

Du versant au cours d'eau : structure paysagère et connectivité hydro-sédimentaire en contexte viticole (Beaujolais, France)



Plan de la présentation

1. Cadre conceptuel
2. Secteur d'étude
3. Méthodologie
4. Résultats et discussion
5. Conclusions et perspectives

Thèse de doctorat soutenue publiquement le 18 décembre 2023 – Jessica PIC



1 – Cadre conceptuel

1

Complexité des transferts hydro-sédimentaire en contexte agricole

- Taux d'érosion élevés en contexte agricole



Ruissellement de surface dans une parcelle de vigne, commune de Saint-Lager



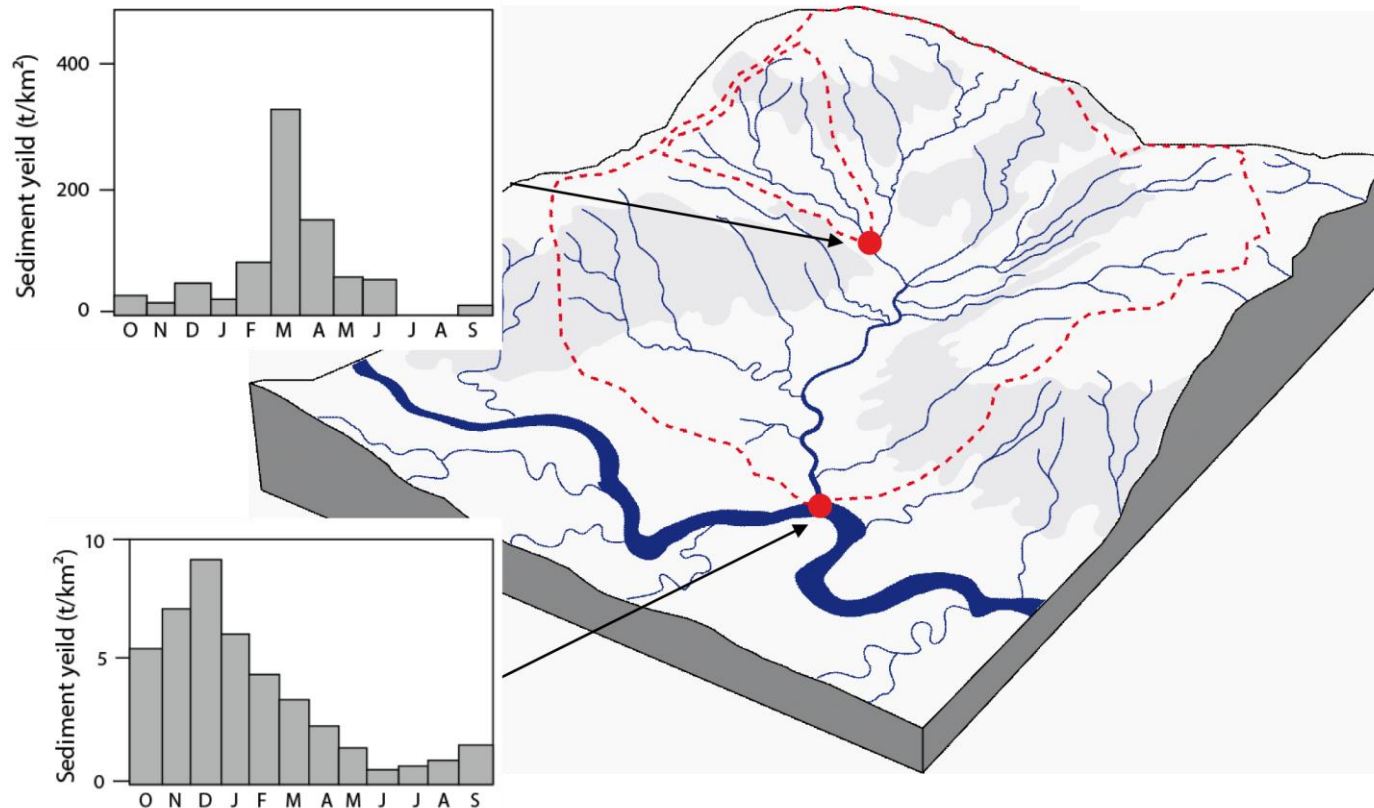
Crue turbide dans une rue de la commune d'Odenas, 12 septembre 2023
Source : Photo Progrès/Daniel DUFOUR ; <https://www.leprogres.fr/faits-divers-justice/2023/09/12/a-odenas-le-ruisseau-sort-de-son-lit-et-provoque-une-inondation>

1 – Cadre conceptuel

Complexité des transferts hydro-sédimentaire en contexte agricole

- Taux d'érosion élevés en contexte agricole
- Non-linéarité de la réponse des bassins versants aux forçages

*Les paradoxes spatiaux et temporels des signaux sédimentaires
(d'après McGuinness et al., 1971 modifié dans Cossart et al., 2017)*



1 – Cadre conceptuel

Complexité des transferts hydro-sédimentaire en contexte agricole

Schéma d'organisation du cheminement des flux hydro-sédimentaires sur les versants du Beaujolais, commune de Villé-Morgon



1 – Cadre conceptuel

Complexité des transferts hydro-sédimentaire en contexte agricole

Schéma d'organisation du cheminement des flux hydro-sédimentaires sur les versants du Beaujolais, commune de Villé-Morgon



1 – Cadre conceptuel

Complexité des transferts hydro-sédimentaire en contexte agricole

Schéma d'organisation du cheminement des flux hydro-sédimentaires sur les versants du Beaujolais, commune de Villé-Morgon



1 – Cadre conceptuel

4

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE : Documenter les liens entre les modalités d'organisation de la structure paysagère et les signaux hydro-sédimentaires depuis les versants vers les cours d'eau.

2 objectifs complémentaires

Décrire à échelle fine l'organisation de la structure paysagère et des modalités de connectivité

- Inventaire de la structure paysagère
- Extraction des propriétés structurelles
- Évaluation de la connectivité



ANALYSE et MODÉLISATION SPATIALE

Mesurer le volume et les rythmes des transferts hydro-sédimentaires à différentes échelles spatiales

- Métrologie de terrain
- Dynamiques spatiales et temporelles
- Relais de processus
- Relations de connectivité



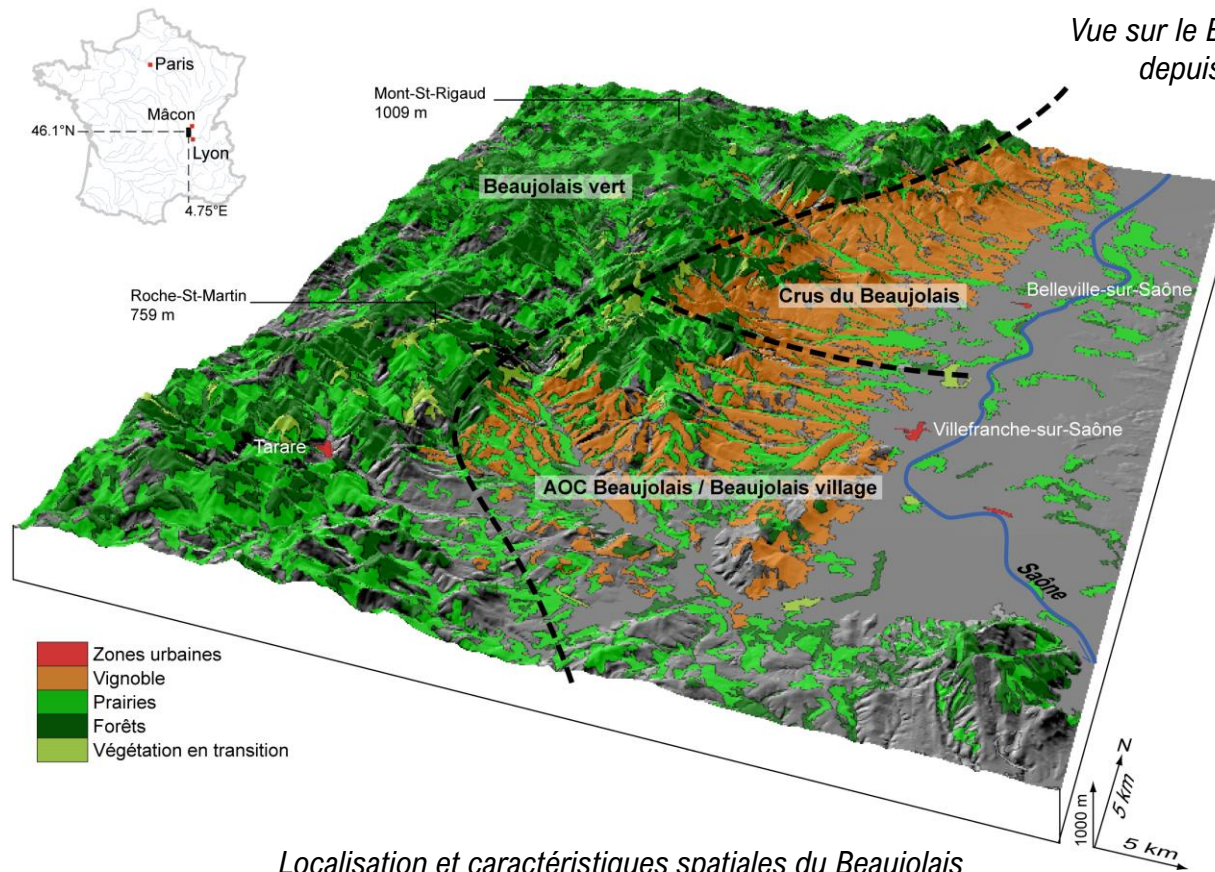
SUIVI MÉTROLOGIQUE MULTISCALEAIRE



Efficacité des connexions
Enjeux de gestion de la ressource en sol

2 – Secteur d'étude

Le Beaujolais viticole : monoculture de forte pente



Localisation et caractéristiques spatiales du Beaujolais

Vue sur le Beaujolais viticole depuis le Mont Brouilly



Photographie aérienne d'un ensemble de parcelles de vigne en Beaujolais (IGN, avril 2017)

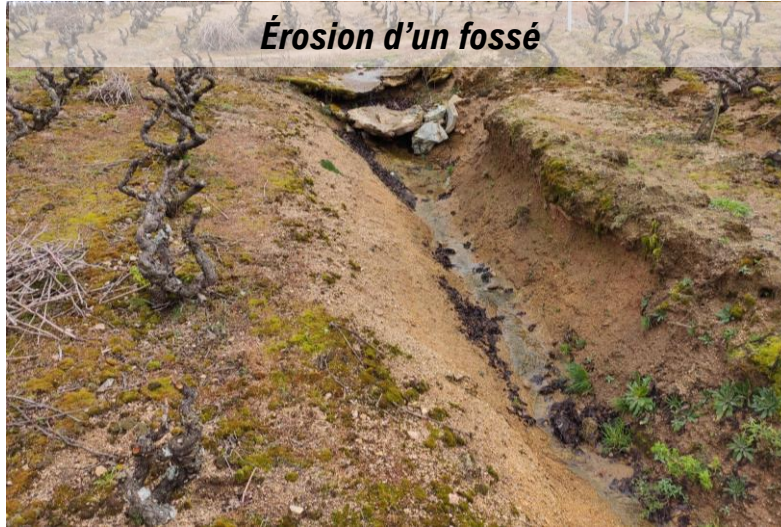
2 – Secteur d'étude

Le Beaujolais viticole : des formes visibles de l'érosion hydrique

Rigoles



Érosion d'un fossé



Dépôt sédimentaire dans un cours d'eau



Dépôt sédimentaire sur une route



Rigoles dans les inter-rangs



Dépôt sédimentaire dans un fossé



2 – Secteur d'étude



Typologie des infrastructures linéaires observées en Beaujolais.

A – Route. B Chemin non-enherbé. C – Chemin enherbé.

2 – Secteur d'étude

7



Typologie des infrastructures linéaires observées en Beaujolais.

A – Route. B Chemin non-enherbé. C – Chemin enherbé.

D – Fossé enherbé bordé par une bande enherbée. E – Gouttière de canalisation.

F – Entrée de canalisation enterrée.

2 – Secteur d'étude



Typologie des infrastructures linéaires observées en Beaujolais.

A – Route. B Chemin non-enherbé. C – Chemin enherbé.

D – Fossé enherbé bordé par une bande enherbée. E – Gouttière de canalisation.

F – Entrée de canalisation enterrée.

G – Bourrelet de terre bordant un chemin non-enherbé. H – Bourrelet de terre intra-parcellaire.

2 – Secteur d'étude



Typologie des infrastructures linéaires observées en Beaujolais.

A – Route. B Chemin non-enherbé. C – Chemin enherbé.

D – Fossé enherbé bordé par une bande enherbée. E – Gouttière de canalisation.

F – Entrée de canalisation enterrée.

G – Bourrelet de terre bordant un chemin non-enherbé. H – Bourrelet de terre intra-parcellaire.

I & J – Différents types de collecteurs de sédiments.

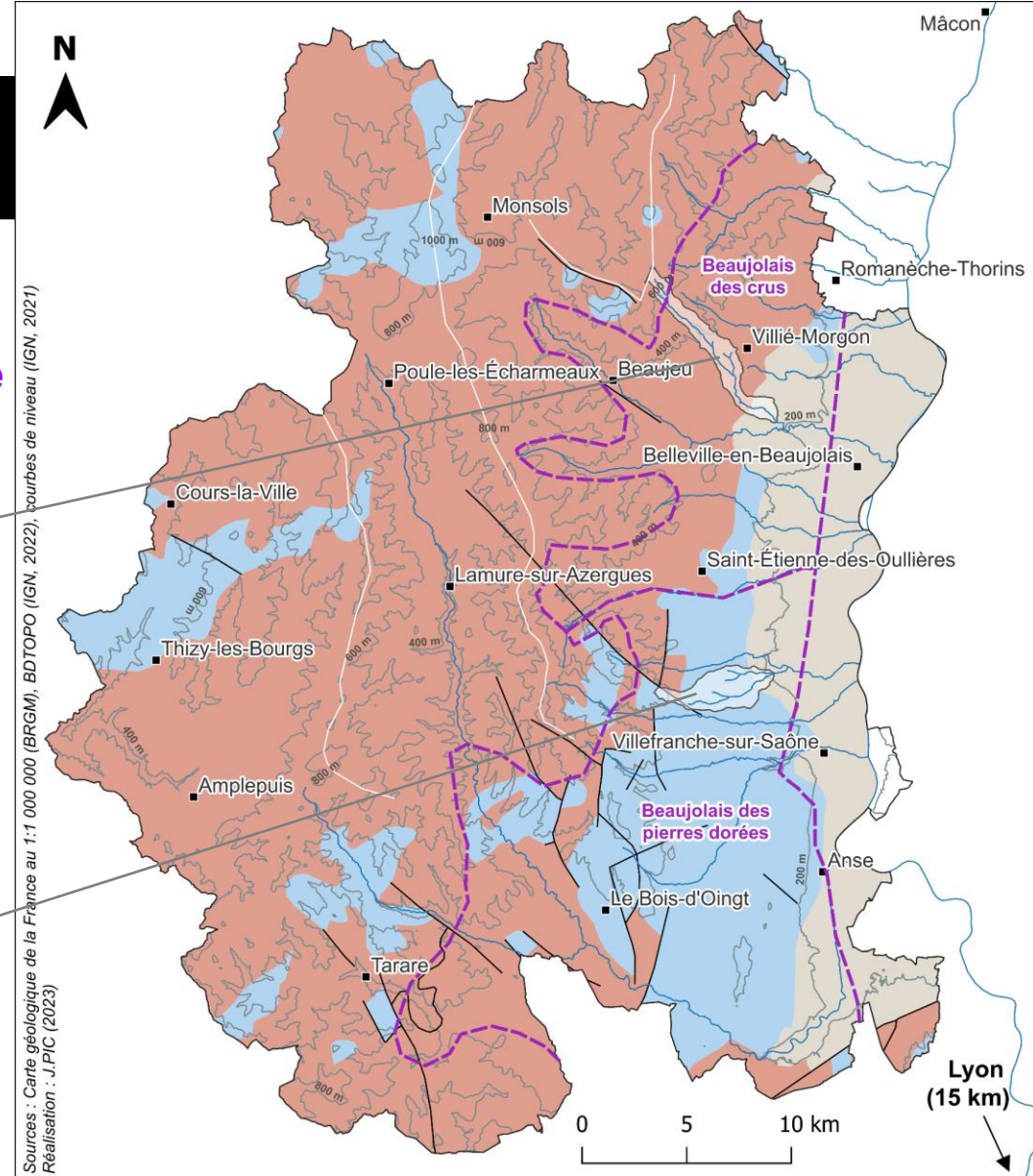
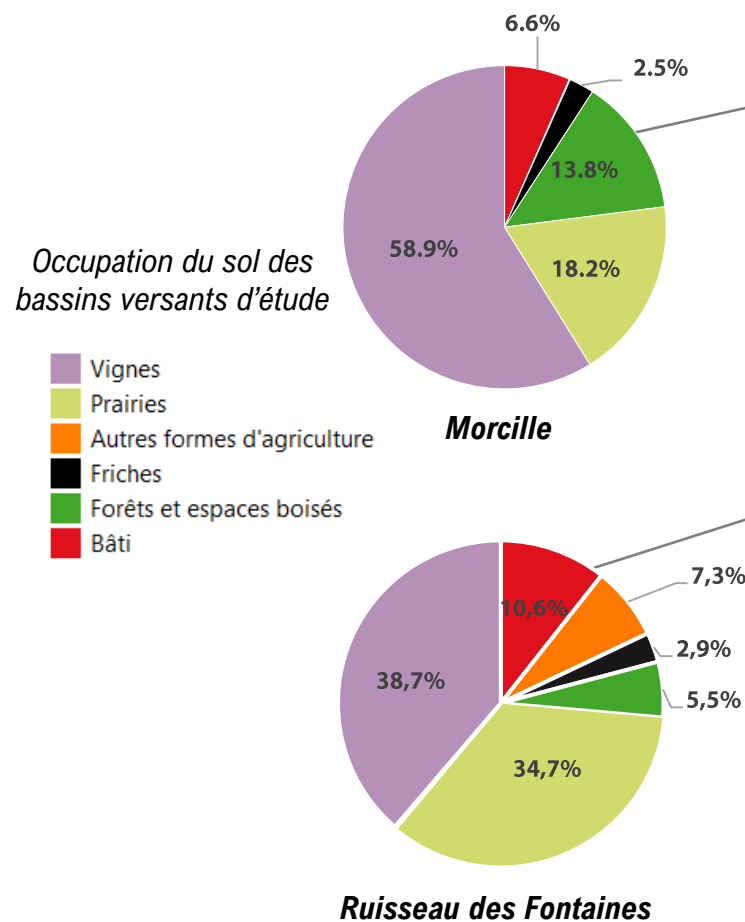
3 – Méthodologie

3.1. Analyse et modélisation spatiale

3 – Méthodologie

3.1. Analyse et modélisation spatiale

Deux secteurs témoins de la diversité paysagère du vignoble



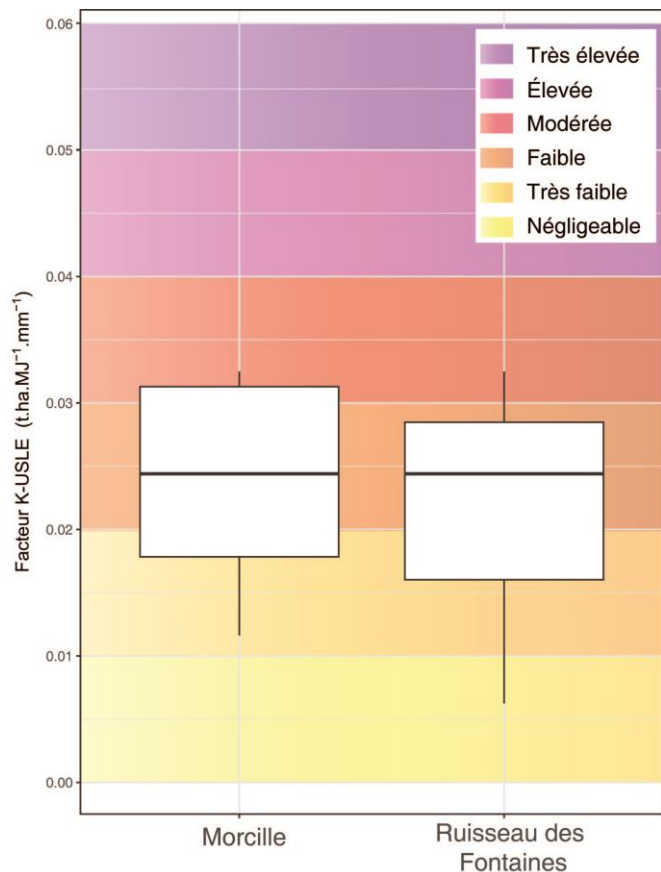
- Grandes formations géologiques**
- Alluvions tertiaires et quaternaires
 - Couverture sédimentaire secondaire
 - Socle cristallin
 - Principales lignes de faille
 - Courbes de niveau (intervalle 200m)

- Principales lignes de crêtes
- Réseau hydrographique principal
- Limites du vignoble
- Principales localités
- Limites des bassins versant d'étude
- Limites du Syndicat Mixte du Beaujolais

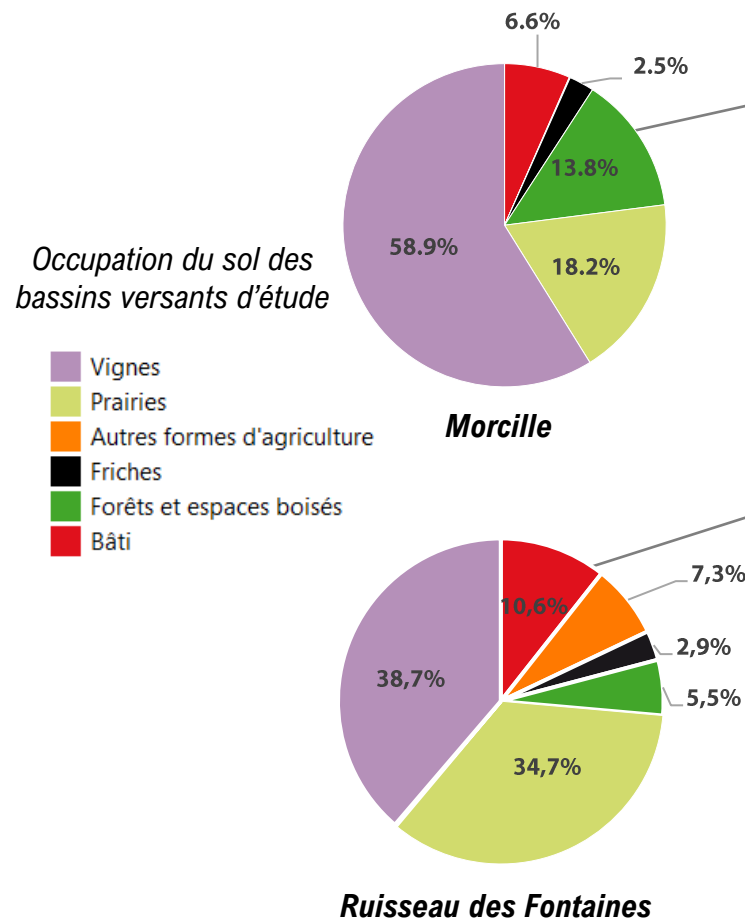
3 – Méthodologie

3.1. Analyse et modélisation spatiale

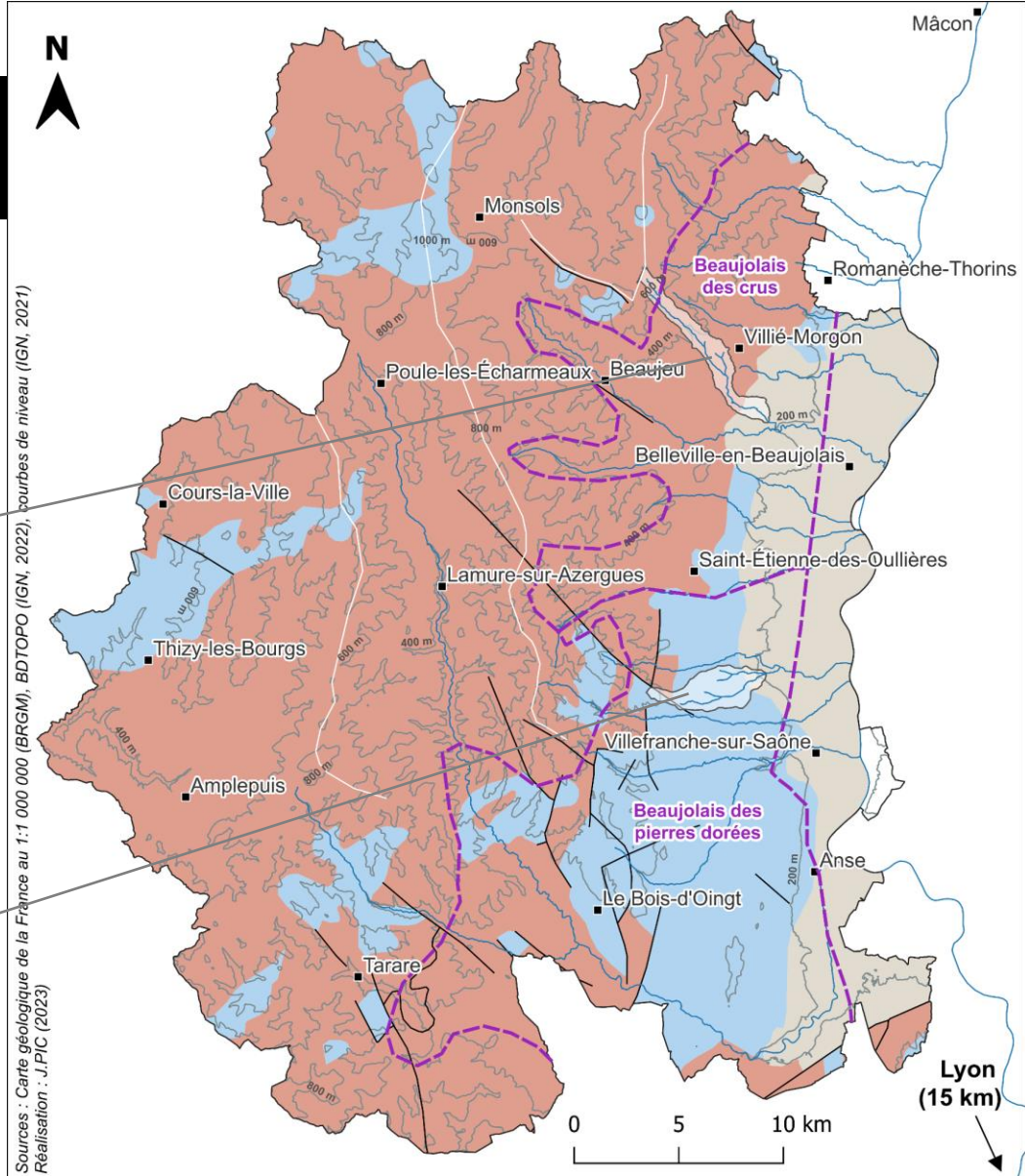
Deux secteurs témoins de la diversité paysagère du vignoble



Érodibilité du sol des bassins versants



Ruisseau des Fontaines



- Grandes formations géologiques**
- Alluvions tertiaires et quaternaires
 - Couverture sédimentaire secondaire
 - Socle cristallin
 - Principales lignes de faille
 - Courbes de niveau (intervalle 200m)

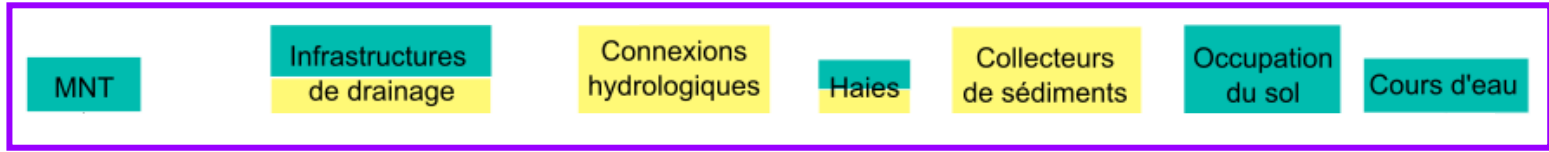
- Principales lignes de crêtes
- Réseau hydrographique principal
 - Limites du vignoble
 - Principales localités
 - Limites des bassins versant d'étude
 - Limites du Syndicat Mixte du Beaujolais

3 – Méthodologie

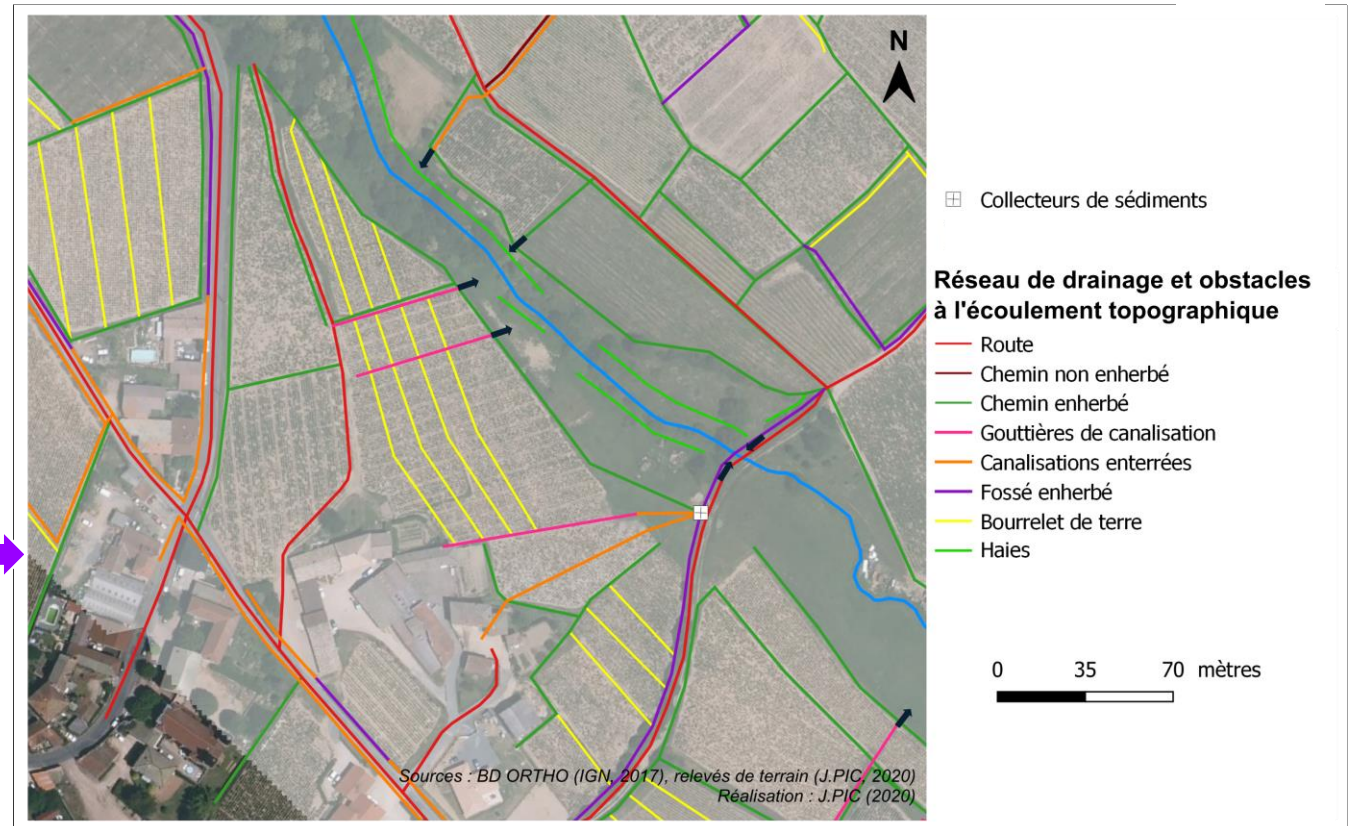
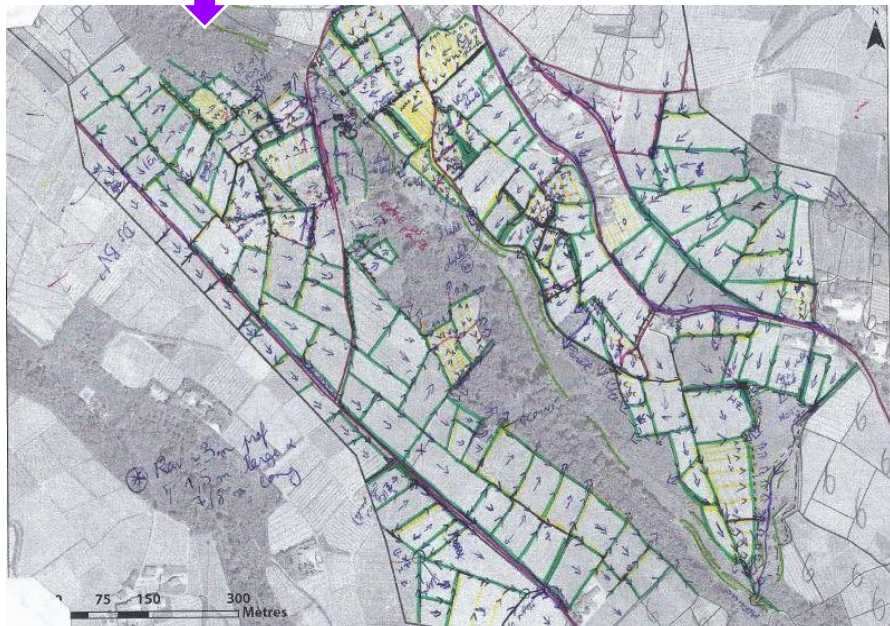
3.1. Analyse et modélisation spatiale

Inventaire des éléments de la structure paysagère

Données SIG
Données de terrain

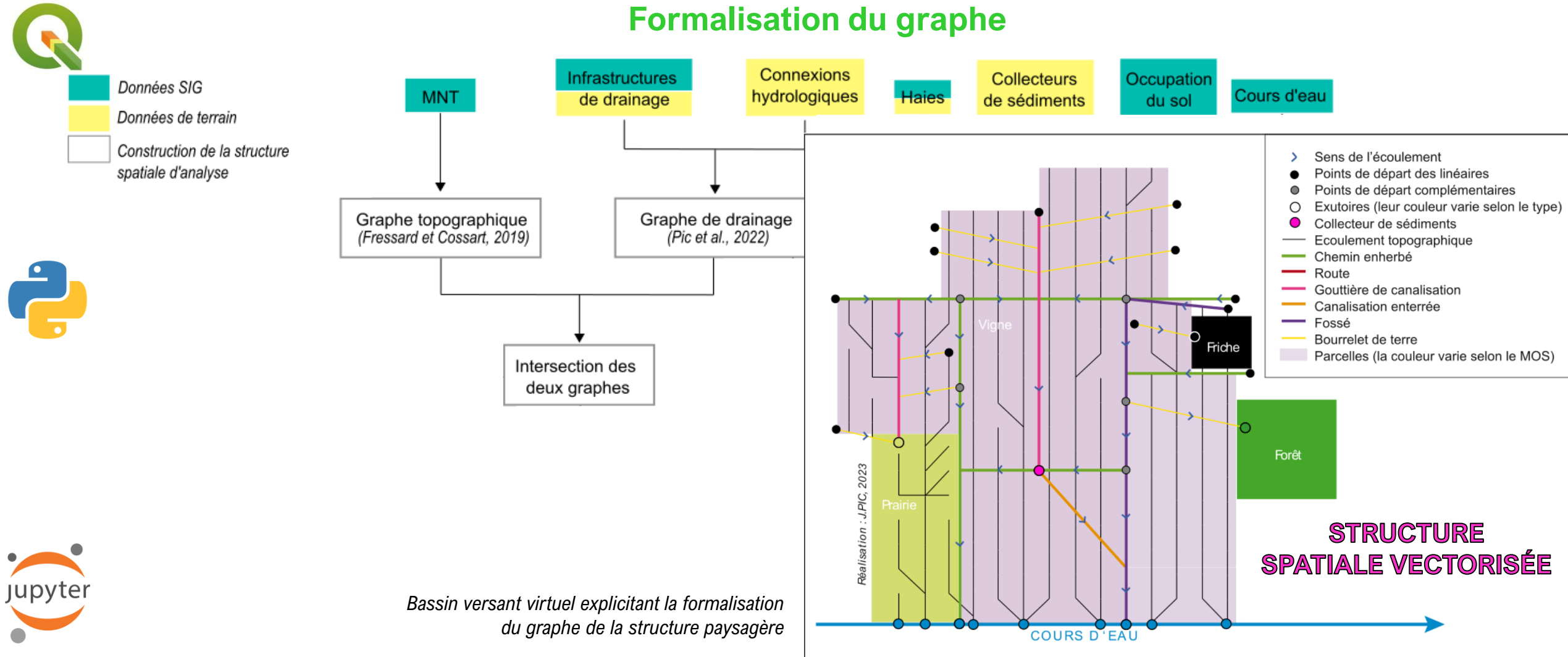


Extraits de la cartographie des infrastructures de drainage



3.1. Analyse et modélisation spatiale

Formalisation du graphe

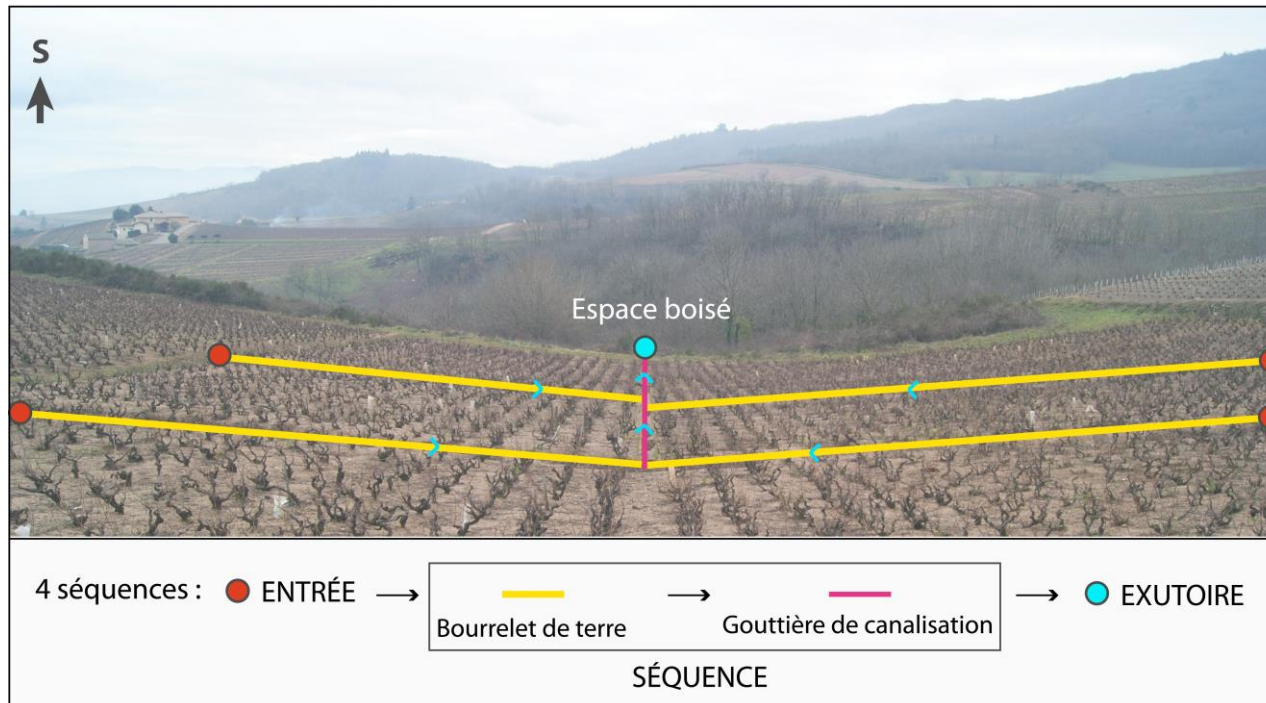


3.1. Analyse et modélisation spatiale

Formalisation du graphe

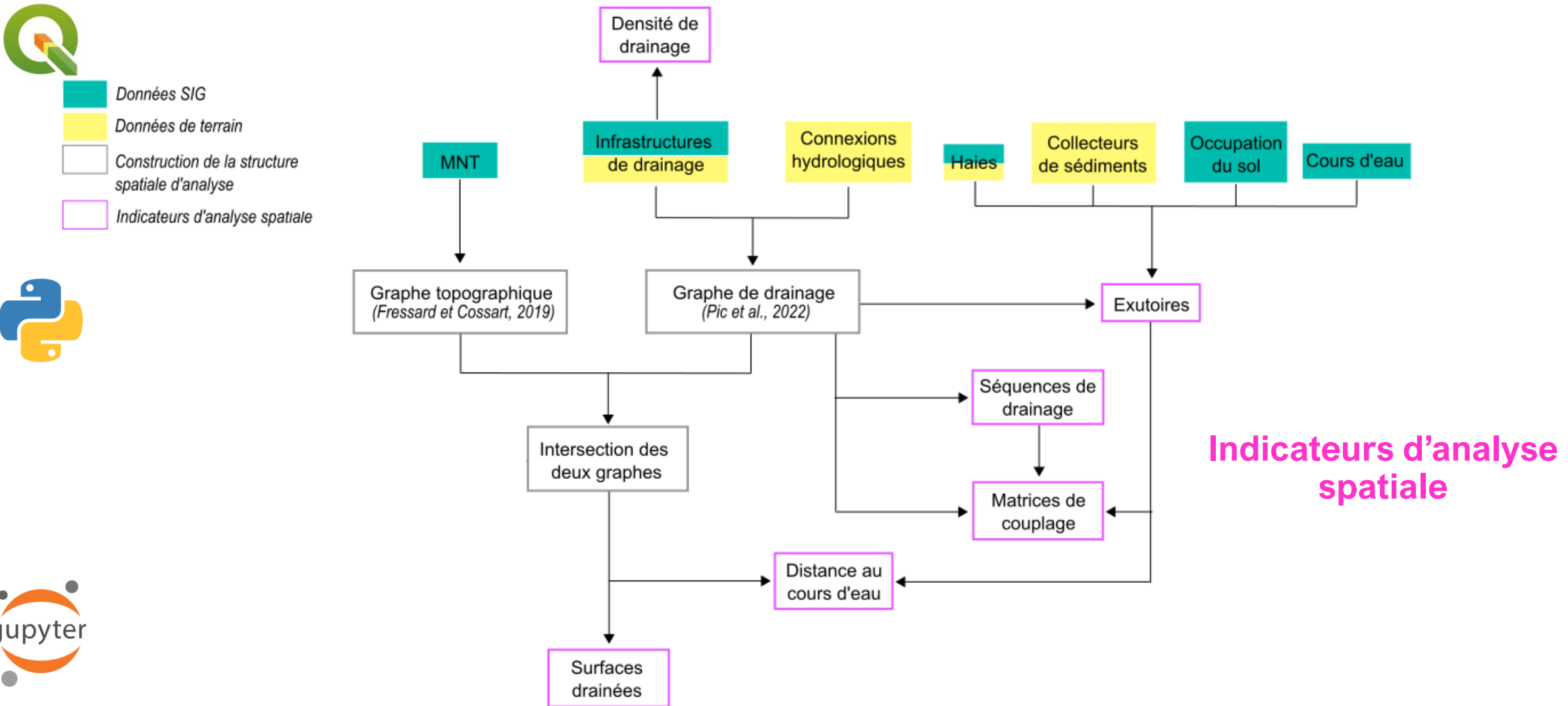
Réseau de drainage sous la forme d'un graphe : infrastructures de drainage et connexions

Explicitation de la constitution du graphe d'infrastructures de drainage



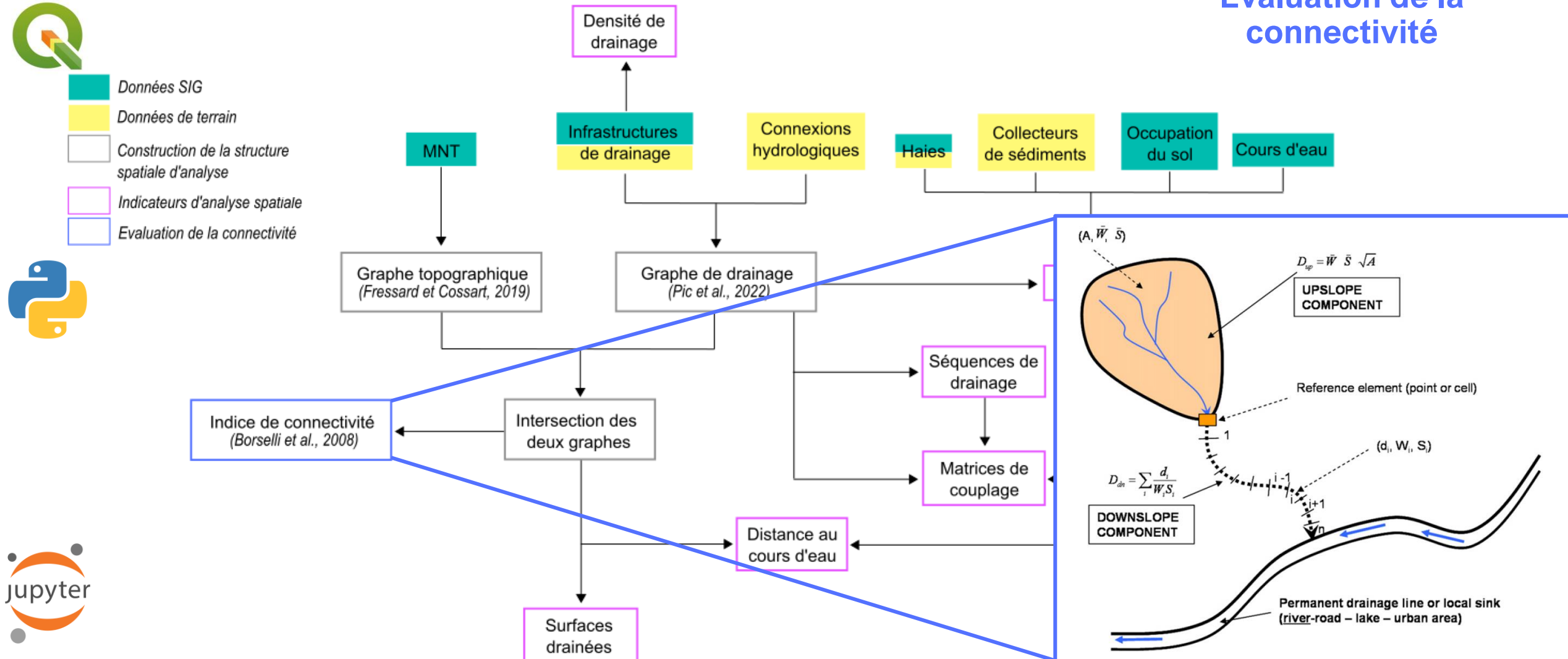
- **Sous-réseaux** : subdivision du réseau au fonctionnement indépendant.
- **Exutoires** : zones où se terminent les sous-réseaux : (1) cours d'eau, (2) puits à sédiments, (3) hors du bassin versant.
- **Séquences** : chemin entre chaque entrée du sous-réseau et son exutoire – succession d'infrastructures de drainage au fil du versant.

3.1. Analyse et modélisation spatiale



3.1. Analyse et modélisation spatiale

Évaluation de la connectivité



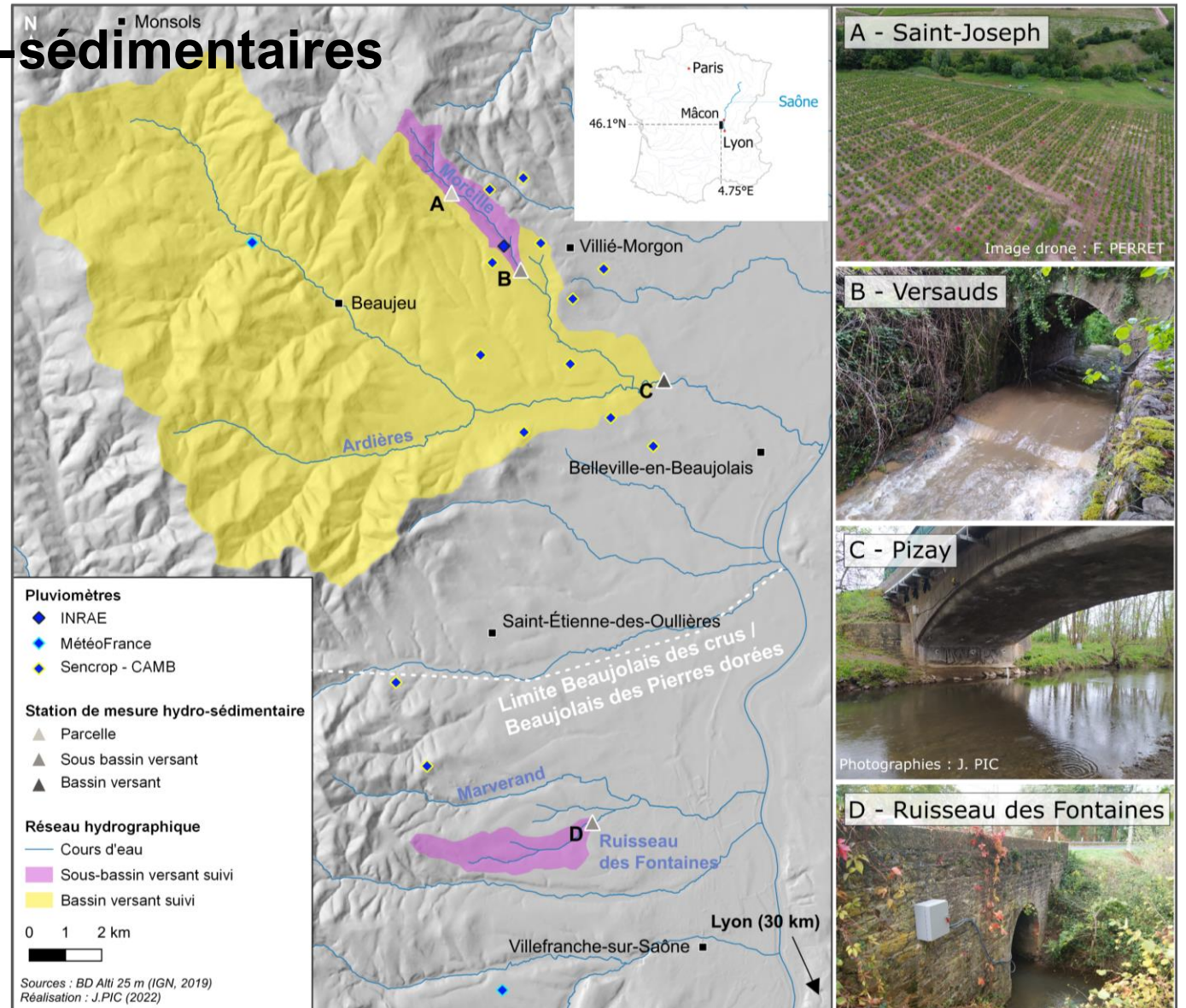
3.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

3 – Méthodologie

3.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

Réseau de mesure à différentes échelles

- 4 stations à 3 échelles dans 2 secteurs :
- A - Parcelle de Saint-Joseph : 0,3 ha
- B - Bassin versant de la Morcille : 3,9 km²
- C - Bassin versant du Ruisseau des Fontaines : 4,6 km²
- D - Bassin versant de l'Ardières : 143 km²
- Suivi hydrologique classique
- 2 années hydrologiques



3 – Méthodologie

3.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

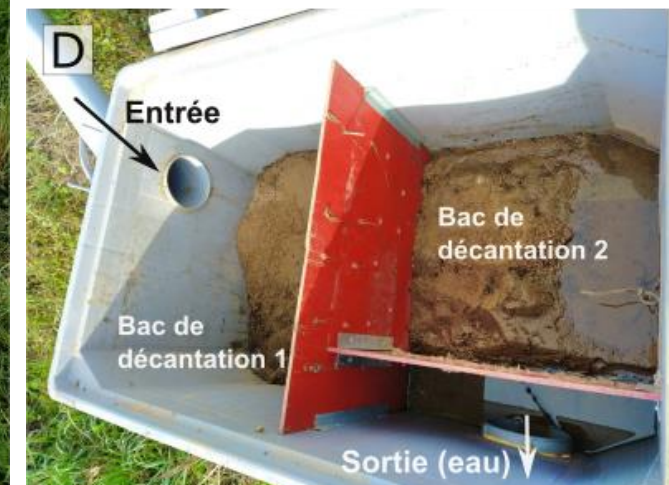
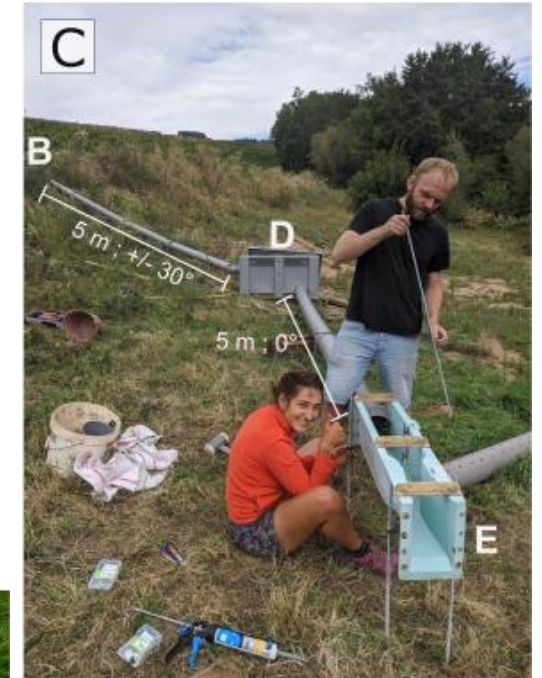
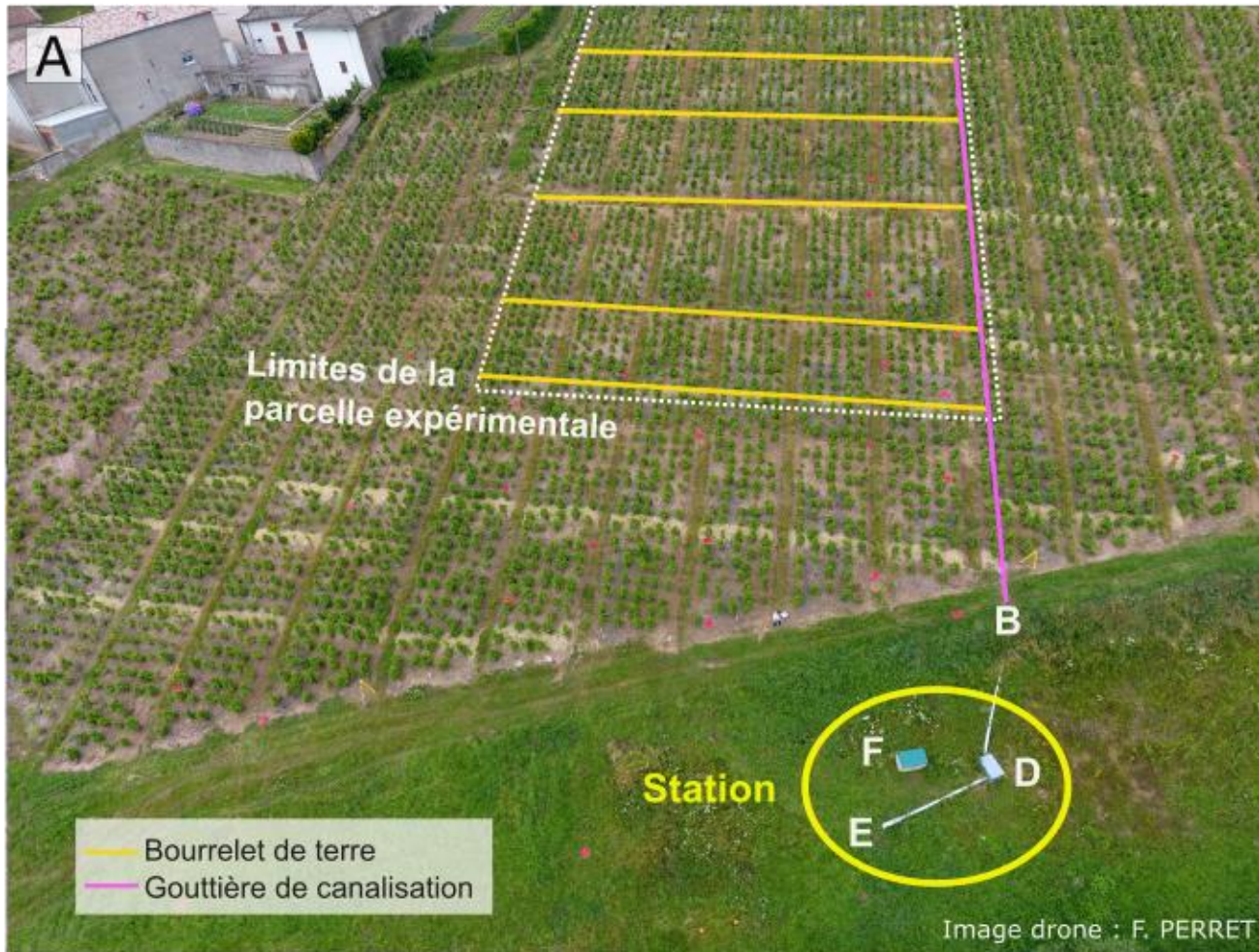
Mesure des transferts hydro-sédimentaire en rivière



3 – Méthodologie

3.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

Mesure de la production sédimentaire en parcelle

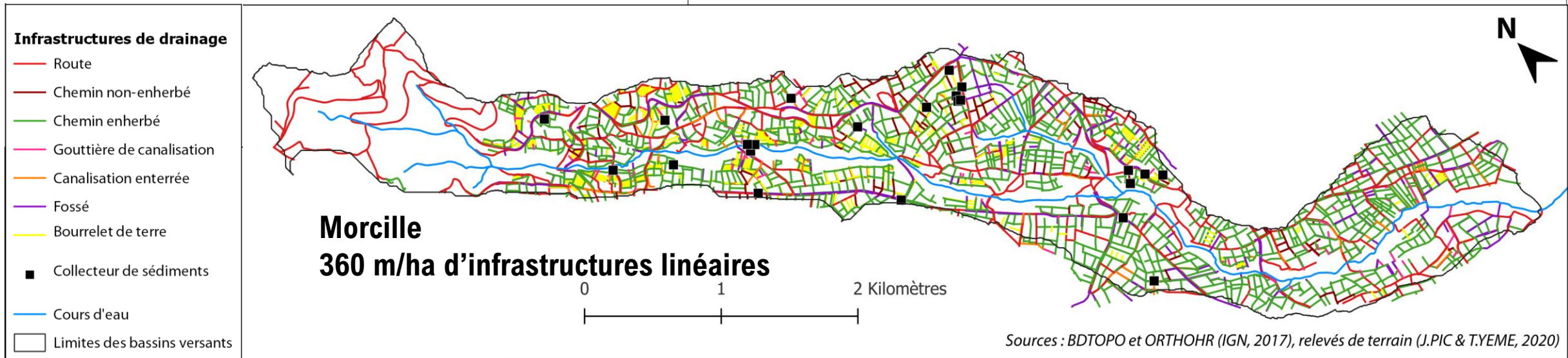
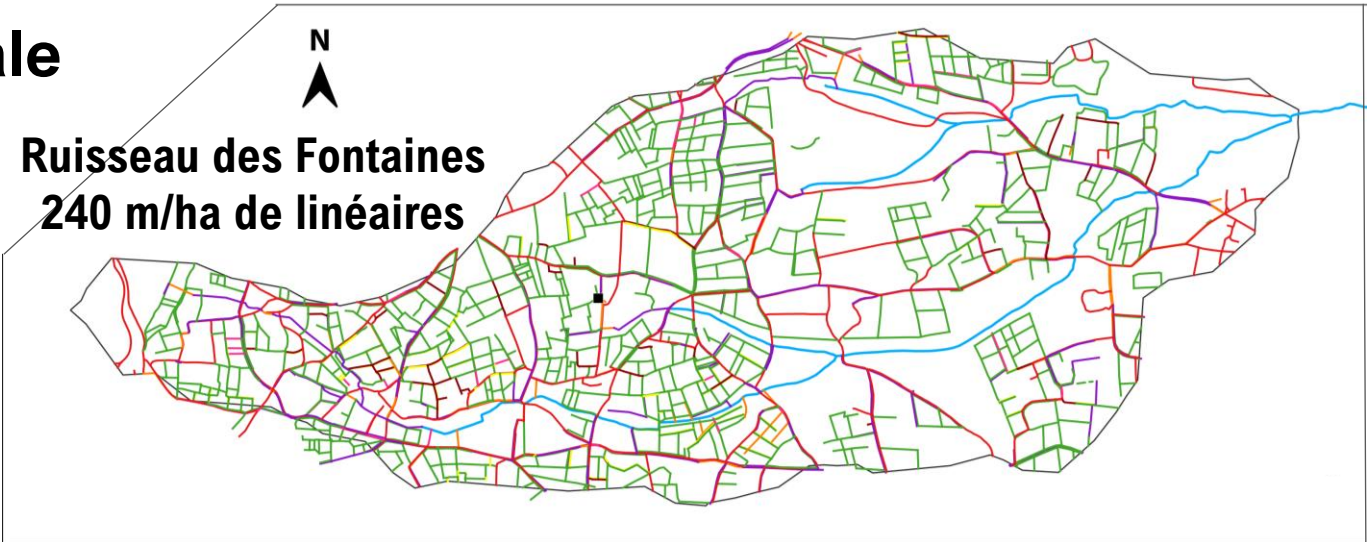


4.1. Analyse et modélisation spatiale

4.1. Analyse et modélisation spatiale

Forte densité d'infrastructures linéaires

- **Versants viticoles**
- Long des **routes** principales
- **Secteurs** les plus pentus

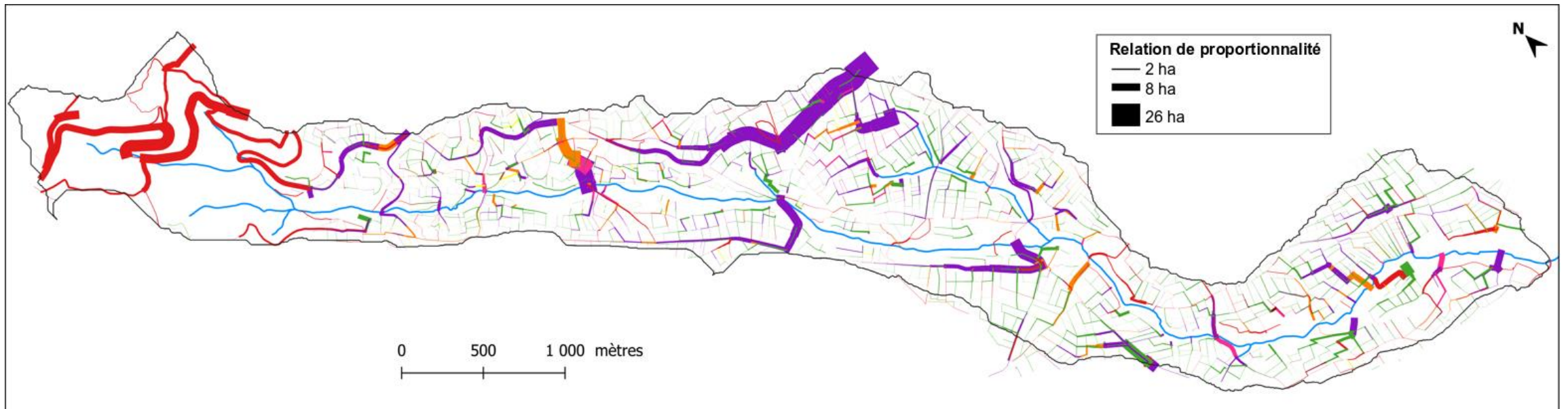
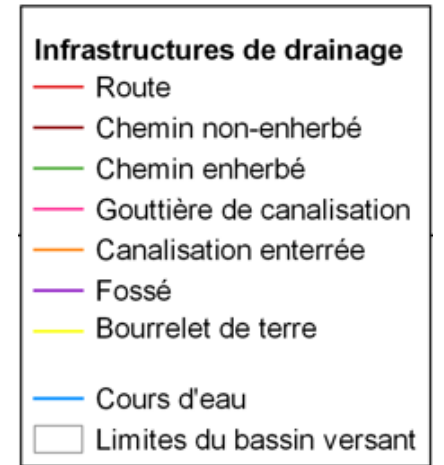


Infrastructures de drainage des versants, bassins versants du Ruisseau des Fontaines (haut) et de la Morcille (bas)

4.1. Analyse et modélisation spatiale

Surface contributive aux infrastructures de drainage

- Limites du bassin versant déterminées par les infrastructures linéaires
- Connexions des **fossés enherbés** au **cours d'eau**
- **Sous-réseaux** plus réduits sur les **versants**

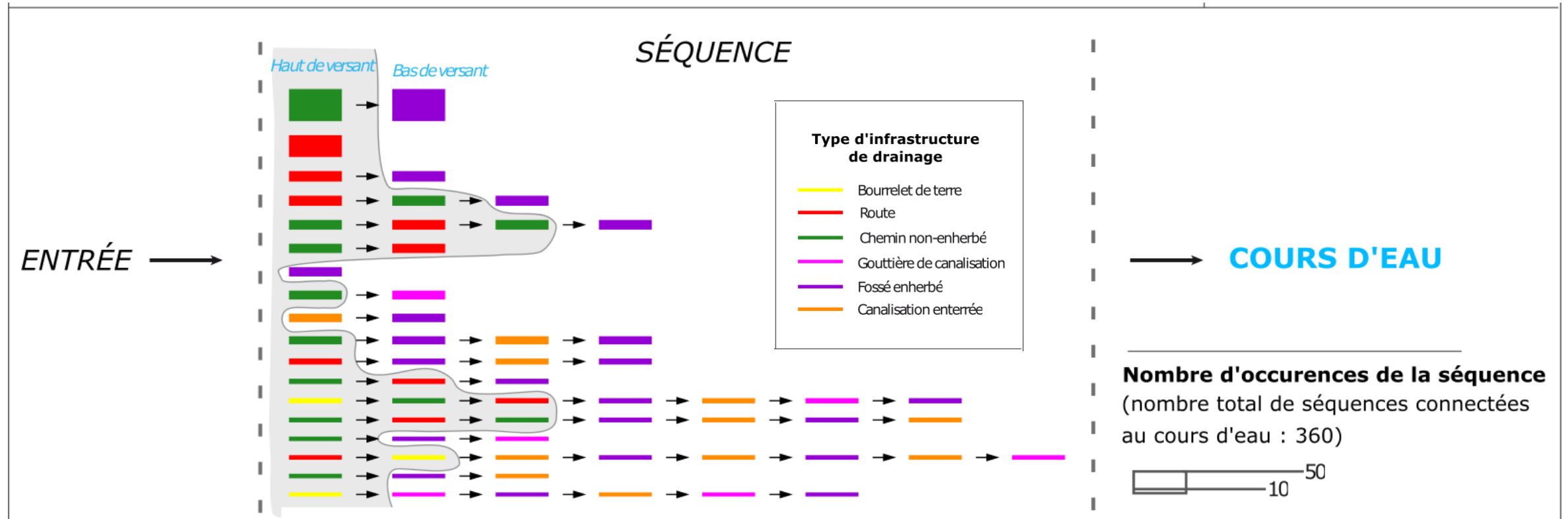


Superficie amont drainée par les infrastructures de drainage sur une portion du bassin versant de la Morcille

4.1. Analyse et modélisation spatiale

Séquences de drainage

Connectivité freinée sur les hauts de versant et accélérée sur les bas : augmentation des distances parcourues, effets barrières vs concentration des flux

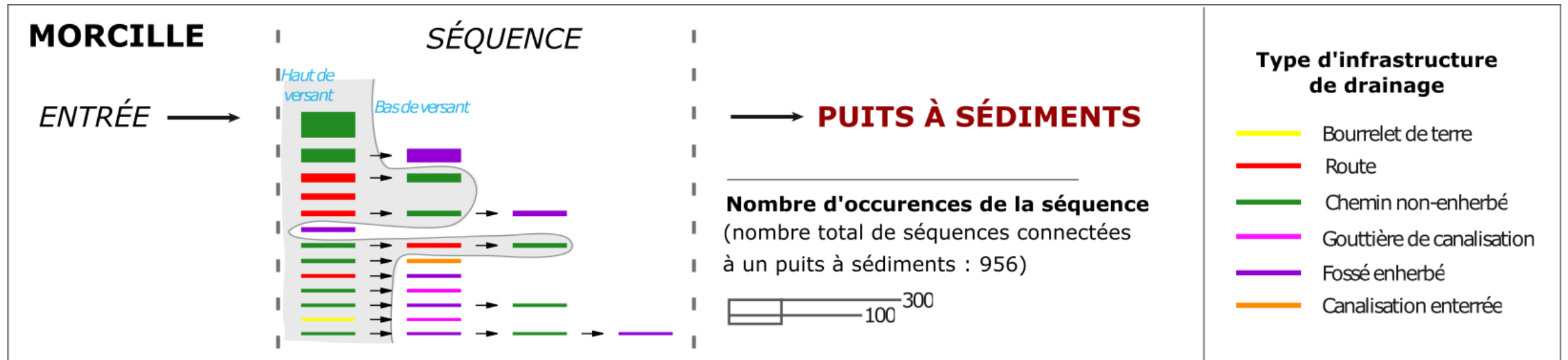


Séquences les plus fréquemment connectées au cours d'eau

4.1. Analyse et modélisation spatiale

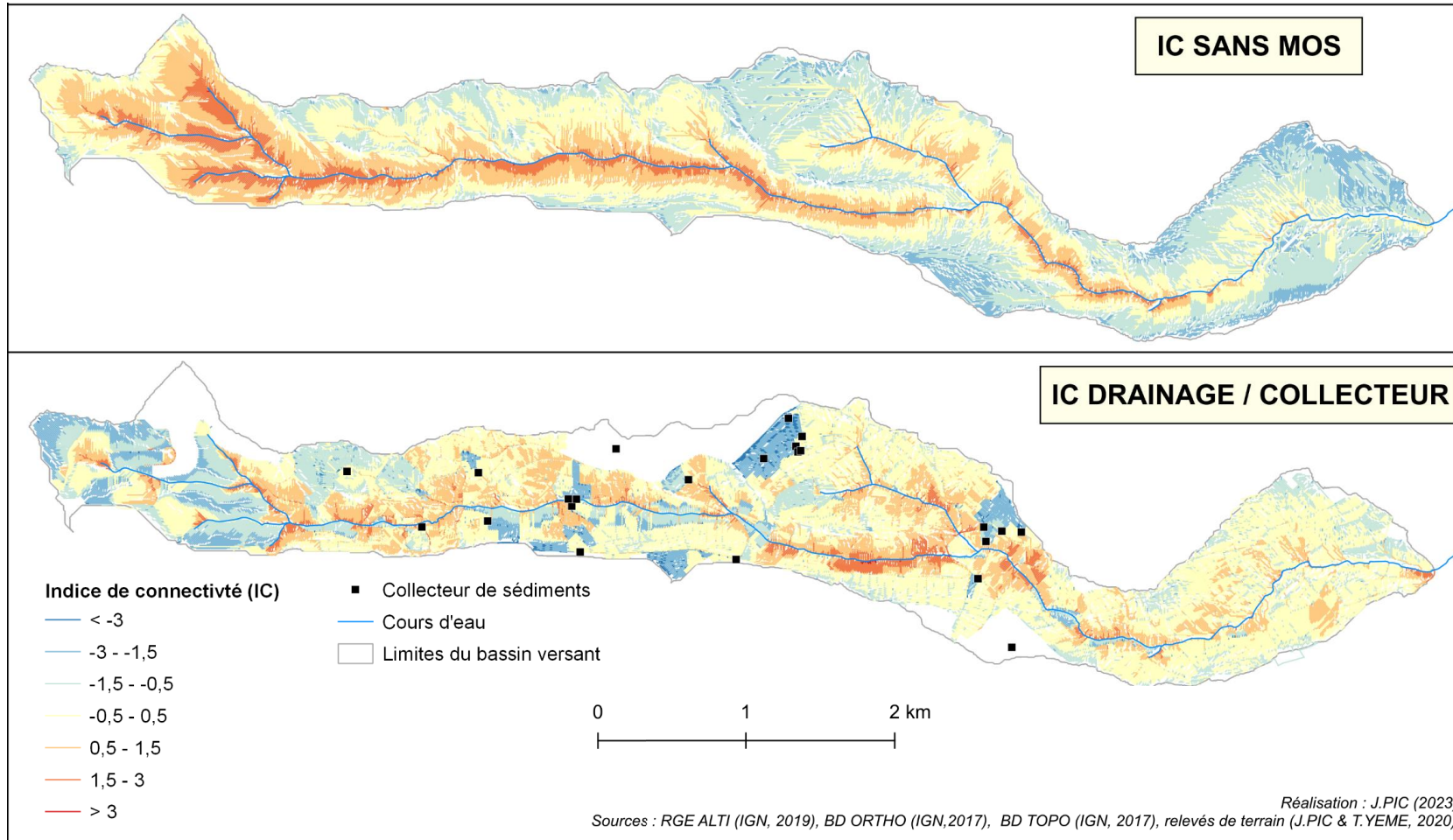
Séquences de drainage

- Séquences plus simples → réseau fragmenté
- **Chemins enherbés et fossés enherbés** = éléments clefs



Séquences les plus fréquemment connectées à un puits à sédiment

4.1. Analyse et modélisation spatiale



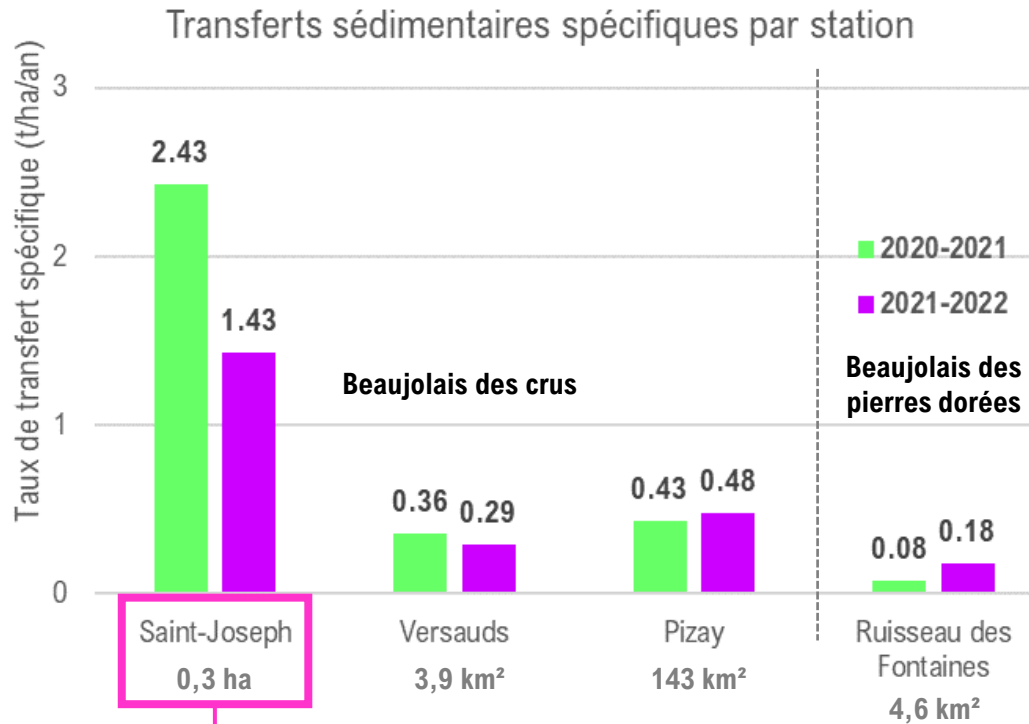
Indice de connectivité

- **Sans structure paysagère** : connectivité ++ = tête de bassin et en bord de cours d'eau.
- **MOS** : connectivité ++ dans le vignoble et les zones urbaines.
- **Réseau de drainage** : connectivité plus fragmentée dans le vignoble + secteurs déconnectés.
- **Collecteurs** : Réduction locale de la connectivité pour les secteurs drainés

4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

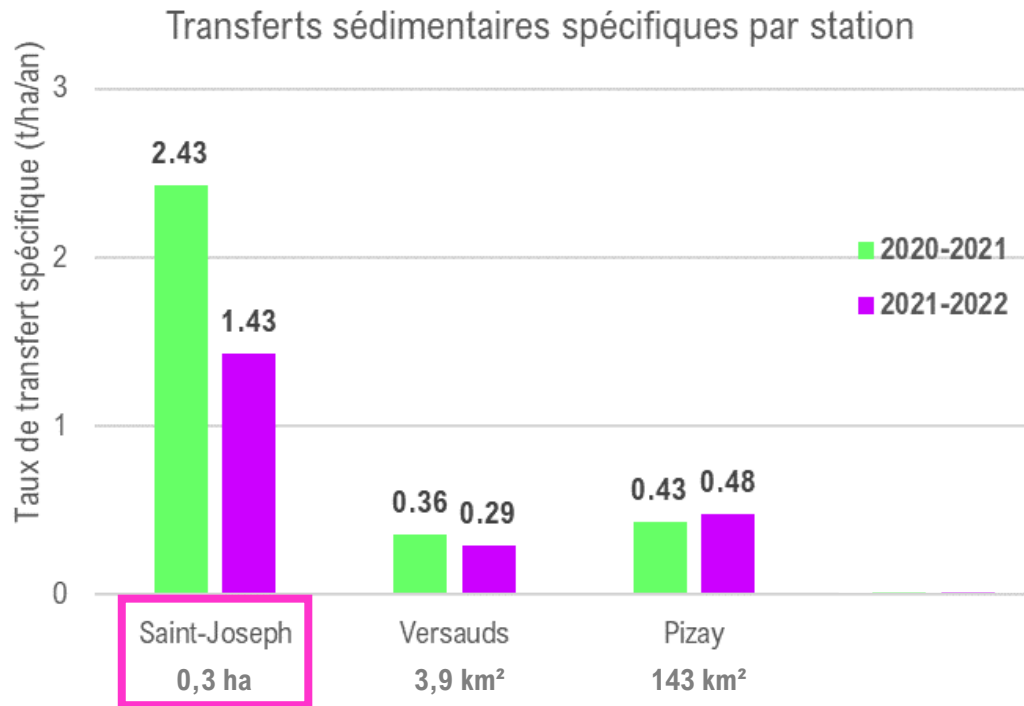
Budget sédimentaire aux trois échelles



- Collecteur : 60 % des transferts
- Matières en suspensions : 40 %

4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

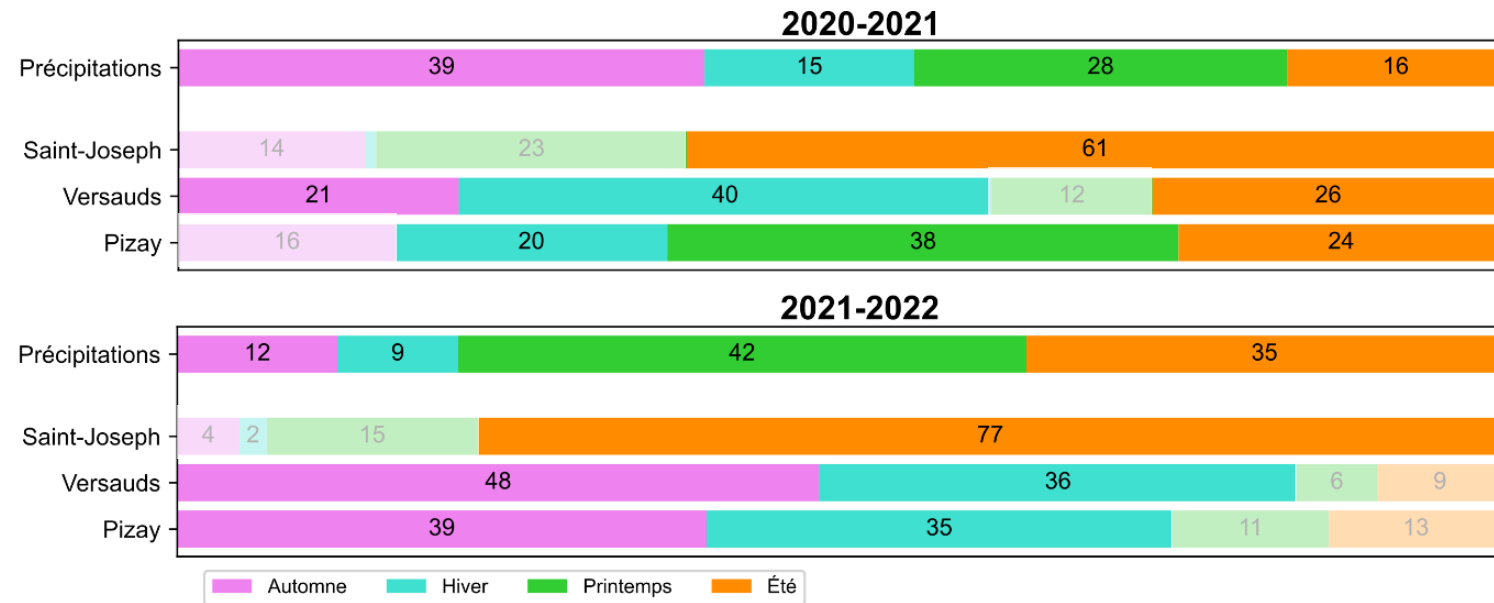
Budget sédimentaire aux trois échelles



- Collecteur : 60 % des transferts
- Matières en suspensions : 40 %

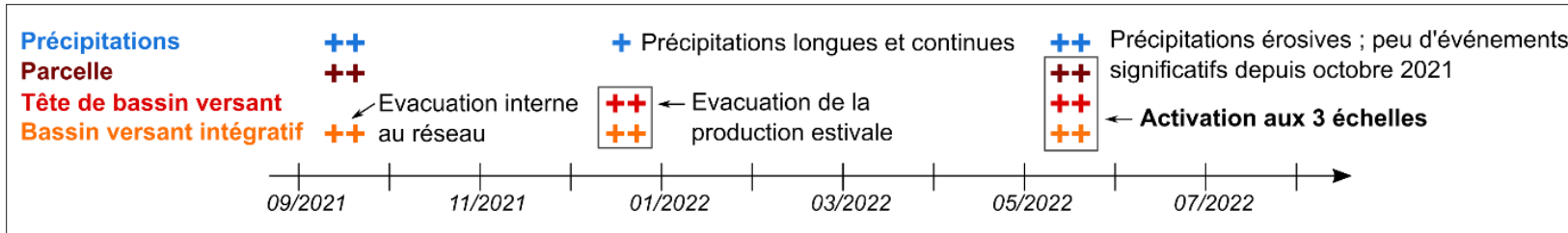
Déphasage saisonnier parcelle – cours d'eau

- Transferts sédimentaires estivaux sur la parcelle
- Rythme saisonnier plus équilibré et variable en rivière

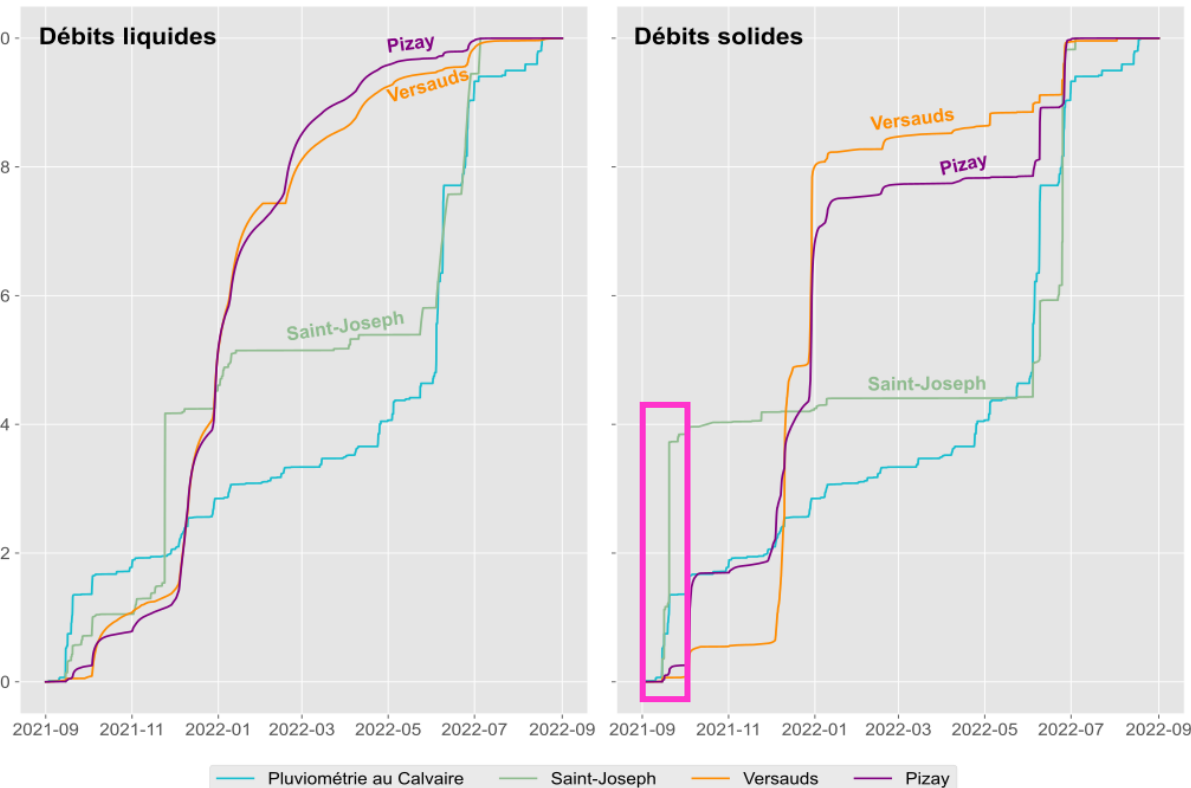


Part du transfert sédimentaire annuel (%) aux trois stations du site Ardières-Morcille pour les années hydrologiques 2020-2021 et 2021-2022.

4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires



Synthèse des dynamiques sédimentaires observées aux 3 échelles du SAAM lors de l'année hydrologique 2021-2022

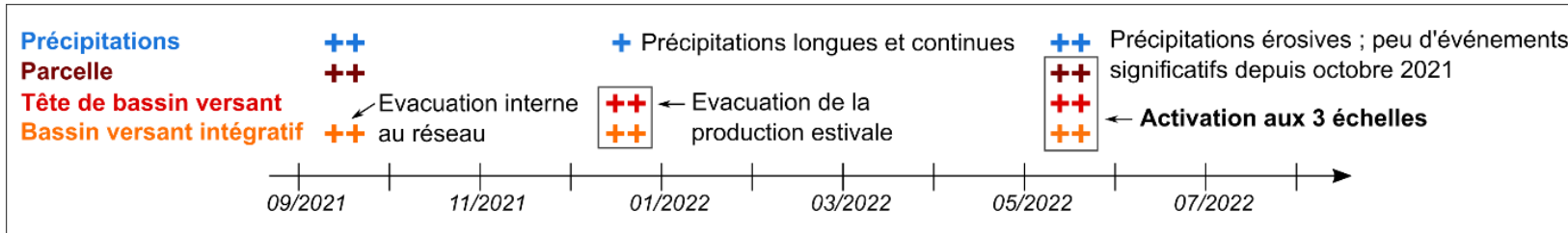


2021-2022 : Désynchronisation des débits solides en rivière et des précipitations

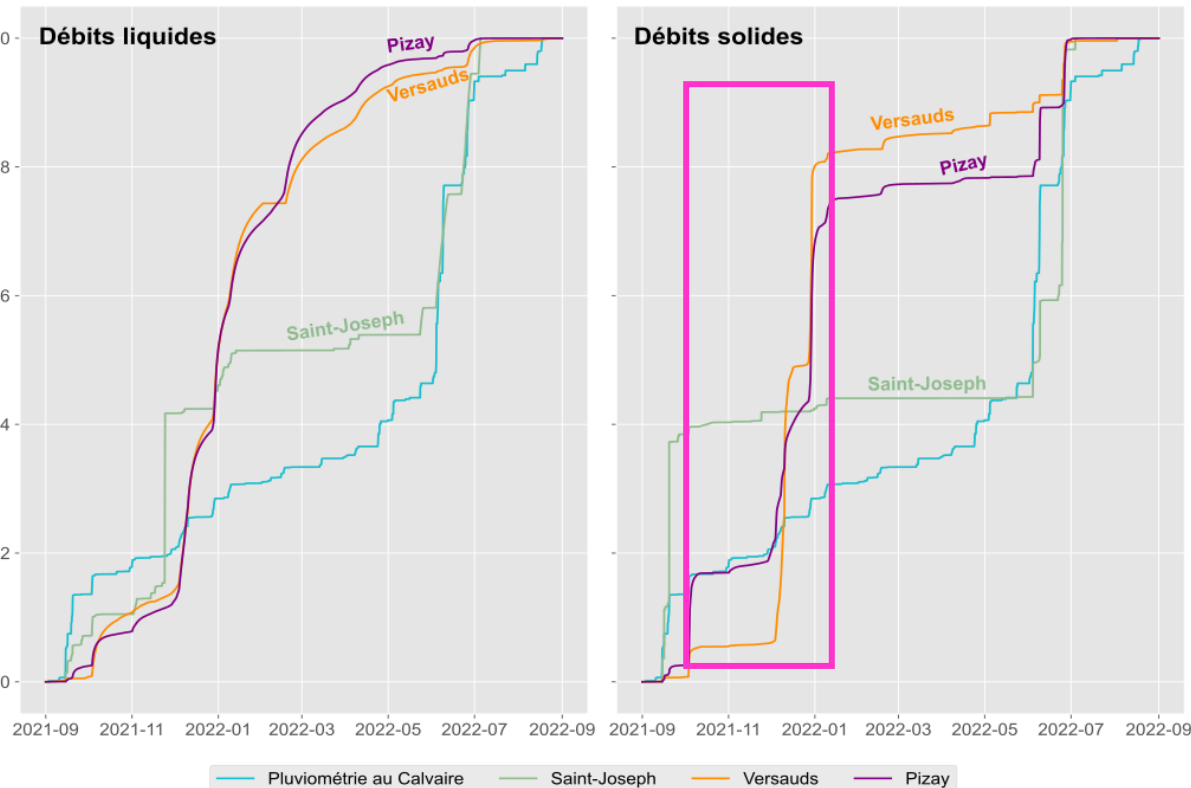
- **Été 2021** : précipitations érosives et production sédimentaire

Flux cumulés de débits liquides et solides, année hydrologique 2021-2022

4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires



Synthèse des dynamiques sédimentaires observées aux 3 échelles du SAAM lors de l'année hydrologique 2021-2022

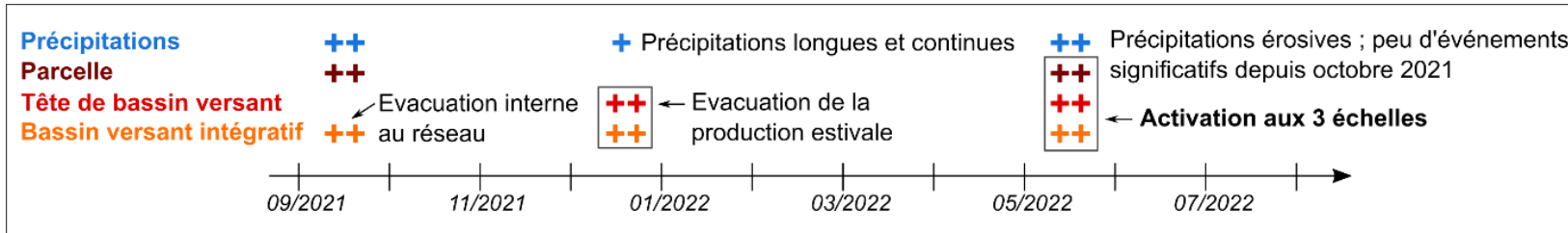


2021-2022 : Désynchronisation des débits solides en rivière et des précipitations

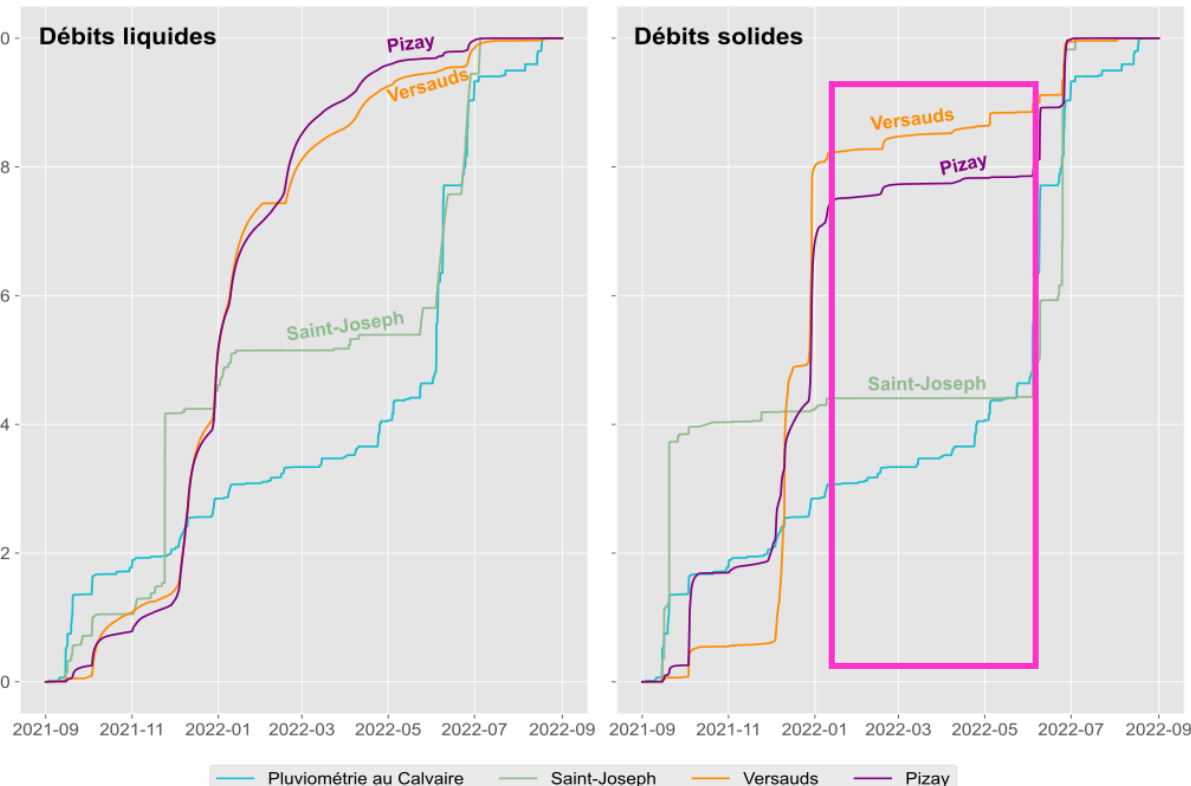
- **Été 2021** : précipitations érosives et production sédimentaire
- **Automne-hiver 2021** : évacuation

Flux cumulés de débits liquides et solides, année hydrologique 2021-2022

4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires



Synthèse des dynamiques sédimentaires observées aux 3 échelles du SAAM lors de l'année hydrologique 2021-2022

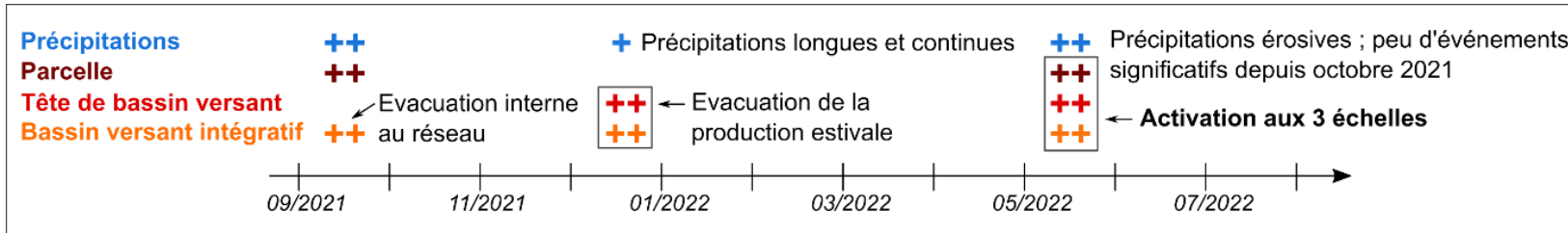


2021-2022 : Désynchronisation des débits solides en rivière et des précipitations

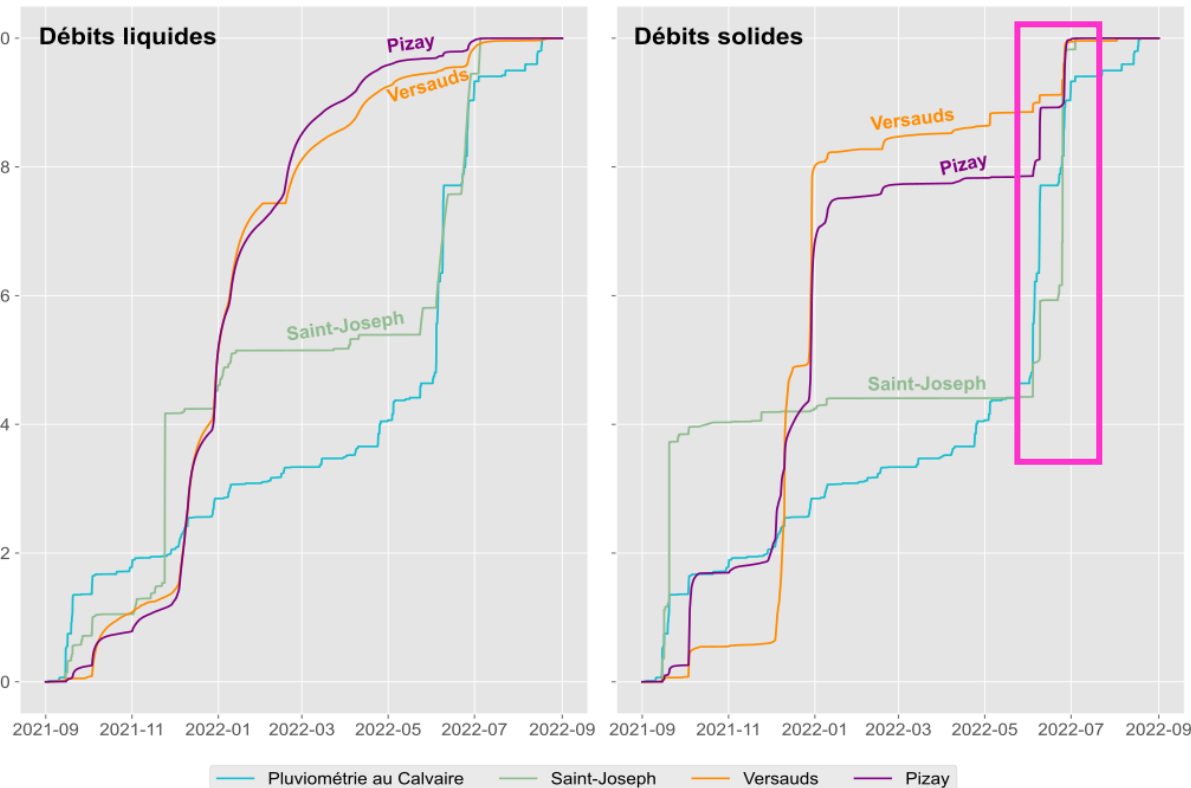
- **Été 2021** : précipitations érosives et production sédimentaire
- **Automne-hiver 2021** : évacuation puis tarissement des stocks sédimentaires

Flux cumulés de débits liquides et solides, année hydrologique 2021-2022

4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires



Synthèse des dynamiques sédimentaires observées aux 3 échelles du SAAM lors de l'année hydrologique 2021-2022



2021-2022 : Témoin de la rare activation du continuum géomorphologique

- **Été 2021** : précipitations érosives et production sédimentaire
- **Automne-hiver 2021** : évacuation puis tarissement des stocks sédimentaires
- **Printemps-été 2022** : activation aux trois échelles

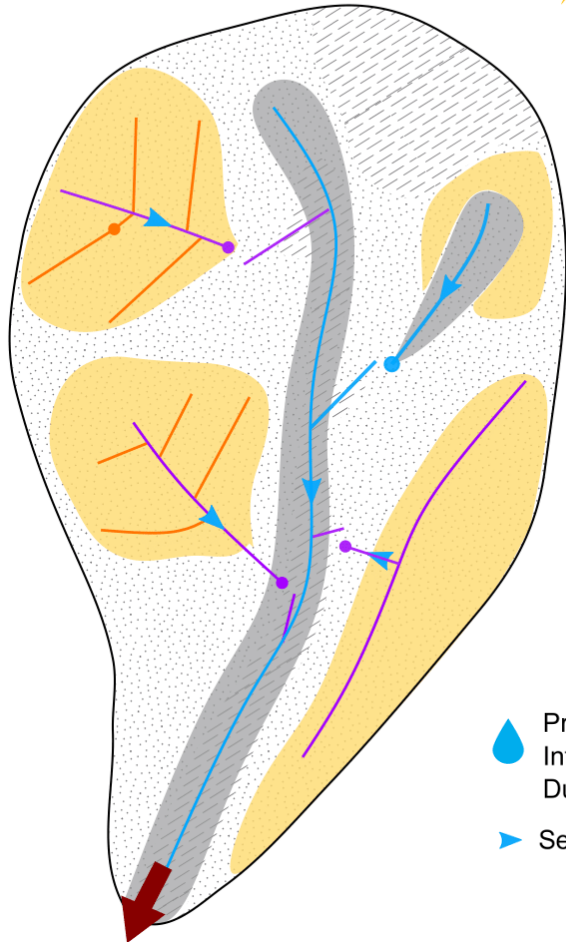
Flux cumulés de débits liquides et solides, année hydrologique 2021-2022

4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

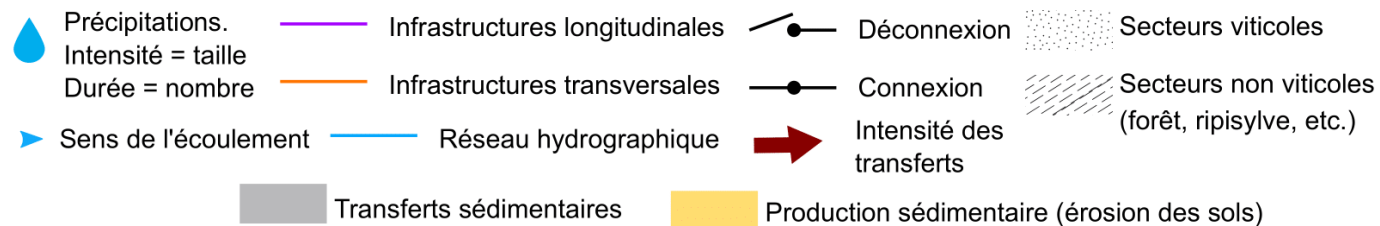
Crués liées à des précipitations érosives 

Types de crués

- Transferts sédimentaires saccadés

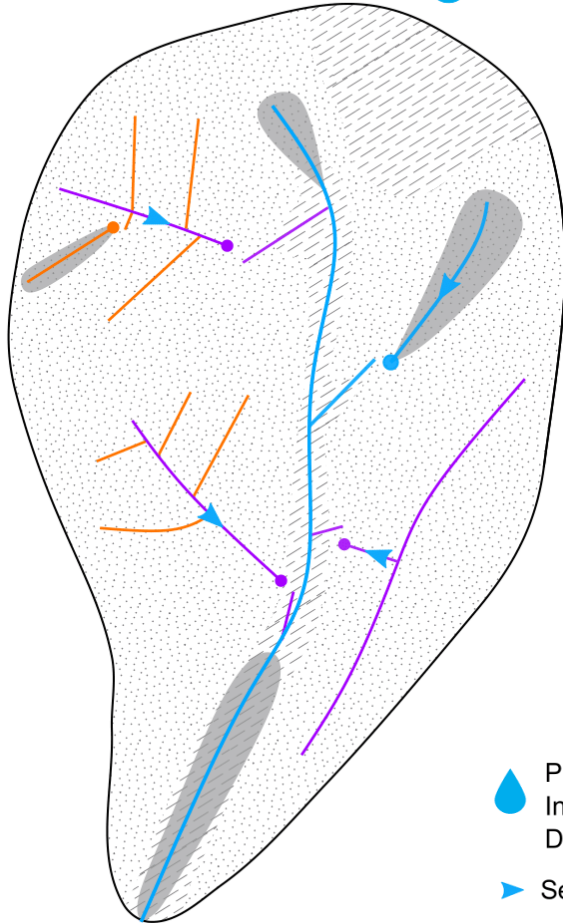


Type de crue	Précipitations	Débits liquides	Concentration en MES	Caractéristiques
Crués liées à des précipitations érosives	++	+	++	Production sédimentaire sur les versants Purge des sédiments du chenal Activation complète du système possible si succession d'événements



4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

Petites crues 

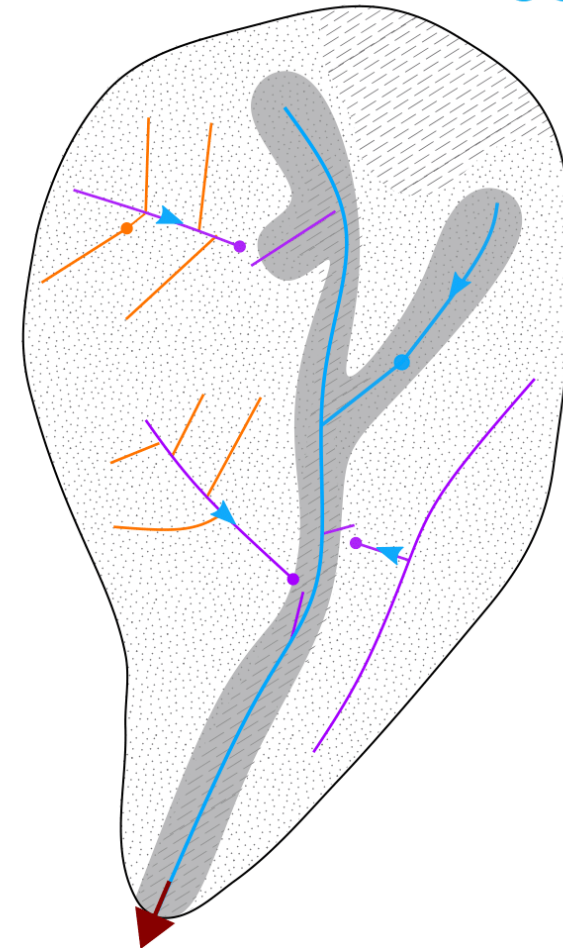




Types de crues




- Transferts sédimentaires saccadés




Type de crue	Précipitations	Débits liquides	Concentration en MES	Caractéristiques
Crues liées à des précipitations érosives	++	+	++	Production sédimentaire sur les versants Purge des sédiments du chenal Activation complète du système possible si succession d'événements
Petites crues	-	+	-	Transferts sédimentaires faibles
Crues intermédiaires	+	+	+	Purge des sédiments du chenal





Crues intermédiaires 



 Précipitations.
 Intensité = taille
 Durée = nombre
 Sens de l'écoulement

 Infrastructures longitudinales
 Infrastructures transversales
 Réseau hydrographique

 Déconnexion
 Connexion
 Intensité des transferts

 Secteurs viticoles
 Secteurs non viticoles (forêt, ripisylve, etc.)
 Transferts sédimentaires
 Production sédimentaire (érosion des sols)

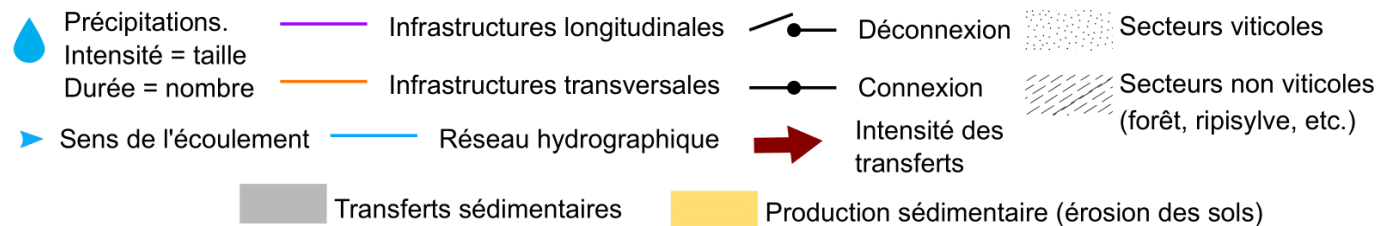
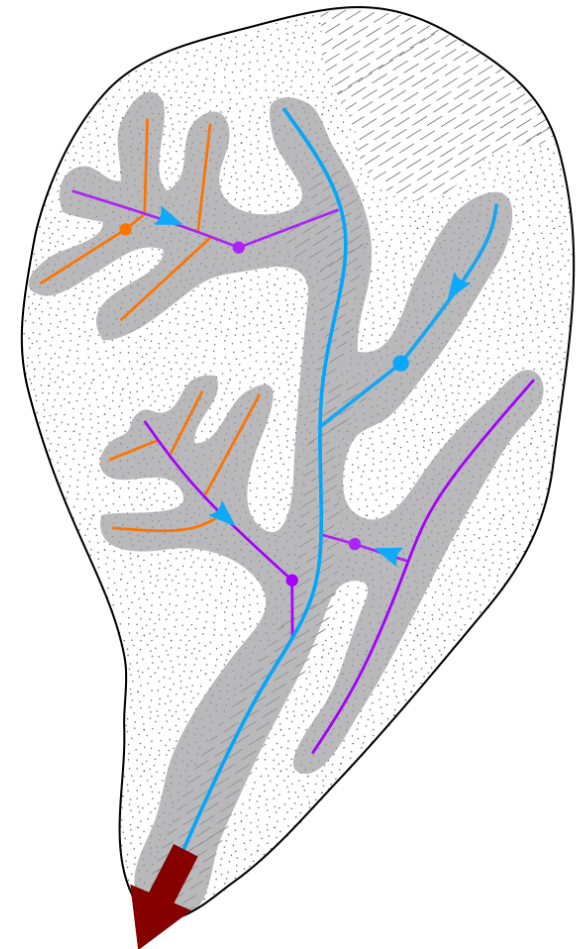
4.2. Mesure des transferts hydro-sédimentaires

Types de crues

- Transferts sédimentaires saccadés

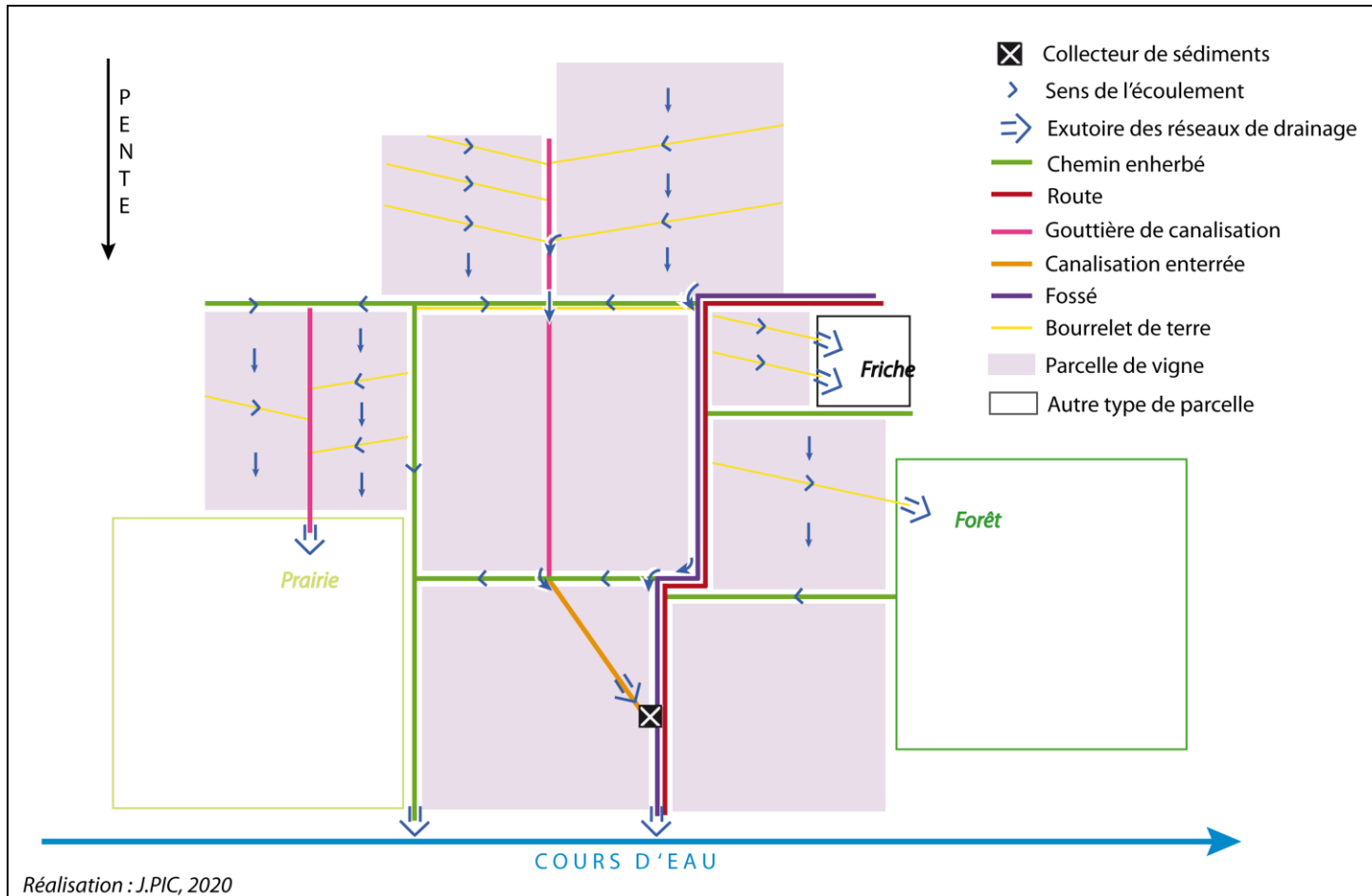
Type de crue	Précipitations	Débits liquides	Concentration en MES	Caractéristiques
Crues liées à des précipitations érosives	++	+	++	Production sédimentaire sur les versants Purge des sédiments du chenal Activation complète du système possible si succession d'événements
Petites crues	-	+	-	Transferts sédimentaires faibles
Crues intermédiaires	+	+	+	Purge des sédiments du chenal
Crues à hauts débits	++	++	+	Signaux complexes Activation complète du système

Crues à hauts débits



4 – Discussion

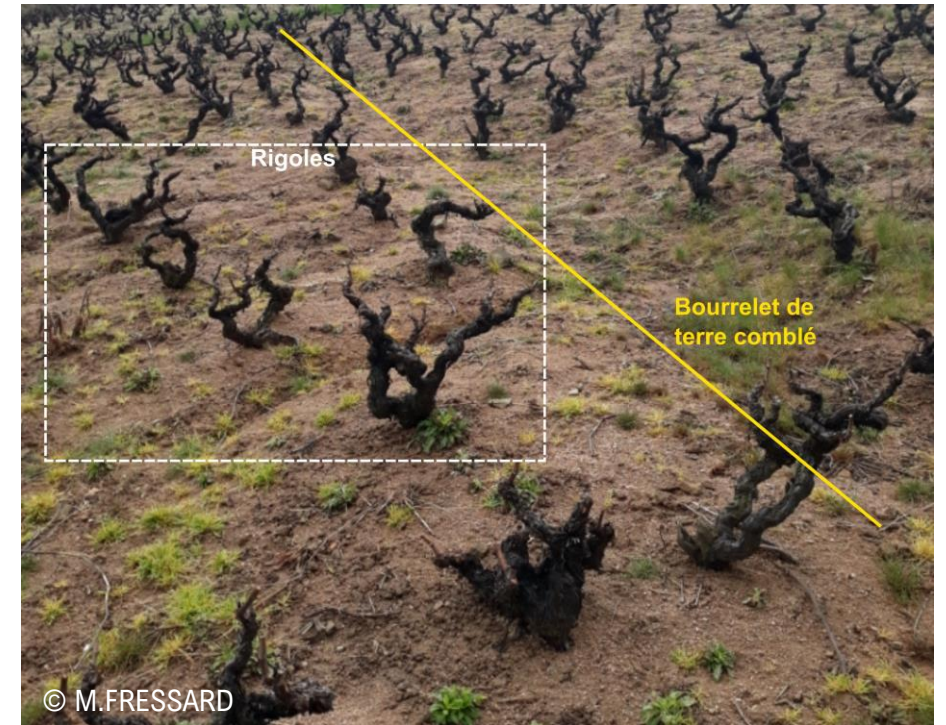
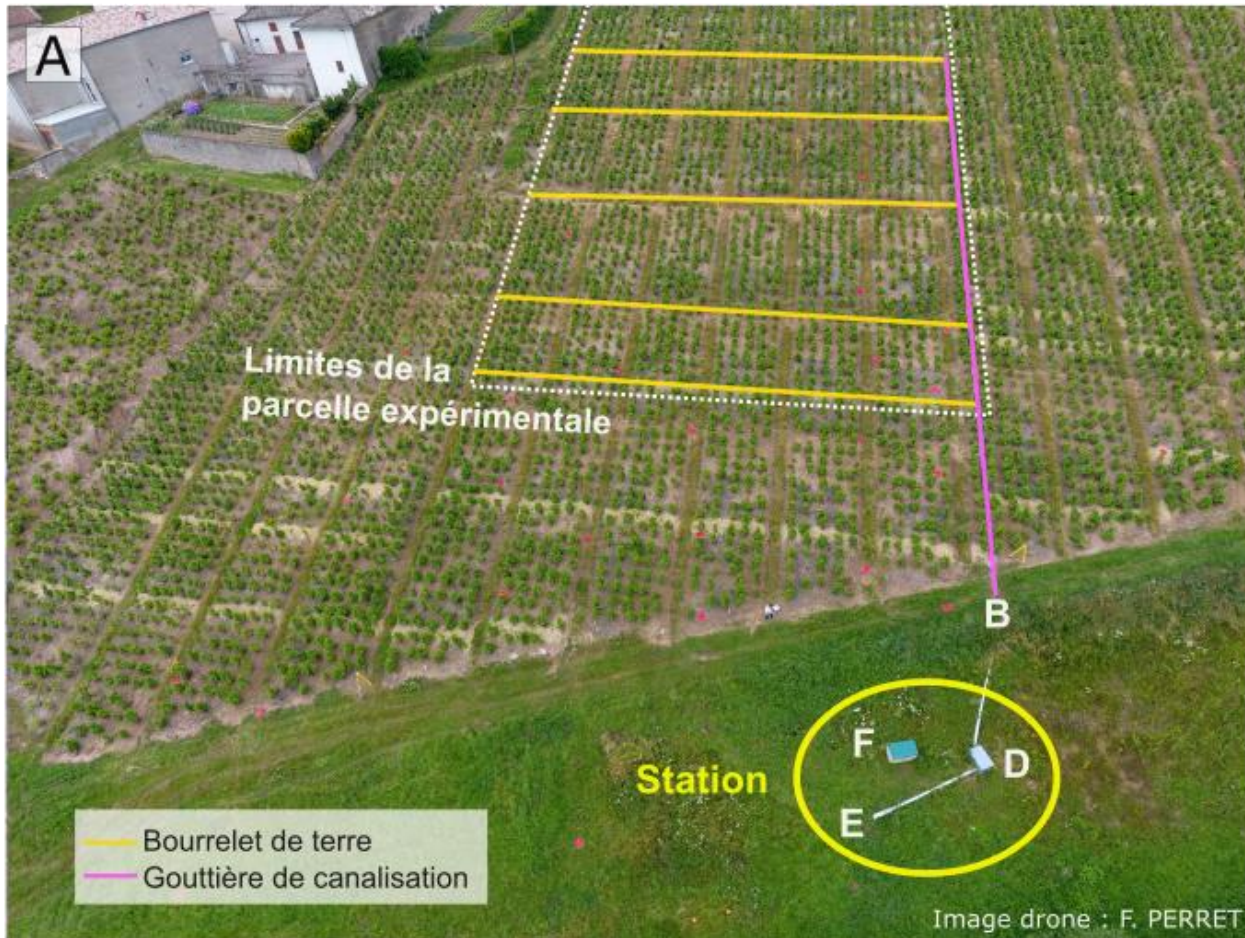
4.3. Implications subtiles de la structure paysagère dans les transferts hydro-sédimentaires



- **Hauts de versant** : réduction de la connectivité, stockage sédimentaire dans le réseau de drainage
- **Bas de versant** : connectivité accrue, forte canalisation, export sédimentaire au cours d'eau ou collecte

4.3. Implications subtiles de la structure paysagère dans les transferts hydro-sédimentaires

- Une stratégie de gestion de la parcelle de Saint-Joseph qui semble limiter la production sédimentaire



Parcelle présentant des bourrelets de terre comblés et des rigoles

4.3. Implications subtiles de la structure paysagère dans les transferts hydro-sédimentaires

- Des transferts facilités ou atténués à l'échelle du versant par le réseau de drainage ?

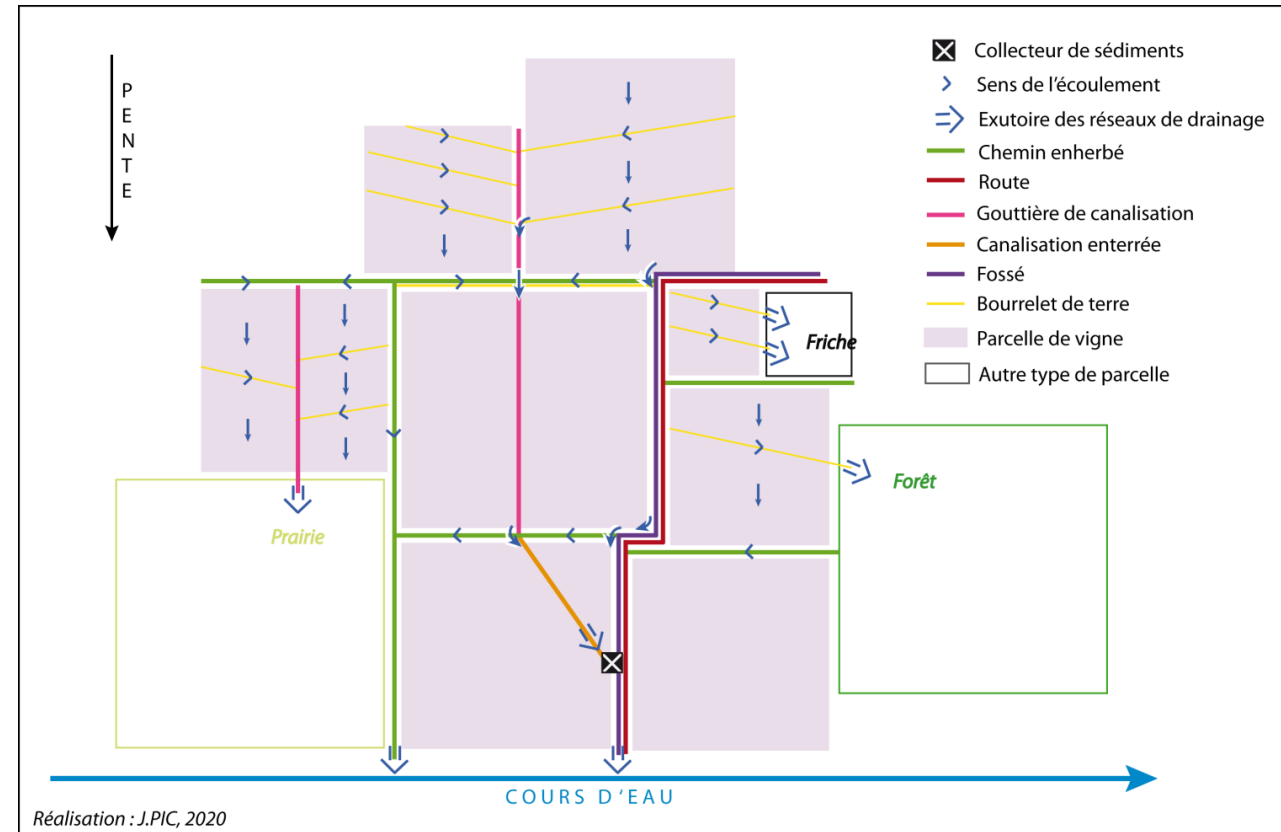
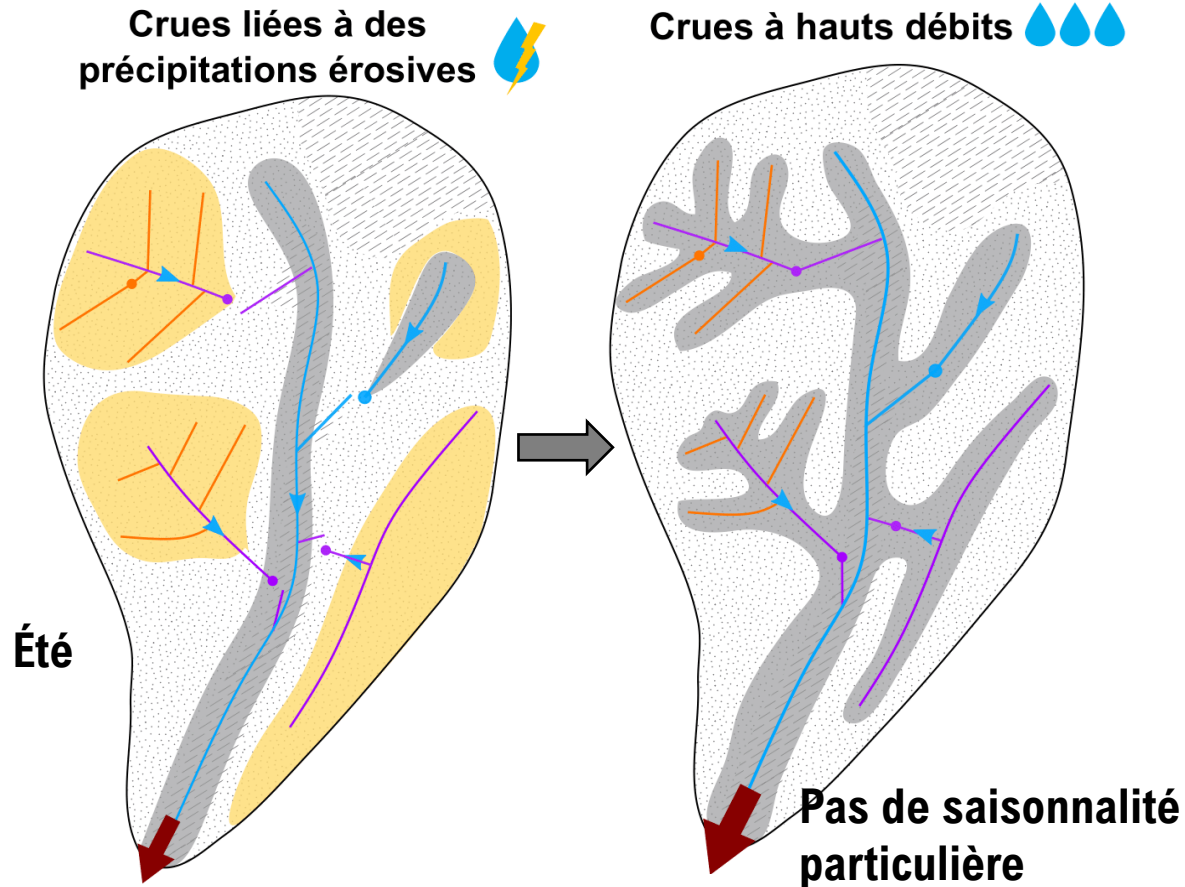


Schéma de synthèse du rôle du réseau de drainage dans la réorganisation des flux hydro-sédimentaires

4.3. Implications subtiles de la structure paysagère dans les transferts hydro-sédimentaires

- Un suivi à l'échelle des infrastructures de drainage et de l'événement à réaliser !

Bourelet de terre
Limitation des transferts
Précipitations érosives



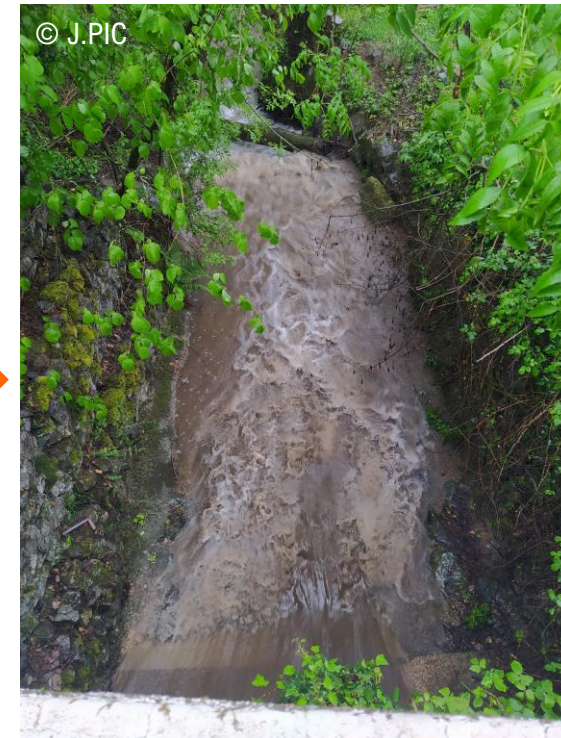
Fossé enherbé
Facilitation et rétention des transferts sédimentaires



Collecteur de sédiments
Stockage sédimentaire
Fréquence de curage



Cours d'eau
Stockage au sein du chenal
Transferts = crues à hauts débits



5 – Conclusion

Décrire à échelle fine l'organisation de la structure paysagère et des modalités de connectivité

Très forte densité d'infrastructures de drainage, distorsion de la cascade sédimentaire et fragmentation des versants par les réseaux

Dominance des connexions directes au cours d'eau via le réseau

Mesurer le volume et les rythmes des transferts hydro-sédimentaires à différentes échelles spatiales

Transferts sédimentaires saccadés : production estivale puis déstockage des versants vers le cours d'eau et évacuation progressive

Intérêt de faire le lien entre l'analyse de la structure paysagère et la mesure des transferts sédimentaires

Décrire à échelle fine l'organisation de la structure paysagère et des modalités de connectivité

Très forte densité d'infrastructures de drainage, distorsion de la cascade sédimentaire et fragmentation des versants par les réseaux

Dominance des connexions directes au cours d'eau via le réseau

Stratégies différenciées entre les hauts et les bas de versant

Mesurer le volume et les rythmes des transferts hydro-sédimentaires à différentes échelles spatiales

Transferts sédimentaires saccadés : production estivale puis déstockage des versants vers le cours d'eau et évacuation progressive

Une production sédimentaire modérée mais des transferts équivalents aux estimations

Typologie des crues → rare activation complète du système

Intérêt de faire le lien entre l'analyse de la structure paysagère et la mesure des transferts sédimentaires

Décrire à échelle fine l'organisation de la structure paysagère et des modalités de connectivité

Très forte densité d'infrastructures de drainage, distorsion de la cascade sédimentaire et fragmentation des versants par les réseaux

Dominance des connexions directes au cours d'eau via le réseau

Stratégies différenciées entre les hauts et les bas de versant

Grappe : approche pertinente pour les petits bassins versants à la structure paysagère complexe

Mesurer le volume et les rythmes des transferts hydro-sédimentaires à différentes échelles spatiales

Transferts sédimentaires saccadés : production estivale puis déstockage des versants vers le cours d'eau et évacuation progressive

Une production sédimentaire modérée mais des transferts équivalents aux estimations

Typologie des crues → rare activation complète du système

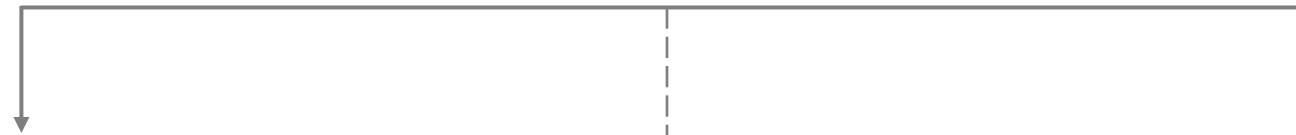
Rôle sensible de la structure paysagère dans les transferts

Intérêt de faire le lien entre l'analyse de la structure paysagère et la mesure des transferts sédimentaires

Intérêt de faire le lien entre l'analyse de la structure paysagère et la mesure des transferts sédimentaires.



PERSPECTIVES



- Comment transposer l'approche graphe à une échelle plus large ? Automatisation, autres indicateurs ?
- Approfondir l'approche fonctionnelle
- Tester la robustesse de la méthode sur d'autres secteurs

- Étendre le suivi dans le temps et à d'autres parcelles
- Suivi multiscalair : réseau de drainage, pratiques culturelles et gestion des infrastructures



**Retombées
opérationnelles ?**