



**HAL**  
open science

# Utilisation des MNT et des SIG pour la modélisation hydrologique

Olivier Delaigue

► **To cite this version:**

Olivier Delaigue. Utilisation des MNT et des SIG pour la modélisation hydrologique. Master. SIG/télédétection, Institut de Physique du Globe de Paris, France. 2020. hal-03288014

**HAL Id: hal-03288014**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03288014>**

Submitted on 16 Jul 2021

**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.

# Utilisation des MNT et des SIG pour la modélisation hydrologique

Olivier Delaigue — Équipe *Hydrologie des bassins versants*  
Unité de recherche *Hydrosystèmes continentaux anthropisés*



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

INRAE  
université  
PARIS-SACLAY



# L'hydrologie à l'INRAE

# INRAE

## L'institut

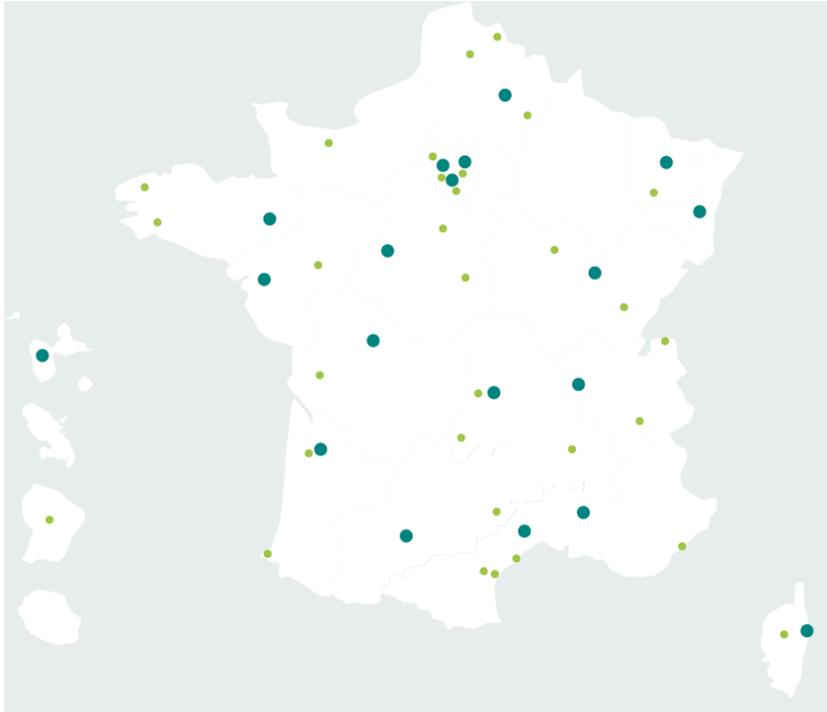
- Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation & l'environnement
- Établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST)

## Thématiques

- Changement climatique et risques
- Agroécologie
- Biodiversité
- Alimentation, santé globale
- Bioéconomie
- Société et territoires



# INRAE



## Quelques chiffres

- 12 000 agents :  
8 500 titulaires & 3 500 contractuels
- 18 centres de recherche,  
14 départements de recherche
- 268 unités de recherche,  
de service et expérimentales

# Qu'est ce que l'hydrologie ?

## **Hydrologie**

Science de la Terre qui s'intéresse au cycle de l'eau, c'est-à-dire aux échanges entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol

## **Hydrologie fluviale**

Branche de l'hydrologie dont l'objet essentiel est l'étude des régimes fluviaux, des débits et de leurs variations

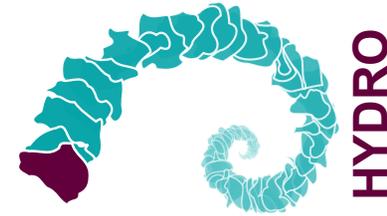
## **Hydrologie de surface**

Étudie le ruissellement, les phénomènes d'érosion, les écoulements des cours d'eau et les risques liés à l'eau (inondations et sécheresses)

# Équipe *Hydrologie des bassins versants* (Antony, 92)

## Principaux axes de recherche

- Prédiction hydrométéorologique
- Changements globaux et impacts
- Régionalisation et variabilités
- Modélisation hydrologique et incertitudes



# Parcours personnel

## Parcours universitaire à Lyon

- Licence de biologie
- Master de biostatistique appliquée à l'écologie

## Parcours professionnel à l'INRAE

- 6 ans en hydrobiologie (Aix-en-Provence & Antony)
  - biostatistique
- 8 ans en hydrologie (Antony)
  - développement de logiciels
  - gestion de bases de données
  - géomatique



# Modélisation hydrologique des bassins versants

# Qu'est-ce qu'un bassin versant ?

## Définition

- Ensemble des points d'une région ayant un exutoire commun pour les écoulements de surface

## Propriété

- Définissable en tout point d'un cours d'eau
- Ensemble des surfaces drainées par le réseau hydrographique situé en amont du point considéré



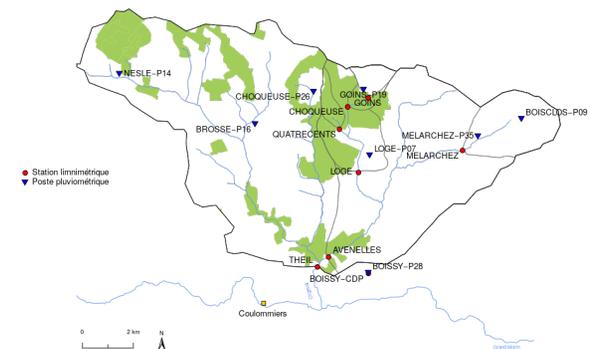
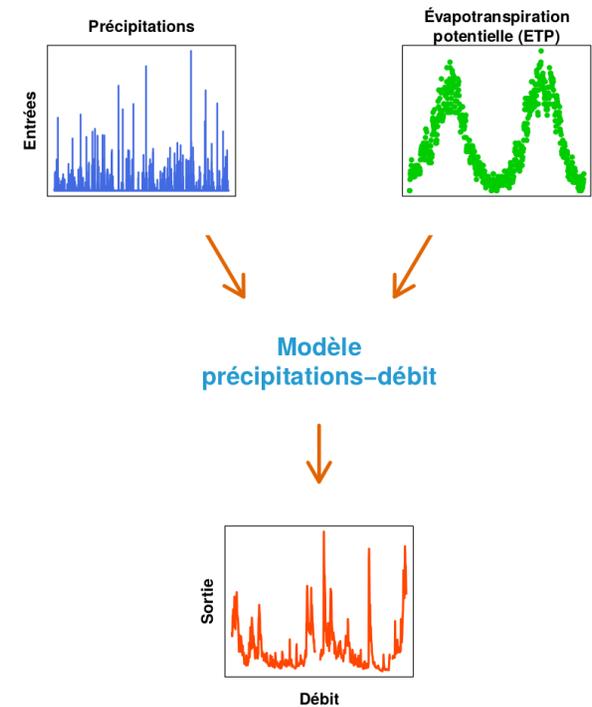
# Qu'est-ce qu'un modèle ?

## Définition

- Représentation simplifiée d'un système complexe  
système naturel : bassin versant
- Synthèse architecturée de connaissances  
outil de recherche
- Permet de répondre à des questions d'ordre opérationnel  
outil d'application

## Modèles précipitations-débit

- Outils mathématiques qui permettent de calculer des débits à partir de données de précipitations et d'évaporation potentielle

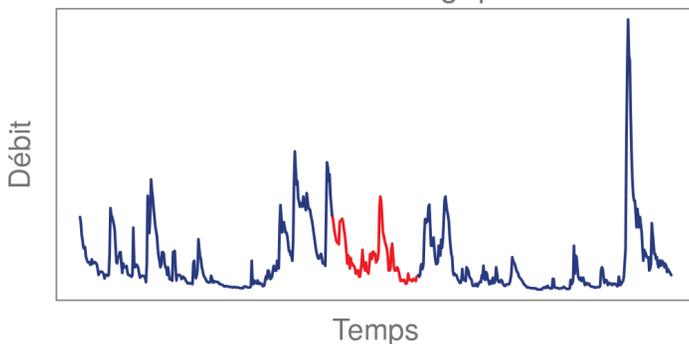


# Modèles hydrologiques

# Applications de modèles précipitations-débit

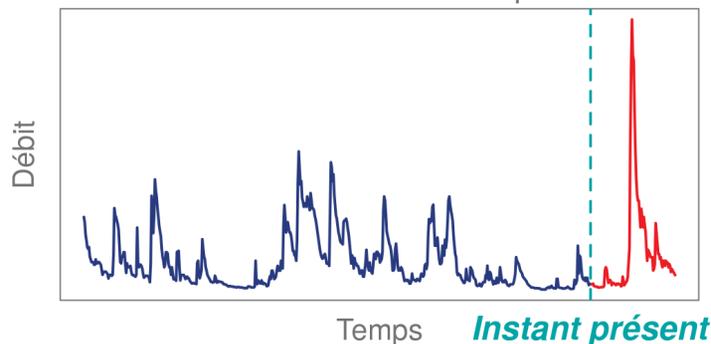
## Reconstitution

Comblent les lacunes existant dans une série chronologique de débits



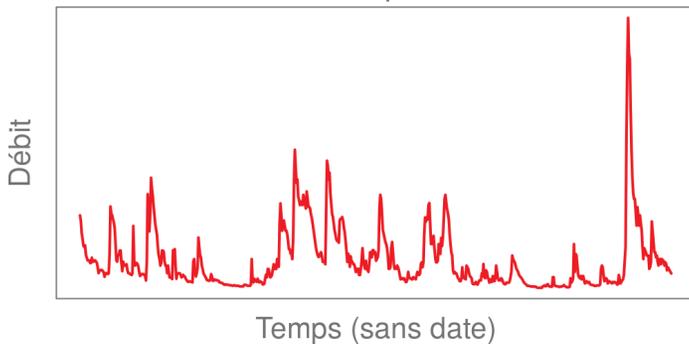
## Prévision

Évolution future du débit évoluant dans le temps



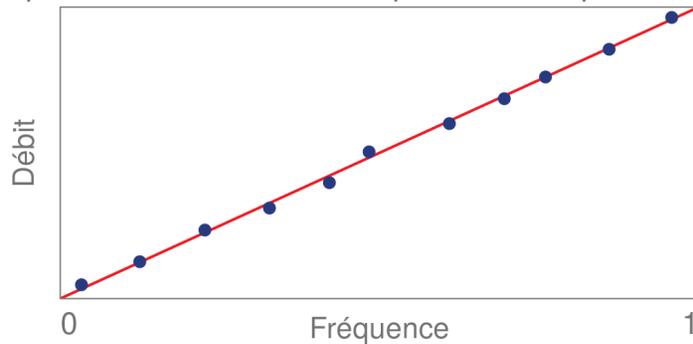
## Simulation

Générer une chronique fictive de débits



## Prédétermination

Recherche d'une distribution statistique du débit pour l'évaluation d'un risque ou d'une probabilité

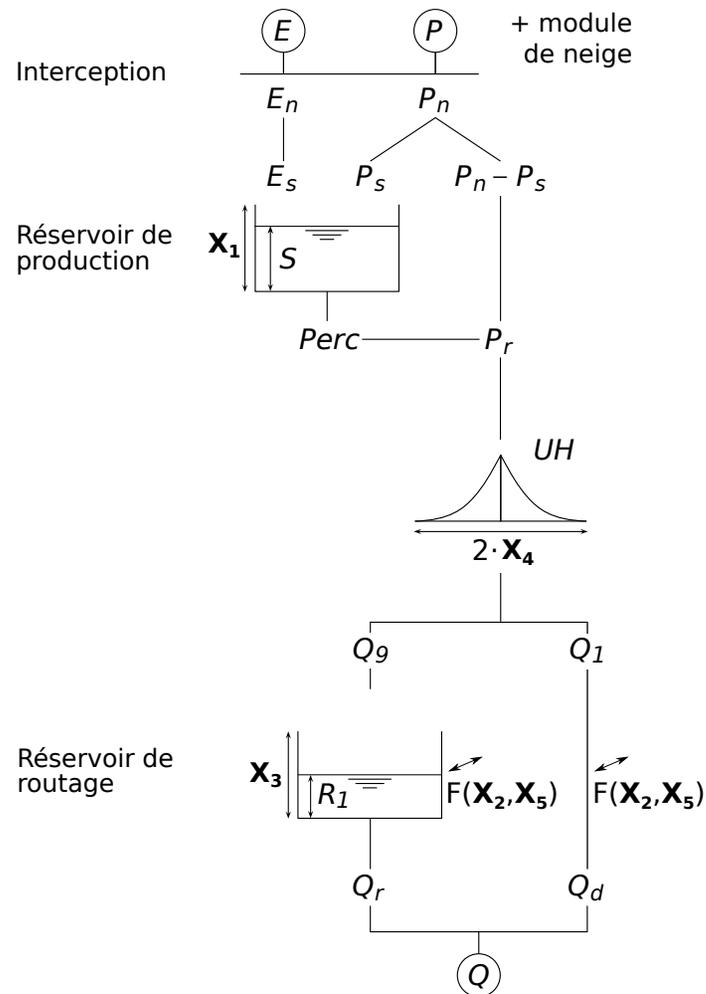


# Quelques types de modèles hydrologiques

Trois grandes familles :

- **Modèles empiriques ou “boîtes noires”**
  - formulation mathématique abstraite relie des grandeurs sur le bassin  
ex. : intelligence artificielle
- **Modèles à base physique**
  - représentation a priori de tous les processus hydrologiques
  - adapté pour la recherche fondamentale sur un bassin
- **Modèles conceptuels**
  - structure simple et mise en œuvre aisée
  - variables intermédiaires détaillées, mais délicates à interpréter
  - au plus près des mesures de terrain

# Modèle conceptuel global GR5J



## Paramètres du modèle GR5J

- **X1** : capacité du réservoir de production [mm]
- **X2** : coefficient d'échanges souterrains [mm/jour]
- **X3** : capacité du réservoir de routage [mm]
- **X4** : temps de base de l'hydrogramme unitaire UH [jours]
- **X5** : seuil d'échanges souterrains [-]

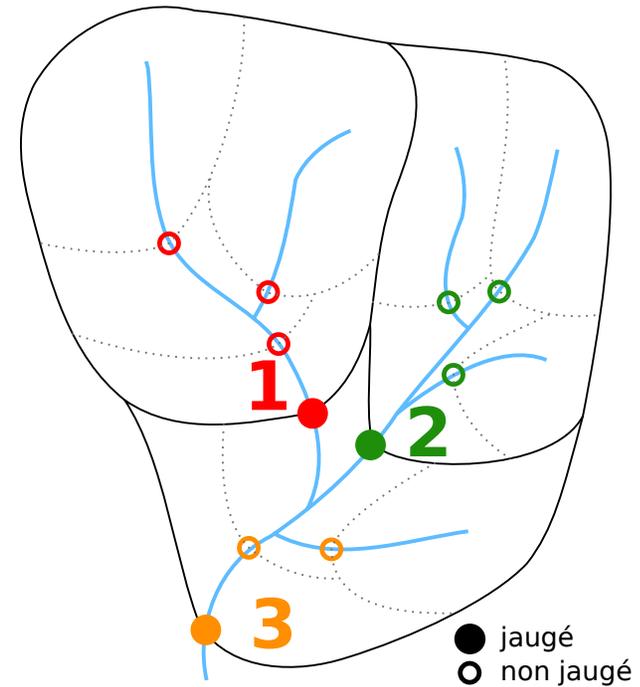
## Module de neige

- répartitions des précipitations (liquides + solides)

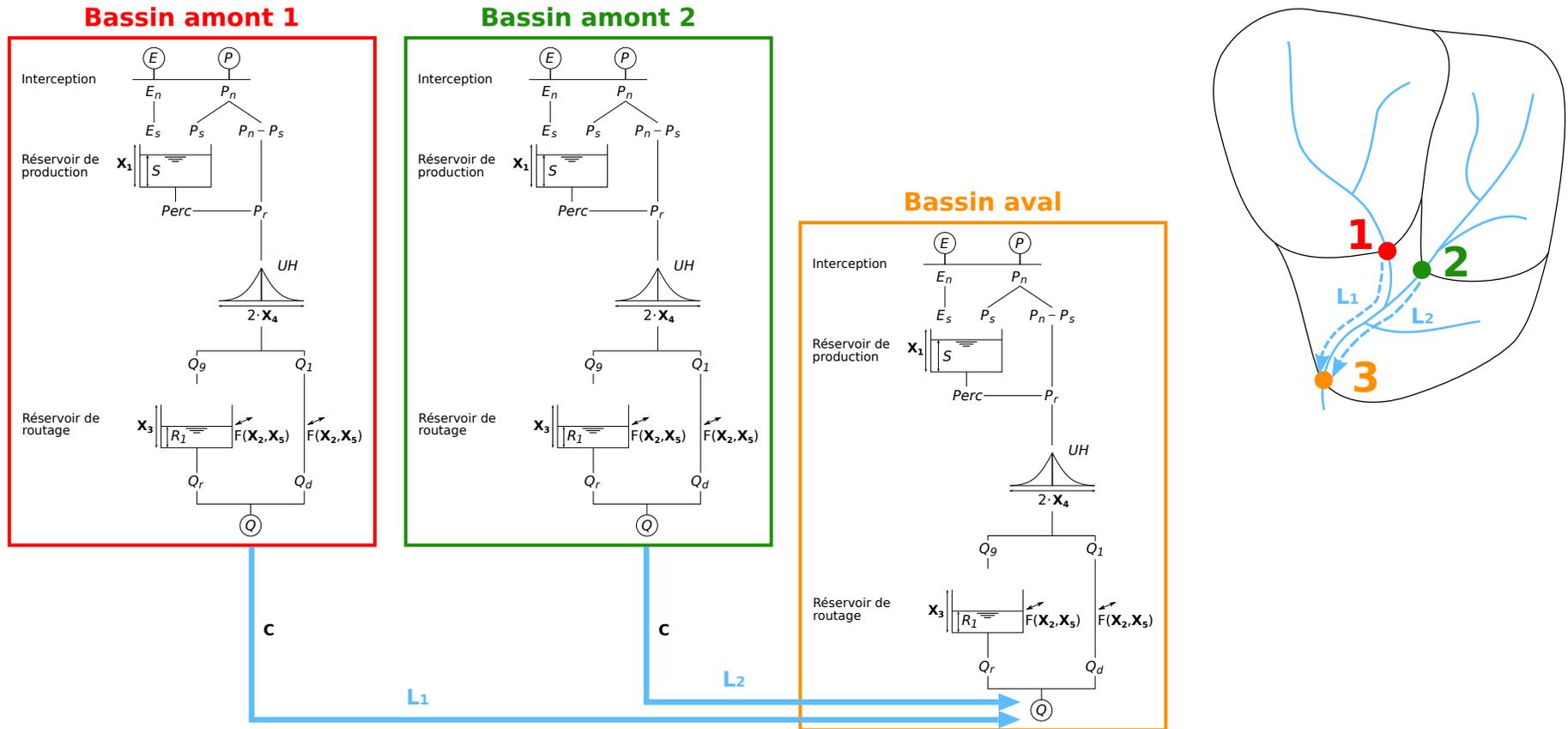
# Modèle conceptuel spatialement distribué GRSD

## Concepts

- Version spatialisée des modèles de simulation pluie-débit globaux de la famille GR
- Représentation du bassin versant comme un ensemble d'entités spatiales : les sous-bassins versants (et les zones contributives)



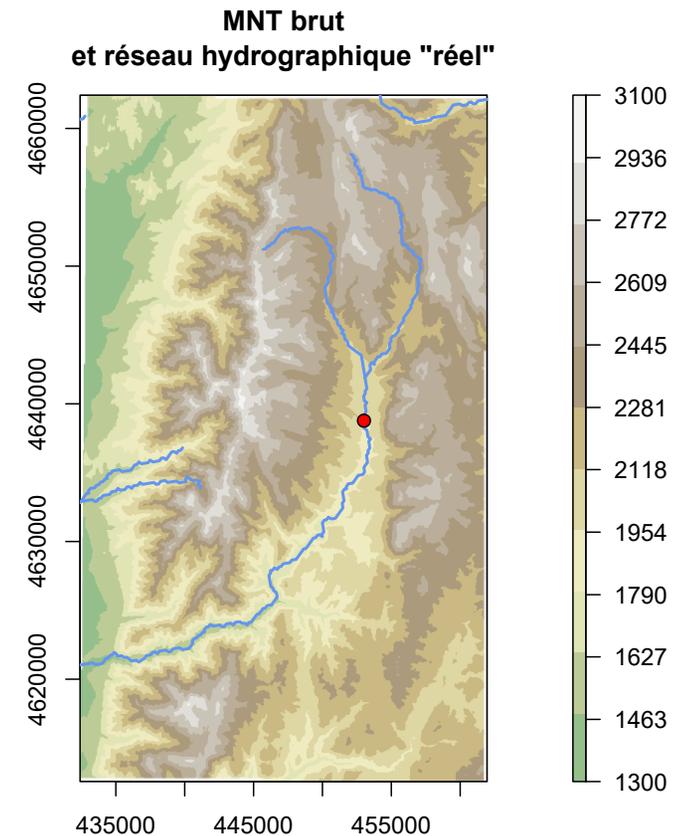
# Modèle conceptuel spatialement distribué GRSD



# Données nécessaires à la modélisation

## Informations géographiques disponibles :

- élévation du terrain
- réseau hydrographique observé
- positions géographiques des stations hydrométriques



# Données nécessaires à la modélisation

**Pour modéliser les débits, il est nécessaire de disposer :**

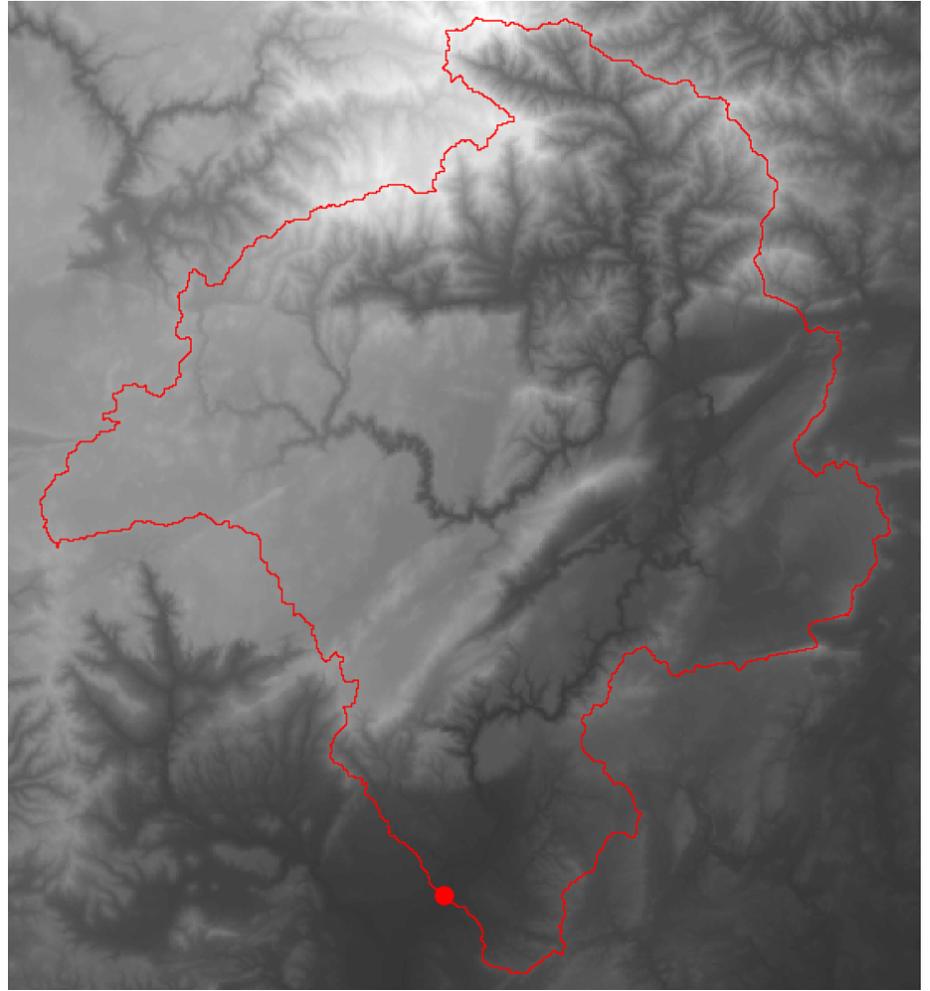
- superficies du bassin versant et des sous-bassins versants
- chroniques climatiques sur chaque sous-bassin versant
- courbes hypsométriques (si la bassin présente un régime nival)
- longueurs hydrauliques entre les sous-bassins

# Détermination des contours des bassins versants

# Détermination des contours des bassins versants



carte topographique

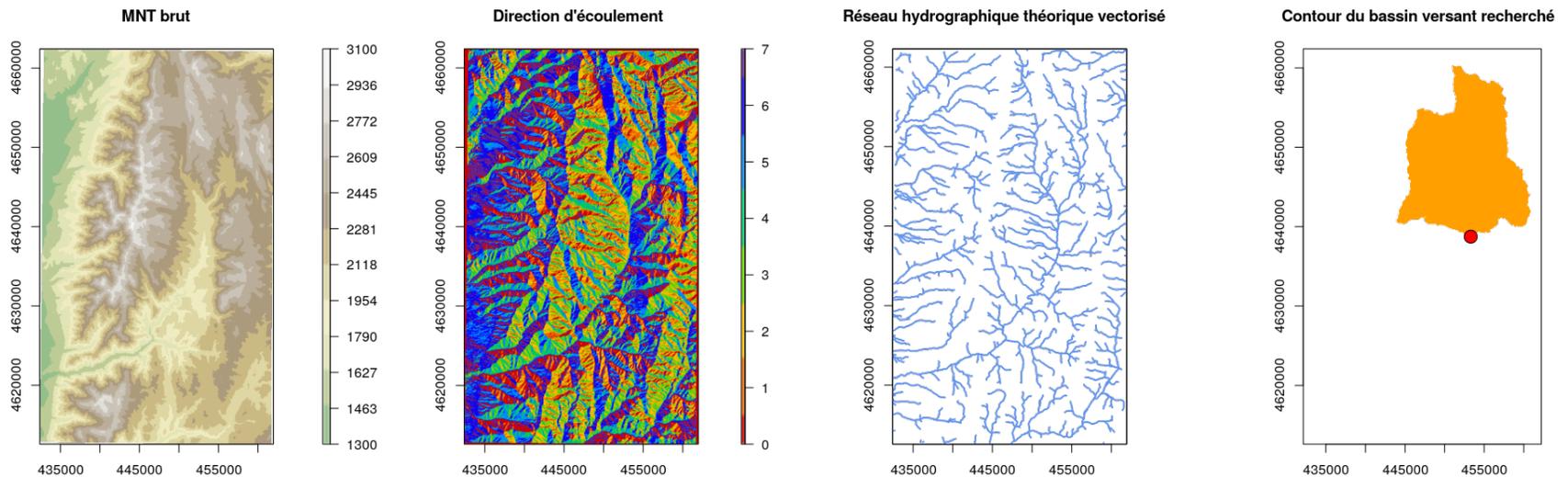


modèle numérique de terrain

# Étapes

1. déterminer les directions d'écoulement du MNT
2. déterminer un réseau hydrographique théorique
3. repositionner les stations hydrologiques sur le réseau théorique
4. "remonter" le réseau pour déterminer le contour du bassin versant

## Exemple de la rivière Logan (Utah, USA)



# Calcul de la grille de direction d'écoulement

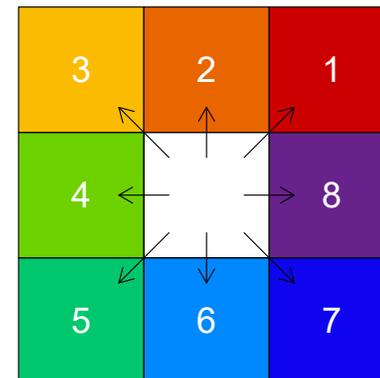
## Cas général du calcul de la grille de directions d'écoulement

- Pour chaque pixel, choisir vers lequel de ses 8 voisins il s'écoule (d8)
- On fait l'hypothèse que l'eau s'écoule selon la direction de plus grande pente

$$\frac{60 - 57}{r\sqrt{2}} > \frac{60 - 58}{r}$$

67	65	63
61	60	59
57	58	57

élevations



codes des  
directions d'écoulement

# Calcul de la grille de direction d'écoulement

## Correction du fichier d'élévation

1. Premier parcours du MNT dans lequel on identifie les pixels n'ayant pas d'exutoire défini
2. Traitement des dépressions

52	49	37	36	37	39	38
47	40	37	38	37	37	39
40	35	36	38	40	38	39
35	35	37	35	43	47	38
37	38	36	34	46	55	40
35	39	33	41	44	42	41
37	40	33	39	43	40	42
38	40	32	37	46	48	44
33	38	36	38	42	45	38
35	45	34	41	40	39	37
34	31	35	38	39	39	36

52	49	37	36	37	39	38
47	40	37	38	37	37	39
40	35	36	38	40	38	39
35	35	37	36	43	47	38
37	38	36	36	46	55	40
35	39	36	41	44	42	41
37	40	36	39	43	40	42
38	40	36	37	46	48	44
33	38	36	38	42	45	38
35	45	34	41	40	39	37
34	31	35	38	39	39	36

52	49	37	36	37	39	38
47	40	37	38	37	37	39
40	35	36	38	40	38	39
35	35	37	35	43	47	38
37	38	36	34	46	55	40
35	39	34	41	44	42	41
37	40	34	39	43	40	42
38	40	34	37	46	48	44
33	38	34	38	42	45	38
35	45	34	41	40	39	37
34	31	35	38	39	39	36

# Calcul de la grille de direction d'écoulement

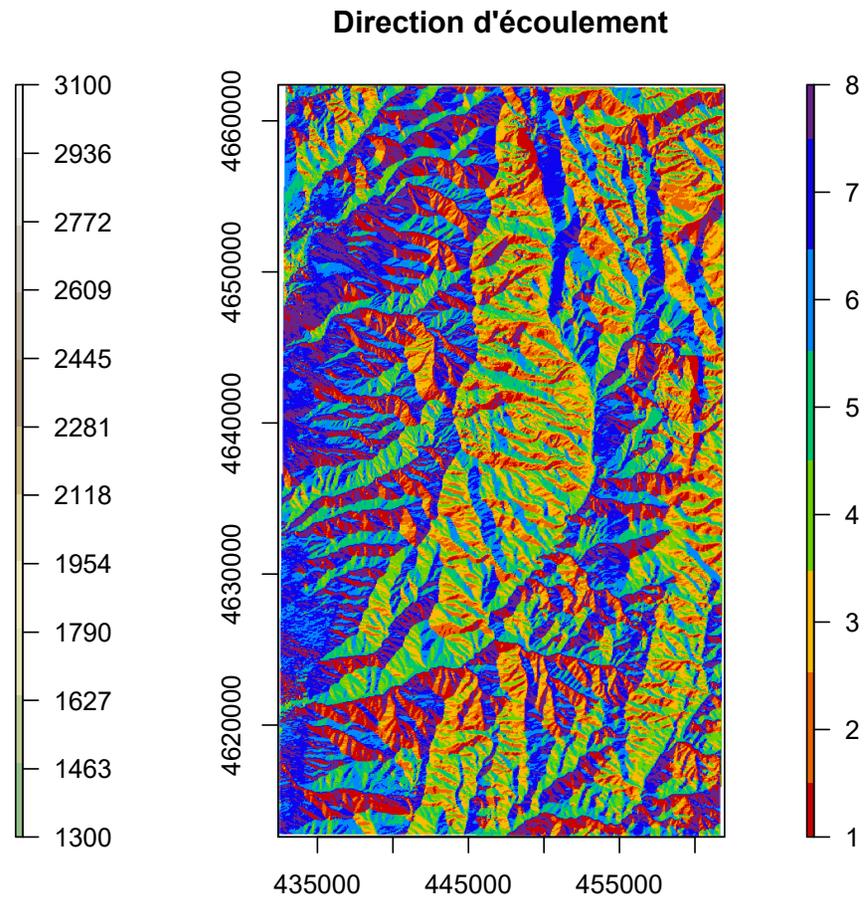
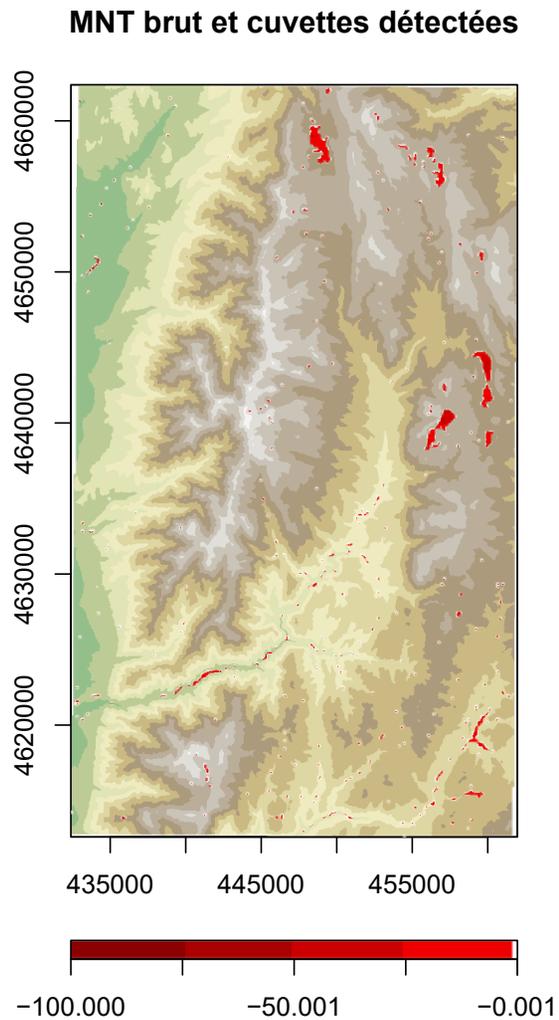
## Correction du fichier d'élévation

1. Premier parcours du MNT dans lequel on identifie les pixels n'ayant pas d'exutoire défini
2. Traitement des dépressions
3. Traitement des zones plates

6	5	3	3	3	3	3
5	4	4	2	2	2	6
8	5	2	2	2	2	4
7	4	2	2	2	2	4
7	2	2	2	2	2	5
7	2	2	2	2	4	4
6	2	2	2	3	5	5
3	2	2	2	3	6	8
3	2	2	2	2	4	7
4	3	2	2	2	3	4
4	3	1	1	1	3	3

			8€	8€	8€	
		7€	7€	7€	7€	
		6€	6€	6€	6€	
	5€	5€	5€	5€	5€	
	4€	4€	4€	4€		
	3€	3€	3€			
	2€	2€	2€			
	1€	1€	1€	1€		
		0€	0€	0€		

# Calcul de la grille de direction d'écoulement



# Correction du MNT sous contraintes de données vectorielles

## Surcreusement du MNT

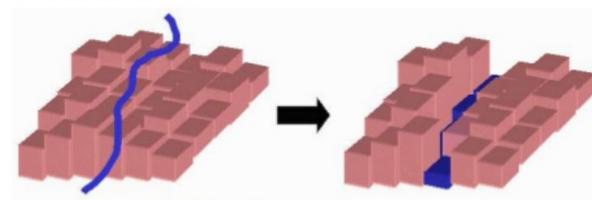
- Technique consistant à “graver” le MNT en abaissant artificiellement l’altitude des pixels appartenant au réseau vectoriel observé

## Inconvénient

- Si aucune information amont-aval n’est transmise, il reste systématiquement des dépressions et des zones plates parmi les pixels “réseau”
- Les traitements des dépressions et des zones plates “effacent” fréquemment la “gravure” du réseau

## Nécessite

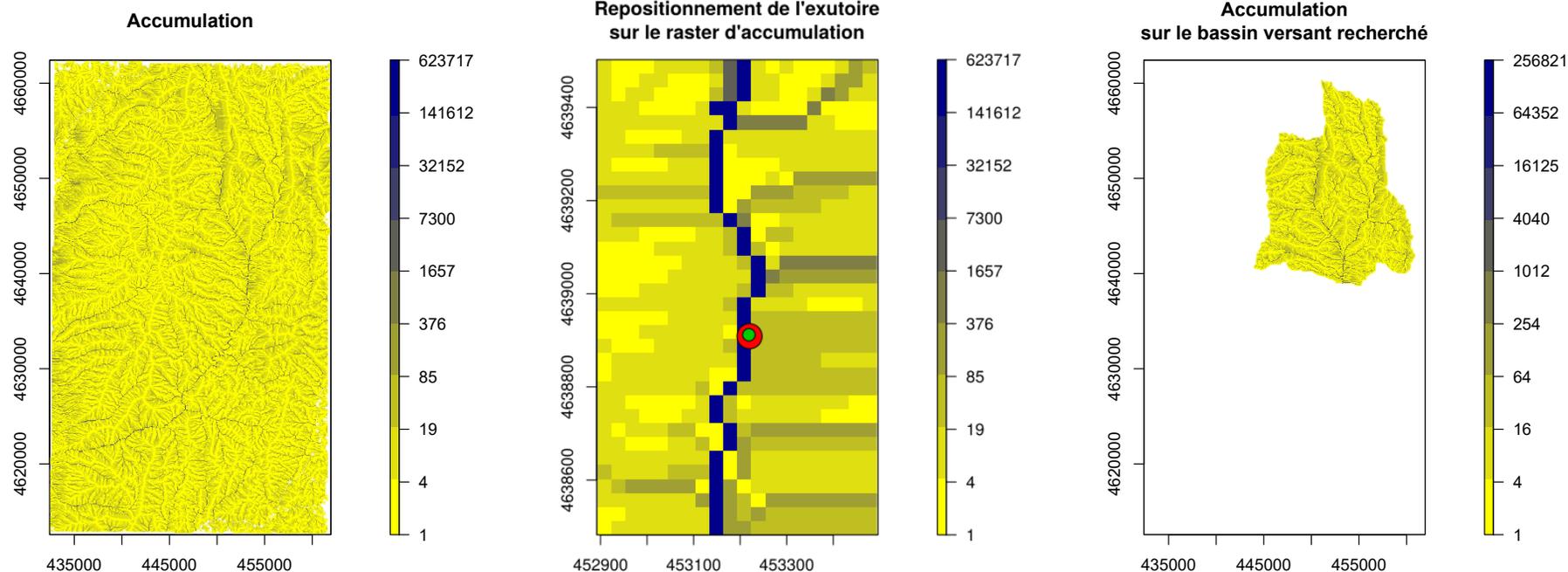
- Absence de bras secondaire (pas d’île)
- Absence d’arc déconnecté du réseau



# Remplacement des stations sur le réseau théorique

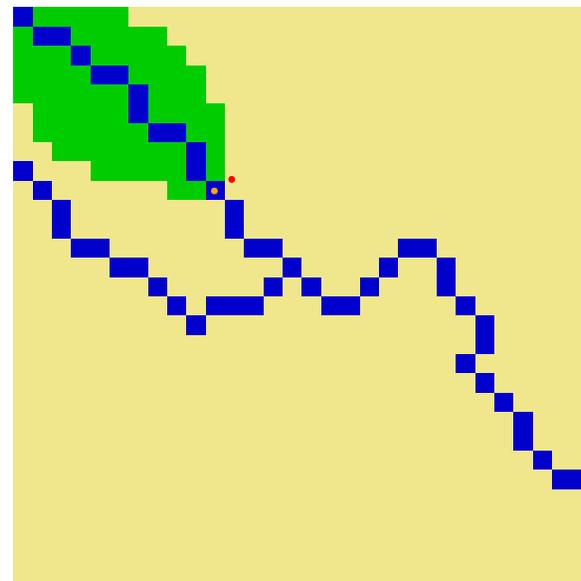
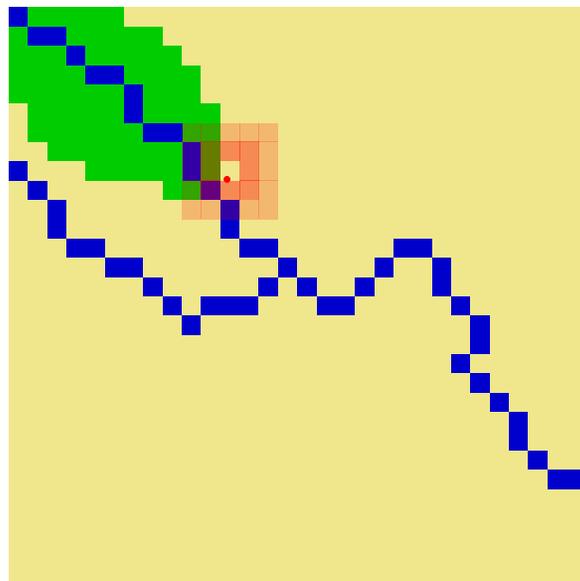
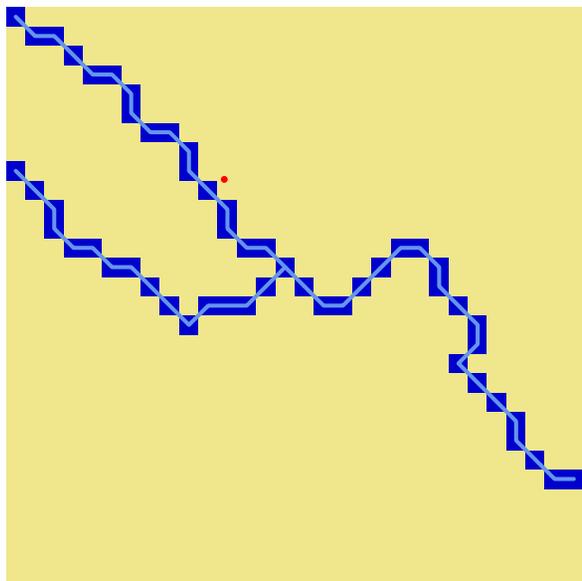
Les coordonnées de stations n'ont pas de raison de se trouver précisément sur le réseau hydrographique théorique

Il est nécessaire de les positionner au centre d'un pixel de rivière



# Remplacement des stations sur le réseau théorique

- Si on connaît a priori la superficie :
  - pixel présentant la superficie amont drainée la plus proche dans un rayon de recherche fixé
- Si on ne connaît pas a priori la superficie :
  - pixel présentant la superficie amont drainée la plus élevée



# Remplacement des stations sur le réseau théorique

## Vérification visuelle

Location of hydrometric stations  Interface

**Selection of the station**

Territory

Station

Zoom on station location  
 INRAE  Bhydro

X  Y

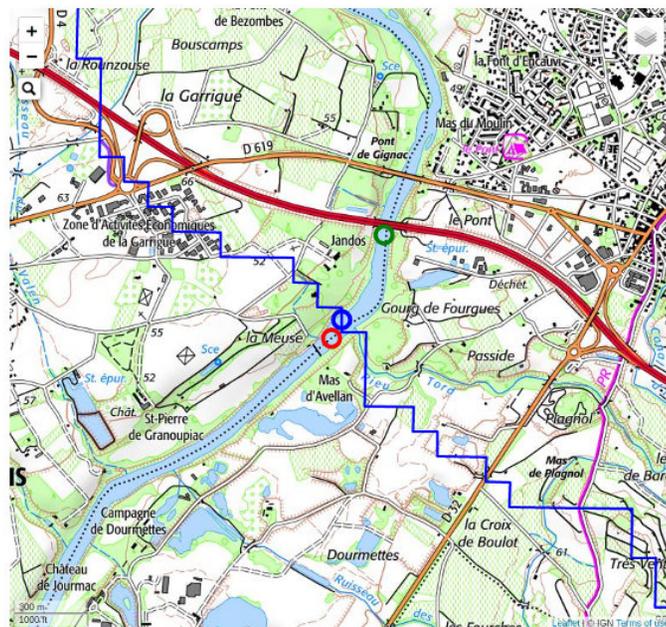
CRS of coordinates X / Y

Metadata displayed with the station location defined during the year  
 2014  2018

Outlet location displayed with the station location defined during the year  
 2014  2018

Catchments boundaries displayed with the station location defined during the year  
 2014  2018

New shapefile of catchment boundaries  
 No file selected



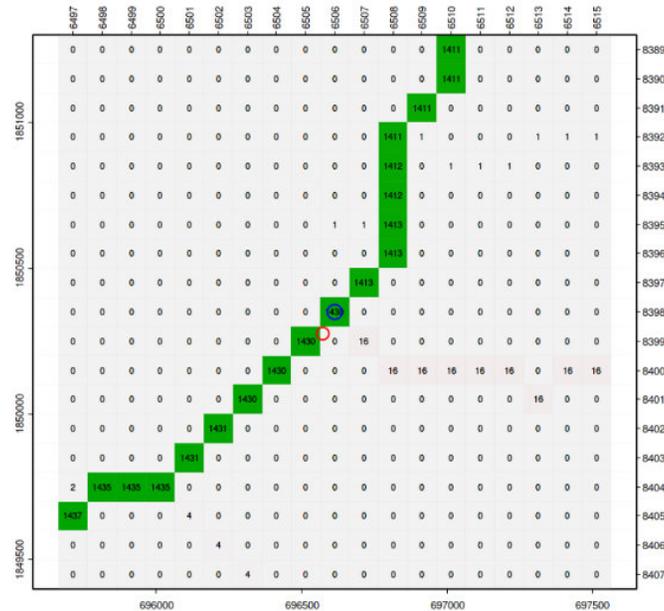
### Metadata

Catchment area from Banque Hydro [km<sup>2</sup>]: **1312** 

Catchment area from INRAE [km<sup>2</sup>]: **1429.9**

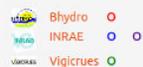
CODE : Y2142010

NAME : L'Hérault [] à Gignac []

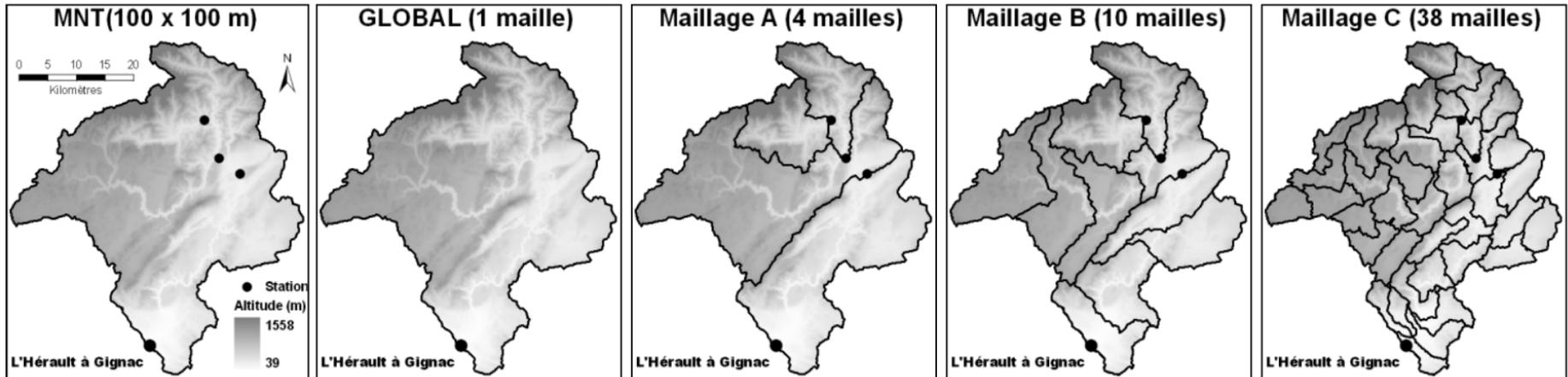


### Informations about the raster click location (plot on the right)

	X	Y	
RASTER	6506	8398	Catchment area [km <sup>2</sup> ] = 1429.9
XL2E	696612.99	1850349.31	
XL93	742972.4	6283405.96	
XW84	3.53	43.65	



# Discrétisation spatiale du bassin versant



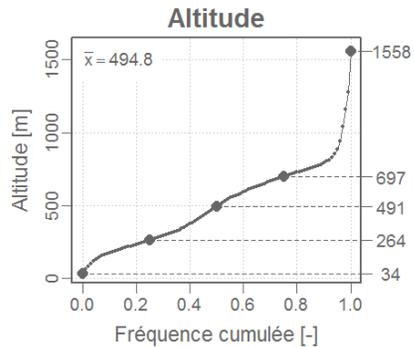
## Discrétisation en sous-bassins dont la taille dépend :

- positions des stations
- positions des ouvrages
- zones à risque d'inondation
- champs de précipitations
- occupation du sol
- etc.

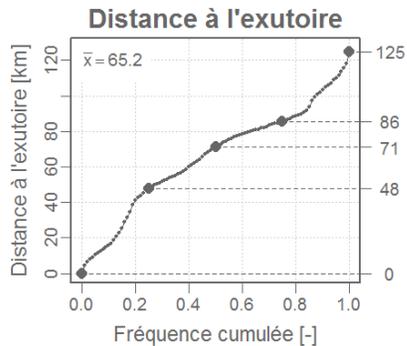
# Calcul des variables sur le bassin versant

## Données morphologiques

- courbes hypsométriques

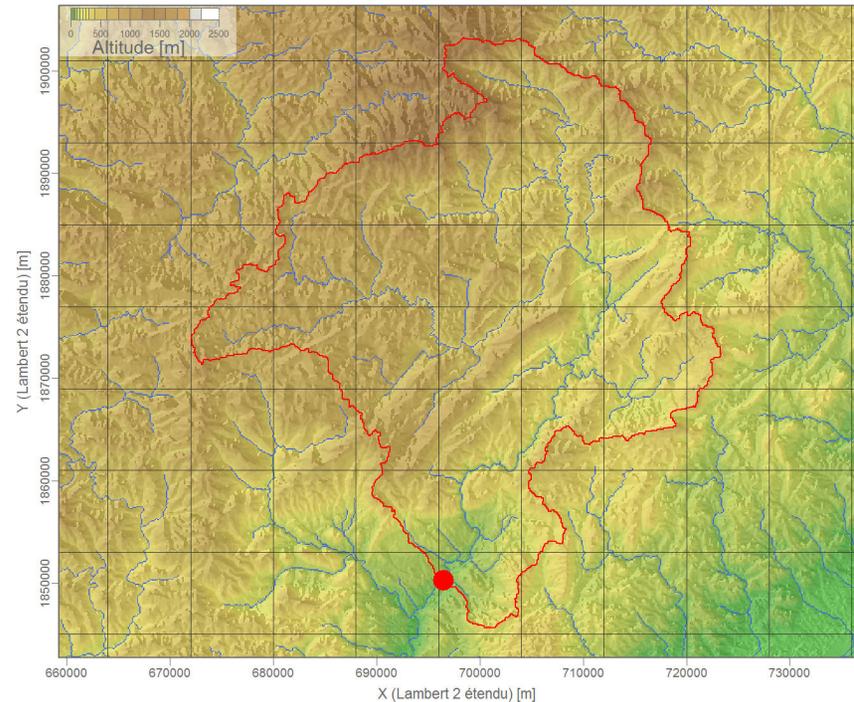


- longueurs hydrauliques



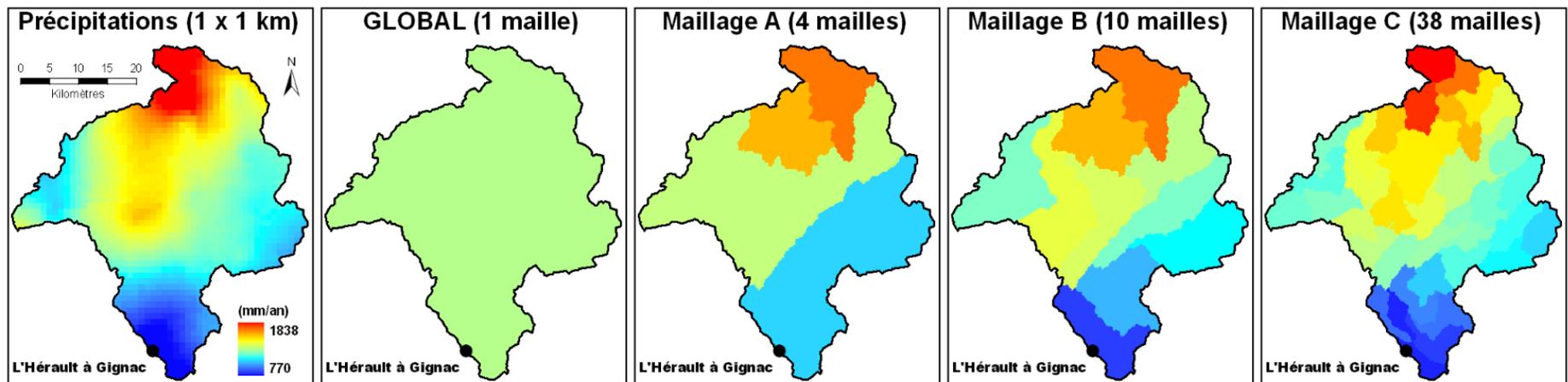
## Données climatiques

- proportions de pixels du raster qui intersectent le bassin versant

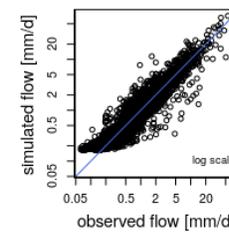
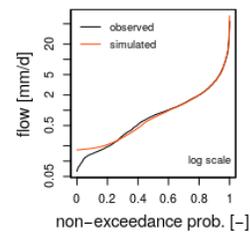
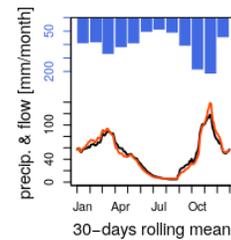
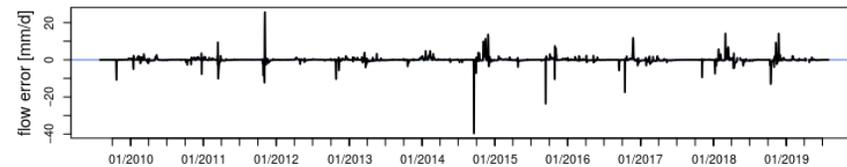
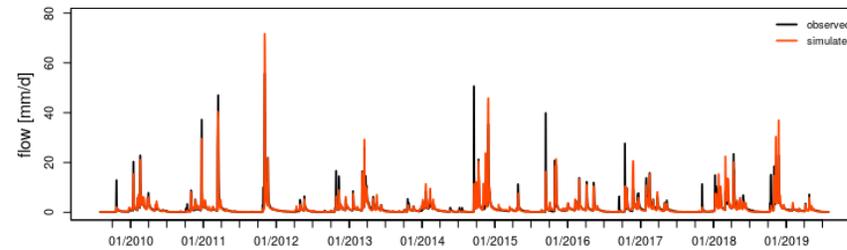
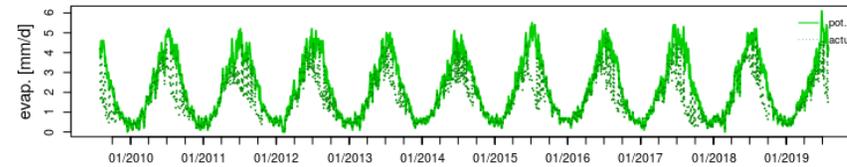
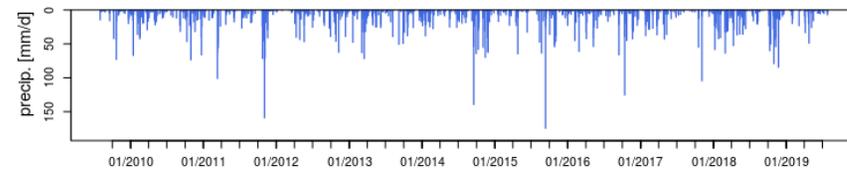


# Calcul des variables sur le bassin versant

Précipitations pour différents maillages de sous-bassins

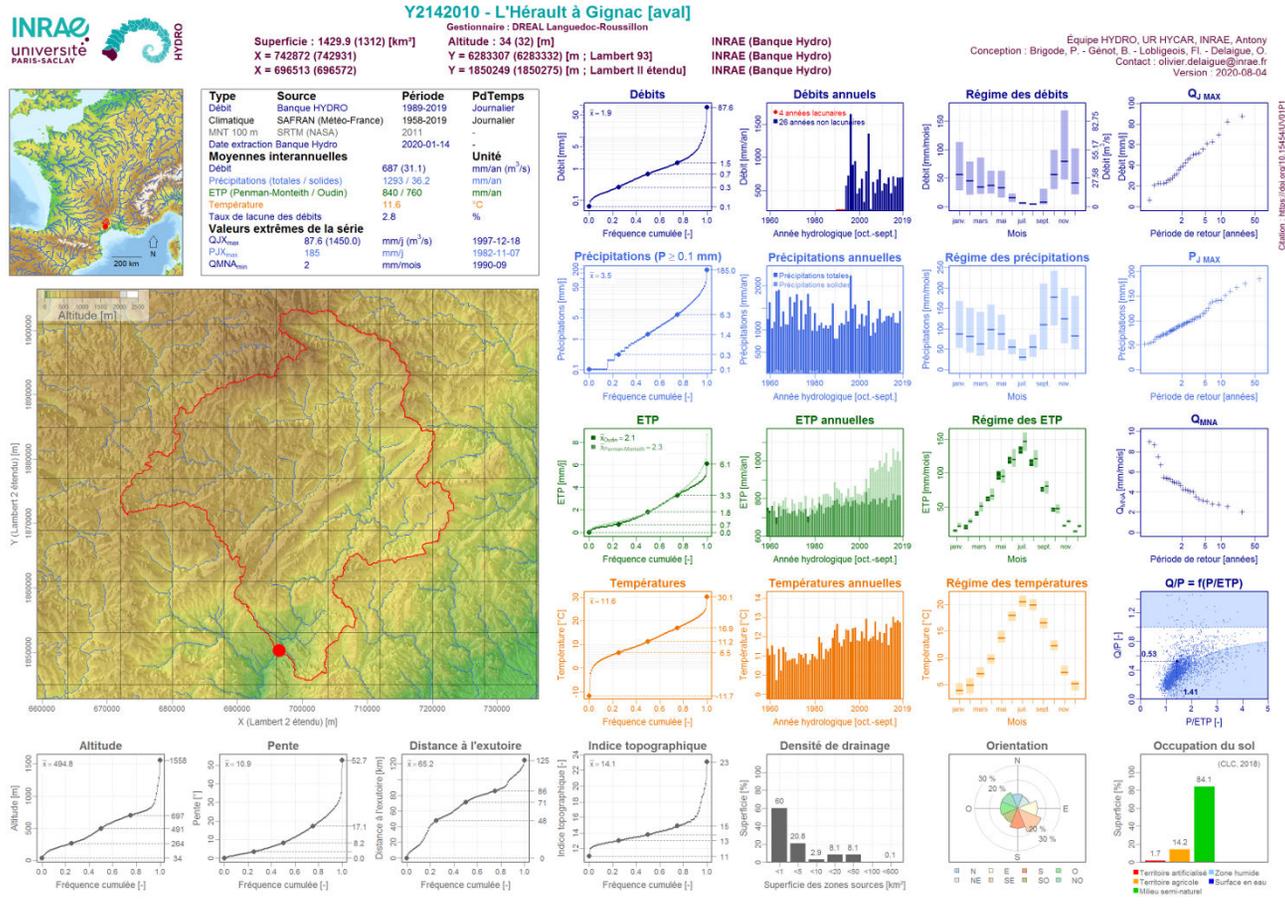


# Résultats de la modélisation hydrologique



# Fiches de synthèse graphique

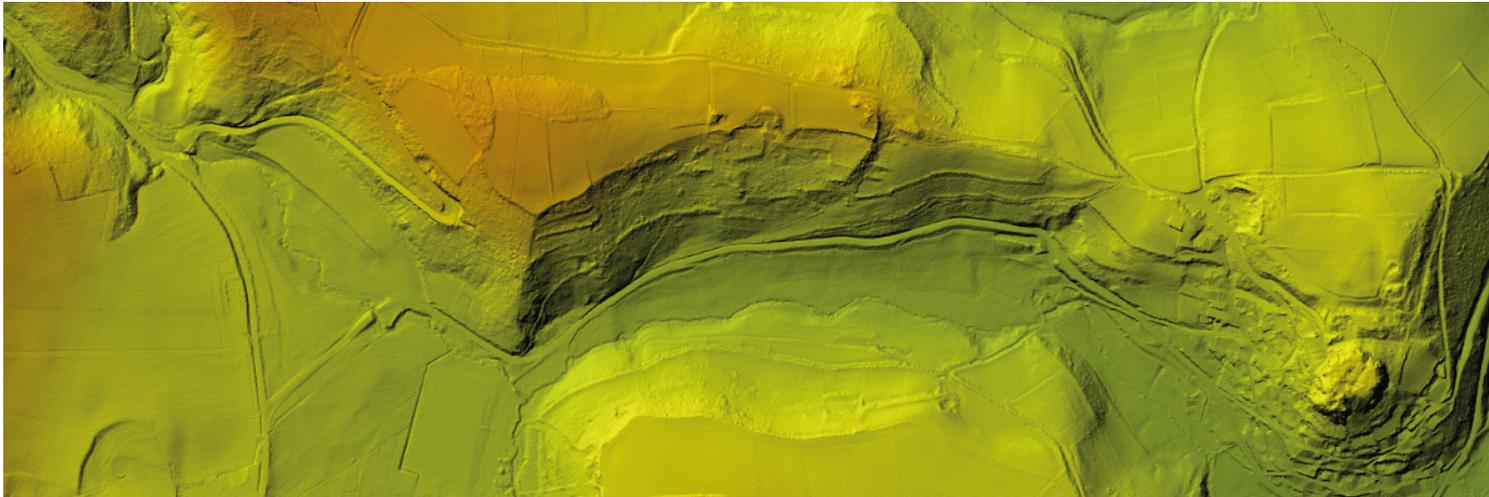
## Fiches générées pour plus de 4 000 stations de France métropolitaine



**Principaux produits & outils  
couramment utilisés**

# Modèles numériques de terrain

- Shuttle Radar Topography Mission [SRTM] (NASA & NGA) [100 m]
- Digital Elevation Model over Europe [EU-DEM] (projet GMES RDA) [30 m]
- BD ALTI (IGN) [25 m]
- RGE ALTI (IGN) [1m]



# Produits climatiques & météorologiques

## Réseau d'observations au sol

- Météo-France

## Observation radars

- PANTHERE (Météo-France)
- ANTILOPE (Météo-France)

## Réanalyses météorologiques

- ERA5 (ECMWF)
- SAFRAN (Météo-France)
- COMEPHORE (Météo-France)

## Produits satellitaires

- Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer [MODIS] (NASA)
- Tropical Rainfall Measuring Mission [TRMM] (NASA & JAXA)

## Prévisions

- AROME (Météo-France)
- PEARP (Météo-France)
- CEP (ECMWF)

## Projections climatiques

# Outils informatiques

## Interfaces graphiques utilisateurs des logiciels

- Peu d'utilisation
- Principalement pour de la visualisation exploratoire

## Langages de programmation

- C++ (codes "maison")
- Fortran (codes "maison")
- R (+ bibliothèques spécialisées)

## Logiciels ou bibliothèques appelés en lignes de commande

- ArcGIS
- GDAL
- SAGA GIS
- QGIS
- GRASS GIS
- TauDEM

# Développement d'applications pour le Web

## Cartographie des paramètres des modèles GR (bassins non jaugés)

Sunshine

airGRmaps  Interface

**Selection of the outlet**

Station

W1074010 - L'Arc à Épièrre

X  Y

CRS

Lambert 93

Submit Clear

**Selection of the model**

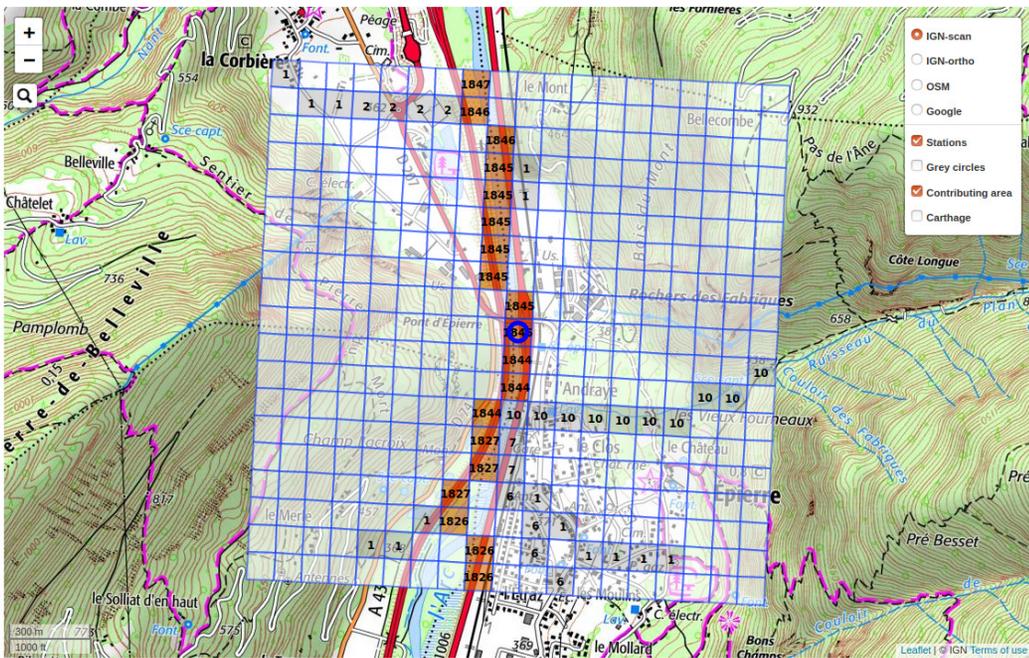
GR4J

**Metadata links**

 Banque Hydro

 INRAE

 Vigicrues



IGN-scan  
IGN-ortho  
OSM  
Google  
Stations  
Grey circles  
Contributing area  
Carthage

Parameter	Value
X1	403.78
X2	-0.61
X3	134.31
X4	2.13

Copy into clipboard Export to csv

# basinSample

## Sélection de bassins (critères hydro-climatiques et morphologiques)

Sunshine  
basinSample

50 / 3632 (1.4 %) Bassins versants

9 / 20 (45.0 %) Références bibliographiques

Superficie [km<sup>2</sup>]  
Altitude [m]  
Pente [°]  
Précip. moy. annuelles [mm/an]  
Fraction solide des précip. [%]  
Débit moyen [mm]]  
Taux de lacune des débits [%]  
Nb d'années de débits dispo. [-]  
Stockage amont [m<sup>3</sup>]  
Types d'influences

Carte

Liste des bassins versants

Code	Nom
O0105110	La Neste de Cap de Long à Aragouet [Les Edelweiss]
O1002510	L'Ariège à l'Hospitalet-près-l'Andorre [amont]
O1074320	L'Aston à Château-Verdun [Riète 1]
O1076010	Le Quioulès à Château-Verdun [Riète 2]
O1115010	L'Artigue à Auzat [Cibelle]
P0000010	La Dordogne à Mont-Dore [Piste de ski]
Q0015010	L'Adour du Tourmalet à Bagnères-de-Bigorre [La Mongie]
W0000010	L'Isère à Val-d'Isère

Liste des références bibliographiques

Auteur	Année	Pas de temps
GUINTOLI	2012	J
KOCHANEK	2014	J
LEBECHEREL	2015	J
PONCELET	2016	J
RANDRIANASOLO	2012	J
RIBOUST	2018	J
SANTOS	2018	J
TERRIER	2019	J

Superficie [km<sup>2</sup>]  
Altitude [m]  
Pente [°]  
Précip. moy. annuelles [mm/an]  
Fraction solide des précip. [%]

# PREMHYCE

## Plateforme de prévision des étiages par modélisation hydrologique

Sunshine

PREMHYCE

Projet Manuel Rapport de synthèse Comprendre pour agir (OFB)

Identification

Tableau de bord

Choix du gestionnaire  
France entière

Observation

Seuils de vigilance

- Bon
- Vigilance
- Alerte
- Alerte Renforcée
- Crise
- No data

Tout sélectionner

Prévision

Type de prévision

- CEP
- HIST\_SAF
- PO

Choix du modèle

- Gardenia
- GR6J
- MORDOR-EDF
- Presages
- MultiMod
- SIM

Echéance de prévision (jours)

Réinitialiser

Prévision - Instant prévu : 2020-11-08

OSM  
IGN-scan  
IGN-ortho  
Google  
Sans fond  
Carthage  
Stations

Seuils de vigilance

- Bon
- Vigilance
- Alerte
- Alerte Renforcée
- Crise
- No data

Y0436420  
Le Cady à Villefranche-de-Conflent  
Vigilance : 0  
Alerte : 0  
Alerte Renforcée : 0  
Crise : 100

Code	Nom	Gestionnaire
Y0105210	La Baillaury à Banyuls-sur-Mer	France entière
Y0115410	La Massane à Argeles-sur-Mer [Mas d'en Tourens]	France entière
Y0204010	Le Tech à Prats-de-Mollo-la-Preste [La Preste]	France entière
Y0245210	Le Mondony à Amélie-les-Bains-Palalda	France entière
Y0254050	Le Tech [total] à Reynès [Saint-Paul-sur-Tech]	France entière
Y0255020	L'Ample à Reynès [Le Vila]	France entière
Y0325010	La Canterrane à Terrats [Moulin d'en Canterrane]	France entière
Y0436420	Le Cady à Villefranche-de-Conflent	France entière

**Gardenia | CEP**  
Y0436420

**Gardenia | Hist. Safran**  
Y0436420

**GR6J | CEP**  
Y0436420

**GR6J | Hist. Safran**  
Y0436420

**Mordor-EDF | CEP**  
Y0436420

**Mordor-EDF | Hist. Safran**  
Y0436420

**Presages | CEP**  
Y0436420

**Presages | Hist. Safran**  
Y0436420

**SIM | CEP**  
Y0436420

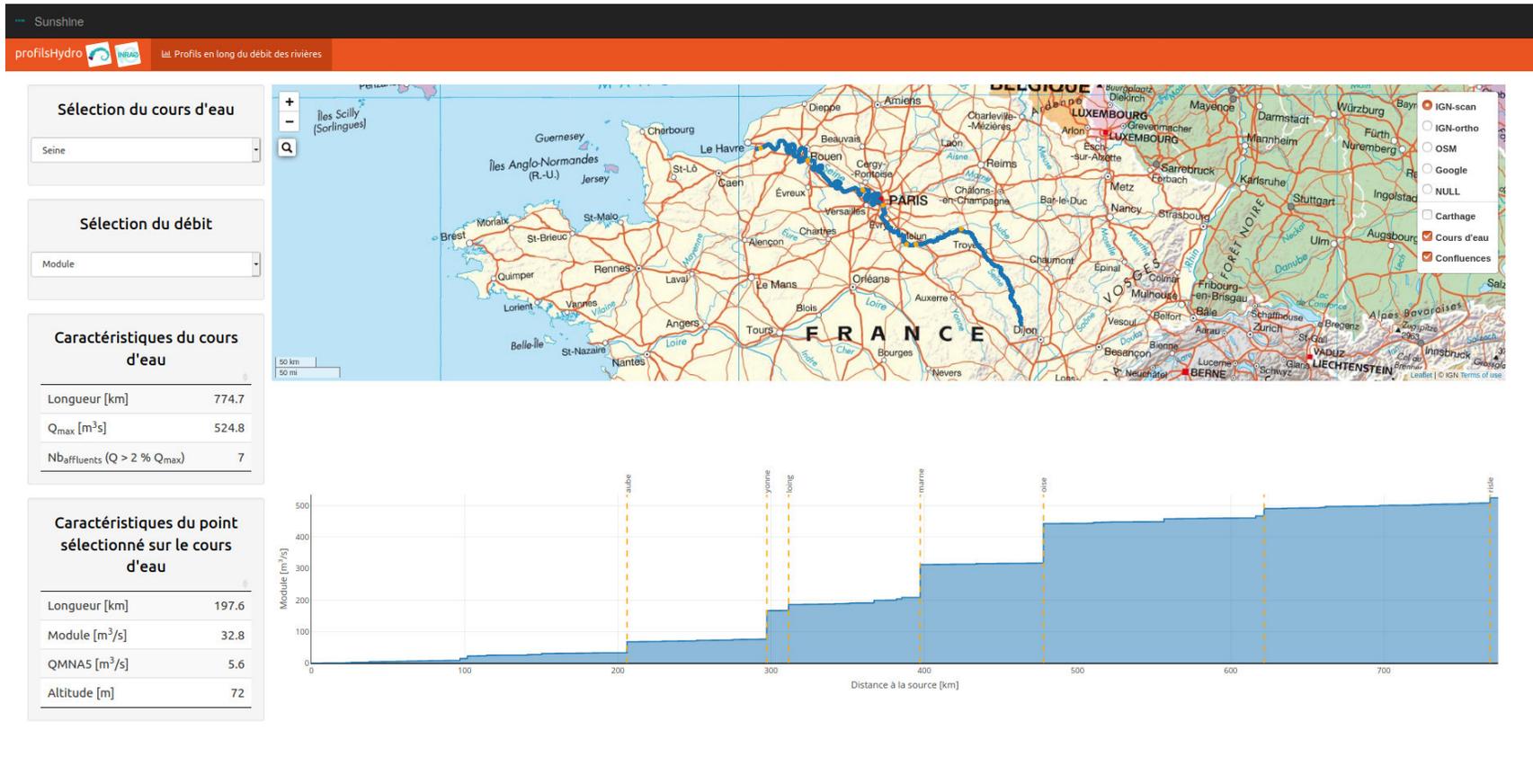
**SIM | Hist. Safran**  
Y0436420

**Multi-Modeles | CEP**  
Y0436420

**Multi-Modeles | Hist. Safran**  
Y0436420

# profilsHydro

## Cartographie des profils en long du débit des cours d'eau français



Merci de votre attention

[webGR.inrae.fr](http://webGR.inrae.fr)

