’observation spatiale (ou spatio-temporelle) sert au-delà de la carte à simuler un phénomène physique (les pertes de charge sur un bief de canal en régime permanent), une autre difficulté vient de l’absence de formalisme unifié où le critère d’optimisation dépend de la précision attendue sur le phénomène simulé (pertes de charge).

Dans cette problématique générale qui prolonge l’axe 2 de mon bilan, je chercherai à développer des protocoles d’observations optimisés de variables sur réseaux hydrographiques (boucle de rétro-action en vert à gauche sur la figure 2), dans l’espace comme dans le temps. Les travaux sur les indices de sensibilité spatiaux de SAINT-GEOURS, LAVERGNE et al. [140], utilisés dans un schéma inverse²⁶, me semblent poser les bases d’un formalisme possible pour aborder ces questions.

9.3 Impacts hydrologiques de réseaux hydrographiques : exploration théorique des lois d’échelle structure-fonction

Comme évoqué en fin de section 8.3.2, les démarches d’expérimentation numérique que j’ai initiées, par chaînage entre simulateurs stochastiques du paysage et simulateurs hydrologiques, ont permis d’étudier la sensibilité de la réponse hydrologique à la structure des réseaux, mais de manière particulière au contexte des bassins supports des expérimentations. Pour gagner en généralité et dans la continuité de ces travaux, l’article de VAN NIEUWENHUYSE, ANTOINE et al. [126] me paraît représenter le type de démarche numérique que je projette de poursuivre sur le lien structure-fonctionnement de la mosaïque paysagère. Toute-

26. par exemple, rechercher pour une variabilité de sortie donnée, la résolution et les paramètres d’incertitude sur chaque facteur d’entrée tel que les indices de sensibilité par facteur soient minimaux et égaux

fois, par rapport à ces travaux qui s'appuient sur des mosaïques paysagères synoptiques peu réalistes et mono-échelle, j'envisage deux inflexions. La première est de chercher à développer des générateurs de mosaïques paysagères virtuelles (également de petite dimension) mais plus réalistes (reproduisant une gamme de motifs observés) et multi-composants ; par exemple, en cherchant à générer conjointement relief (voir HILLIER, SOFIA et al. [178]), parcellaire (voir PAPAIX, ADAMCZYK et al. [123]) et réseaux, et tenant compte de l'interdépendance entre composantes. La deuxième inflexion, dans la poursuite des travaux de SAINT-GEOURS, BAILLY et al. [168], est d'explorer les lois d'échelles (spatiales ou temporelles) sur ces liens structures-fonctions. Sans totalement quitter les schémas d'analyse de sensibilité spatiale globale par étiquetage, le coût (CPU) de simulation et la dimensionnalité du problème m'obligera sans doute à aller vers des approches d'analyse de sensibilité par méta-modélisation, par exemple par simples classifications supervisées (CART) ou régressions. Les questions d'optimisation des plans d'expérience, et des approches par méta-modélisation reposent de manière encore plus pressante la question de métriques de dissimilarité disponibles sur les mosaïques paysagères [126].

Références

- ¹H LAMBERT, « Photometria sive de misura et gradibus luminis colorum et umbrae, 1790, a. beer », *Ann. Physik* **86**, 1852 (1790).
- ²G. LACEY, « Stable channels in alluvium (includes appendices). », in *Minutes of the proceedings*, t. 229, 1930 (Thomas Telford, 1930), p. 259–292.
- ³L. B. LEOPOLD et T. MADDOCK JR, *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*, rapp. tech. (1953).
- ⁴A. SCHEIDEGGER, « A stochastic model for drainage patterns into an intramontane trench », *Hydrological Sciences Journal* **12**, 15–20 (1967).
- ⁵J. G. SPEIGHT, « Parametric description of land form », *Land evaluation*, 239–250 (1968).
- ⁶A. G. JOURNAL et C. J. HUIJBREGTS, *Mining geostatistics* (Academic press, 1978).
- ⁷J. FRYER, « Photogrammetry through shallow water », *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying* **38**, 25–38 (1983).
- ⁸G. C. GUENTHER, *Airborne laser hydrography : system design and performance factors*, rapp. tech. (DTIC Document, 1985).
- ⁹M. G. TURNER, « Landscape ecology : the effect of pattern on process », *Annual review of ecology and systematics*, 171–197 (1989).
- ¹⁰I. D. MOORE, R. GRAYSON et A. LADSON, « Digital terrain modelling : a review of hydrological, geomorphological, and biological applications », *Hydrological processes* **5**, 3–30 (1991).
- ¹¹F BUREL, J BAUDRY, P. CLERGEAU, P CONSTANT et M.-C. EYBERT, « Approche spatiale des phénomènes écologiques : échelles et hiérarchie », *Bulletin d'écologie* **23**, 93–101 (1992).
- ¹²M. A. SMITH, J. L. DODD, Q. D. SKINNER et J. D. RODGERS, « Dynamics of vegetation along and adjacent to an ephemeral channel », *Journal of Range Management*, 56–64 (1993).
- ¹³F. GALLART, P. LLORENS et J. LATRON, « Studying the role of old agricultural terraces on runoff generation in a small mediterranean mountainous basin », *Journal of Hydrology* **159**, 291–303 (1994).
- ¹⁴Y LE COARER et B DUMONT, « Modélisation de la morphodynamique fluviale pour la recherche des relations habitat/faune aquatique », *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 309–316 (1995).
- ¹⁵J. WOOD, « The geomorphological characterisation of digital elevation models », thèse de doct. (University of Leicester, 1996).
- ¹⁶C. HEIPKE, H MAYER, C WIEDEMANN et O JAMET, « Evaluation of automatic road extraction », *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **32**, 151–160 (1997).
- ¹⁷J. M. LAFLÉN, W. ELLIOT, D. FLANAGAN, C. MEYER et M. NEARING, « Wepp-predicting water erosion using a process-based model », *Journal of Soil and Water Conservation* **52**, 96–102 (1997).

- ¹⁸E. J. PEBESMA et G. B. HEUVELINK, « Latin hypercube sampling of gaussian random fields », *Technometrics* **41**, 303–312 (1999).
- ¹⁹P. S. FRAZIER, K. J. PAGE et al., « Water body detection and delineation with landsat tm data », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **66**, 1461–1468 (2000).
- ²⁰C. PUECH, *Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*, Habilitation à diriger des recherches Mécanique des Milieux, Géophysique et Environnement, INPG Grenoble, 2000.
- ²¹L. BREIMAN, « Random forests », *Machine learning* **45**, 5–32 (2001).
- ²²F. LUKAC, « Caractérisation par télédétection thr du réseau hydraulique de surface d'un marais atlantique - qualité de caractérisation et résolution spatiale. », mém.de mast. (GDPA, 2001).
- ²³D. G. TARBOTON et D. P. AMES, « Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data », in *World water and environmental resources congress* (Am. Soc Civil Engrs USA, 2001), p. 20–24.
- ²⁴A. W. WESTERN, G. BLÖSCHL et R. B. GRAYSON, « Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns », *Water Resources Research* **37**, 83–97 (2001).
- ²⁵E. BENGOTXEA, « Inexact graph matching using estimation of distribution algorithms », Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris (2002).
- ²⁶C. BIRKETT, L. MERTES, T DUNNE, M. COSTA et M. JASINSKI, « Surface water dynamics in the amazon basin : application of satellite radar altimetry », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012) **107**, LBA–26 (2002).
- ²⁷R. MOUSSA, M. VOLTZ et P. ANDRIEUX, « Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events », *Hydrological processes* **16**, 393–412 (2002).
- ²⁸A. PORPORATO et I. RODRIGUEZ-ITURBE, « Ecohydrology-a challenging multidisciplinary research perspective/ecohydrologie : une perspective stimulante de recherche multidisciplinaire », *Hydrological sciences journal* **47**, 811–821 (2002).
- ²⁹P. D. ARMITAGE, K. SZOSZKIEWICZ, J. H. BLACKBURN et I. NESBITT, « Ditch communities : a major contributor to floodplain biodiversity », *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **13**, 165–185 (2003).
- ³⁰J. BAILLY, C. PUECH et J. MASSE, « Applications de l'imagerie à très haute résolution spatiale pour le suivi de l'hydromorphie du marais atlantique de bourgneuf », *Photo-interprétation* **1**, 22–30 (2003).
- ³¹P. CHAPONNIÈRE, « Télédétection et bathymétrie de rivière : application à la durance », mém.de mast. (ENSG de Nancy, 2003).
- ³²L. COMORETTO, « Analyse des chemins de l'eau d'un petit bassin rural sur mnt thr », mém.de mast. (Université de Montpellier II, 2003).
- ³³S. DURRIEU, J. BAILLY, D. CORTI, J. BOUREAU et C. PUECH, « Tree perception accuracy in high-resolution images : exploratory analysis of combined effects of image parameters and stand characteristics », in *Geoscience and remote sensing symposium, 2003. igarss '03. proceedings. 2003 ieee international*, t. 4 (2003), p. 2532–2534.

- ³⁴W. E. WALKER, P. HARREMOËS, J. ROTMANS, J. P. van der SLUIJS, M. B. van ASSELT, P. JANSSEN et M. P. Krayser von KRAUSS, « Defining uncertainty : a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support », [Integrated assessment](#) **4**, 5–17 (2003).
- ³⁵J. GHESQUIÈRE, *Bilan des essais des capteurs limnimétriques capacitifs*, rapp. tech. (Cemagref, 2004).
- ³⁶T. HENGL, G. B. HEUVELINK et A. STEIN, « A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging », [Geoderma](#) **120**, 75–93 (2004).
- ³⁷R. KISS, « Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations », [Journal of Hungarian Geomathematics](#) **2**, 16–29 (2004).
- ³⁸B. ROUX, « Photographies aériennes par drone », Founder member of the Avion Jaune start-up company : <http://www.lavionjaune.fr/>, mém.de mast. (GDTA, 2004).
- ³⁹H. M. TULLDAHL et K. O. STEINVALL, « Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding », [Applied optics](#) **43**, 2462–2483 (2004).
- ⁴⁰J. CROKE, S. MOCKLER, P. FOGARTY et I. TAKKEN, « Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity », [Geomorphology](#) **68**, 257–268 (2005).
- ⁴¹J. C. GREEN, « Comparison of blockage factors in modelling the resistance of channels containing submerged macrophytes », [River research and applications](#) **21**, 671–686 (2005).
- ⁴²D. LAGUE, N. HOVIUS et P. DAVY, « Discharge, discharge variability, and the bedrock channel profile », [Journal of Geophysical Research: Earth Surface](#) (2003–2012) **110** (2005) 10.1029/2004JF000259.
- ⁴³P. MONESTIEZ, J. BAILLY, P. LAGACHERIE et M. VOLTZ, « Geostatistical modelling of spatial processes on directed trees : application to fluvisol extent », [Geoderma](#) **128**, 3-4, 179–191 (2005).
- ⁴⁴J. BAILLY, D. FEURER, Y. LECOARER, C. PUECH, P. CHAPONNIERE et B. ROUX, « Gravel-bed river depth mapping with cokriging using aerial high resolution images. », in [Egu hydrological sciences](#) (2006).
- ⁴⁵J. BAILLY, P. LAGACHERIE, C. MILLIER, C. PUECH et P. KOSUTH, « Comparison of artificial drainage network detection rates in cultivated landscapes with lidar and high resolution irc images », in [Egu hydrological sciences](#) (2006).
- ⁴⁶J. BAILLY, P. MONESTIEZ et P. LAGACHERIE, « Modeling spatial variability along drainage networks with geostatistics », [Mathematical Geosciences](#) **38**, Best paper award 2006, 515–539 (2006).
- ⁴⁷K. BEVEN, « A manifesto for the equifinality thesis », [Journal of hydrology](#) **320**, 18–36 (2006).
- ⁴⁸N. CRESSIE, J. FREY, B. HARCH et M. SMITH, « Spatial prediction on a river network », [Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics](#) **11**, 127–150 (2006).

- ⁴⁹M. FALKENMARK et J. ROCKSTRÖM, « The new blue and green water paradigm : breaking new ground for water resources planning and management », *Journal of water resources planning and management* (2006) [10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:3\(129\)](#).
- ⁵⁰T. HENGL, « Finding the right pixel size », *Computers & Geosciences* **32**, 1283–1298 (2006).
- ⁵¹S. A. LECCE, P. A. GARES et P. P. PEASE, « Drainage ditches as sediment sinks on the coastal plain of north carolina », *Physical Geography* **27**, 447–463 (2006).
- ⁵²A. LESAIGNOUX, « Modélisation et simulations de trains d’ondes lidar vert : application à la détection de faibles lames d’eau en rivière », mém.de mast. (Université de Montpellier II - CNAM, 2006).
- ⁵³F PAPPENBERGER et K. J. BEVEN, « Ignorance is bliss : or seven reasons not to use uncertainty analysis », *Water resources research* **42** (2006) [10.1029/2005WR004820](#).
- ⁵⁴S. RANA, *Use of plan curvature variations for the identification of ridges and channels on dem* (Springer, 2006).
- ⁵⁵E. TEMPLE-BOYER, « Aménagement et ménagement du paysage dans la dorsale tunisienne : évolution, représentation et gestion de la conservation des eaux et des sols à l’échelle de trois petits bassins-versants », thèse de doct. (Lyon, Ecole normale supérieure Lettres et sciences humaines, 2006).
- ⁵⁶J. M. VER HOEF, E. PETERSON et D. THEOBALD, « Spatial statistical models that use flow and stream distance », *Environmental and Ecological statistics* **13**, 449–464 (2006).
- ⁵⁷T. ALLOUIS, « Analyse et traitement de trains d’ondes de retour lidar bathymétrique : application aux lames d’eau de faibles épaisseur », 20/20, mém.de mast. (ESIEA, 2007).
- ⁵⁸E. CHRISTOPHE et J. INGLADA, « Robust road extraction for high resolution satellite images », in *Image processing, 2007. icip 2007. ieee international conference on*, t. 5 (IEEE, 2007), p. V–437.
- ⁵⁹D FEURER, J.-S BAILLY, Y LE COARER, C PUECH et A. A VIAU, « On the use of very high resolution optical images to map river bathymetry : upscaling from aerial to satellite imagery », in *Second space for hydrology workshop "surface water storage and runoff : modeling, in-situ data and remote sensing"*, 12 - 14 november 2007, geneva, switzerland (2007).
- ⁶⁰A. HOLZKÄMPER et R. SEPPELT, « A generic tool for optimising land-use patterns and landscape structures », *Environmental Modelling & Software* **22**, 1801–1804 (2007).
- ⁶¹A. LESAIGNOUX, J. BAILLY, T. ALLOUIS et D. FEURER, « Épaisseur d’eau minimale mesurable en rivière sur fronts d’ondes lidar simulés », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* **186**, 48–53 (2007).
- ⁶²J. C. REFSGAARD, J. P. van der SLUIJS, A. L. HØJBERG et P. A. VANROLLEGHEM, « Uncertainty in the environmental modelling process—a framework and guidance », *Environmental modelling & software* **22**, 1543–1556 (2007).
- ⁶³S. REYES-CASTILLO, « Cartographie des profondeurs d’eau en rivière par imagerie spatiale », mém.de mast. (Master BGEA, spécialité IEGB, Université de Montpellier 2, 2007).

- ⁶⁴J. BAILLY, P. LAGACHERIE, C. MILLIER, C. PUECH et P. KOSUTH, « Agrarian landscapes linear features detection from lidar : application to artificial drainage networks », *International Journal of Remote Sensing* **29(12)**, 3489–3508 (2008).
- ⁶⁵N. BERCHER, « Accuracy of satellite radar altimetry over rivers : development and application of a standardized method to characterize the quality of radar altimetry products for inland water hydrology », thèse de doct. (AgroParisTech, 2008).
- ⁶⁶A. COLLIN, P. ARCHAMBAULT et B. LONG, « Mapping the shallow water seabed habitat with the shoals », *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* **46**, 2947–2955 (2008).
- ⁶⁷D. FEURER, « Géométrie 3d des lits de rivière par stéréophotogrammétrie à travers l’eau », thèse de doct. (AgroParisTech-École Doctorale SIBAGHE & Université de Laval-Faculté de Géographie et Géomatique, 2008).
- ⁶⁸D. FEURER, J. BAILLY, C. PUECH, Y. LECOARER et A. VIAU, « Very high resolution mapping of river immersed topography by remote sensing », *Progress in Physical Geography* **32**, 1–17 (2008).
- ⁶⁹D. FEURER, C. PUECH et J. BAILLY, « Measuring depth of a clear, shallow, gravel-bed river by through-water photogrammetry with small format cameras and ultra light aircrafts. », in *Geophysical research abstracts*, t. 10, sous la dir. d’E. G. A. 2008, EGU2008-A-00000 (European Geophysical Union, 2008).
- ⁷⁰J. GHESQUIERE, D. HALLEMA et R. MOUSSA, « Hydraulic-hydrologic spatially distributed modelling of extreme flood events with overbank flow on farmed catchments », in *La cour des miracles de l’hydrologie the court of miracles of hydrology. 2008-06-182008-06-20*, paris, france, fra (Cemagref/Engref-AgroParistech, 2008).
- ⁷¹I. HERZON et J. HELENIUS, « Agricultural drainage ditches, their biological importance and functioning », *Biological Conservation* **141**, 1171–1183 (2008).
- ⁷²A. JACOME, C. PUECH, D. RACLOT, J.-S. BAILLY et B. ROUX, « Extraction d’un modèle numérique de terrain à partir de photographies par drone », in *Extraction et gestion des connaissances spatio-temporelles. applications à la géomatique pour la gestion des territoires*, sous la dir. de C. RNTI (Cépaduès, 2008) chap. 6, p. 79–100.
- ⁷³C. J. LEGLEITER et P. C. KYRIAKIDIS, « Spatial prediction of river channel topography by kriging », *Earth Surface Processes and Landforms* **33**, 841–867 (2008).
- ⁷⁴J. S. LIU, *Monte carlo strategies in scientific computing* (Springer Science & Business Media, 2008).
- ⁷⁵M. LUHAR, J. ROMINGER et H. NEPF, « Interaction between flow, transport and vegetation spatial structure », *Environmental Fluid Mechanics* **8**, 423–439 (2008).
- ⁷⁶W. A. MARCUS et M. A. FONSTAD, « Optical remote mapping of rivers at sub-meter resolutions and watershed extents », *Earth Surface Processes and Landforms* **33**, 4–24 (2008).
- ⁷⁷Y. NÉDÉLEC et B. GAY, « Experimental study of a right-angled end junction between a pipe and an open channel », *Journal of Hydraulic Engineering* **134**, 616–625 (2008).

- ⁷⁸C POULARD, B CHASTAN, P ROYET, G DEGOUTTE, F GRELOT, K ERDLENBRUCH et Y NÉDÉLEC, « Prévention des inondations par ralentissement dynamique : principe et recommandations », *Ingénieries EAT special*, 5–24 (2008).
- ⁷⁹S. REANEY, « The use of agent based modelling techniques in hydrology : determining the spatial and temporal origin of channel flow in semi-arid catchments », *Earth surface processes and landforms* **33**, 317–327 (2008).
- ⁸⁰A. SALTELLI, M. RATTO, T. ANDRES, F. CAMPOLONGO, J. CARIBONI, D. GATELLI, M. SAISANA et S. TARANTOLA, *Global sensitivity analysis : the primer* (John Wiley & Sons, 2008).
- ⁸¹J. P. WILSON, G. AGGETT, D. YONGXIN et al., « Water in the landscape : a review of contemporary flow routing algorithms », in *Advances in digital terrain analysis* (Springer, 2008), p. 213–236.
- ⁸²F. BRETAR, A. CHAUVE, J. BAILLY, C. MALLET et A. JACOME, « Terrain surfaces and 3d landcover classification from small footprint full-waveform lidar data : application to badlands », *Hydrology and Earth System Sciences* **13**, 1531–1544 (2009).
- ⁸³J. CALLOW et K. SMETTEM, « The effect of farm dams and constructed banks on hydrologic connectivity and runoff estimation in agricultural landscapes », *Environmental Modelling & Software* **24**, 959–968 (2009).
- ⁸⁴J.-P. CHILES et P. DELFINER, *Geostatistics : modeling spatial uncertainty*, t. 497 (John Wiley & Sons, 2009).
- ⁸⁵C DAGES, M. VOLTZ, A BSAIBES, L PRÉVOT, O HUTTEL, X LOUCHART, F GARNIER et S NEGRO, « Estimating the role of a ditch network in groundwater recharge in a mediterranean catchment using a water balance approach », *Journal of Hydrology* **375**, 498–512 (2009).
- ⁸⁶E. M. DELMELLE et P. GOOVAERTS, « Second-phase sampling designs for non-stationary spatial variables », *Geoderma* **153**, 205–216 (2009).
- ⁸⁷F. GRELOT, *Rdt- evaluation perception des inondations*, rapp. tech. (Cemagref, 2009).
- ⁸⁸D. W. KNIGHT, C. MCGAHEY, R. LAMB et P. SAMUELS, *Practical channel hydraulics : roughness, conveyance and afflux* (CRC Press, 2009).
- ⁸⁹M. LAMBONI, D. MAKOWSKI, S. LEHUGER, B. GABRIELLE et H. MONOD, « Multivariate global sensitivity analysis for dynamic crop models », *Field Crops Research* **113**, 312–320 (2009).
- ⁹⁰C. J. LEGLEITER, D. A. ROBERTS et R. L. LAWRENCE, « Spectrally based remote sensing of river bathymetry », *Earth Surface Processes and Landforms* **34**, 1039–1059 (2009).
- ⁹¹L. LILBURNE et S. TARANTOLA, « Sensitivity analysis of spatial models », *International Journal of Geographical Information Science* **23**, 151–168 (2009).
- ⁹²A. MEERKERK, B. van WESEMAEL et N. BELLIN, « Application of connectivity theory to model the impact of terrace failure on runoff in semi-arid catchments », *Hydrological Processes* **23**, 2792–2803 (2009).

- ⁹³V. SOTI, A. TRAN, J. BAILLY, C. PUECH, D. LOSEEN et A. BEGUE, « An assessment of optical earth observation systems performances for detection and monitoring of water bodies in arid areas », [International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation](#) **11**, 344–351 (2009).
- ⁹⁴S. SWENSON et J. WAHR, « Monitoring the water balance of lake victoria, east africa, from space », [Journal of Hydrology](#) **370**, 163–176 (2009).
- ⁹⁵P. TAROLLI et G. DALLA FONTANA, « Hillslope-to-valley transition morphology : new opportunities from high resolution dtms », [Geomorphology](#) **113**, 47–56 (2009).
- ⁹⁶J. W. TERMORSHUIZEN et P. OPDAM, « Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development », [Landscape Ecology](#) **24**, 1037–1052 (2009).
- ⁹⁷D. TUIA, F. RATLE, F. PACIFICI, M. F. KANEVSKI et W. J. EMERY, « Active learning methods for remote sensing image classification », [Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on](#) **47**, 2218–2232 (2009).
- ⁹⁸T. ALLOUIS, J. BAILLY, Y. PASTOL et C. LEROUX, « Comparison of lidar waveform processing methods for very shallow water bathymetry using raman, near-infrared and green signals », [Earth Surface Processes and Landforms](#) **35**, 640–650 (2010).
- ⁹⁹J. BAILLY, Y. LECOARER, P. LANGUILLE, C. STIGERMARK et T. ALLOUIS, « Geostatistical estimation of bathymetric lidar errors on rivers », [Earth Surface Processes and Landforms](#) **35**, 1199–1210 (2010).
- ¹⁰⁰V. GARRETA, P. MONESTIEZ et J. M. VER HOEF, « Spatial modelling and prediction on river networks : up model, down model or hybrid ? », [Environmetrics](#) **21**, 439–456 (2010).
- ¹⁰¹M. GUIN, « Est-ce qu'un calage/validation multi-critère et multi-local améliore les performances d'un modèle hydrologique distribué événementiel de crue ? », 15/20, mém.de mast. (ENGEES - Strasbourg, 2010).
- ¹⁰²P. LAGACHERIE, M. RABOTIN, F. COLIN, R. MOUSSA et M. VOLTZ, « Geo-mhydass : a landscape discretization tool for distributed hydrological modeling of cultivated areas », [Computers & Geosciences](#) **36**, 1021–1032 (2010).
- ¹⁰³D. LEENHARDT, F. ANGEVIN, A. BIARNÈS, N. COLBACH et C. MIGNOLET, « Describing and locating cropping systems on a regional scale. a review », [Agronomy for sustainable development](#) **30**, 131–138 (2010).
- ¹⁰⁴D. MARÉCHAL, J.-S. BAILLY, C. PUECH, P.-A. AYRAL, D. SALZE et S. SAUVAGNARGUES-LESAGE, « Extractin : an original algorithm for automatic extraction of hydrographic network using elevation data », in Balwois2010 (2010).
- ¹⁰⁵S. MITCHELL, J. P. THAYER et M. HAYMAN, « Polarization lidar for shallow water depth measurement », [Applied optics](#) **49**, 6995–7000 (2010).
- ¹⁰⁶N. SAINT-GEOURS, J.-S. BAILLY, F. GRELOT et C. LAVERGNE, « Latin hypercube sampling of gaussian random field for sobol global sensitivity analysis of models with spatial inputs and scalar output », in [Ninth international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences](#), sous la dir. de L. UNIVERSITY (ISARA, 2010).

- ¹⁰⁷M. W. SMITH, L. J. BRACKEN et N. J. COX, « Toward a dynamic representation of hydrological connectivity at the hillslope scale in semiarid areas », [Water Resources Research](#) **46** (2010) [10.1029/2009WR008496](#).
- ¹⁰⁸J. SZABÓ, « Anthropogenic geomorphology : subject and system », in *Anthropogenic geomorphology* (Springer, 2010), p. 3–10.
- ¹⁰⁹N. THOMMERET, J. BAILLY et C. PUECH, « Extraction of thalweg networks from dtms : application to badlands », [Hydrology and Earth System Sciences](#) **14**, 1527–1536 (2010).
- ¹¹⁰P. H. VERBURG, D. B. van BERKEL, A. M. van DOORN, M. van EUPEN et H. A. van den HEILIGENBERG, « Trajectories of land use change in europe : a model-based exploration of rural futures », [Landscape ecology](#) **25**, 217–232 (2010).
- ¹¹¹R. G. VON GIOI, J. JAKUBOWICZ, J.-M. MOREL et G. RANDALL, « Lsd : a fast line segment detector with a false detection control », [IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence](#) **32**, 722–732 (2010).
- ¹¹²H. ABDALLAH, J. BAILLY, N. BAGHDADI et N. LEMARQUAND, « Improving the assessment of icesat water altimetry accuracy accounting for autocorrelation », [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing](#) **66**, 833–844 (2011).
- ¹¹³N. BAGHDADI, N. LEMARQUAND, H. ABDALLAH et J. BAILLY, « The relevance of GLAS-ICESat elevation data for the monitoring of river networks », [Remote Sensing](#) **3**, 708–720 (2011).
- ¹¹⁴J. BAILLY, F. LEVAVASSEUR et P. LAGACHERIE, « A stochastic algorithm to reconstruct artificial drainage networks from incomplete remote sensing delineations », [International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation](#) **13**, 853–862 (2011).
- ¹¹⁵R. BHAMJEE et J. LINDSAY, « Ephemeral stream sensor design using state loggers », [Hydrology and Earth System Sciences](#) **15**, 1009–1021 (2011).
- ¹¹⁶A. CRABIT, F. COLIN, J. BAILLY, H. AYROLES et F. GARNIER, « Soft water level sensors for characterizing the hydrological behaviour of agricultural catchments », [Sensors](#) **11**, 4656–4673 (2011).
- ¹¹⁷J.-F. CRÉTAUX et al., « Sols : a lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data », [Advances in space research](#) **47**, 1497–1507 (2011).
- ¹¹⁸S. J. GUMIERE, D. RACLOT, B. CHEVIRON, G. DAVY, X. LOUCHART, J.-C. FABRE, R. MOUSSA et Y. L. BISSONNAIS, « Mhydas-erosion : a distributed single-storm water erosion model for agricultural catchments », [Hydrological processes](#) **25**, 1717–1728 (2011).
- ¹¹⁹N. LEMARQUAND, N. BAGHDADI et J. BAILLY, « Étude de la précision du satellite lidar glas-icesat pour l’altimétrie des eaux continentales », [Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection](#) **2**, 45–52 (2011).
- ¹²⁰M. LUHAR et H. M. NEPF, « Flow-induced reconfiguration of buoyant and flexible aquatic vegetation », [Limnology and Oceanography](#) **56**, 2003–2017 (2011).

- ¹²¹D. MARÉCHAL, « Utilisation de l'imagerie satellitale à très haute résolution spatiale pour l'aide à la caractérisation du fonctionnement hydrologique des réseaux hydrographiques. application à des bassins cévenols soumis aux crues éclair. », thèse de doct. (École doctorale Sciences, Ingénierie, Santé, ED SIS 488, Saint-Etienne, 2011).
- ¹²²R. MOUSSA, F. COLIN et M. RABOTIN, « Invariant morphometric properties of headwater subcatchments », [Water Resources Research](#) **47** (2011) [10.1029/2010WR010132](#).
- ¹²³J. PAPAIX, K. ADAMCZYK, A. BOUVIER, K. KIËU, C. LANNOU et H. MONOD, « Modélisation et génération de parcelles agricoles par tessellations aléatoires. », in Colloque payote 2011 modélisation de paysages agricoles pour la simulation et l'analyse de processus. 2011-10-182011-10-19, rennes, fra (2011).
- ¹²⁴N. PARE, « Pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. construction d'un modèle couplé pression-impact pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l'échelle de petits bassins versants », thèse de doct. (2011).
- ¹²⁵N. THOMMERET, J. BAILLY et C. PUECH, « A hierarchical graph matching method to assess accuracy of network extraction from dtm », in [Geomorphometry 2011](#), sous la dir. de T. HENGL, I. S. EVANS, J. P. WILSON et M. GOULD (2011), p. 49–52.
- ¹²⁶B. H. VAN NIEUWENHUYSE, M. ANTOINE, G. WYSEURE et G. GOVERS, « Pattern-process relationships in surface hydrology : hydrological connectivity expressed in landscape metrics », [Hydrological Processes](#) **25**, 3760–3773 (2011).
- ¹²⁷G. ZHANG, H. XIE, S. KANG, D. YI et S. F. ACKLEY, « Monitoring lake level changes on the tibetan plateau using icesat altimetry data (2003–2009) », [Remote Sensing of Environment](#) **115**, 1733–1742 (2011).
- ¹²⁸Q. ZHOU, P. PILESJÖ et Y. CHEN, « Estimating surface flow paths on a digital elevation model using a triangular facet network », [Water Resources Research](#) **47** (2011) [10.1029/2010WR009961](#).
- ¹²⁹H. ABDALLAH, « Potentiel des capteurs lidar satellitaires pour le suivi altimétrique et bathymétriques des surfaces en eau continentales et côtières. », thèse de doct. (Université de Montpellier II - École Doctorale I2S, 2012).
- ¹³⁰H. ABDALLAH, N. BAGHDADI, J. BAILLY, Y. PASTOL et F. FABRE, « Wa-lid : a lidar waveform simulator for waters », [IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters](#) **9**, 744–748 (2012).
- ¹³¹J.-S. BAILLY et F. LEVAVASSEUR, « Potential of linear features detection in a mediterranean landscape from 3d vhr optical data : application to terrace walls », in [Geoscience and remote sensing symposium \(igarss\), 2012 ieee international](#), FR2.8 - Pléiades, a dual optical system for metric resolution observations : thematic space applications (2012), p. 7110–7113.
- ¹³²J.-S. BAILLY, P. J. KINZEL, T. ALLOUIS, D. FEURER et Y. LE COARER, « Fluvial remote sensing for science and management », in [Fluvial remote sensing for science and management](#), sous la dir. de P. E. CARBONNEAU et H. PIÉGAY (John Wiley & Sons, Ltd, 2012) chap. Airborne LiDAR Methods Applied to Riverine Environments, p. 141–161.

- ¹³³F COLIN, R MOUSSA et X LOUCHART, « Impact of the spatial arrangement of land management practices on surface runoff for small catchments », [Hydrological Processes](#) **26**, 255–271 (2012).
- ¹³⁴O FOVET, G BELAUD, X LITRICO, S CHARPENTIER, C BERTRAND, P DOLLET et C HUGODOT, « A model for fixed algae management in open channels using flushing flows », [River research and applications](#) **28**, 960–972 (2012).
- ¹³⁵S. KLEMENJAK, B. WASKE, S. VALERO et J. CHANUSSOT, « Automatic detection of rivers in high-resolution sar data », [Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of](#) **5**, 1364–1372 (2012).
- ¹³⁶F. LEVAVASSEUR, « Structure du paysage et fonctionnement hydrologique. application aux reseaux de fosses en zone viticole mediterraneenne. », Mention tres honorable avec felicitations du jury, thèse de doct. (Montpellier Supagro - Ecole Doctorale SIBAGHE, 2012).
- ¹³⁷F. LEVAVASSEUR, J. BAILLY, P. LAGACHERIE, F. COLIN et M. RABOTIN, « Simulating the effects of spatial configurations of agricultural ditch drainage networks on surface runoff from agricultural catchments », [Hydrological Processes](#) **16**, 3393–3404 (2012).
- ¹³⁸H. M. NEPF, « Hydrodynamics of vegetated channels », [Journal of Hydraulic Research](#) **50**, 262–279 (2012).
- ¹³⁹M. RATTO, A. CASTELLETTI et A. PAGANO, « Emulation techniques for the reduction and sensitivity analysis of complex environmental models », [Environmental Modelling & Software](#) **34**, 1–4 (2012).
- ¹⁴⁰N. SAINT-GEOURS, C. LAVERGNE, J. BAILLY et F. GRELOT, « Change of support in spatial variance-based sensitivity analysis », [Mathematical Geosciences](#) **44**, 945–958 (2012).
- ¹⁴¹N. SAINT-GEOURS, « Analyse de sensibilité de modèles spatialisés - application à l'analyse cout-bénéfice de projets de prévention des inondations », Best PhD work 2011, GDR MascotNum : <http://www.gdr-mascotnum.fr/index.html>, thèse de doct. (Université de Montpellier II - École Doctorale I2S, 2012).
- ¹⁴²N. THOMMERET, « Analyse spatiale et modélisation des réseaux de ravines en secteurs de forte dissection. effets d'échelle et non linéarités », thèse de doct. (Université de Paris I Panthéon-Sorbonne - École Doctorale 434 de Géographie de Paris, 2012).
- ¹⁴³J.-F. WANG, A STEIN, B.-B. GAO et Y. GE, « A review of spatial sampling », [Spatial Statistics](#) **2**, 1–14 (2012).
- ¹⁴⁴J.-S. BAILLY, N. SAINT-GEOURS, F. GRELOT et T. LANGER, « Flood level spatial uncertainty simulation from expert knowledge : methods, limits and impacts », in [Facets of uncertainty 2013: 5th egu leonardo conference, hydrofractals'13, stahy'13](#), sous la dir. d'E. G. UNION (EGU, 2013), p. 38–39.
- ¹⁴⁵L. BRACKEN, J WAINWRIGHT, G. ALI, D TETZLAFF, M. SMITH, S. REANEY et A. ROY, « Concepts of hydrological connectivity : research approaches, pathways and future agendas », [Earth-Science Reviews](#) **119**, 17–34 (2013).
- ¹⁴⁶D. G. BROWN et al., *Advancing land change modeling : opportunities and research requirements*, 2013.

- ¹⁴⁷J.-F. DESPRATS, D. RACLOT, M. ROUSSEAU, O. CERDAN, M. GARCIN, Y LE BISSONNAIS, A BEN SLIMANE, J. FOUCHÉ et D MONFORT-CLIMENT, « Mapping linear erosion features using high and very high resolution satellite imagery », *Land Degradation & Development* **24**, 22–32 (2013).
- ¹⁴⁸L. HASCOET et V. PASCUAL, « The tapenade automatic differentiation tool : principles, model, and specification », *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* **39**, 20 (2013).
- ¹⁴⁹C. LANTUÉJOUL, *Geostatistical simulation : models and algorithms* (Springer Science & Business Media, 2013).
- ¹⁵⁰D. MARÉCHAL, P. AYRAL, J. BAILLY, C. PUECH et S. SAUVAGNARGUES-LESAGE, « Sur l'origine morphologique des écoulements par l'analyse d'observations hydrologiques distribuées. application à deux bassins versants cévenols (gard, france) », *Géomorphologie: relief, processus, environnement* **1**, 47–62 (2013).
- ¹⁵¹A. MONTANARI et G. DI BALDASSARRE, « Data errors and hydrological modelling : the role of model structure to propagate observation uncertainty », *Advances in Water Resources* **51**, 498–504 (2013).
- ¹⁵²C.-Z. QIN, L.-L. BAO, A.-X. ZHU, X.-M. HU et B. QIN, « Artificial surfaces simulating complex terrain types for evaluating grid-based flow direction algorithms », *International Journal of Geographical Information Science* **27**, 1055–1072 (2013).
- ¹⁵³F. VINATIER et J. BAILLY, « Ecohydrology of agricultural ditches », in *Hydroeco 2013: 4th international multidisciplinary conference on hydrology and ecology* (2013), p. 201.
- ¹⁵⁴P. WHITTAKER, C. WILSON, J. ABERLE, H. P. RAUCH et P. XAVIER, « A drag force model to incorporate the reconfiguration of full-scale riparian trees under hydrodynamic loading », *Journal of Hydraulic Research* **51**, 569–580 (2013).
- ¹⁵⁵L. ABADY, J.-S. BAILLY, N. BAGHDADI, Y. PASTOL et H. ABDALLAH, « Assessment of quadrilateral fitting of the water column contribution in lidar waveforms on bathymetry estimates », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **11**, 813–817 (2014).
- ¹⁵⁶N. BAGHDADI, G. LEMAIRE, I. FAYAD, J.-S. BAILLY, Y. NOUVELLON, C. LEMOS et R. HAKAMADA, « Testing different methods of forest height and aboveground biomass estimations from icesat-glas data in eucalyptus plantations in brazil », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **7**, 290–299 (2014).
- ¹⁵⁷*Terrace walls detection from a pleiades digital elevation model* (2014).
- ¹⁵⁸A. BOUHDAOUI, J.-S. BAILLY, N. BAGHDADI et L. ABADY, « Modeling the water bottom geometry effect on peak time shifting in lidar bathymetric waveforms », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **11**, 1285–1289 (2014).
- ¹⁵⁹I. FAYAD, N. BAGHDADI, J.-S. BAILLY, N. BARBIER, V. GOND, M. E. HAJJ, F. FABRE et B. BOURGINE, « Canopy height estimation in french guiana using lidar icesat/glas data », *Remote Sensing* **6**, 11883–11914 (2014).
- ¹⁶⁰F. GRELOT, J.-S. BAILLY, N. SAINT-GEOURS et T. LANGER, *Guide méthodologique pour la prise en compte des incertitudes dans les acb appliquées aux projets de prévention du risque d'inondation*, rapp. tech., Num Presage-FEDER : 38648 (Plan Rhône, 2014).

- ¹⁶¹S. J. GUMIERE, J.-S. BAILLY, B. CHEVIRON, D. RACLOT, L. LZ BISSONNAIS et A. N. ROUSSEAU, « Evaluating the impact of the spatial distribution of land management practices on water erosion : case study of a mediterranean catchment », [Journal of Hydrologic Engineering, On line](#) (2014).
- ¹⁶²D. LAGUE, « The stream power river incision model : evidence, theory and beyond », [Earth Surface Processes and Landforms](#) **39**, 38–61 (2014).
- ¹⁶³F. LEVAVASSEUR, A. BIARNÈS, J. BAILLY et P. LAGACHERIE, « Time-varying impacts of different management regimes on vegetation cover in agricultural ditches », [Agricultural Water Management](#) **140**, 14–19 (2014).
- ¹⁶⁴T. I. MARJORIBANKS, R. J. HARDY et S. N. LANE, « The hydraulic description of vegetated river channels : the weaknesses of existing formulations and emerging alternatives », [Wiley Interdisciplinary Reviews: Water](#) **1**, 549–560 (2014).
- ¹⁶⁵M. MEZIAN, « Apport de l'analyse fonctionnelle pour l'estimation de variables environnementales à partir de formes d'onde lidar », mém.de mast. (Univerité de Montpellier ii, Master 2 Physique et Ingénierie, parcours Physique Informatique, 2014).
- ¹⁶⁶M. A. MONTES-HUGO, J.-S. BAILLY, N. BAGHDADI et A. BOUHDAOUI, « Modeling the effects of surface and bottom geometries on lidar bathymetric waveforms », in [Geoscience and remote sensing symposium \(igarss\), 2014 ieee international](#) (2014), p. 2706–2708.
- ¹⁶⁷H. RADOUI, « Potentiel de cartographie des réseaux de fossés et de leur densité à l'échelle de la région languedoc-roussillon », mém.de mast. (AgroParisTech, Master 2 Eau et Agriculture, 2014).
- ¹⁶⁸N. SAINT-GEOURS, J.-S. BAILLY et F. GRELOT, « Multi-scale spatial sensitivity analysis : application to a flood damage assessment model », [Environmental Modelling & Software](#) **60**, 153–166 (2014).
- ¹⁶⁹G. SOFIA, G. D. FONTANA et P. TAROLLI, « High-resolution topography and anthropogenic feature extraction : testing geomorphometric parameters in floodplains », [Hydrological Processes](#) **28**, 2046–2061 (2014).
- ¹⁷⁰P. TAROLLI, F. PRETI et N. ROMANO, « Terraced landscapes : from an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment », [Anthropocene](#) **6**, 10–25 (2014).
- ¹⁷¹N. THOMMERET, J. BAILLY, J. BARDET, C. PUECH et B. KAISER, « Les dimensions fractales de réseaux vectoriels : méthodes d'estimation et robustesse des résultats », [Cybergeographie : European Journal of Geography Systems, Modelling, Geostatistics, On line](#) (2014).
- ¹⁷²D. AUBÉ, A. BERKAOUI, F. VINATIER, J.-S. BAILLY et G. BELAUD, « 4d photogrammetric technique to study free surface water in open channels », in Geophysical research abstracts, vol. 17, egu2015-12327, egu general assembly 2015, EGU2015-12327, GM2.1 session (2015).
- ¹⁷³J. BAILLY, G. BELAUD, F. VINATIER et D. COMBEMALE, « Vegetation patch effects on flow resistance at channel scale », in [36th iahr world congress, la hague \(nl\) 28june - 3 july 2015](#) (2015).
- ¹⁷⁴T. B. DEVI et B. KUMAR, « Turbulent flow statistics of vegetative channel with seepage », [Journal of Applied Geophysics](#) **123**, 267–276 (2015).

- ¹⁷⁵J. DOLLINGER, C. DAGES, J.-S. BAILLY, P. LAGACHERIE et M. VOLTZ, « Managing ditches for agroecological engineering of landscape. a review », [Agronomy and sustainable development](#) **35**, 999–1020 (2015).
- ¹⁷⁶C DUKU, H RATHJENS, S. ZWART et L HEIN, « Towards ecosystem accounting : a comprehensive approach to modelling multiple hydrological ecosystem services », [Hydrology and Earth System Sciences Discussions](#) **12**, 3477–3526 (2015).
- ¹⁷⁷S. GUILLEMOT, « Spatialisation des variables géométriques du réseau hydrographique d'un bassin ressource aménagé », mém.de mast. (AgroParisTech, Master Eau et Agriculture, 2015).
- ¹⁷⁸J. K. HILLIER, G. SOFIA et S. CONWAY, « Perspective – synthetic dems : a vital underpinning for the quantitative future of landform analysis? », [Earth Surface Dynamics Discussions](#) **3**, 601–629 (2015).
- ¹⁷⁹J. JALONEN, J. JÄRVELÄ, J.-P. VIRTANEN, M. VAAJA, M. KURKELA et H. HYYPPÄ, « Determining characteristic vegetation areas by terrestrial laser scanning for floodplain flow modeling », [Water](#) **7**, 420–437 (2015).
- ¹⁸⁰F. LEVAVASSEUR, P. LAGACHERIE, J. BAILLY, A. BIARNÈS et F. COLIN, « Spatial modeling of man-made drainage density of agricultural landscapes », [Journal of Land Use Science](#) **10**, 256–276 (2015).
- ¹⁸¹M. A. MONTES-HUGO, J.-S. BAILLY, N. BAGHDADI et U. NEUMEIER, « Detecting anomalous turbidity patterns in nearshore waters of québec based on caliop waveforms », in [L'aqt : 1975-2015. 40 ans de science, d'application et de service à la société](#) (2015).
- ¹⁸²A. OGILVIE, G. BELAUD, C. DELENNE, J.-S. BAILLY, J.-C. BADER, A. OLEKSIK, L. FERRY et D. MARTIN, « Decadal monitoring of the niger inner delta flood dynamics using modis optical data », [Journal of Hydrology](#) **523**, 368–383 (2015).
- ¹⁸³P. PASSALACQUA et al., « Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes : a review », [Earth-Science Reviews](#) **148**, 174–193 (2015).
- ¹⁸⁴N. SAINT-GEOURS, F. GRELOT, J.-S. BAILLY et C. LAVERGNE, « Ranking sources of uncertainty in flood damage modelling : a case study on the cost-benefit analysis of a flood mitigation project in the orb delta, france », [Journal of Flood Risk Management](#) **8**, 161–176 (2015).
- ¹⁸⁵R. F. SHAW, P. J. JOHNSON, D. W. MACDONALD et R. E. FEBER, « Enhancing the biodiversity of ditches in intensively managed uk farmland », [PloS one](#) **10**, e0138306 (2015).
- ¹⁸⁶F. VINATIER, J.-S. BAILLY et D. COMBEMALE, « Three-dimensional reconstruction techniques to study ditches eco-hydrology », in Geophysical research abstracts, vol. 17, egu general assembly 2015, EGU2015-5931, HS10.9 session (2015).
- ¹⁸⁷C. WANG, Q. LI, Y. LIU, G. WU, P. LIU et X. DING, « A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength lidar bathymetry », [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing](#) **101**, 22–35 (2015).
- ¹⁸⁸P. WHITTAKER, C. A. WILSON et J. ABERLE, « An improved cauchy number approach for predicting the drag and reconfiguration of flexible vegetation », [Advances in Water Resources](#) (2015) **10.1016/j.advwatres.2015.05.005**.

- ¹⁸⁹F. LEVAVASSEUR, J. BAILLY et P. LAGACHERIE, « Are ditch networks optimized for mitigating rill erosion in cultivated mediterranean landscapes? a digital experiment », [Land Use Policy](#) **50**, 441–448 (2016).
- ¹⁹⁰V. VERSCHOREN, D. MEIRE, J. SCHOELYNCK, K. BUIS, K. D. BAL, P. TROCH, P. MEIRE et S. TEMMERMAN, « Resistance and reconfiguration of natural flexible submerged vegetation in hydrodynamic river modelling », [Environmental Fluid Mechanics](#) **InPress**, 1–21 (2016).
- ¹⁹¹G. SOFIA, J.-S. BAILLY, N. CHEHATA, P. TAROLLI et F. LEVAVASSEUR, « Comparison of pleiades and lidar digital elevation models for terraces detection in farmlands », [IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing](#) (Submitted).