

Le cycle de l'Eau dans la tourmente climatique

Quelle ressource demain en région ?



Séverin Pistre
Professeur Hydrosciences - UM

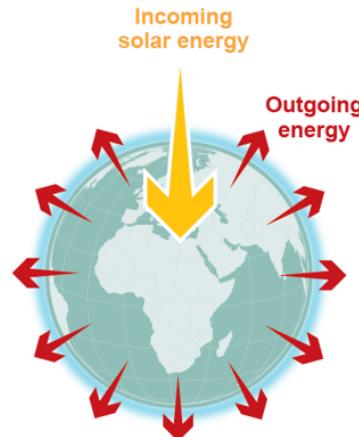
Mardi 22 Novembre 2022

Encore l'effet de serre !

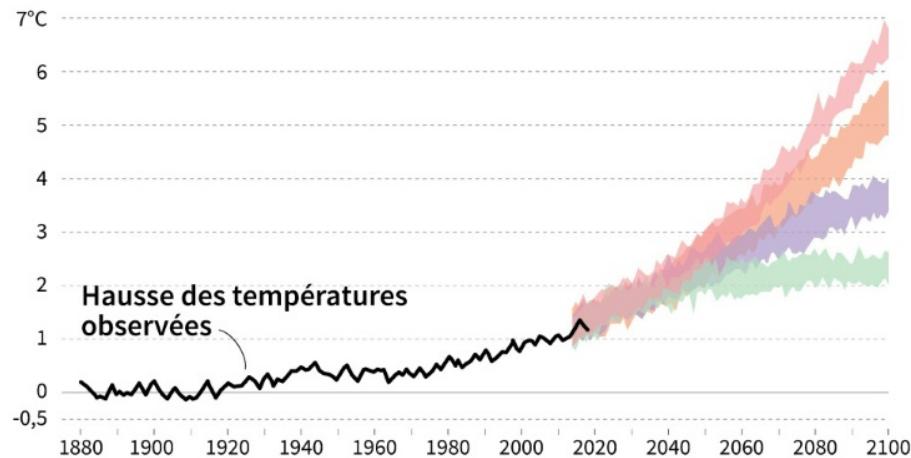
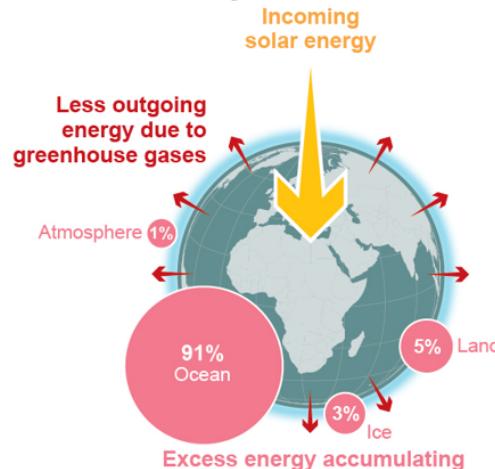


Les prévisions des modèles

Stable climate: in balance



Today: imbalanced



Scénarios appliqués aux nouveaux modèles

- | | |
|---|---|
| ■ Croissance économique rapide | ■ Poursuite de la trajectoire alimentée par les énergies fossiles |
| ■ Progrès lents en matière environnementale | ■ Neutralité carbone à l'horizon 2080 |

Source : CNRS, CEA, Météo-France

© AFP

Modèles climatologiques de plus en plus robustes

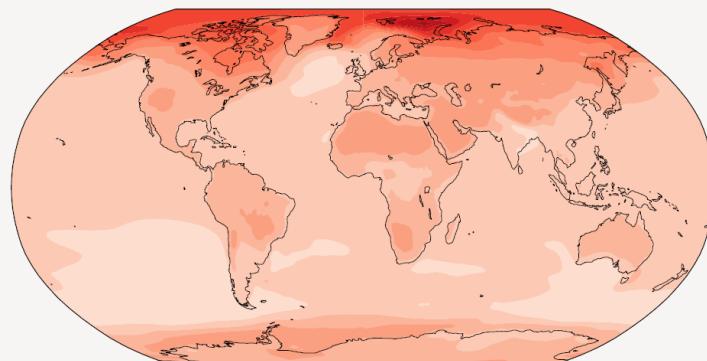
→ Prévisions plus fiables

→ Plus pessimistes que modèles précédents (2012)

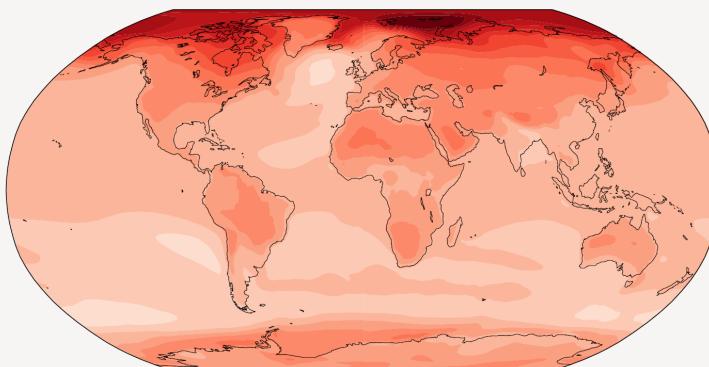
Les conséquences climatiques

Evolution des températures annuelles relatives à la période 1850-1900

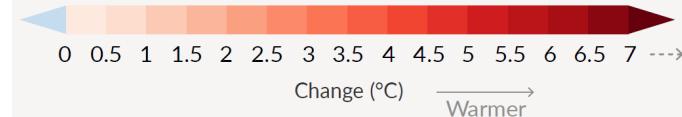
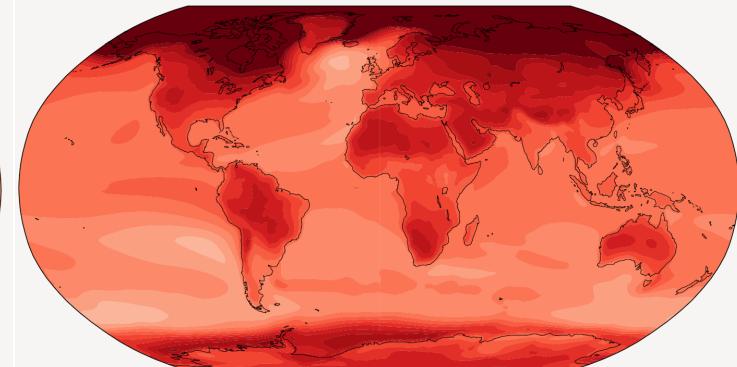
Simulated change at 1.5 °C global warming



Simulated change at 2 °C global warming



Simulated change at 4 °C global warming

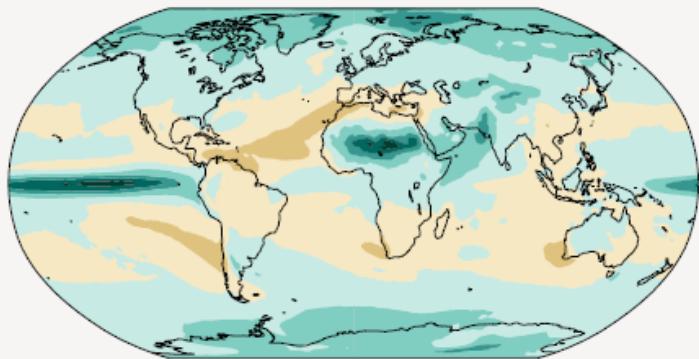


Source : GIEC (2021)

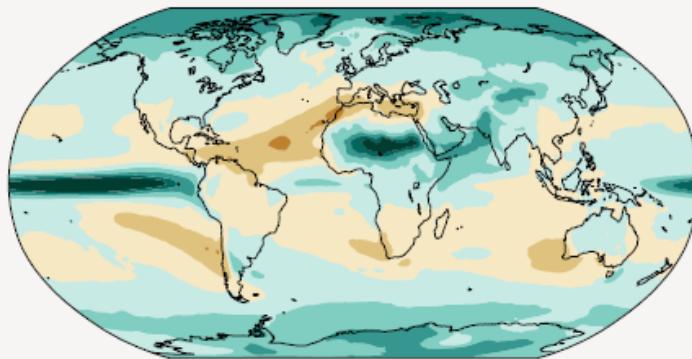
Les conséquences climatiques

Evolution des précipitations annuelles relatives (%) à la période 1850-1900

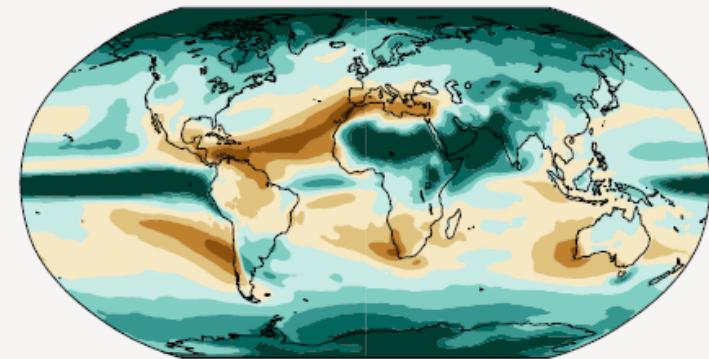
Simulated change at **1.5 °C** global warming



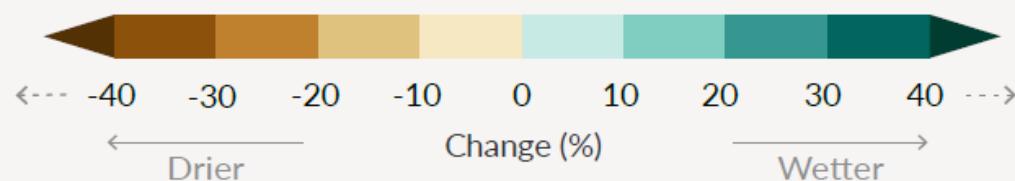
Simulated change at **2 °C** global warming



Simulated change at **4 °C** global warming

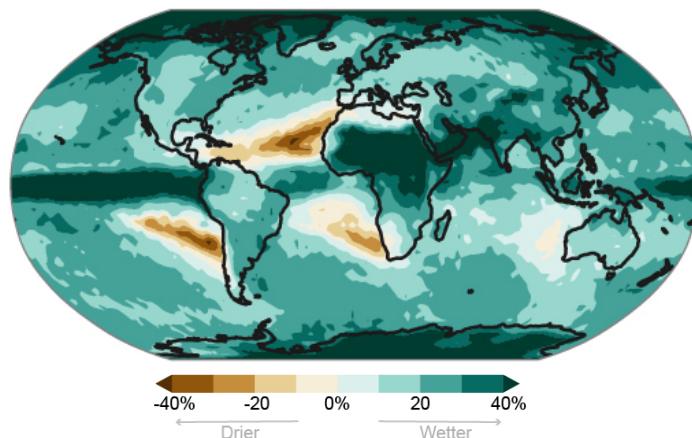
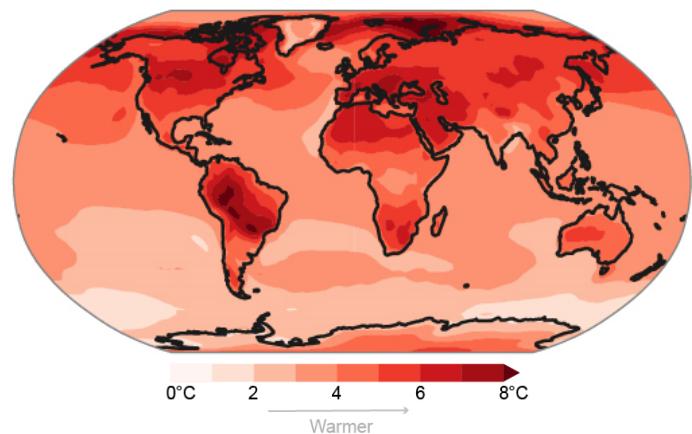


Source : GIEC (2021)



Les conséquences climatiques

Modification de l'occurrence des extrêmes climatiques



Température

Journée la plus chaude par décennie ($^{\circ}\text{C}$)

+ 1,1 °C
AUJOURD'HUI

+ 1,2 °C
(+ 1,0 – 1,4 °C)

x 2
(x 1,2 – 3,1)

x 1,3
(x 1,3 – 1,4)

-1 %
(-2 % – 0 %)

+ 10 %

+ 1,5 °C

+ 1,9 °C
(+ 1,5 – 1,9 °C)

x 2,4
(x 1,4 – 4,1)

x 1,5
(x 1,5 – 1,6)

-5 %
(-5 % – -1 %)

+ 13 %

+ 2 °C

+ 2,6 °C
(+ 2,0 – 2,8 °C)

x 3,1
(x 1,5 – 4,8)

x 1,8
(x 1,7 – 1,9)

-9 %
(-12 % – -4 %)

+ 25 %
(-31 % – -18 %)

+ 4 °C

+ 5,1 °C
(+ 4,6 – 5,6 °C)

x 5,1
(x 2,0 – 8,2)

x 2,8
(x 2,5 – 3,2)

-25 %
(-31 % – -18 %)

+ 30 %

Sécheresse

Une sécheresse qui se produisait une fois par décennie se produira x fois plus

Précipitations

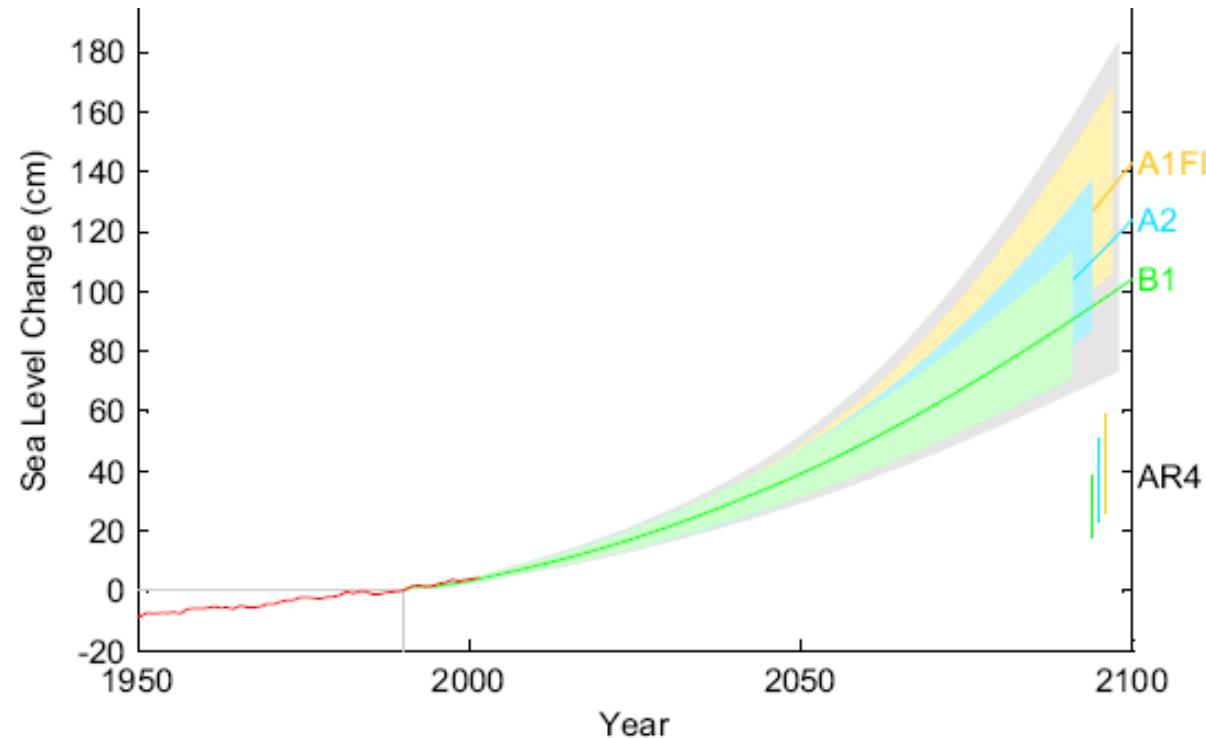
Occurrence des extrêmes pluvieux par décennie

Enneigement

Cyclones tropicaux

Source : GIEC (2021)

Les conséquences océaniques



Projections de hausse du niveau marin d'après les scénarios du GIEC (Verneer and Rahmstorf, 2009)

ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE (CO2) PAR HABITANT EN 2018

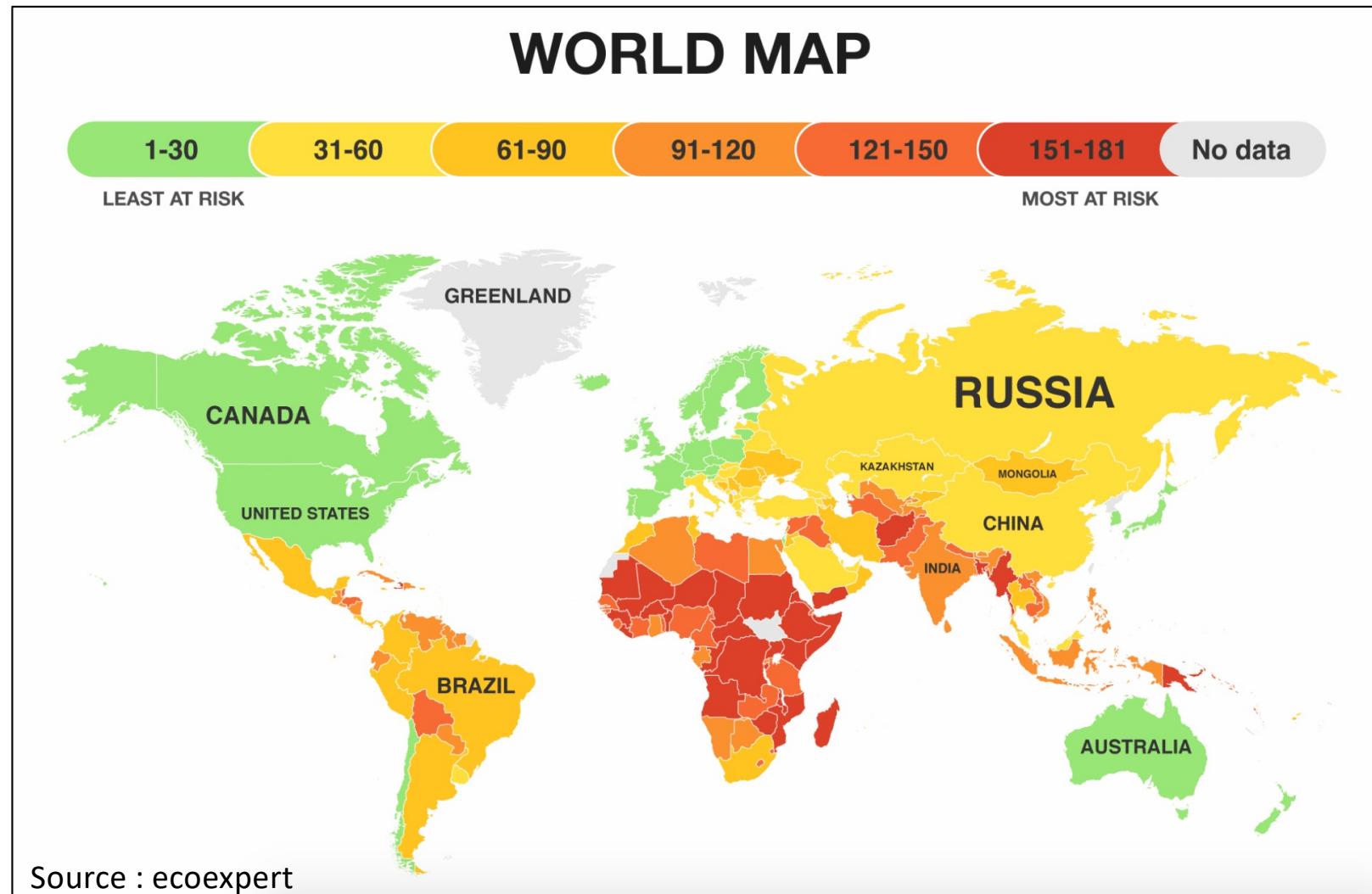
ÉMISSIONS DE CO2 PAR HABITANT

(en tonnes)

- ≥ 18
- 16 - 18
- 14 - 16
- 12 - 14
- 10 - 12
- 8 - 10
- 6 - 8
- 4 - 6
- 2 - 4
- 1 - 2
- < 1
- Données indisponibles

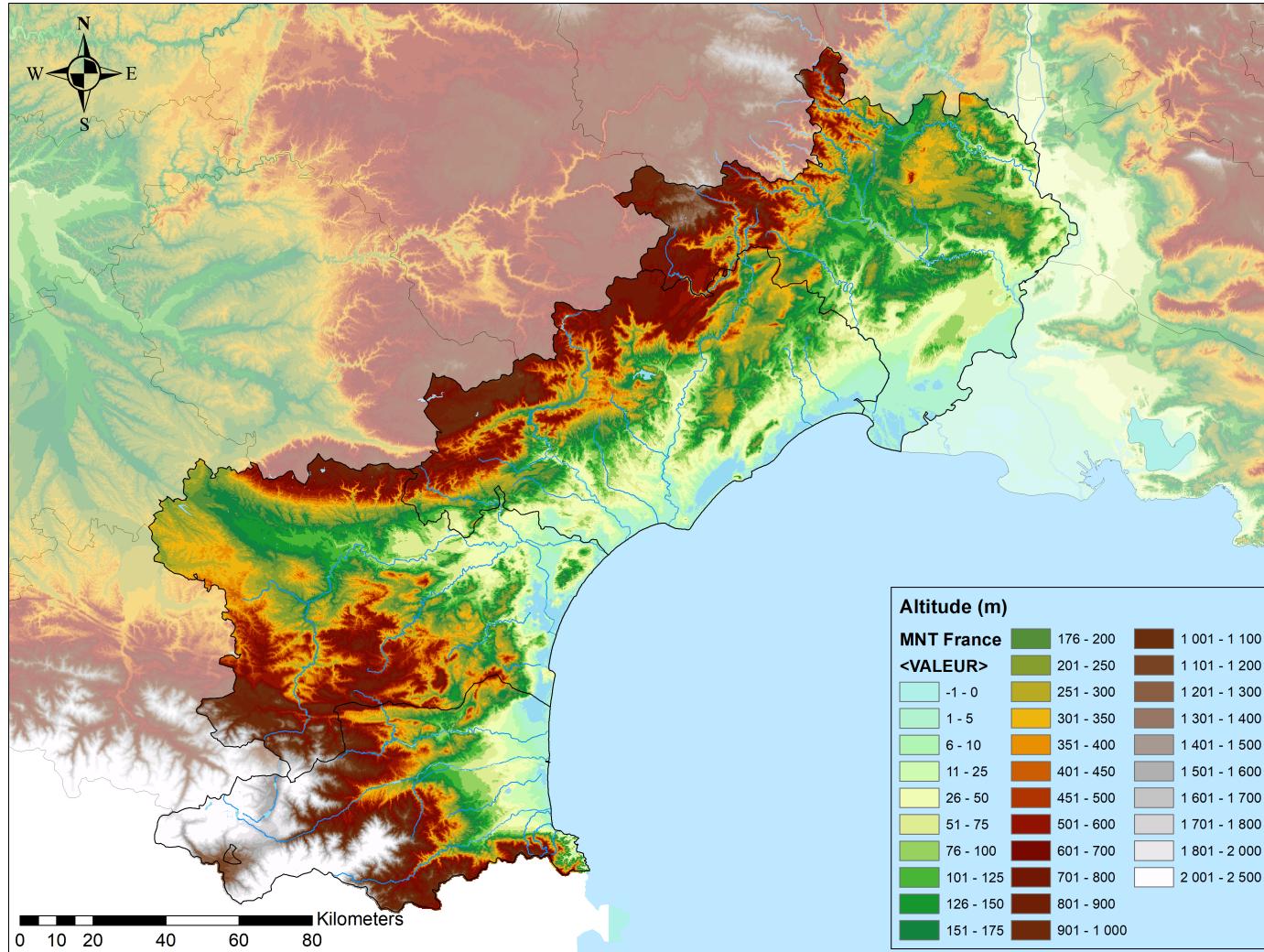
© ATLASOCIO.COM

Sources : Carbon Dioxide Information Analysis Center ;
Emission Database for Global Atmospheric Research ;
United Nations Framework Convention on Climate Change.



Carte des niveaux d'exposition aux risques liés au changement climatique

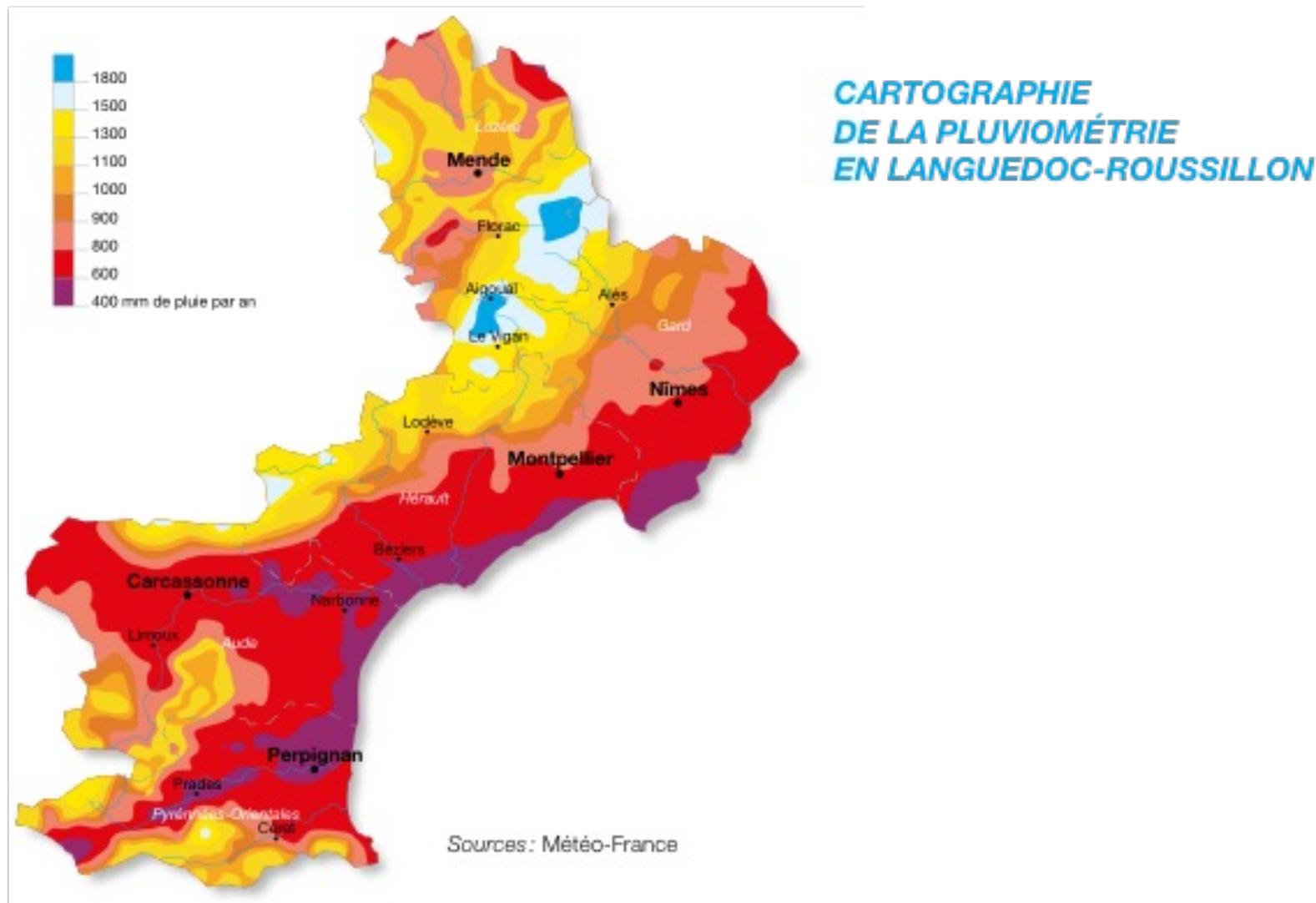
- **Un climat méditerranéen très contrasté**
 - Le rôle majeur du relief et de la géologie sur le cycle de l'eau



Orographie régionale (carte réalisée par G. Artigue, 2022)

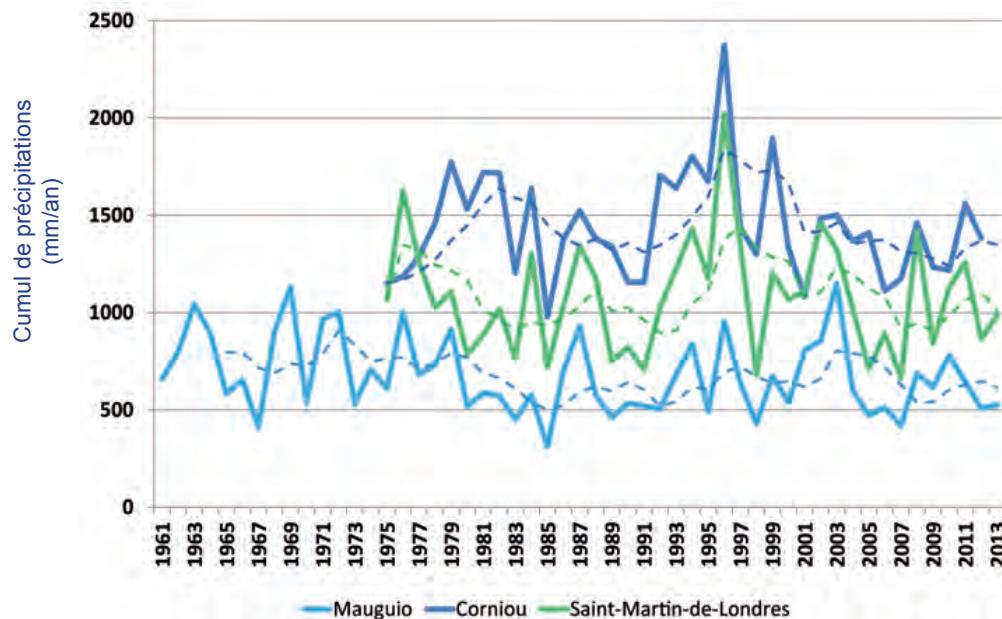
□ Un climat méditerranéen très contrasté

- La pluviométrie moyenne (1960-2015)

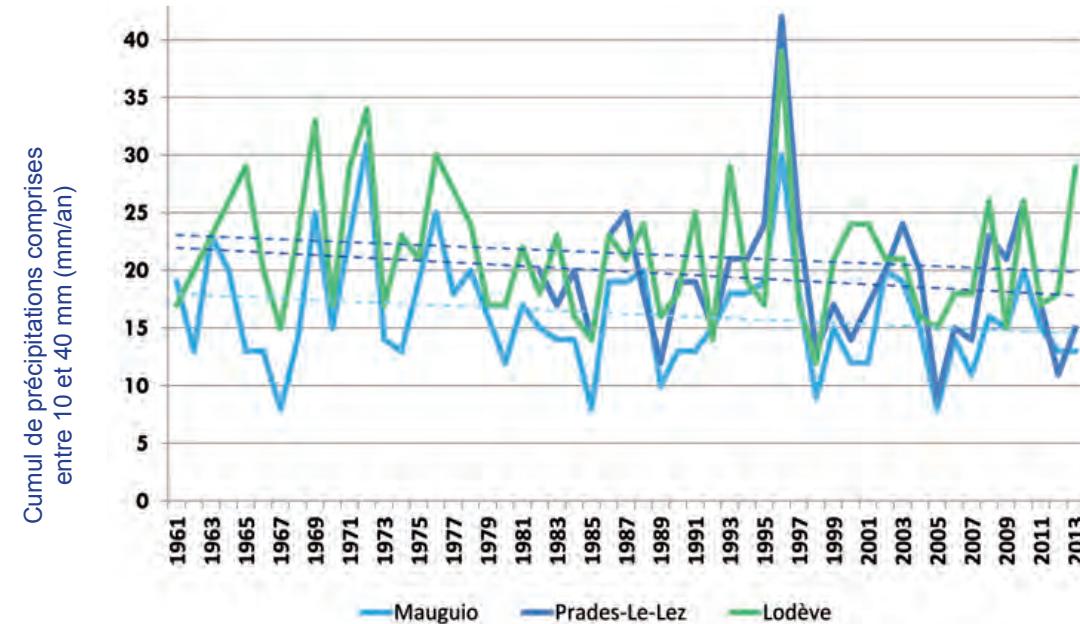


□ **Un climat méditerranéen très contrasté**

- Evolution de la pluviométrie : des cumuls assez stables mais moins de pluies de faible intensité



Evolution des cumuls annuels de précipitations totales
En tirets : moyenne mobile sur une période de 5 ans
(données ACH - CD 34 - Météo-France)

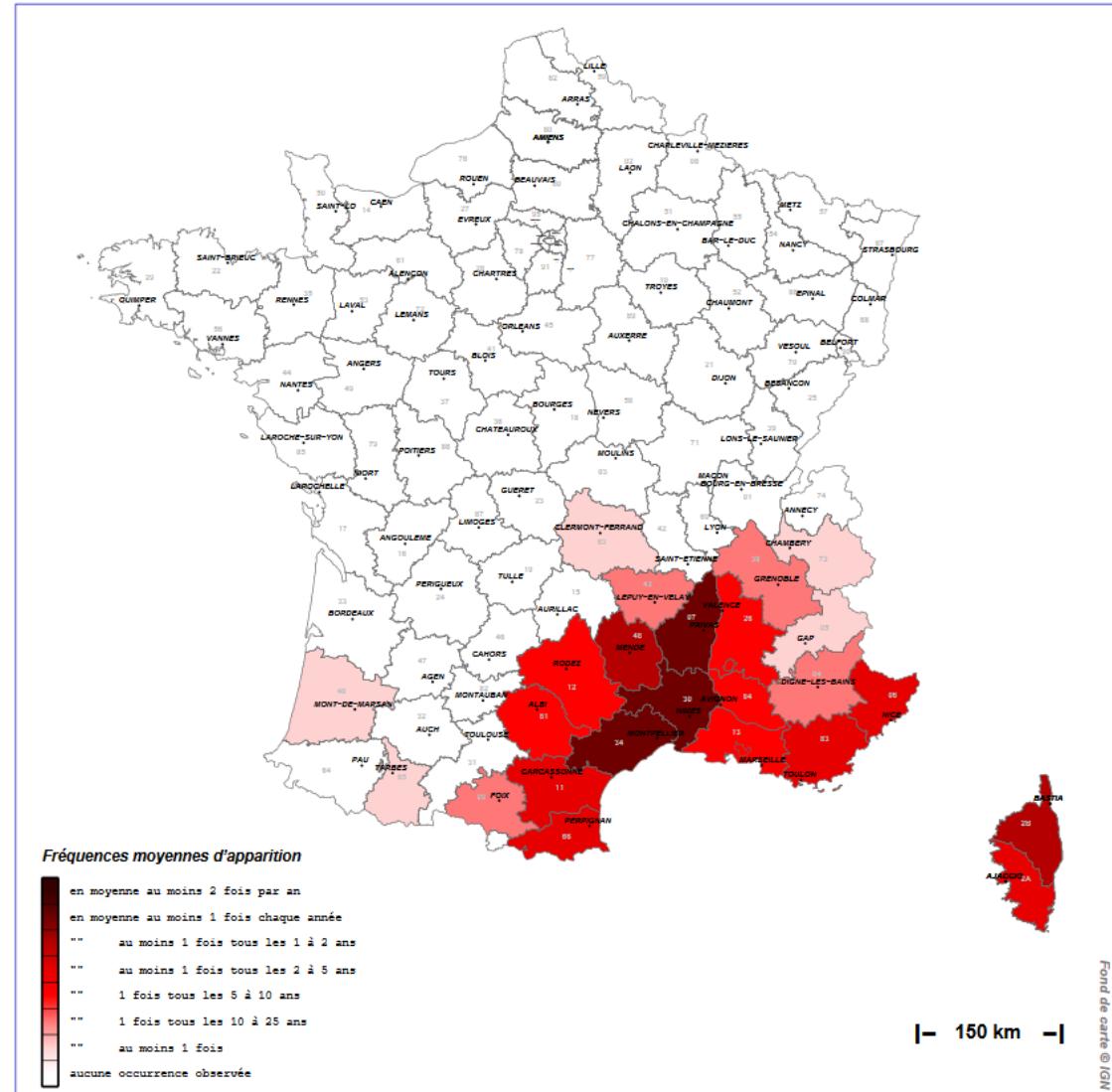


Evolution des épisodes de précipitations compris entre 10 et 40 mm
En tirets : droite de régression
(données ACH - CD 34 - Météo-France)

□ **Un climat méditerranéen très contrasté**

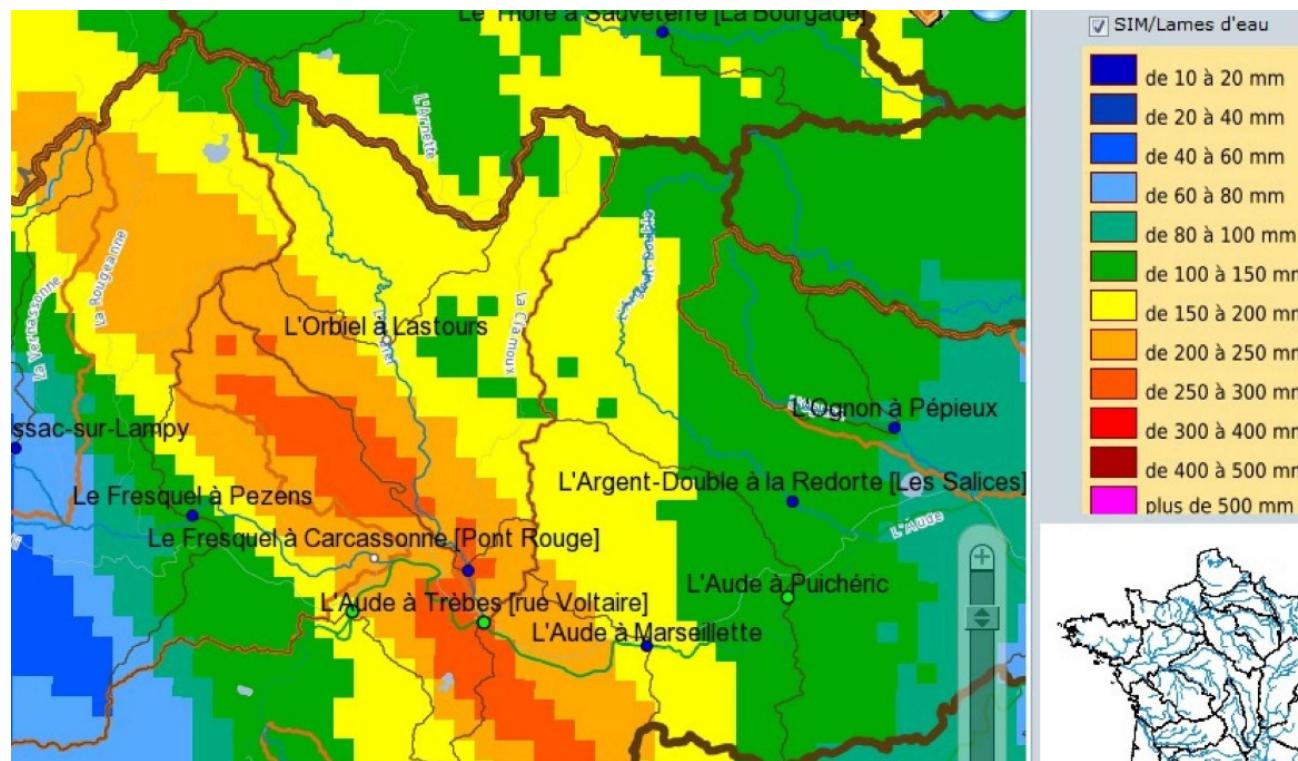
- Les épisodes pluvieux de forte intensité

Occurrence des épisodes pluvieux à très forte intensité
 >200mm / jour entre 1969 et 2018
 (carte réalisée par G. Artigue, 2022)



□ **Un climat méditerranéen très contrasté**

- Les épisodes pluvieux de forte intensité



Cumul de pluies entre 14/10 15h00 et 15/10 15h00 - source REX SCHAPI

Crue de l'Aude 2018

- **Un climat méditerranéen très contrasté**
 - Les épisodes pluvieux de forte intensité



St Laurent Le Minier après la crue du 17 septembre 2014....photo SMBFH

Crue Crenze
St Laurent le Minier
2014



ST Laurent le Minier - Repère de crue de 1982 et niveau atteint par les eaux en 2014 – photo SMBFH



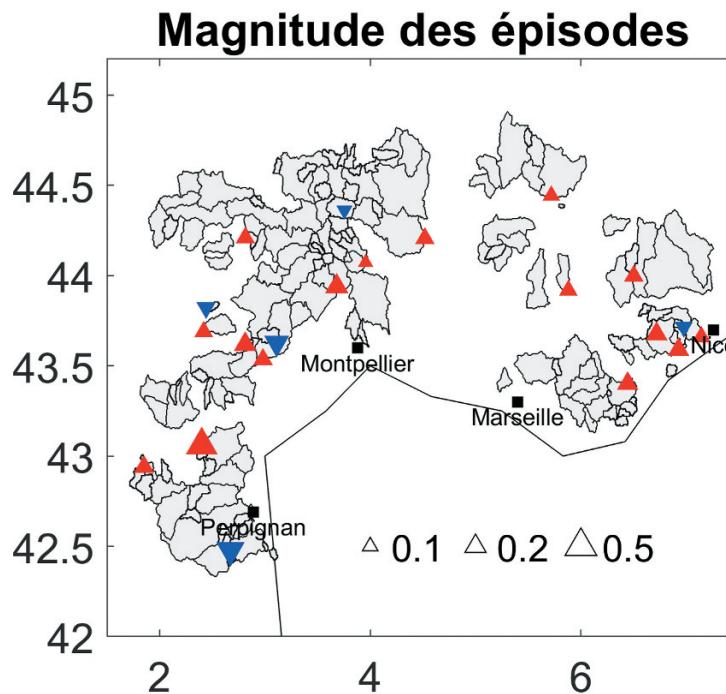
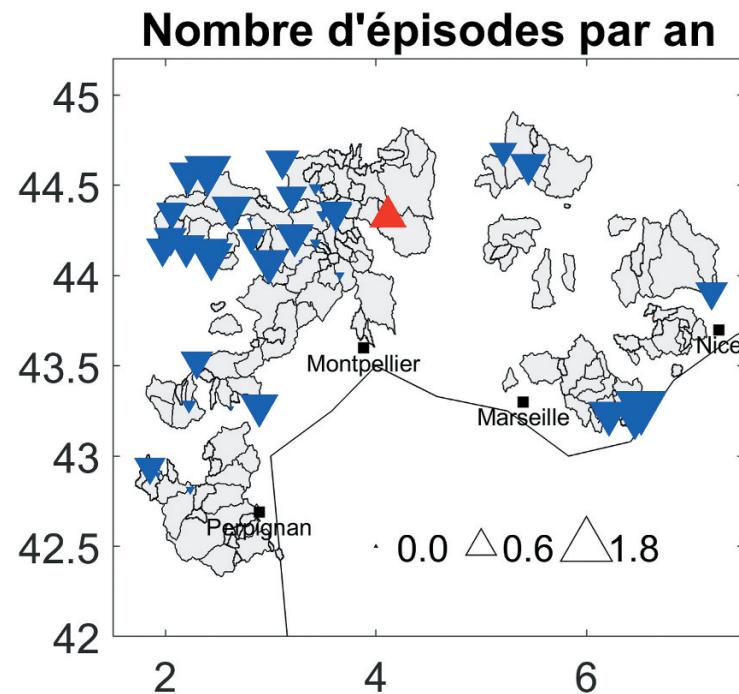
Maison du Barrys – Canet – photo SMBFH

Crue Hérault 2020



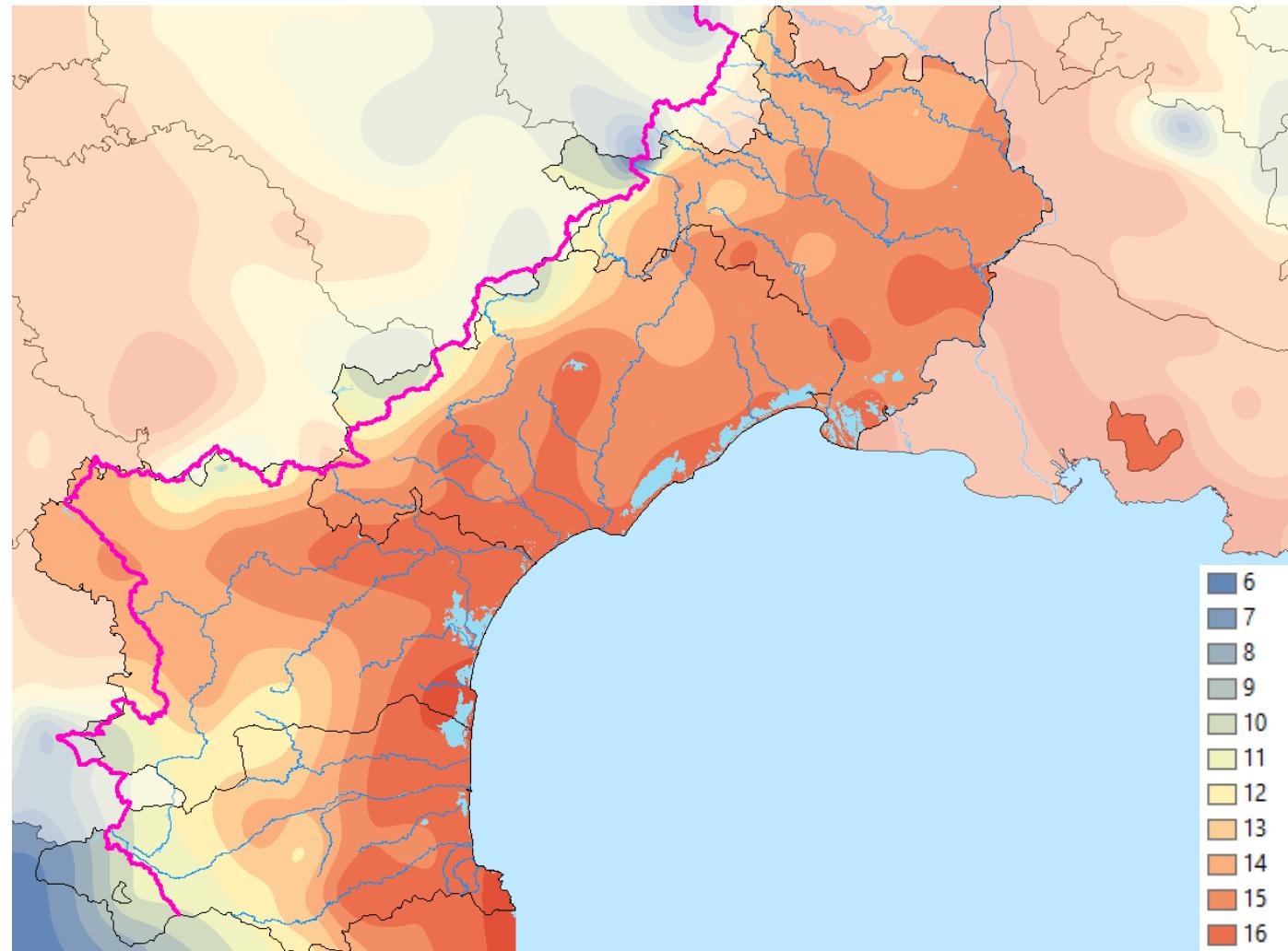
□ **Un climat méditerranéen très contrasté**

- Les épisodes pluvieux de forte intensité



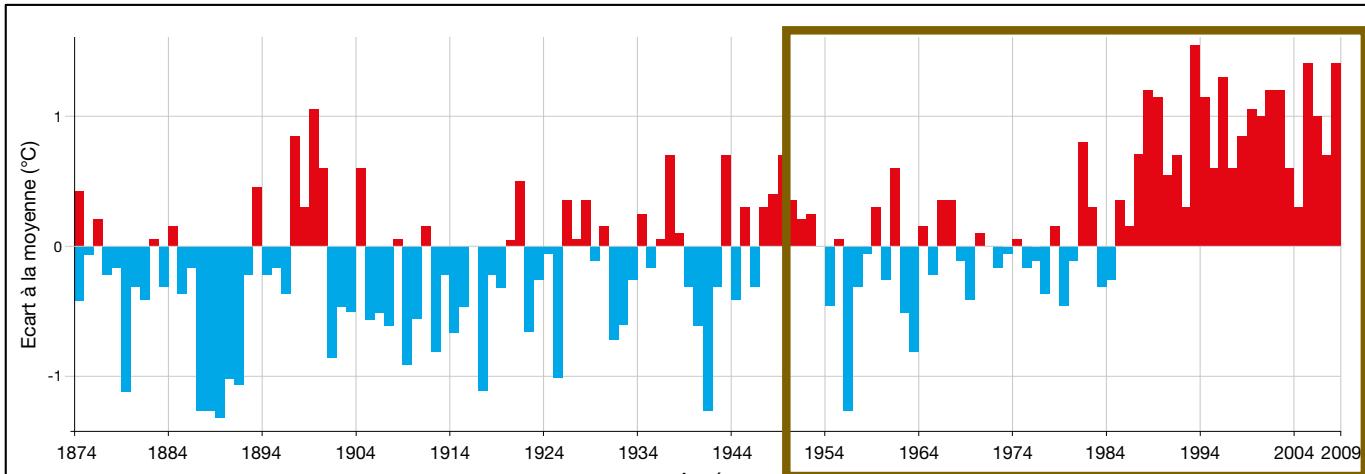
*Tendances observées sur l'occurrence annuelle des crues
(basées sur 99^{ème} centile du débit journalier) – (d'après Tramblay et al. 2019)*

- **Un climat méditerranéen très contrasté**
 - La température moyenne

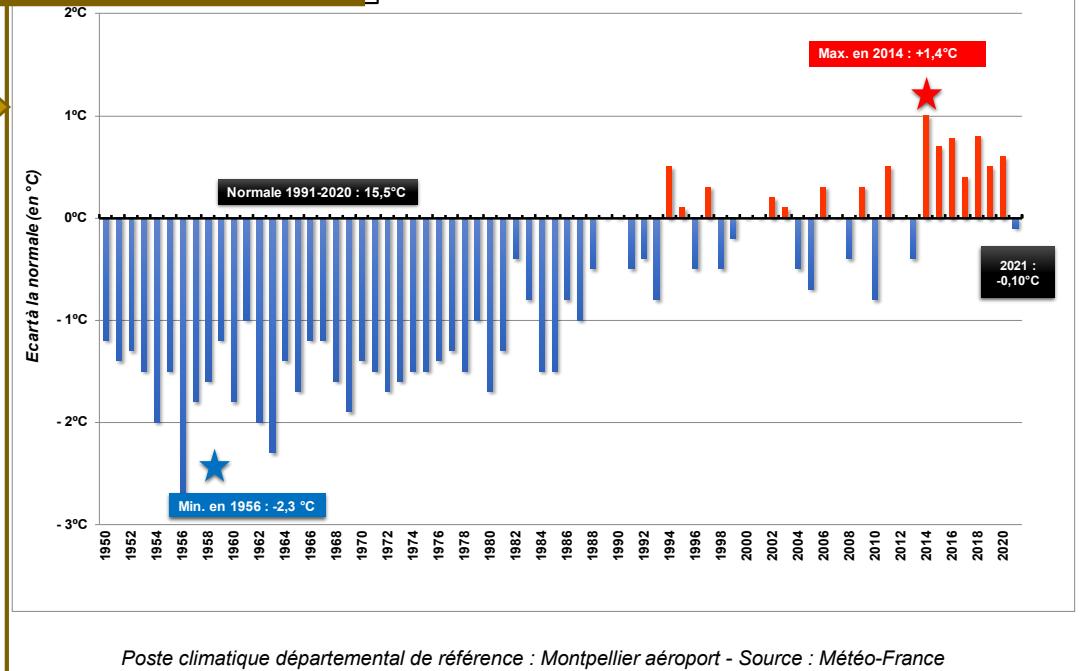


Carte des températures moyennes 1960-2020 (carte réalisée par G. Artigue, 2022)

- Un climat méditerranéen très contrasté
 - Des températures moyennes annuelles en hausse

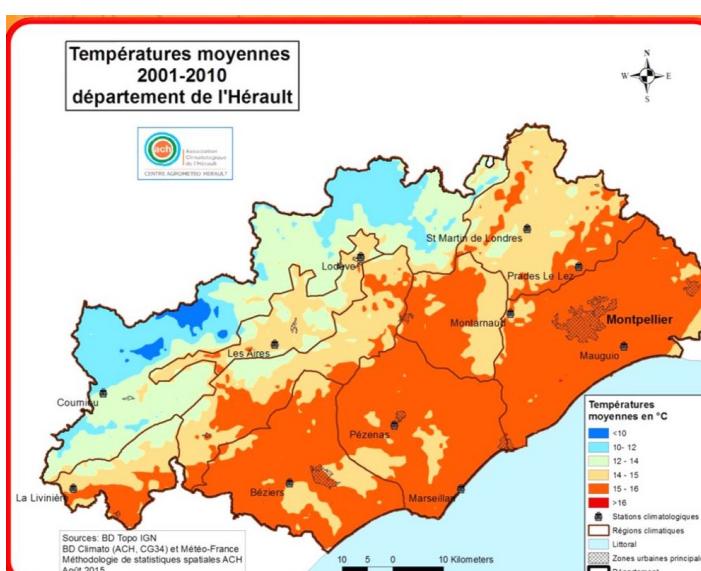
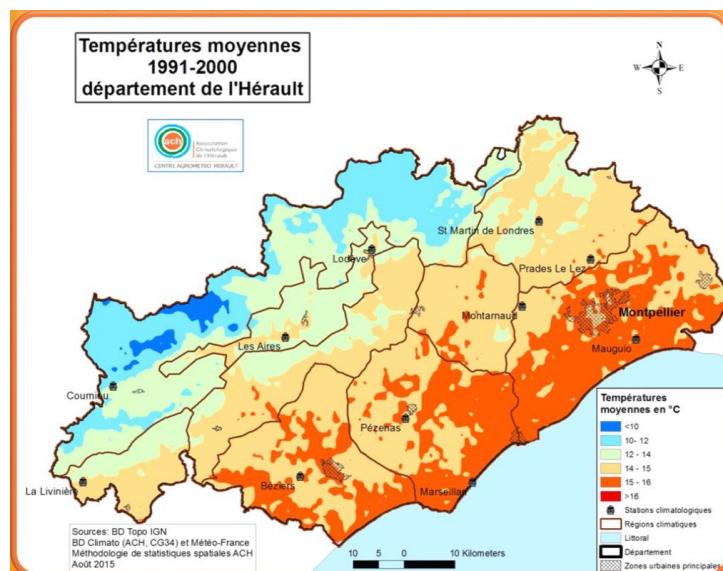
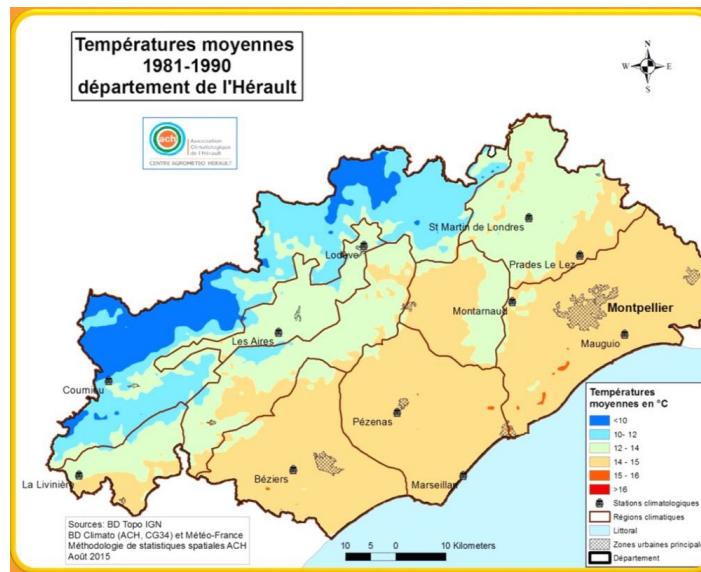
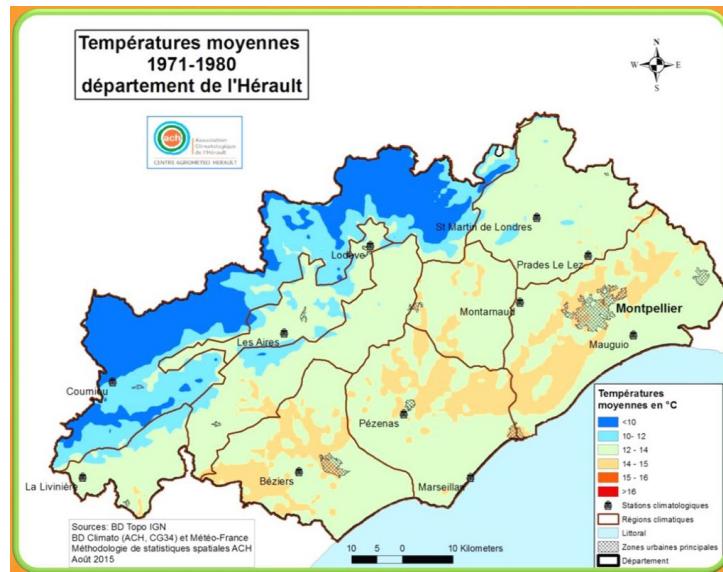


Ecart à la moyenne depuis 1874 en France (Météo-france)



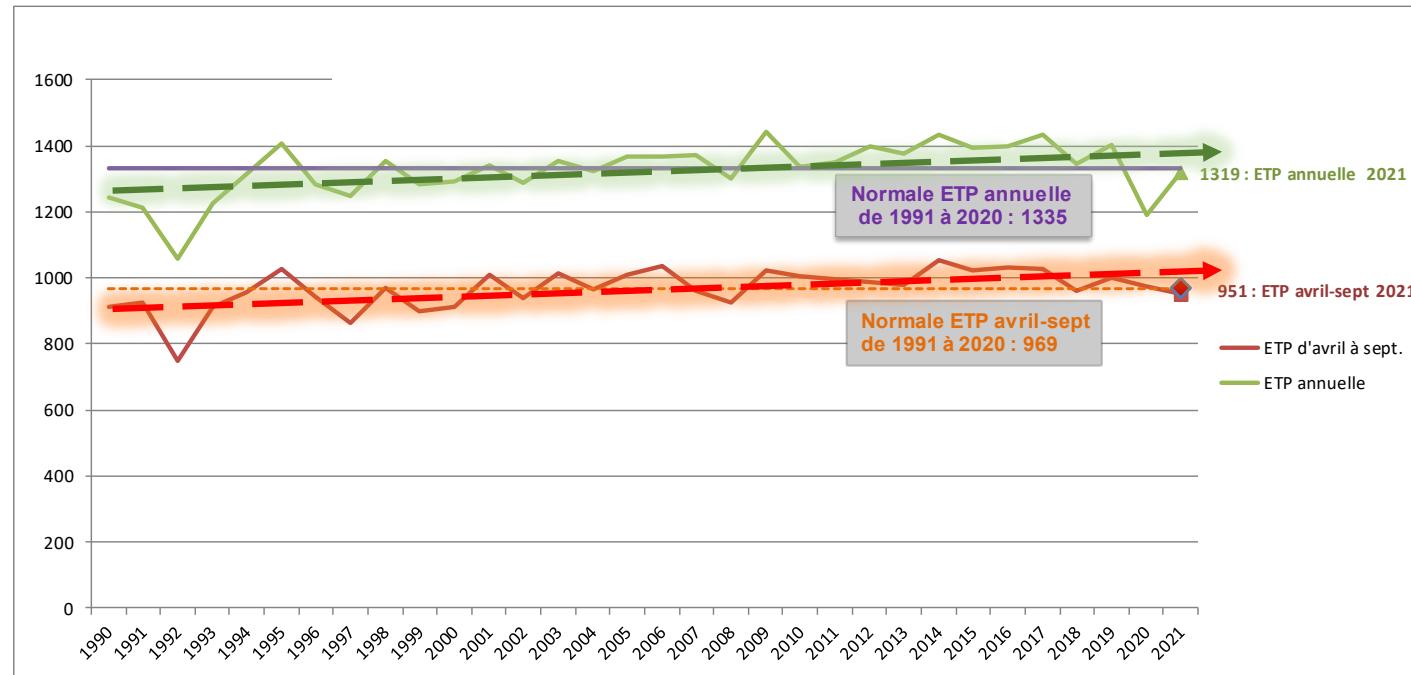
Ecart à la moyenne depuis 1950 (Annales climatologiques de l'Hérault, CD34, 2021)

- **Un climat méditerranéen très contrasté**
 - Des températures moyennes annuelles en hausse



□ **Un cycle de l'eau modifié**

- L'évapotranspiration potentielle (ETP) en hausse régulière



Poste climatique départemental de référence : Montpellier aéroport - Source : Météo-France

Evolutions des valeurs d'ETP de 1990 à 2021



Pluie efficace = Pluie – ETR = recharge des nappes et cours d'eau

$ETP \geq ETR$: Evapotranspiration réelle

□ Un cycle de l'eau modifié

- Une recharge des nappes en baisse

Situation des nappes au 1^{er} juillet 2022

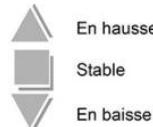
Méthodologie :

Cette carte présente les indicateurs globaux traduisant les fluctuations moyennes des nappes. Ces derniers sont intégrateurs d'indicateurs ponctuels correspondant à des points de surveillance du niveau des nappes (piézomètres).

L'évolution récente traduit la variation du niveau d'eau du mois échu par rapport aux 2 mois précédents (stable, à la hausse ou à la baisse).

L'indicateur du niveau des nappes traduit quant à lui l'écart à la moyenne de la chronique du mois courant. Il est réparti en sept classes, du niveau le plus bas (en rouge), au niveau le plus haut (en bleu foncé).

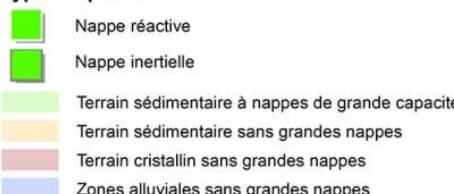
Evolution récente des niveaux :



Niveau des nappes :



Type d'aquifère :



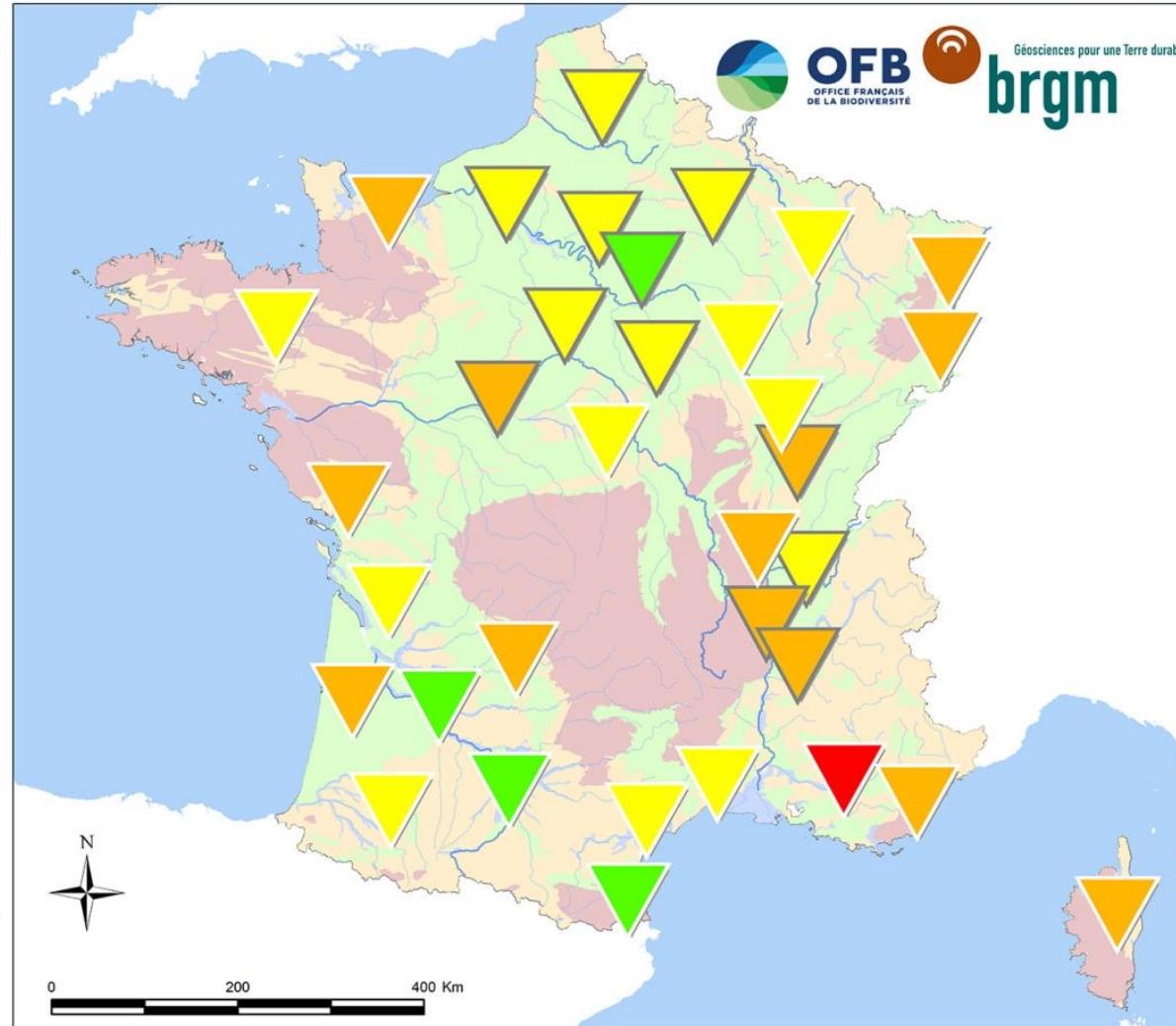
Bulletin de Situation Hydrogéologique



OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ

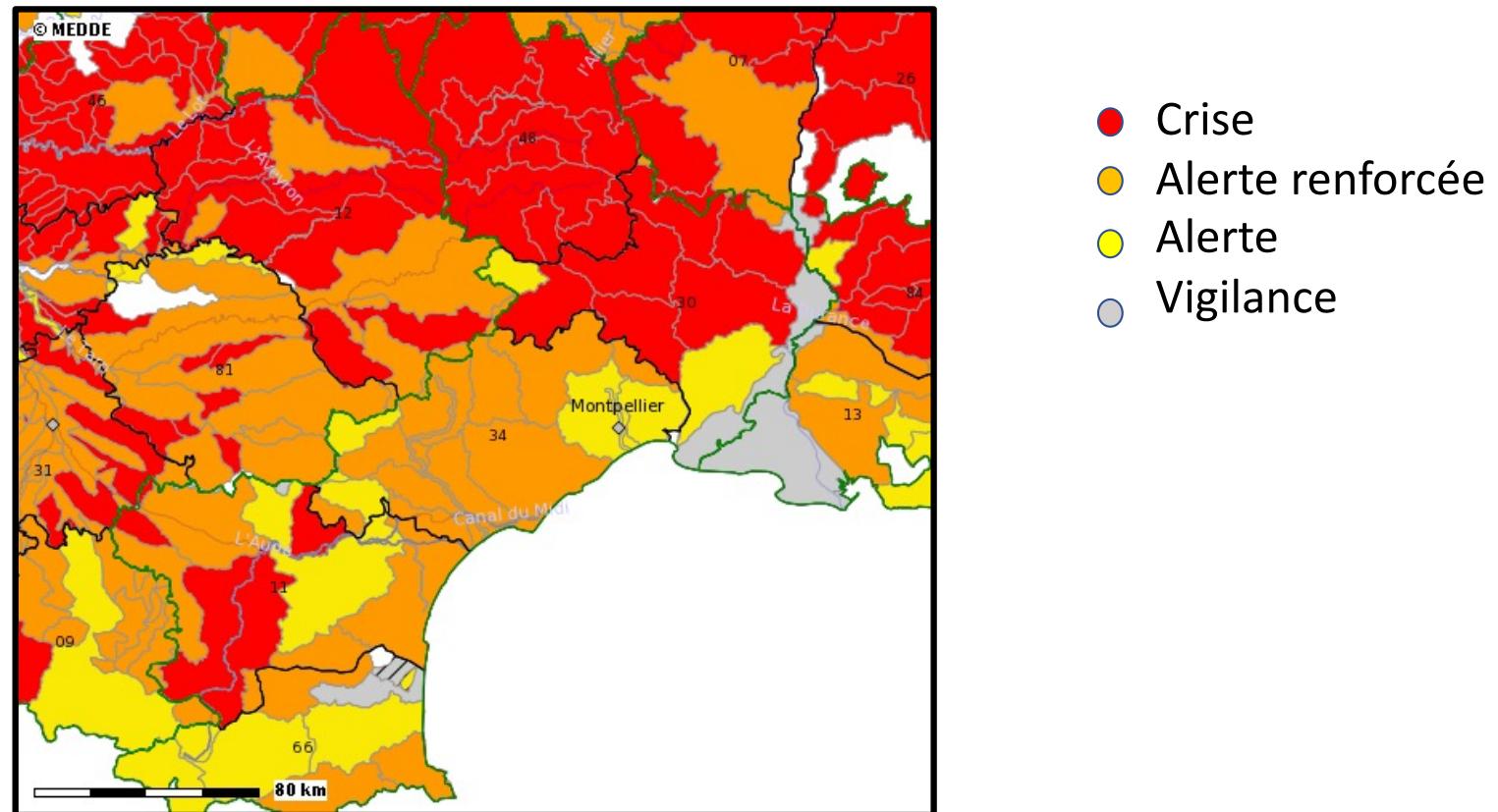


Géosciences pour une Terre durable



□ Un cycle de l'eau modifié

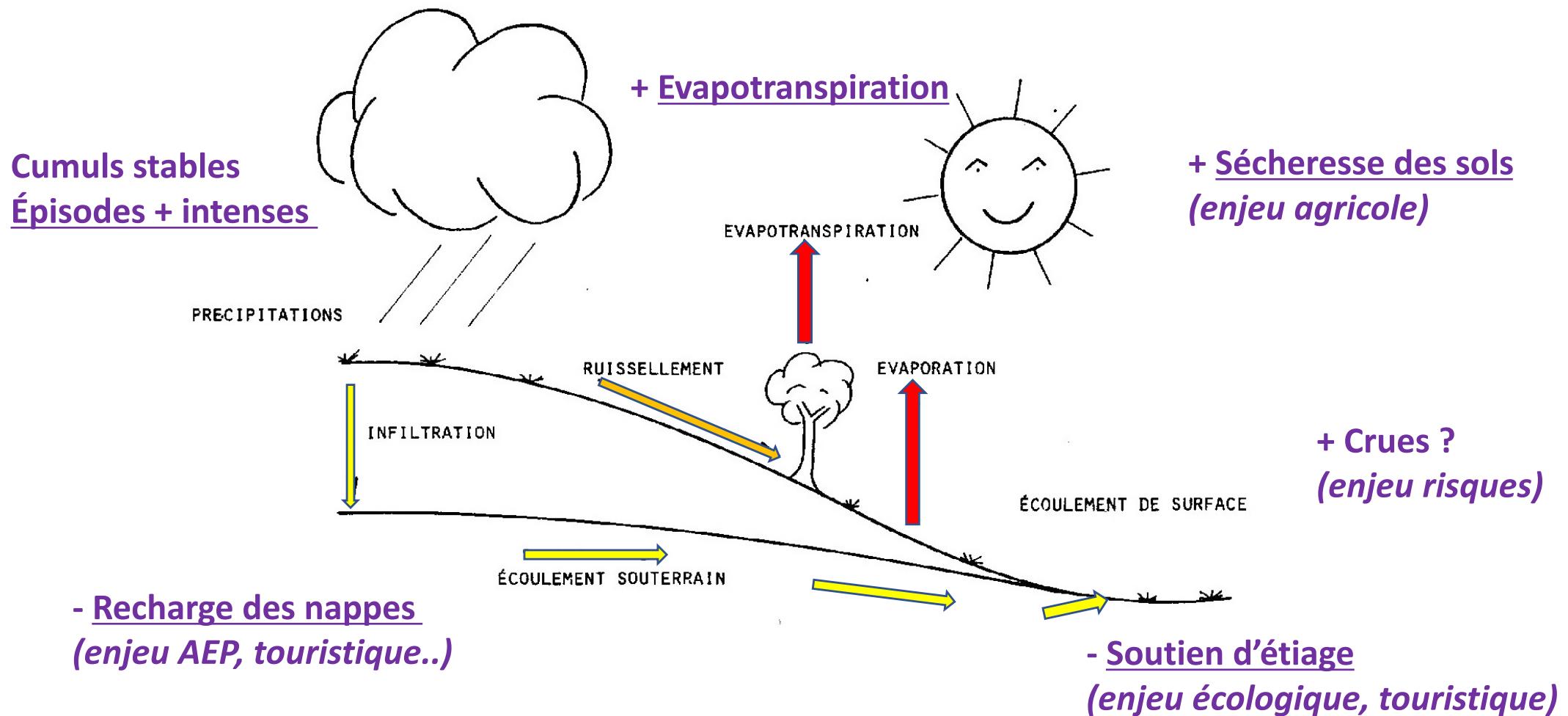
- ## ▪ Des réserves hydriques en baisse



Carte des arrêtés sécheresse au 15/08/22 (Site du Ministère de la transition écologique)

□ **Un cycle de l'eau modifié**

- Des gagnants et des perdants

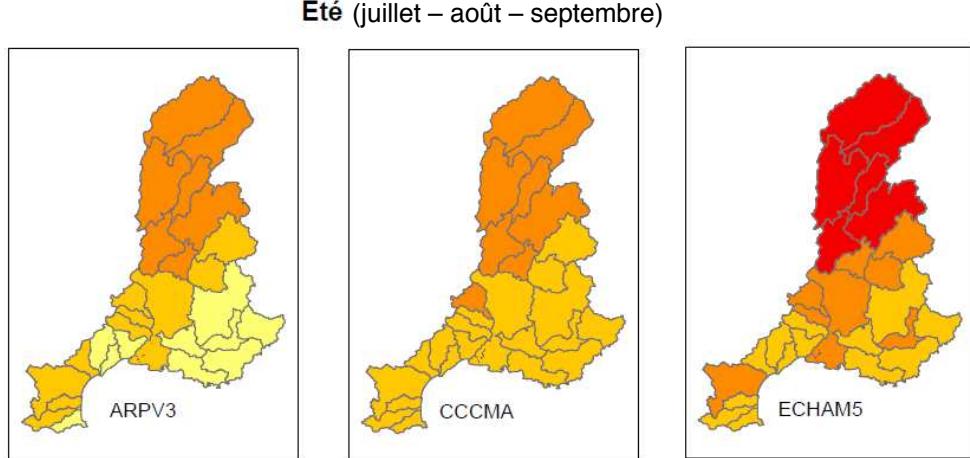
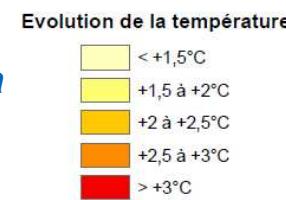


Tendances observées d'évolution du cycle de l'eau (d'après, Tardy, 1986)

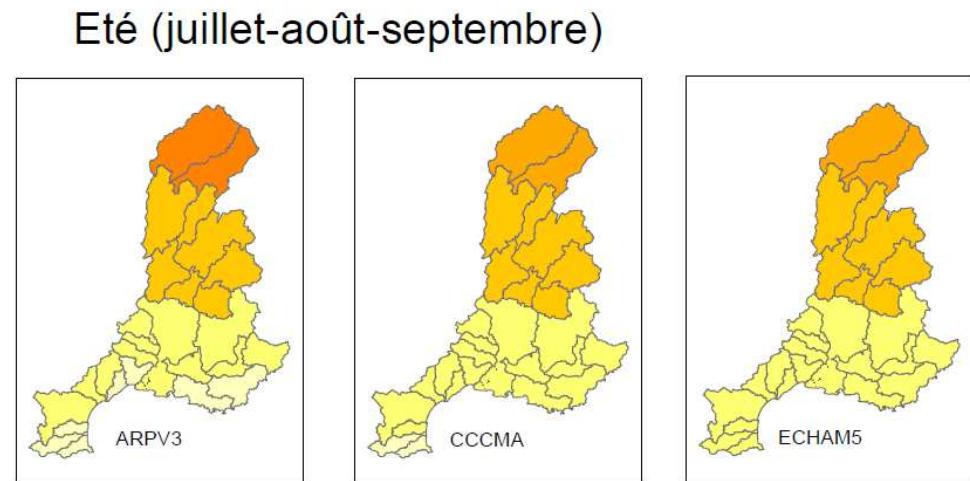
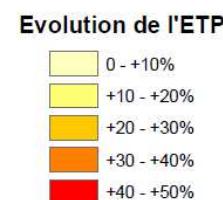
□ Les menaces

- Changement climatique : hausse des températures --> hausse de l'Evapotranspiration

Evolution de la température estivale à l'horizon 2046-2065 selon 3 modèles climatiques - source Explore 2070 (rapport DREAL-Agence RMC)

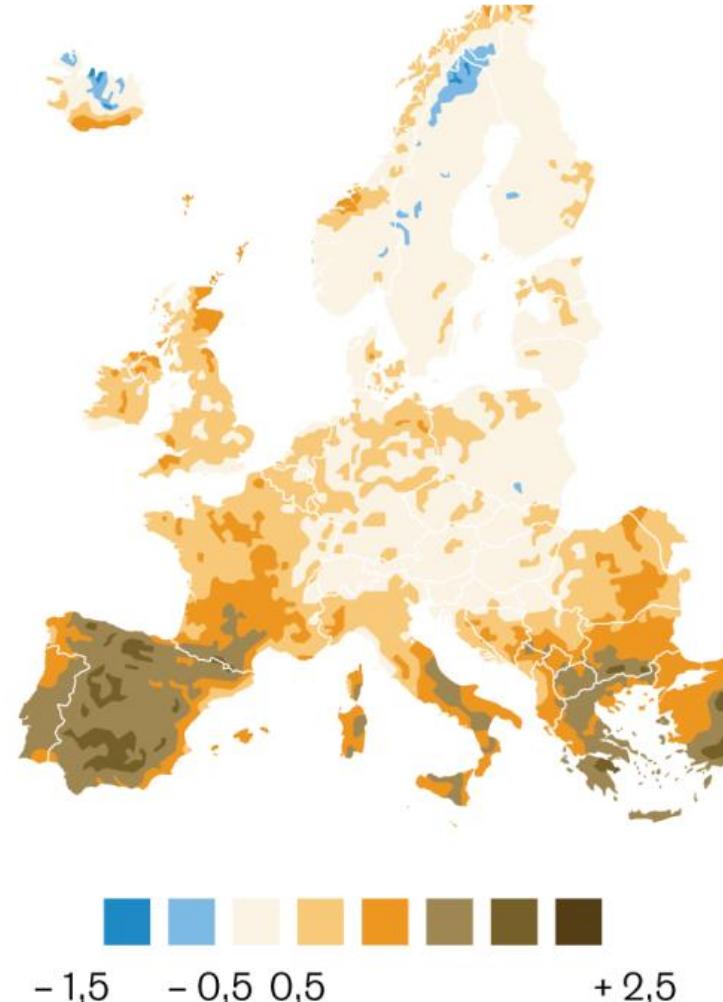


Evolution de l'ETP estivale à l'horizon 2046-2065 selon 3 modèles climatiques - source Explore 2070 (rapport DREAL-Agence RMC)



□ Les menaces

- Baisse de la recharge des hydrosystèmes : sols, nappes, rivières, lacs

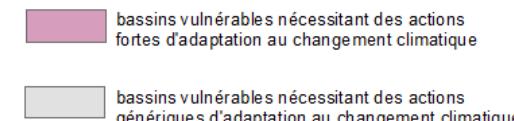
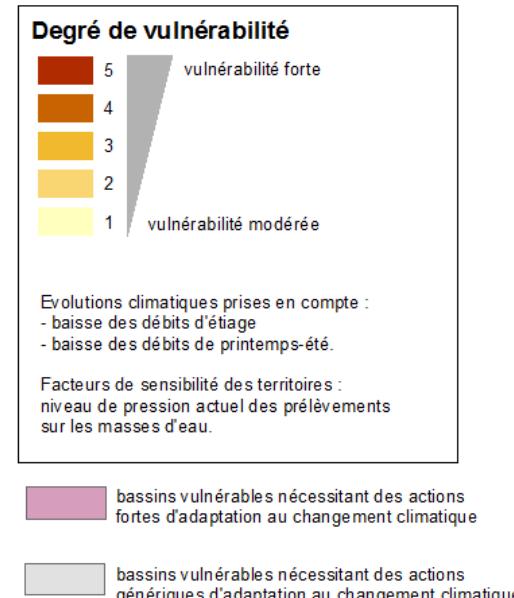


*Fréquence des épisodes de sécheresse à l'horizon 2041-2070
par rapport à la période 1981-2010 – à partir d'indices standardisés
(Infographie Le Monde à partir de données Agence Européenne de
l'Environnement)*

□ Les menaces

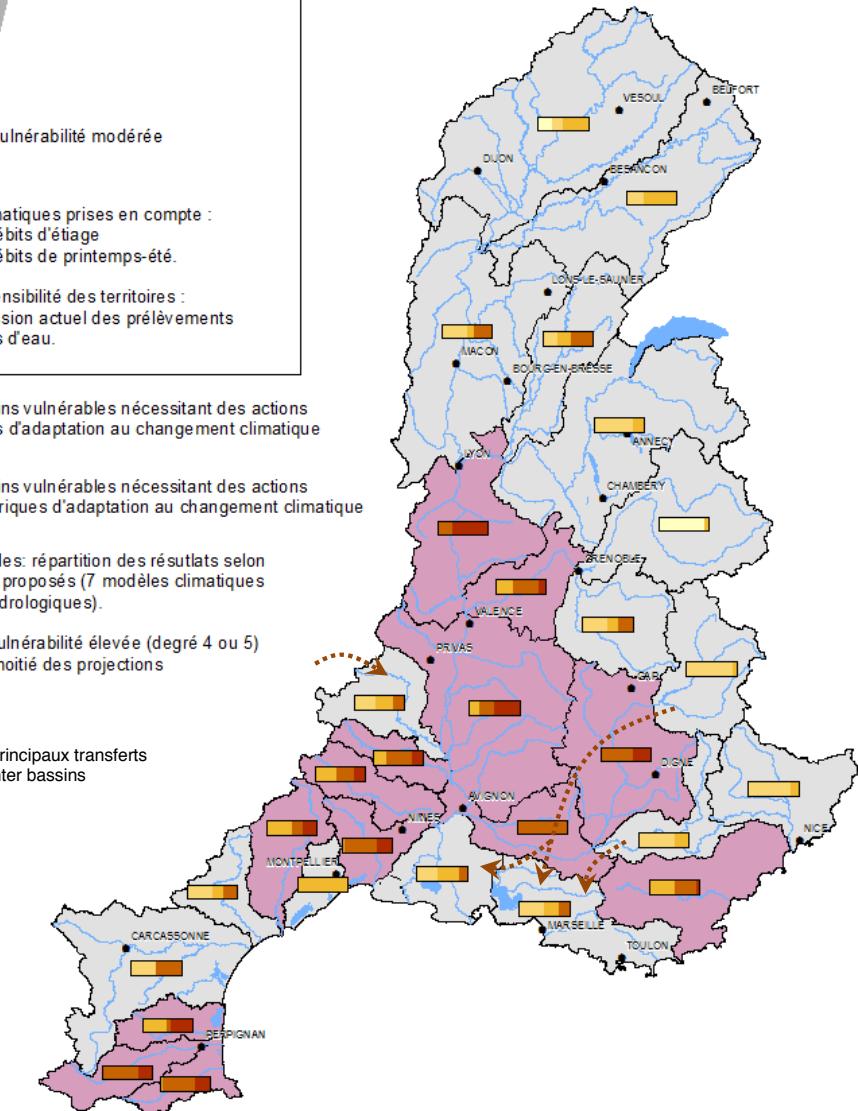
- Baisse de la recharge des hydrosystèmes : sols, nappes, rivières, lacs

Vulnérabilité à l'enjeu disponibilité en eau (Agence de l'Eau RMC)



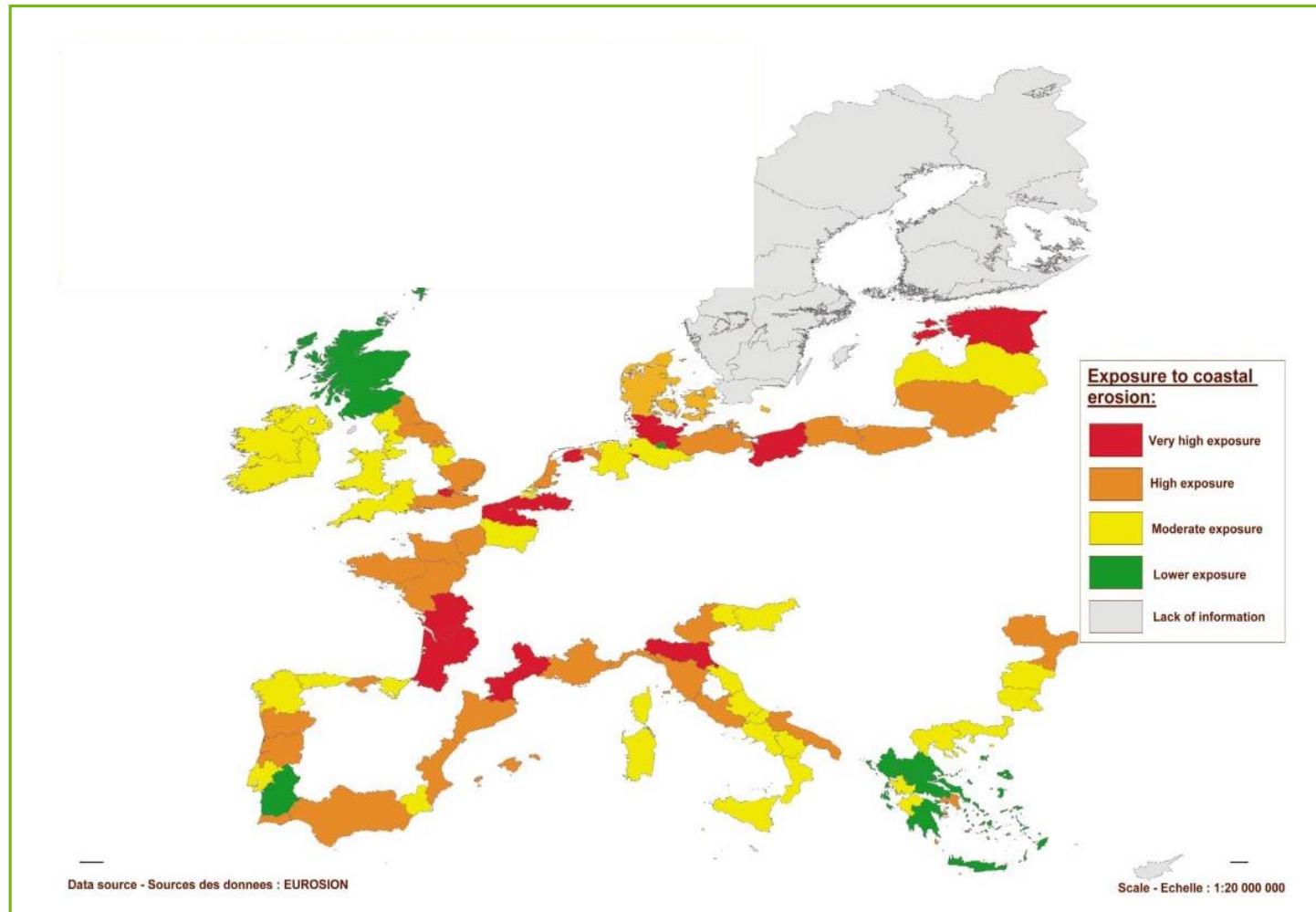
Barres horizontales: répartition des résultats selon les 14 scénarios proposés (7 modèles climatiques et 2 modèles hydrologiques).

Fond de carte: vulnérabilité élevée (degré 4 ou 5) pour plus de la moitié des projections



□ Les menaces

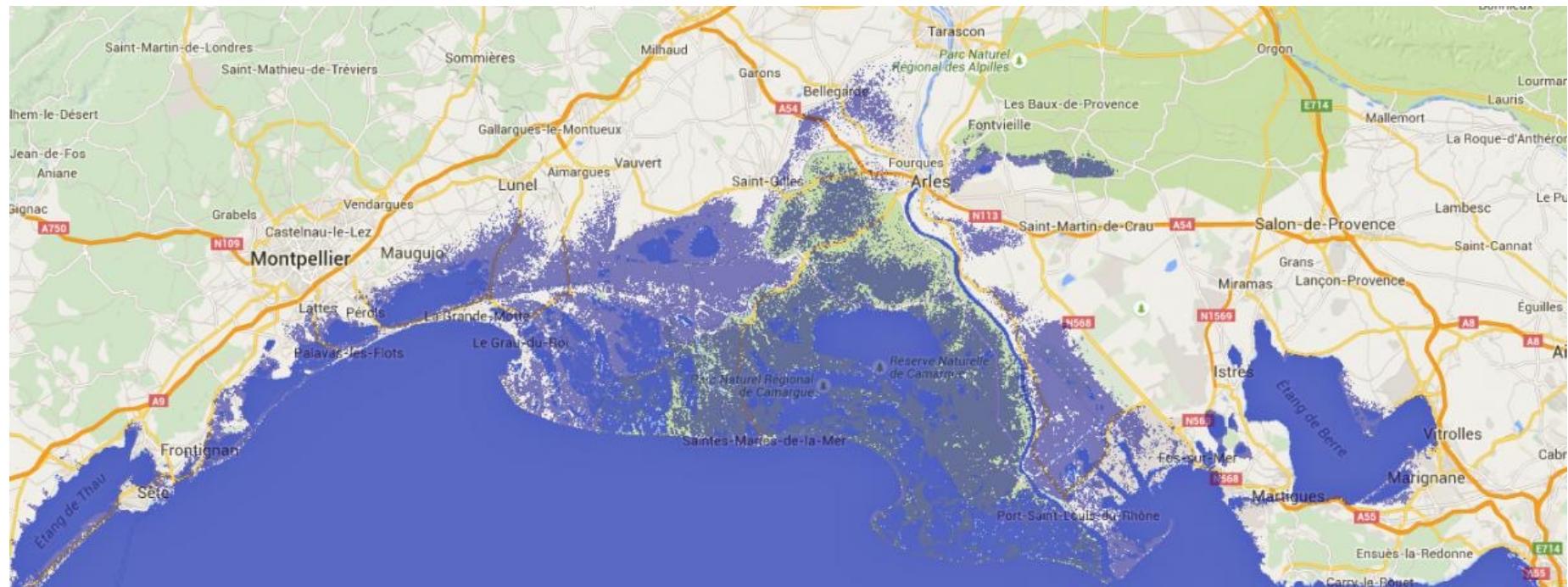
■ L'érosion cotière



Exposition des régions européennes à l'érosion côtière

□ **Les menaces**

■ **Hausse de niveau marin**

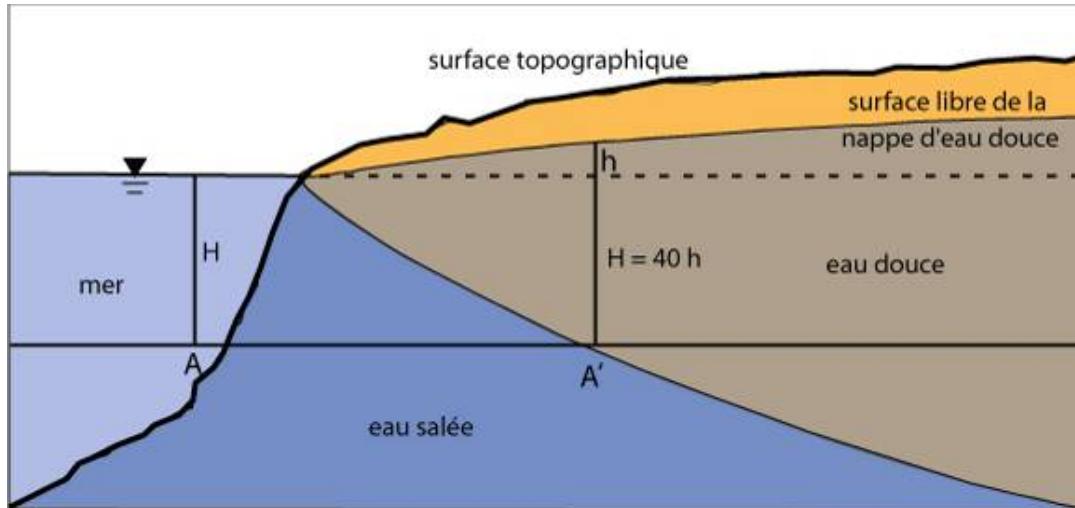


Simulation à l'horizon 2050 des conséquences de la hausse du niveau marin dans le delta du Rhône

- **Destruction du foncier**
- **Disparition des plages**
- **La salinisation des lagunes (pertes de biodiversité)...**

□ **Les menaces**

- Changement climatique : hausse du niveau marin → salinisation des eaux côtières (AEP, Agriculture..)



*Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon
Ghyben-Herzberg (d'après Frissant et al., 2005)
Scénario de salinisation des aquifères littoraux*

$$H \cdot d_s = (H + h) \cdot d \rightarrow H = 40 \text{ h}$$

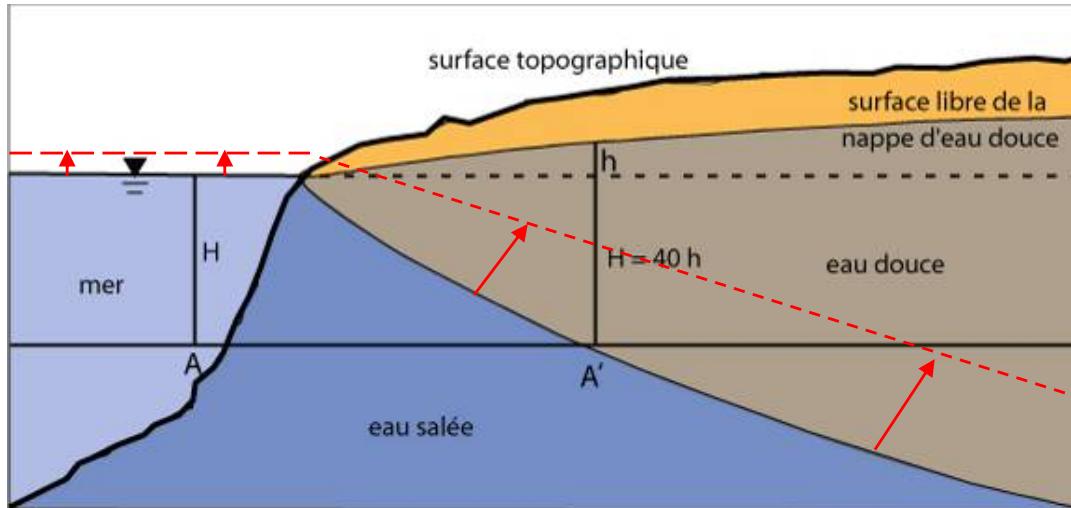
Avec :

d_s : masse volumique eau salée (1025 kg/m³)

d : masse volumique eau douce (1000 kg/m³)

□ Les menaces

- Changement climatique : hausse du niveau marin → salinisation des eaux côtières (AEP, Agriculture..)



Source de la Vise

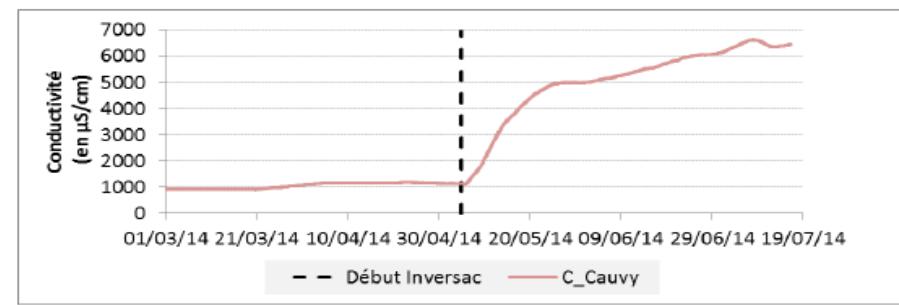
Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg (d'après Frissant et al., 2005)
Scénario de salinisation des aquifères littoraux

$$H \cdot d_s = (H + h) \cdot d \rightarrow H = 40 h$$

Avec :

d_s : masse volumique eau salée (1025 kg/m³)

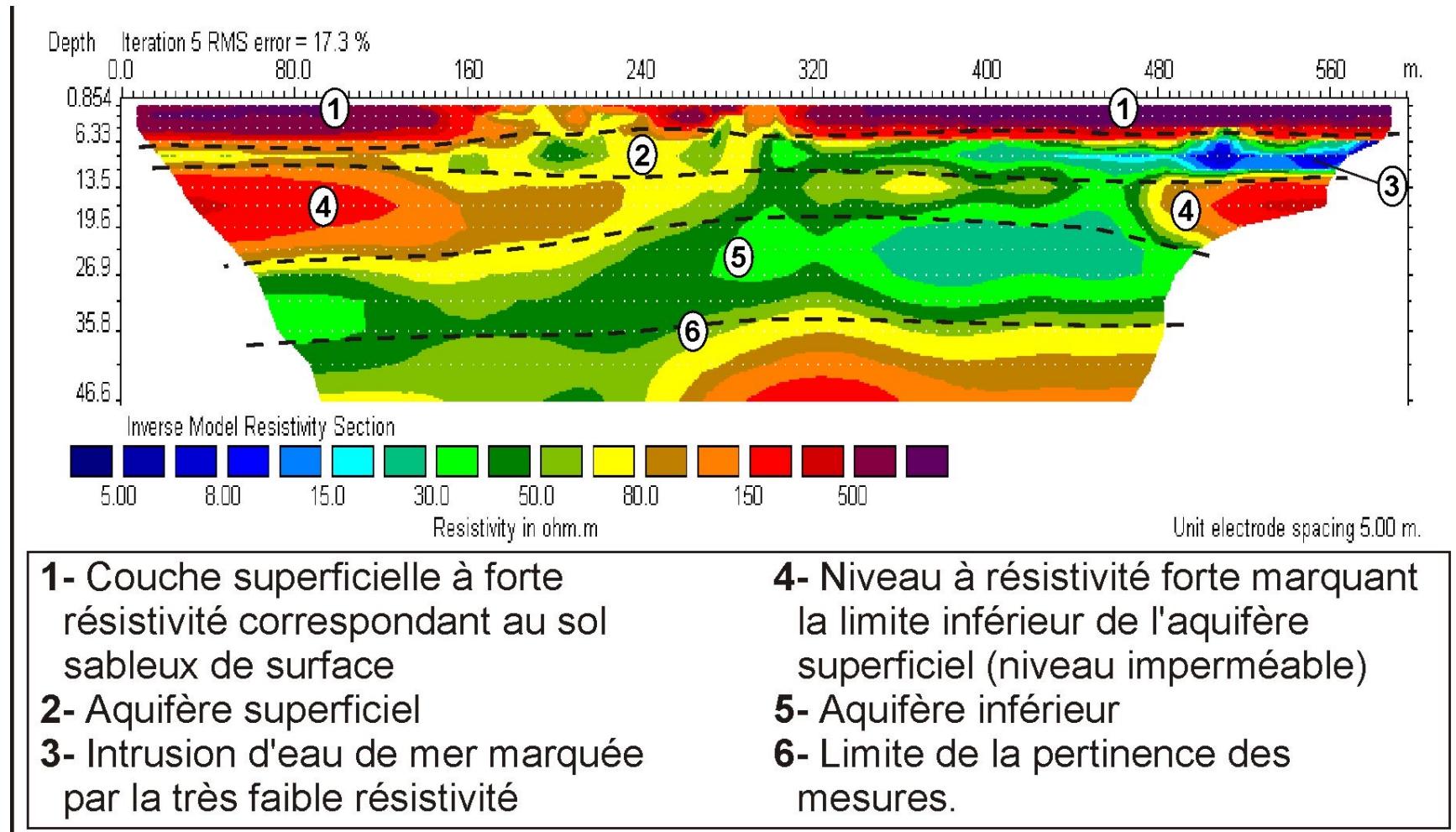
d : masse volumique eau douce (1000 kg/m³)



Evolution des conductivités sur un captage AEP lors d'un INVERSAC (St Fleur, 2018)

□ Les menaces

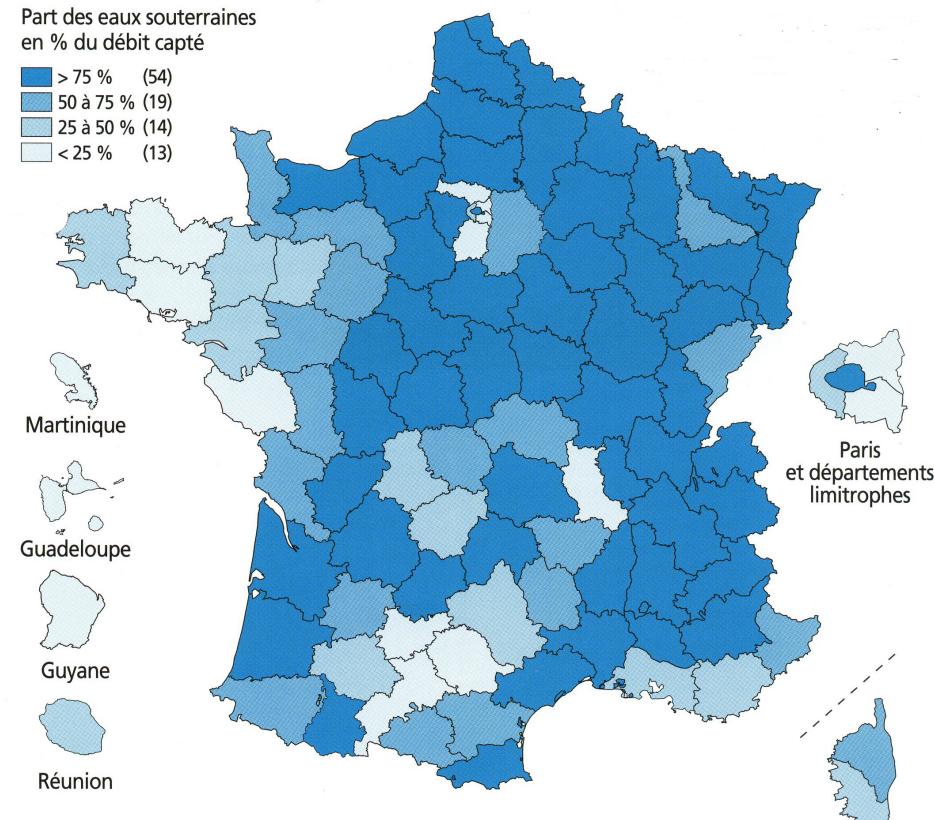
- Changement climatique : hausse du niveau marin → salinisation des eaux côtières



Exemple de profil électrique en domaine littoral – Mas Larieu (thèse Aunay, 2007)

□ Les enjeux

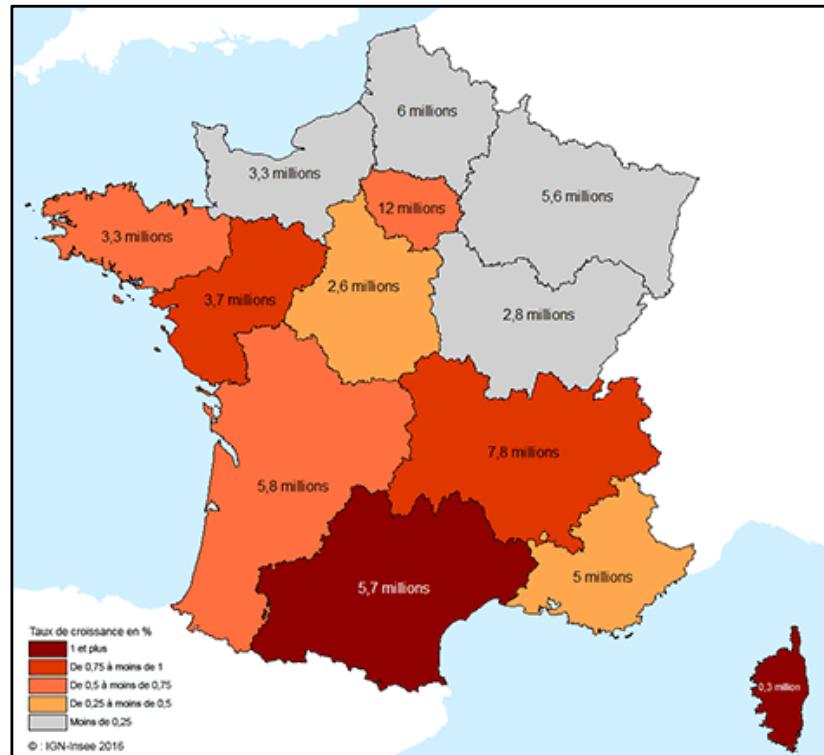
- Répondre à la hausse de la demande en eau domestique



*Origine de l'eau du réseau AEP en France
Part des eaux souterraines par département*

□ Les enjeux

- Répondre à la hausse de la demande en eau domestique



En Occitanie

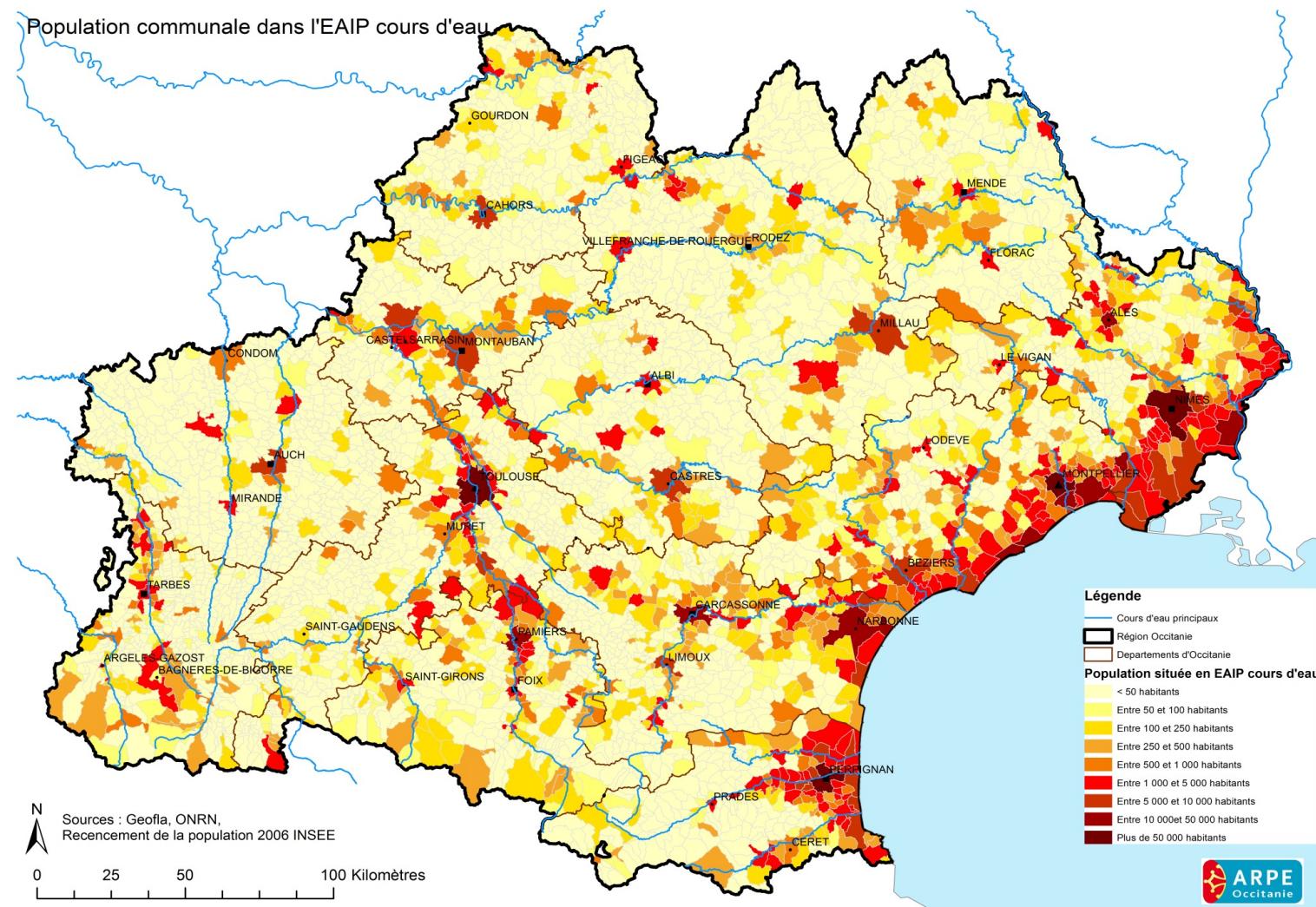
- En moyenne 51 400 nouveaux hab/an
- Population **> 6 millions d'habitants en 2025 et 7 millions en 2050**
- De **nombreux touristes** : 212 millions de nuitées par an (+4 millions d'ici 2030)

→ Besoin AEP (2040) = + 15 à + 25 Mm3

□ **Les enjeux**

- Protéger contre le risque de crues/inondation

La population en zone inondable



□ **Les enjeux**

- Soutenir une économie qui dépend fortement de l'eau disponible

L'eau et les milieux aquatiques, supports de l'aménagement du territoire régional



SUR 1,6 MILLIARD DE M³ D'EAU PRÉLEVÉS ANNUELLEMENT,



42%
sont dédiés à
L'AGRICULTURE,



Poids économique de l'agriculture et de l'agro-alimentaire régionale :

21 milliards d'euros - 165 000 emplois
330 000 ha irrigables (10% de la SAU / 30% des prélèvements annuels totaux)

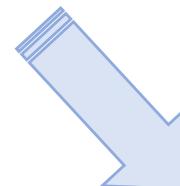
Sources : DRAAF, Conseil régional



38%
à L'EAU POTABLE



et **20%**
à L'INDUSTRIE.



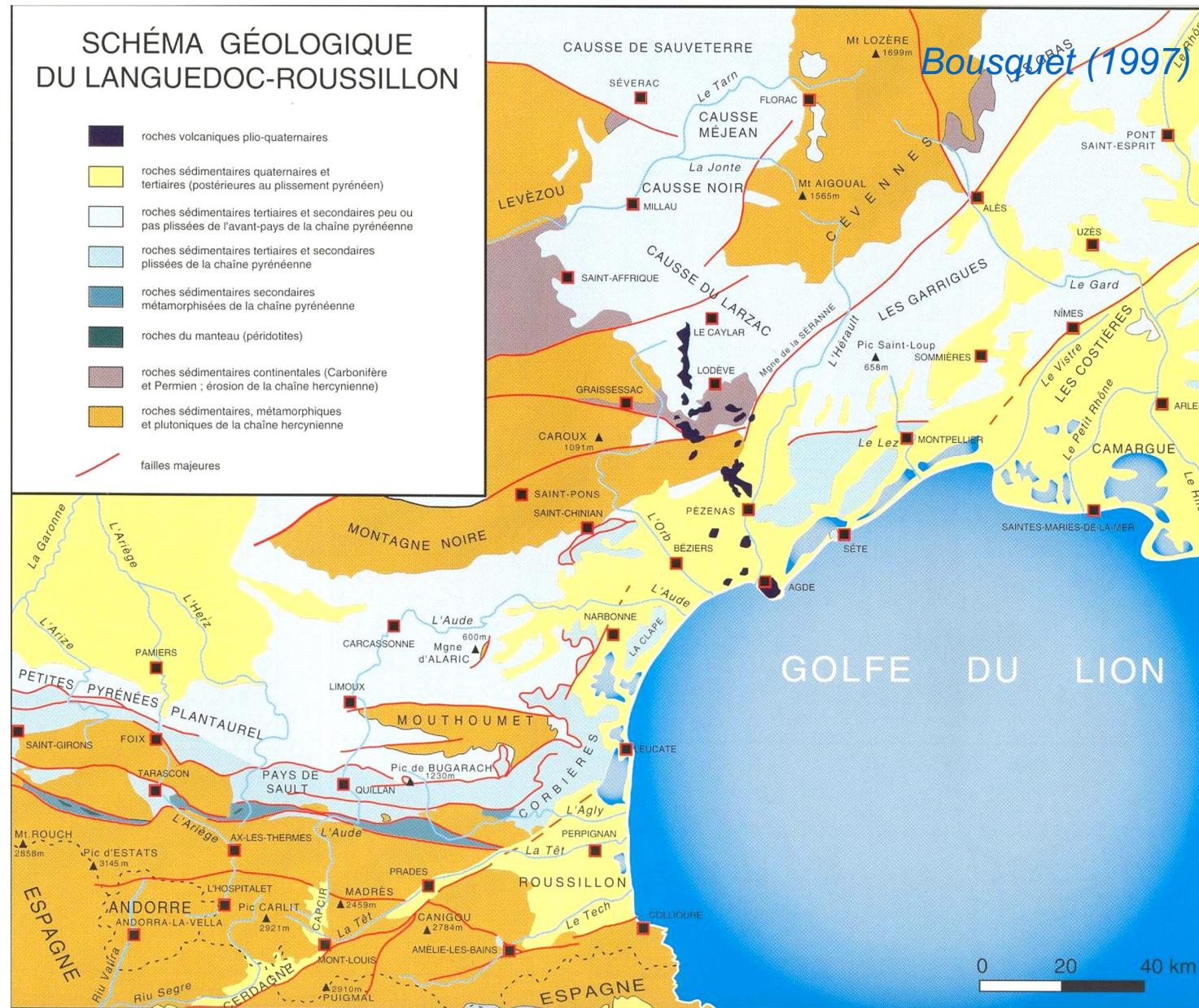
Population permanente
+ touristes

Poids économique du tourisme régional :

14 milliards d'euros par an
108 000 emplois permanents

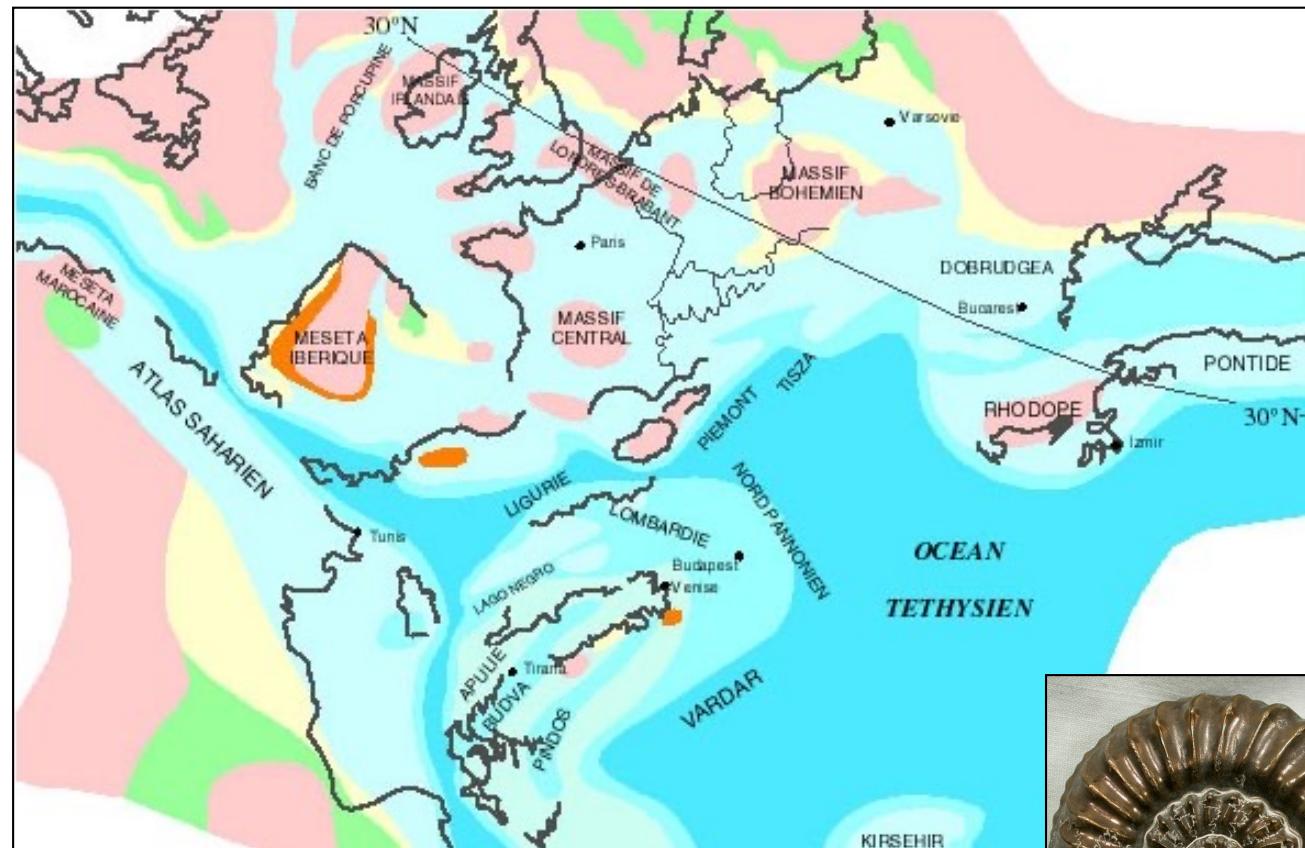
Sources : Fédération nationale de pêche, Conseil régional

□ La géologie



□ La géologie

Quaternaire	
Tertiaire Cenozoïque	Pliocène Miocène Oligocène Eocène Paléocène
Secondaire Mésozoïque	Crétacé Jurassique Trias
Primaire Paléozoïque	Permien Carbonifère Dévonien Silurien Dévonien Cambrien
Précambrien	570



- Fin du Primaire = érosion des reliefs hercyniens
- Début Secondaire = ouverture de la Thétys
- Jurassique = période calme = dépôts marins surtout carbonatés

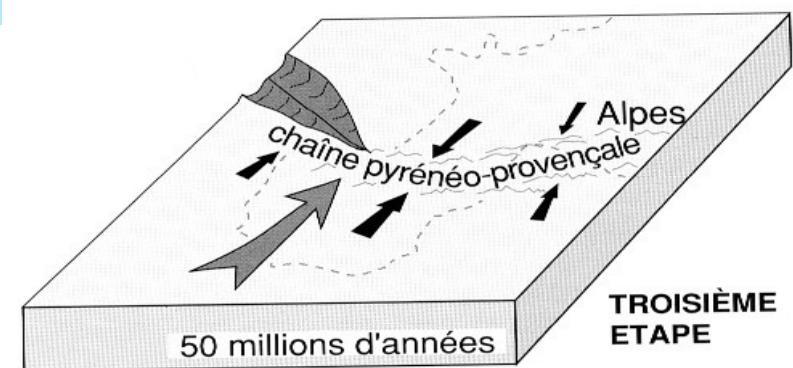
→ Épaisses séries de roches carbonatées

□ La géologie

Quaternaire		2
Tertiaire Cenozoïque	Pliocène Miocène Oligocène Eocène Paléocène	53 65
Secondaire Mésozoïque	Crétacé Jurassique Trias	140 195 230
Primaire Paléozoïque	Permien Carbonifère Dévonien Silurien Dévonien Cambrien	280 350 400 440 500 570
Précambrien		



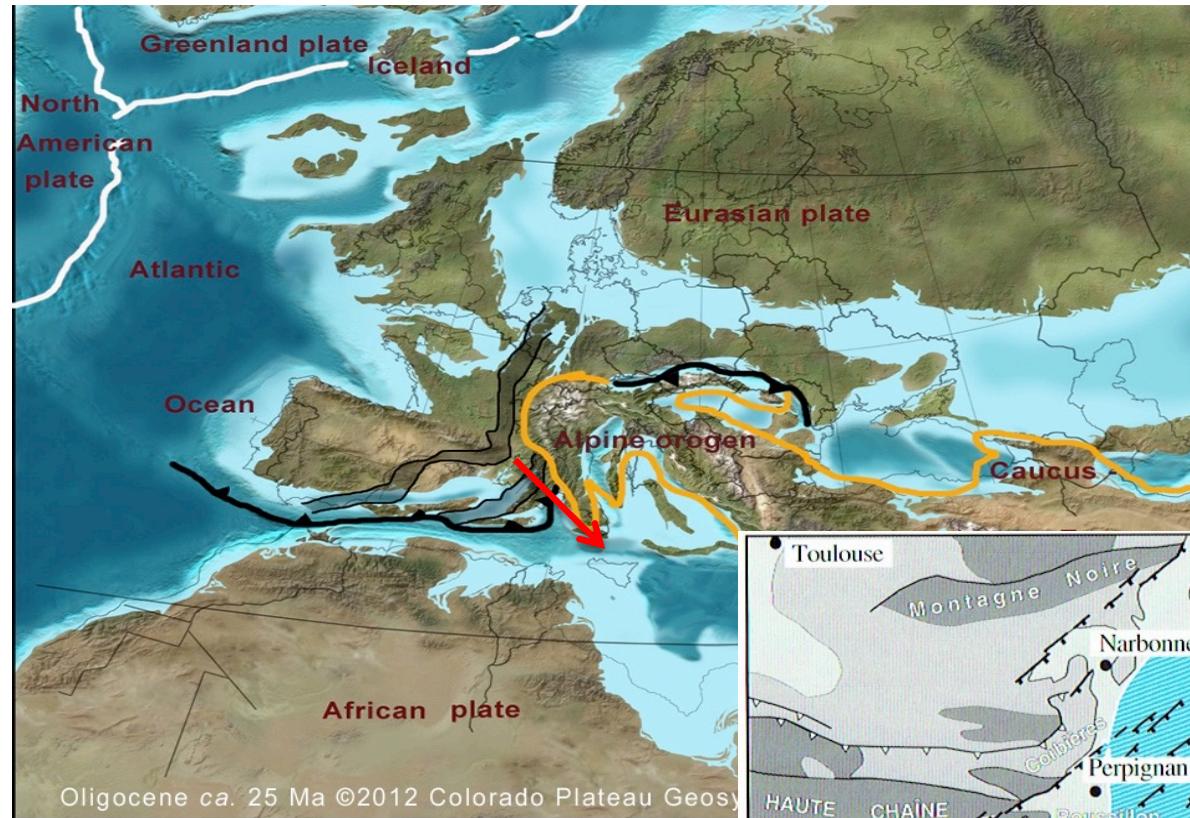
Formation des Pyrénées



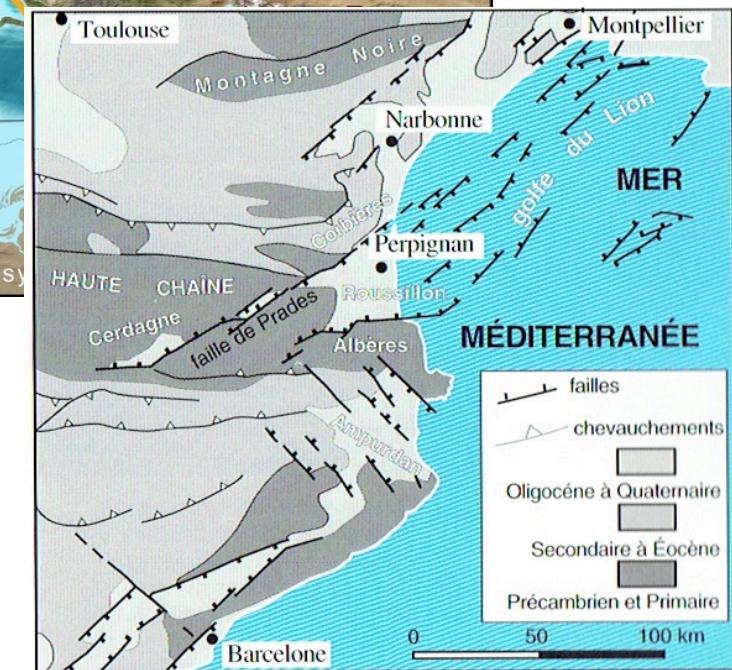
→ Plis, failles, fractures dans les séries Jurassiques

□ La géologie

Quaternaire	
Tertiaire Cenozoïque	Pliocène Miocène Oligocène Eocène Paléocène
Secondaire Mésozoïque	Crétacé Jurassique Trias
Primaire Paléozoïque	Permien Carbonifère Dévonien Silurien Dévonien Cambrien
Précambrien	570

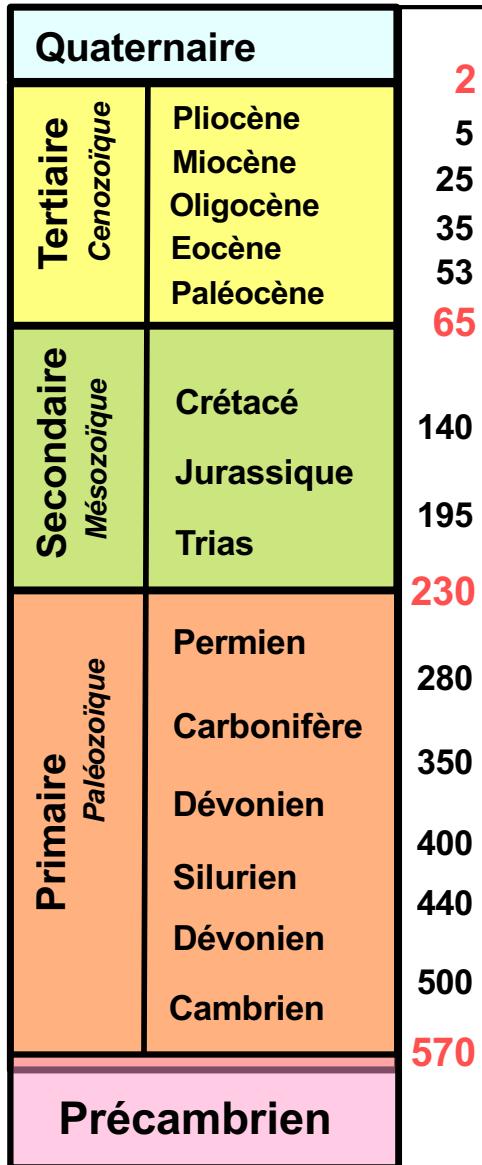


Ouverture du Golfe du Lion



→ Failles (NE-SW), fractures

□ La géologie



Transgression : Dépôts marins plutôt argileux

□ La géologie

Quaternaire		
Tertiaire	Cénozoïque	2
	Pliocène	5
	Miocène	25
	Oligocène	35
	Eocène	53
	Paléocène	65
Secondaire	Mésozoïque	140
	Crétacé	195
	Jurassique	230
	Trias	280
Primaire	Paléozoïque	350
	Permien	400
	Carbonifère	440
	Dévonien	480
	Silurien	520
	Dévonien	560
	Cambrien	570
Précambrien		



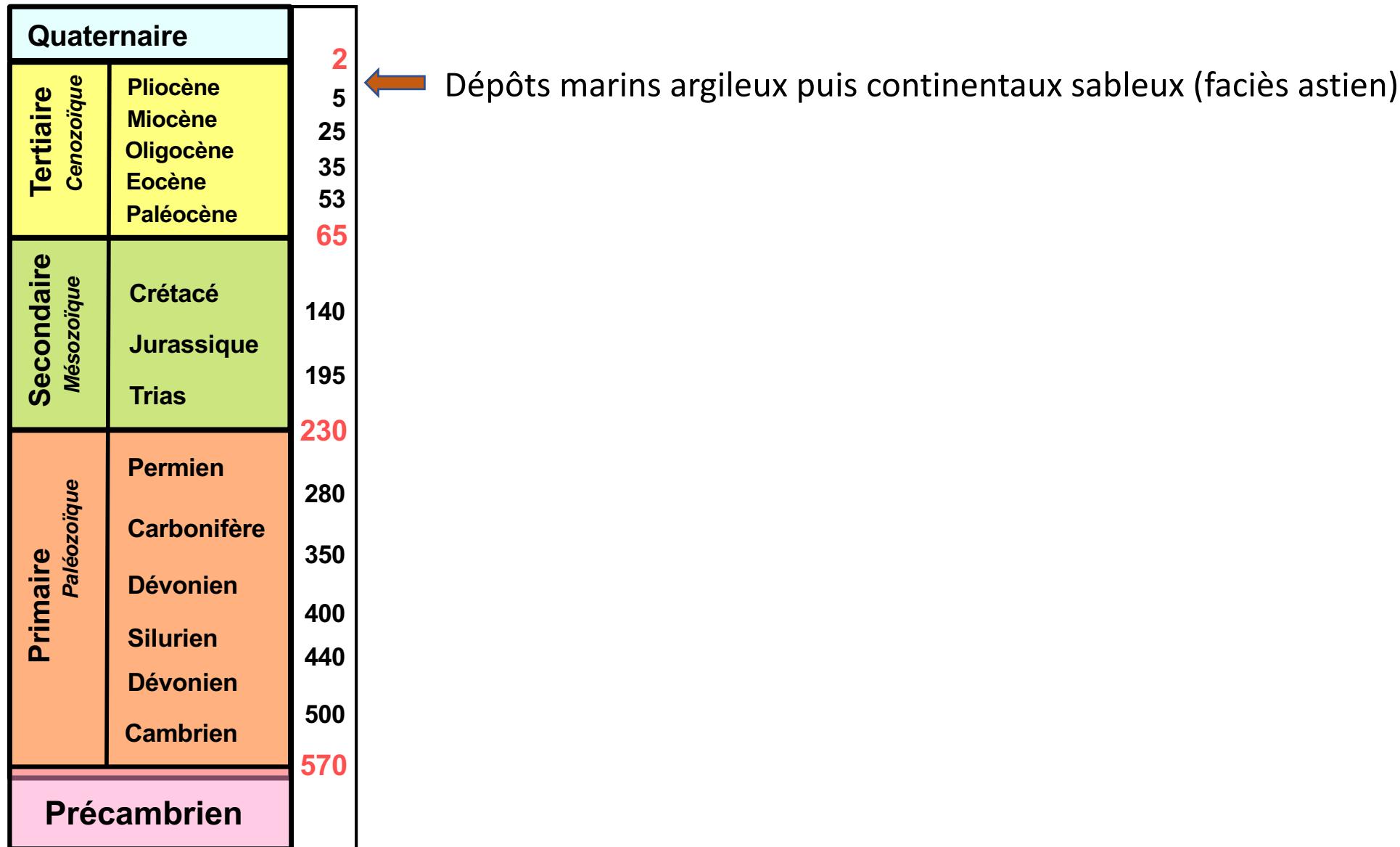
Fin Miocène : forte régression



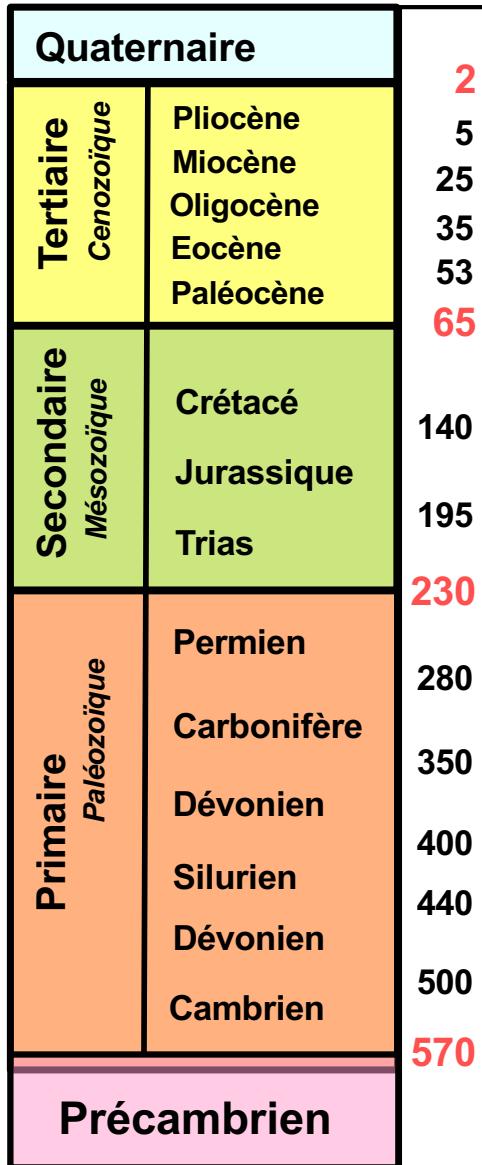
Episode d'assèchement Messinien autour de -6 Ma

→ Creusement des vallées et karstification profonde

□ La géologie

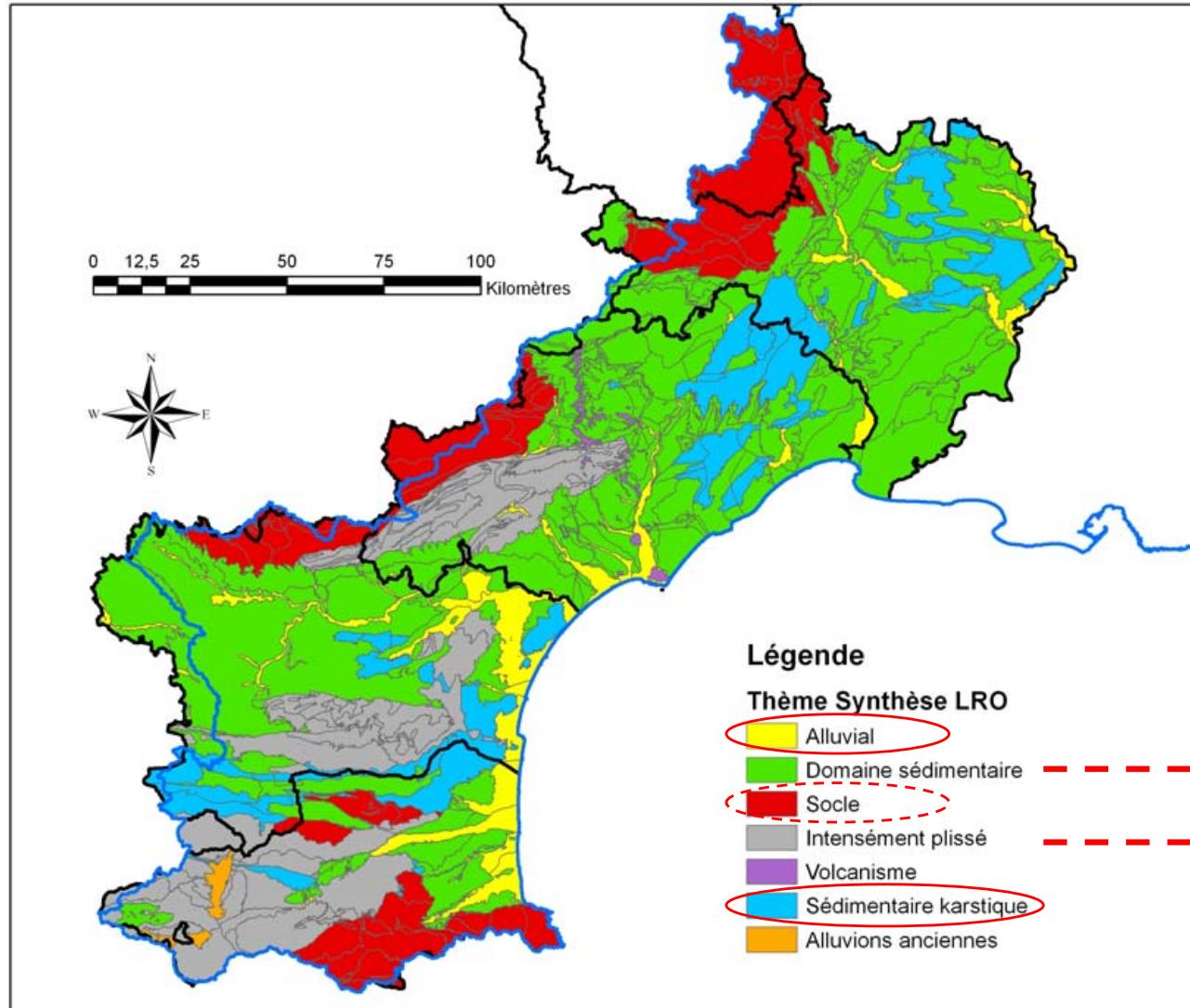


□ La géologie



Creusement des vallées actuelles et dépôt d'alluvions

□ L'Hydrogéologie



Histoire géologique riche
→ hydrogéologie régionale variée ... et complexe !

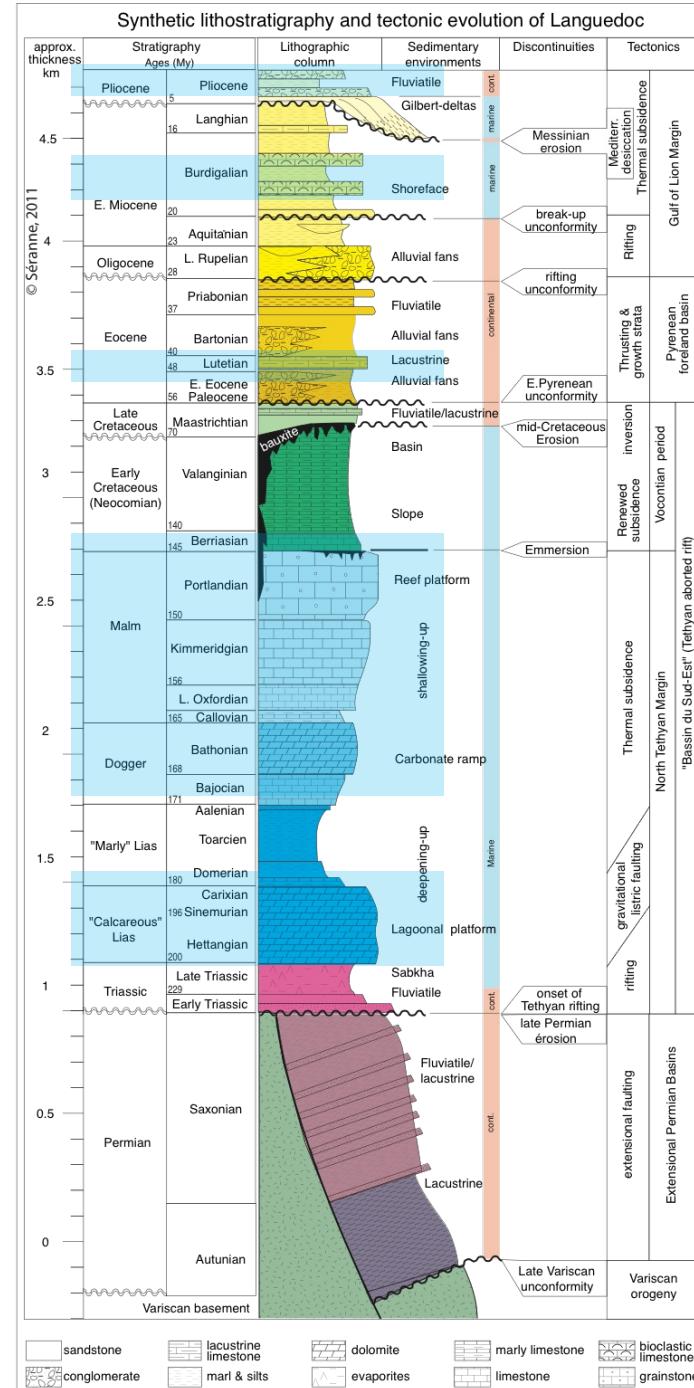
Aquifère :

Domaine souterrain perméable et continu qui constitue un gisement d'eau souterraine.

- Astien, Pliocène Roussillon...
- Monts d'Aude, Conflents, Avant-Monts..

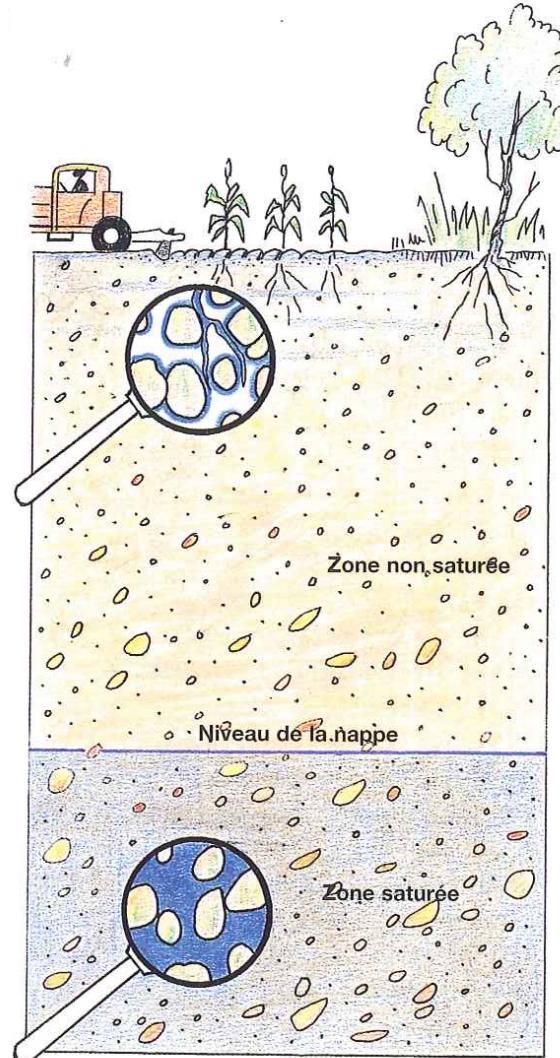
□ L'Hydrogéologie

Colonne stratigraphique synthétique du Languedoc-Roussillon (Seranne, 1999)



□ Principaux types d'aquifères

- Aquifères poreux → Nappe Villafranchienne, Astienne, Plio-quaternaire Roussillon...

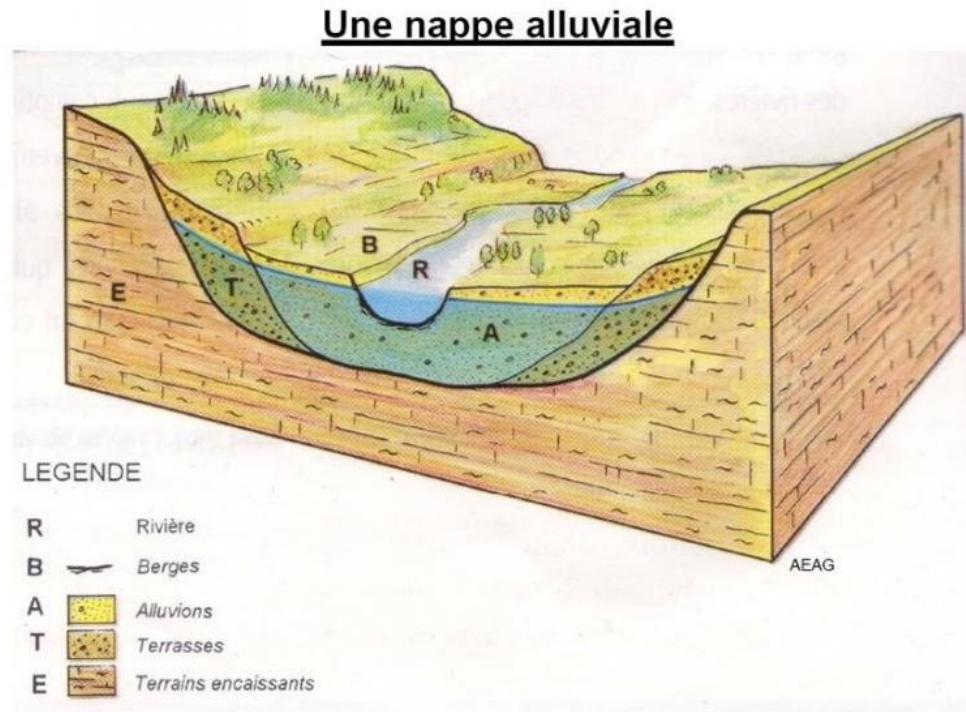


(Collin, 2004)

→ Débits moyens à bons ($50 \text{ m}^3/\text{h}$)

□ Principaux types d'aquifères

- Aquifères poreux : alluvial (Hérault, Orb, Aude, Têt, Tech..)



*Représentation des relations nappe-rivière
(Agence de l'Eau Adour Garonne)*

Recharge = pluie + cours d'eau (crues)



→ Débits bons à très élevés ($>100 \text{ m}^3/\text{h}$)

□ Principaux types d'aquifères

- Aquifère fissuré/fracturé/ de socle : Aigoual-Lingas, Montagne Noire, Quérigut-Millas, ZA Pyrénées..

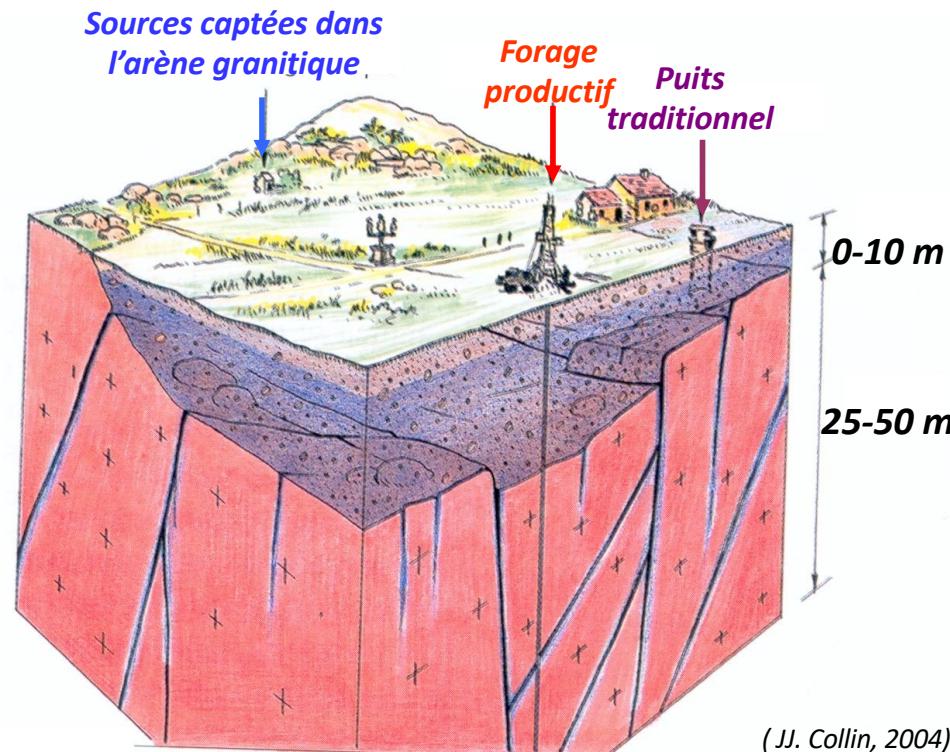
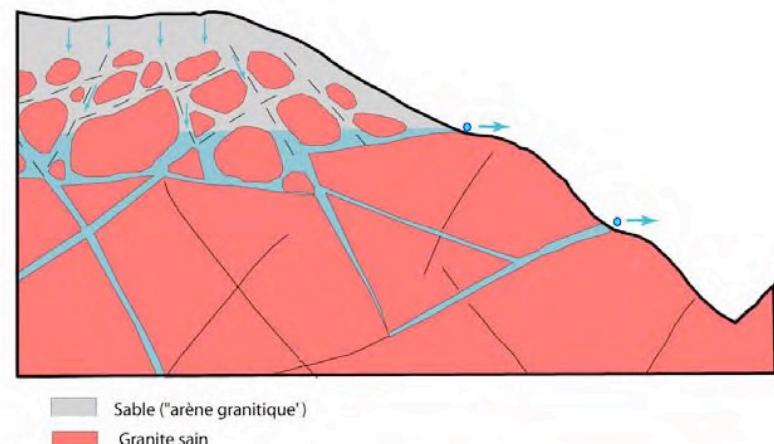
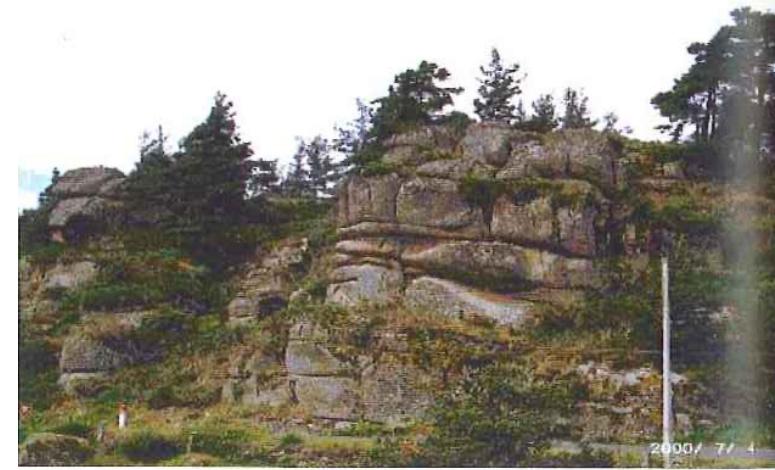


Schéma conceptuel du milieu fissuré



→ Débits faibles à moyens ($>10 \text{ m}^3/\text{h}$)

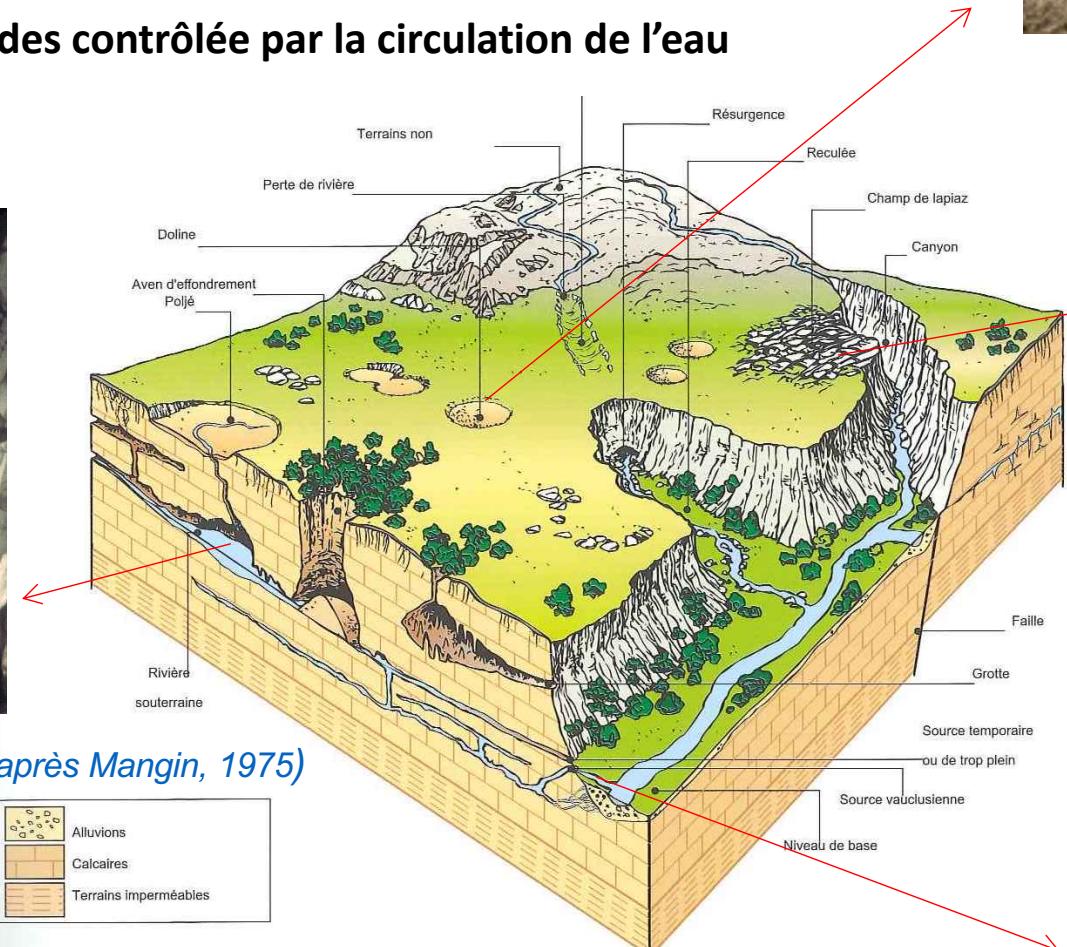
□ Principaux types d'aquifères

- Aquifère karstique : Causses, Corbières, Minervois, Lez-Mosson, Garrigues, Pli-Montpellier, Pays de Sault...

⇒ Organisation des vides contrôlée par la circulation de l'eau



Rivière souterraine



(d'après Mangin, 1975)



Doline



Lapiaz

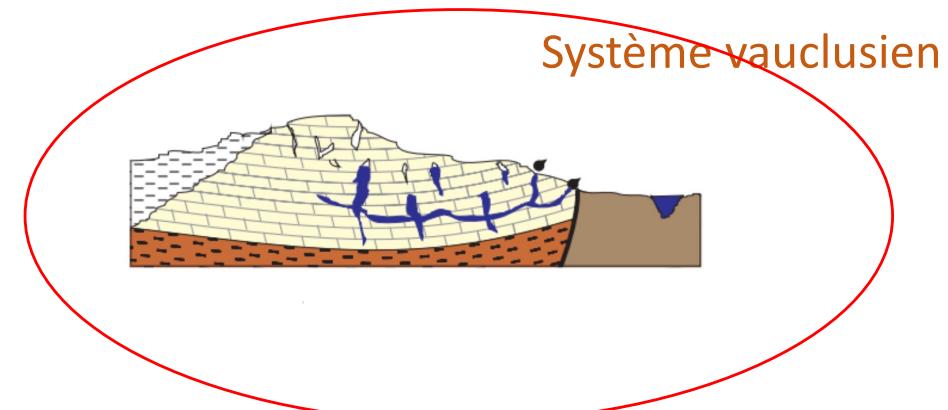
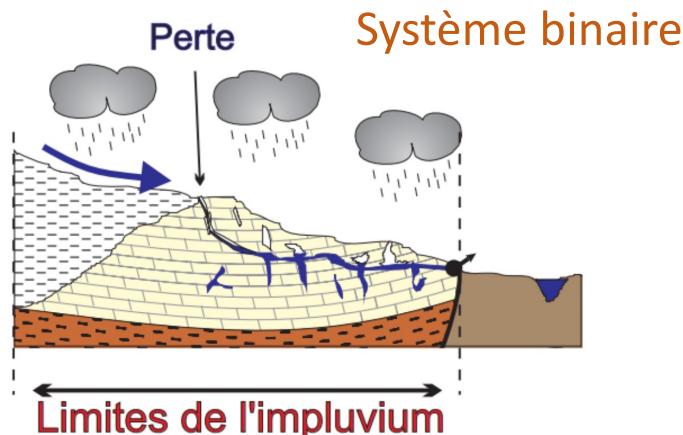
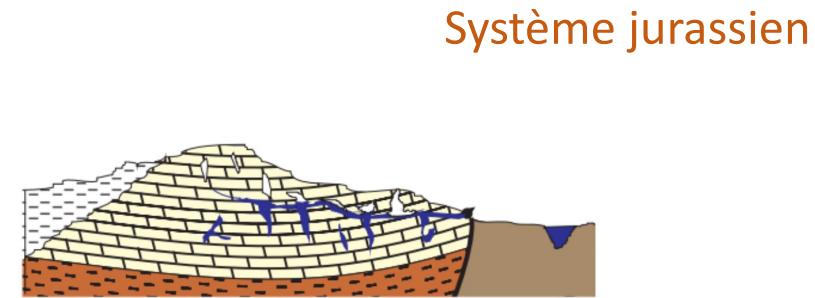
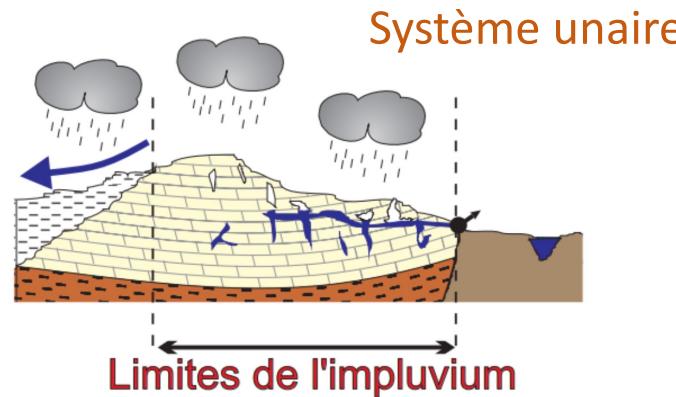


Source du Lez = 2 m³/s

→ Débits variables à très élevés (>>100 m³/h)

□ Principaux types d'aquifères

- Aquifère karstique : Causses, Corbières, Minervois, Lez-Mosson, Garrigues, Pli-Montpellier, Pays de Sault...

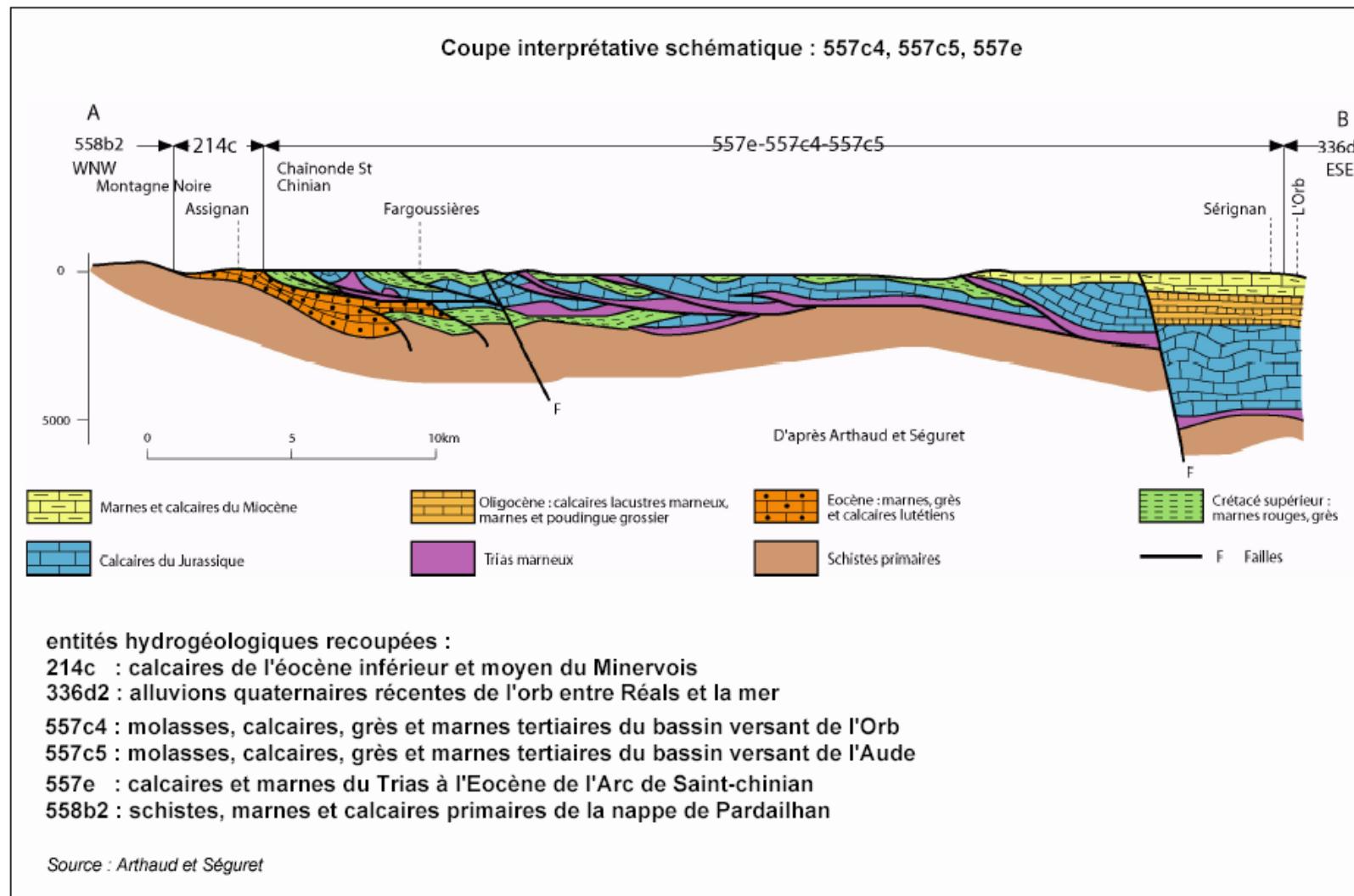


Deux modes de recharge
(Marsaud, 1997)

Deux types d'organisation et de
fonctionnement (Marsaud, 1997)

□ Principaux types d'aquifères

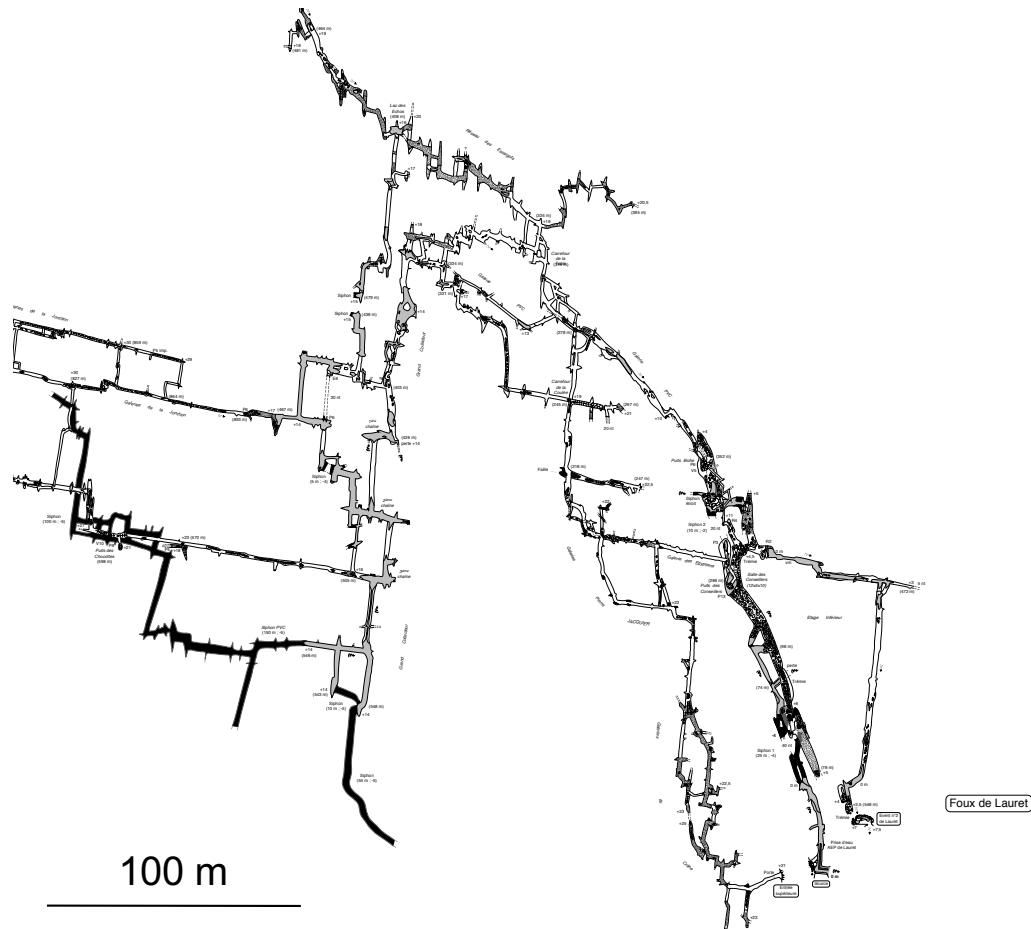
- Aquifère karstique sous-couverture : Biterrois, Vallée de l'Hérault...



Coupe géologique secteur de Béziers (Atlas Hydrogéologique, BRGM 2006)

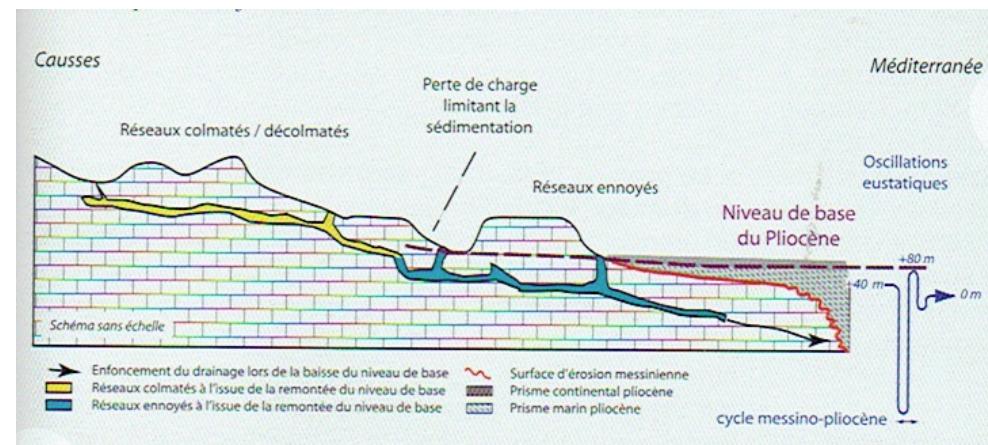
□ Principaux types d'aquifères

■ Aquifère karstique

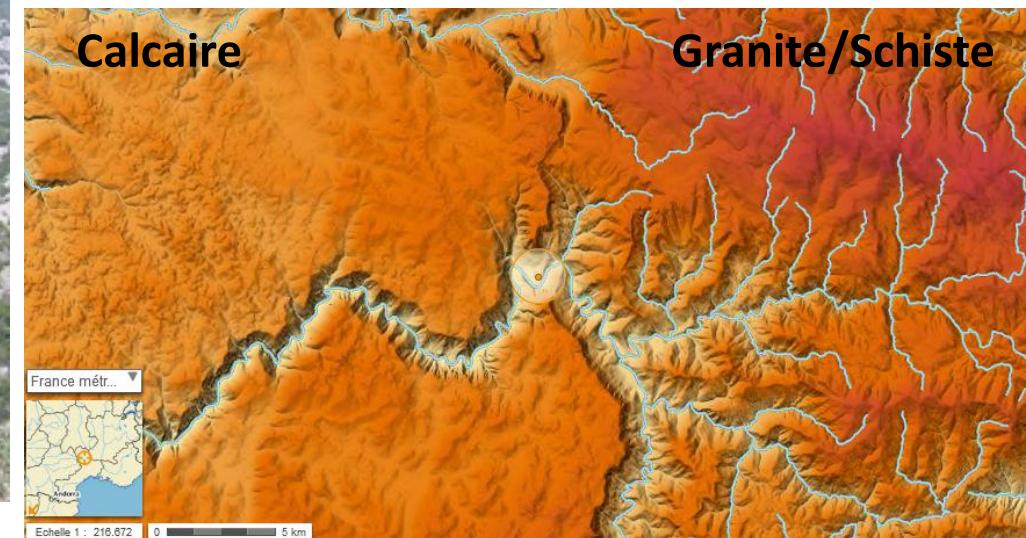


Extrait de la topographie spéléo de la Foux de Lauret.

Modifié d'après Boinet et Paloc 2002*



Creusement puis colmatage des réseaux karstiques sur la marge du Golfe du Lion (Camus, 2010)



Faible épaisseur de sol → Forte capacité d'infiltration

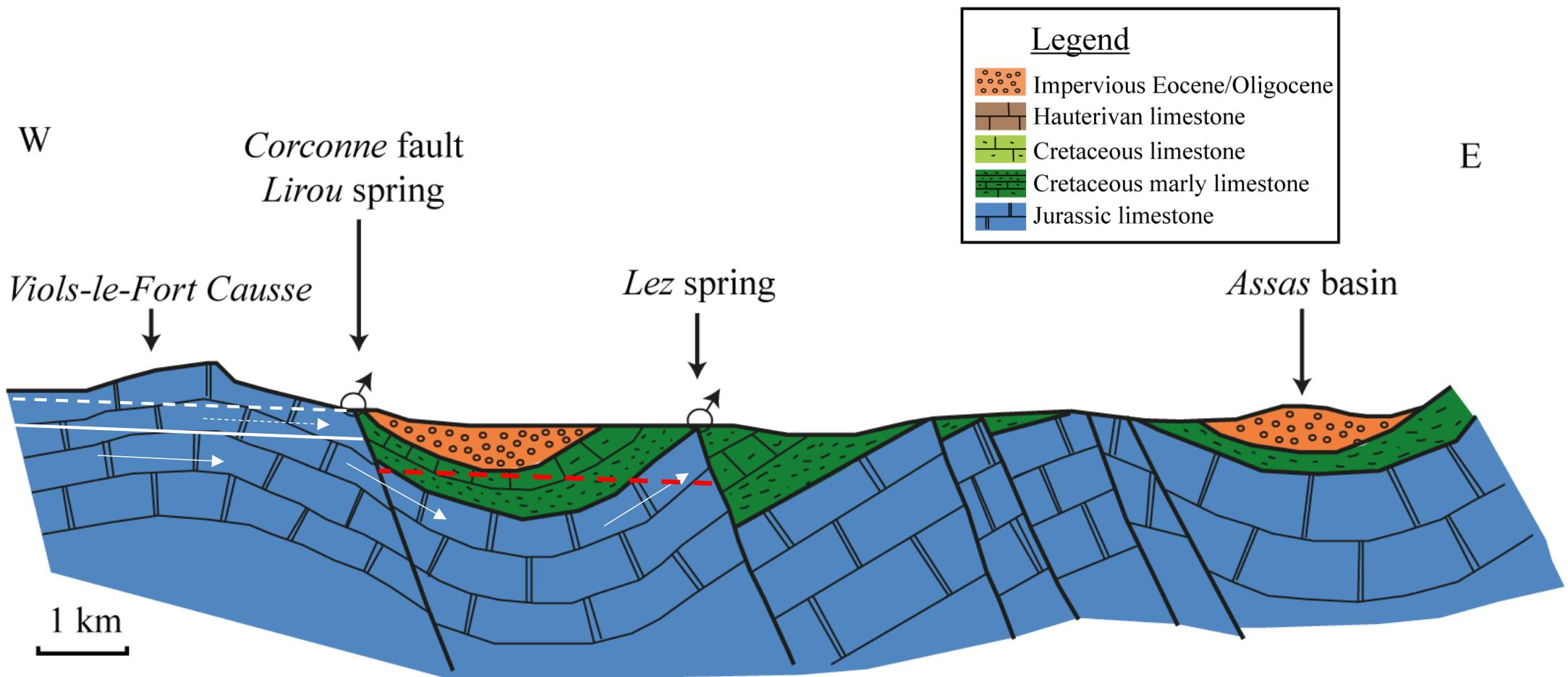
Ressource renouvelable à court terme

Capacité de stockage profonde → Réserves pouvant être considérables

- Aquifères « vulnérables » ... mais élimination rapide des pollutions accidentnelles
- sur-exploitation saisonnière possible (gestion active)

Reliefs souvent accidentés → Peu anthroposés

Structure et fonctionnement complexe → souvent sous-exploités



Coupe du système Lez (Kong a Siou, 2011)

— Niveau piézométrique (gestion active)

- **Les enjeux régionaux socio-économiques et environnementaux sont très largement liés aux eaux souterraines**
- **Les pressions climatiques et anthropiques sont réelles sur la ressource en eau régionale**
- **Les perturbations du cycle hydrologique se poursuivront durant tout le XXIème siècle à un rythme qui dépendra d'une réponse mondialisée au CC**
- **La recharge des nappes d'eau souterraine est menacée par le CC**
- **La région dispose de nombreux aquifères de natures variées qui sont un atout régional majeur (karst en particulier)**
- **L'amélioration des connaissances hydro(géo)logiques doit se renforcer : exploration, suivi, modélisation.. dans une dynamique partenariale Collectivités-Etablissements Publics-Universités**
- **La gestion-préservation des eaux et les politiques d'adaptation au CC doivent être au centre des Politiques Publiques et d'aménagement des territoires**

Bonnes balades à travers les Causses, le Caroux, les Albères, la Clape, les Garrigues, le Minervois....



Foux de la Vis en moyennes eaux et en crue

