

Aquifères karstiques: Enjeux, **globaux, locaux, transverses**

Guillaume Bertrand, Hydrogéologue, Laboratoire Chrono-
environnement, Université de Franche-Comté

guillaume.bertrand2@univ-fcomte.fr

☐ Impacts changements climatiques sur hydro-écosystèmes

☐ Processus et feedbacks paléoclim. / écol. (Holocène, Am. Du Sud)

**2) Master 2- Climat
PhD Hydrogéol.
(2004-2009)**

- ☐ Transferts chimiques lors de la formation des nuages (Rainout)
- ☐ Précipitations (Washout)

**1) Licence-Maîtrise Bio/Eco
(2000-2004)**

- ☐ Microbiologie
- ☐ Génétique
- ☐ Taxonomie
- ☐ Biogéoch.
- ☐ Ecologie aq.
- ☐ Physiologie
- ☐ Hydro-géomorphologie
- ☐ Cartographie
- ☐ Géostatistiques
- ☐ Ecosystèmes

**5) Postdoc 2 / Prof inv.
2012-2015 / 2017**

- ☐ Gestion/Management Hydrosystèmes/ Aspect socio-environnementaux

**6) MC UFC
(depuis 2017)**

- ☐ Infiltration
- ☐ Transferts sol

☐ Recharge

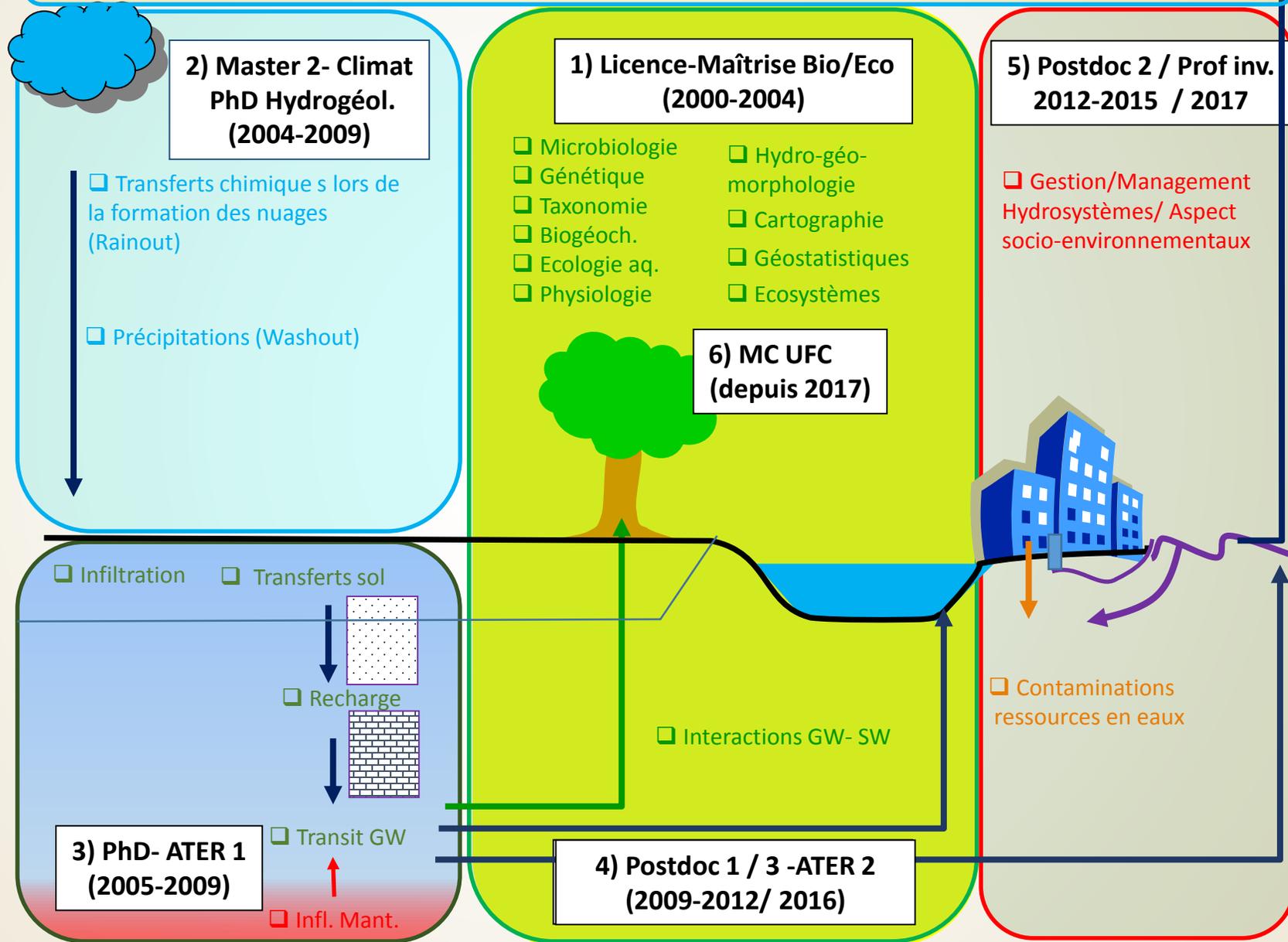
**3) PhD- ATER 1
(2005-2009)**

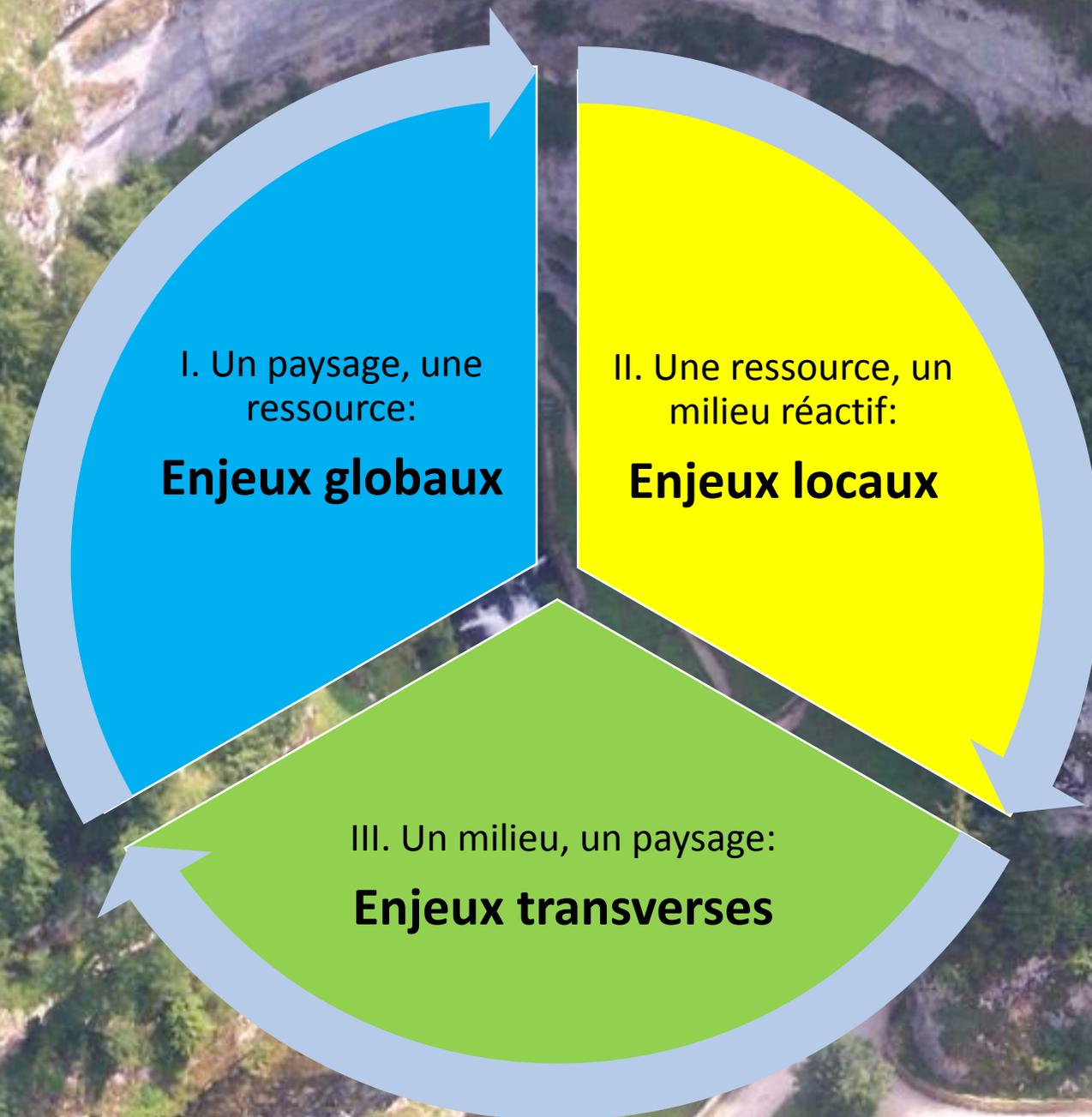
- ☐ Transit GW
- ☐ Infl. Mant.

☐ Interactions GW- SW

**4) Postdoc 1 / 3 -ATER 2
(2009-2012/ 2016)**

- ☐ Contaminations ressources en eaux





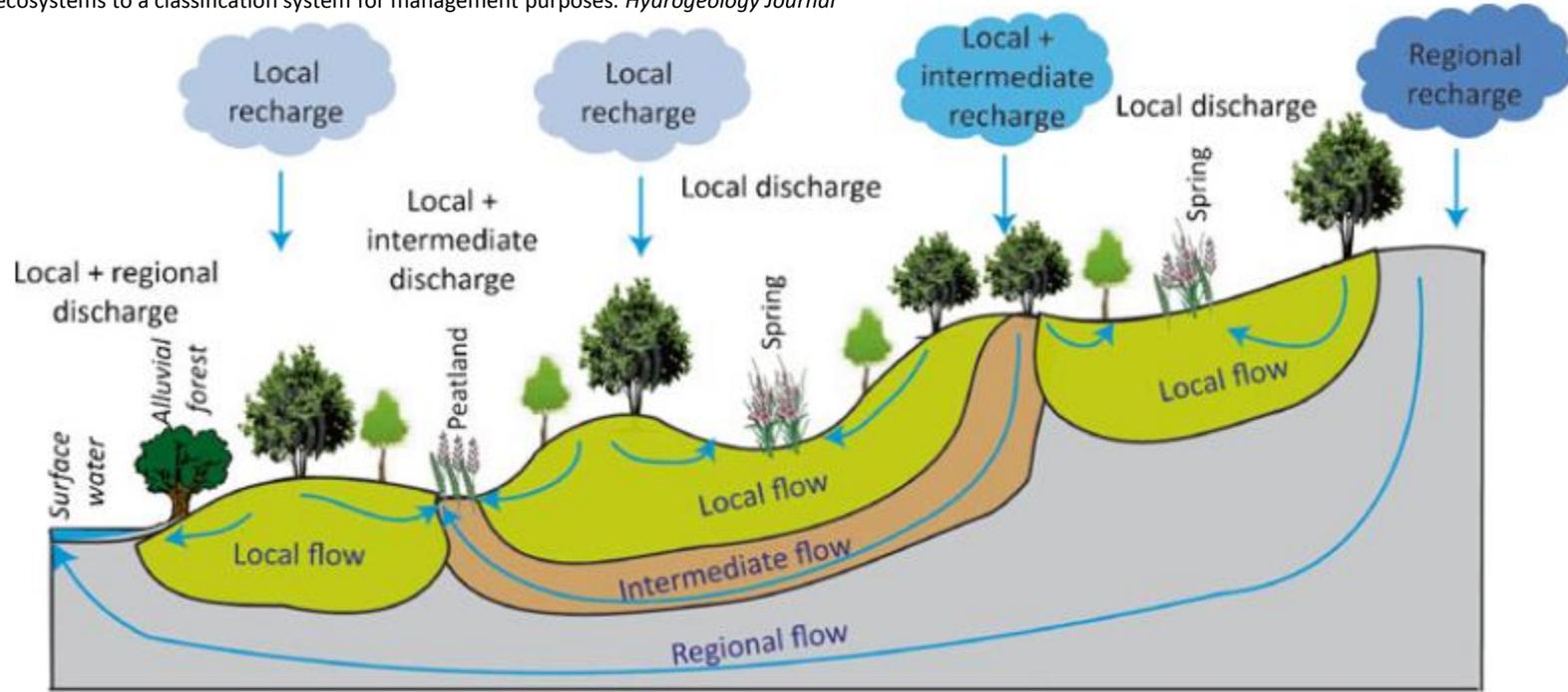
Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses

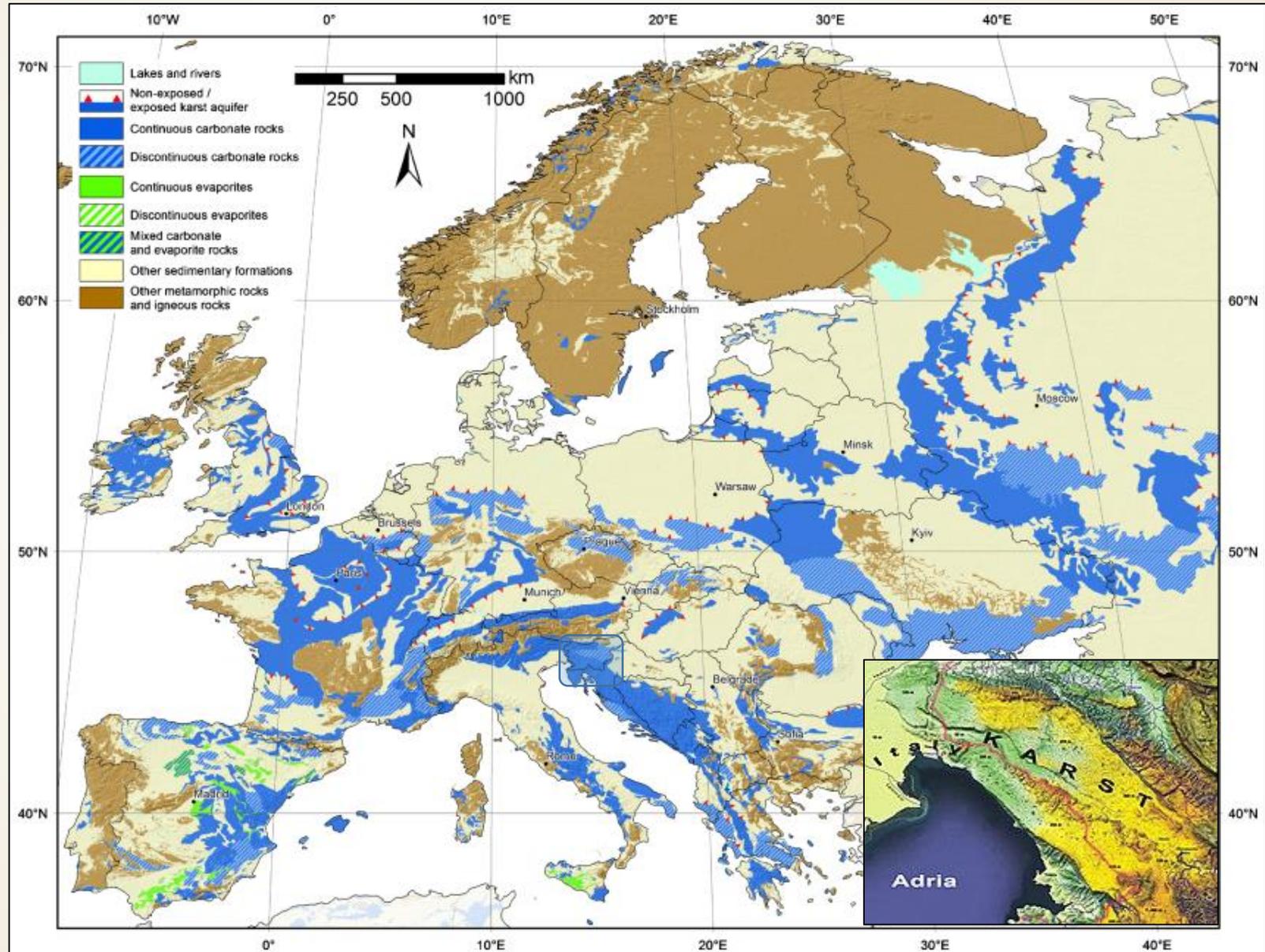
Recharge

Bertrand G., Goldscheider N., Gobat J-M., Hunkeler D. (2012). Review: from multi-scale conceptualization of groundwater-dependent ecosystems to a classification system for management purposes. *Hydrogeology Journal*

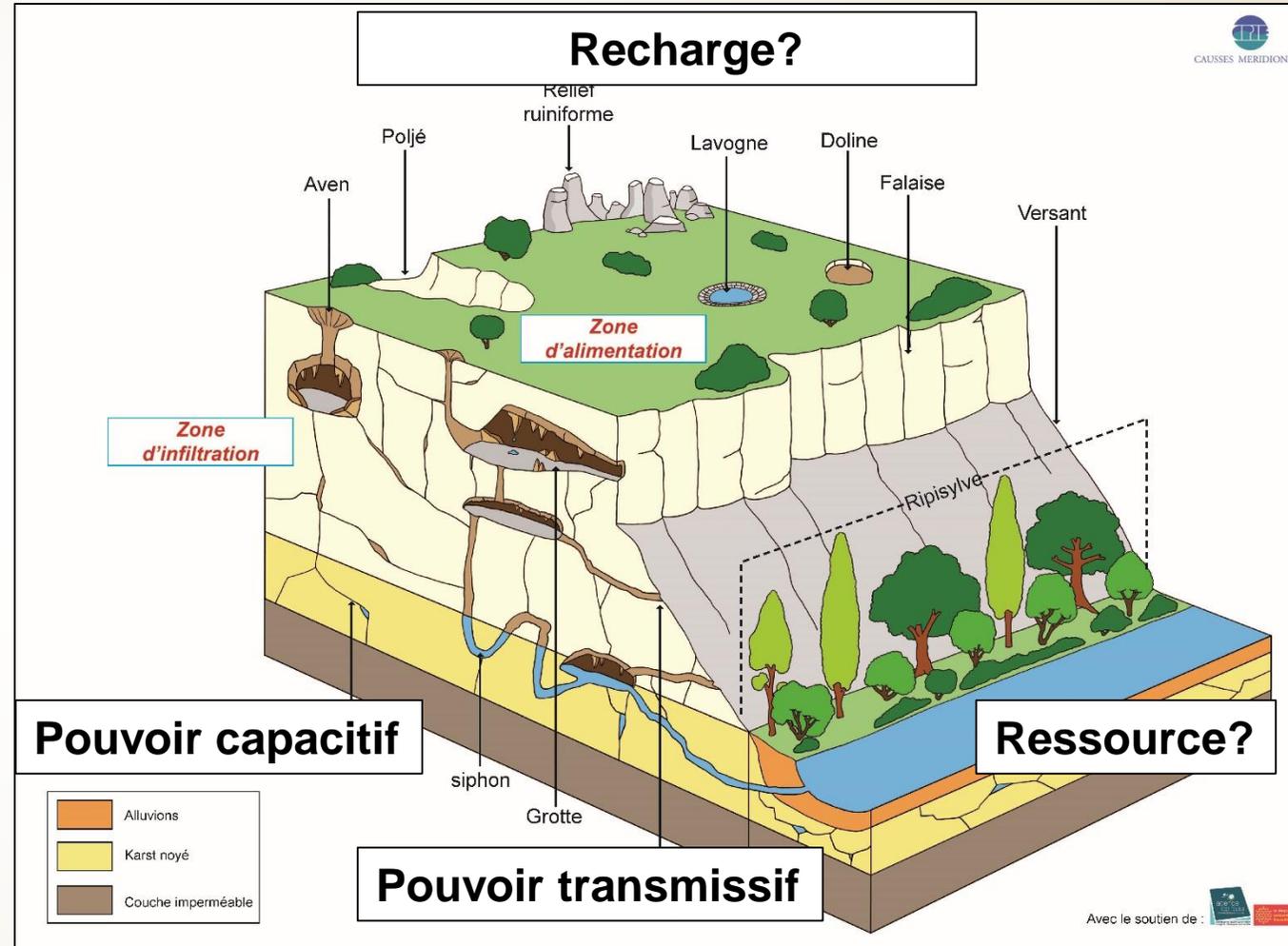
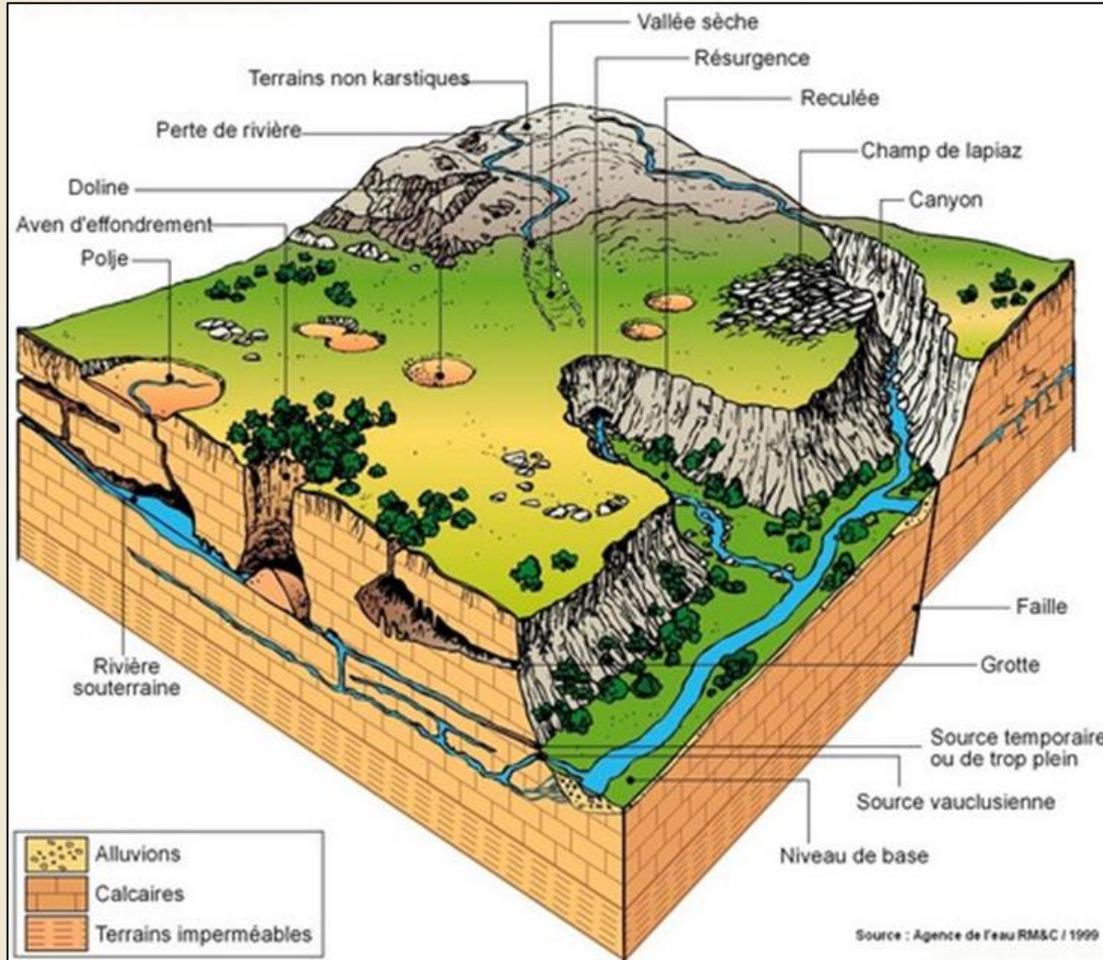


Transferts



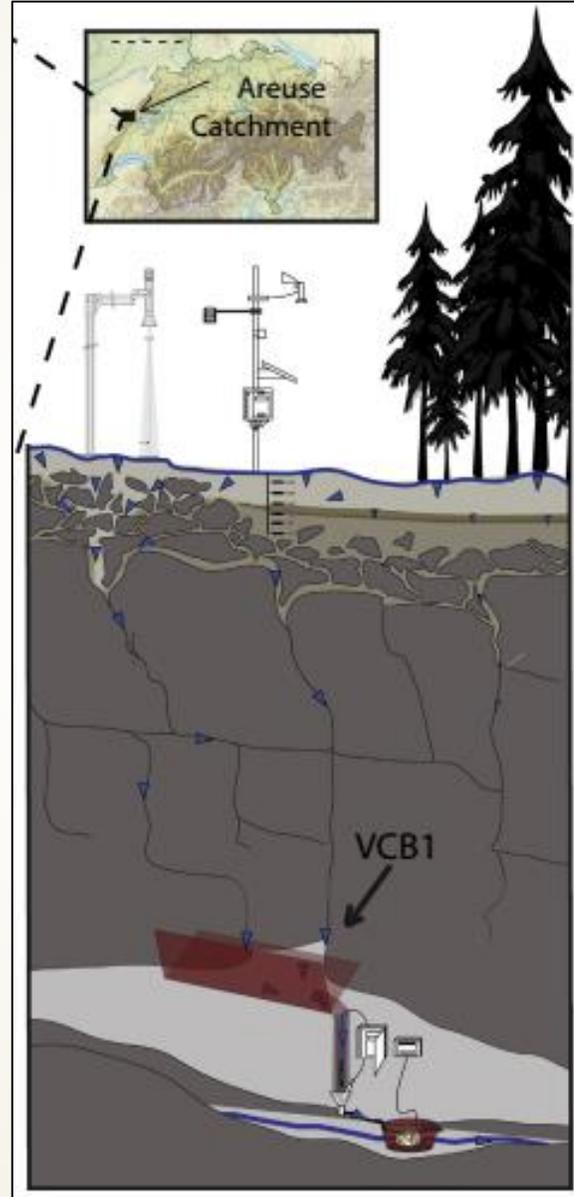
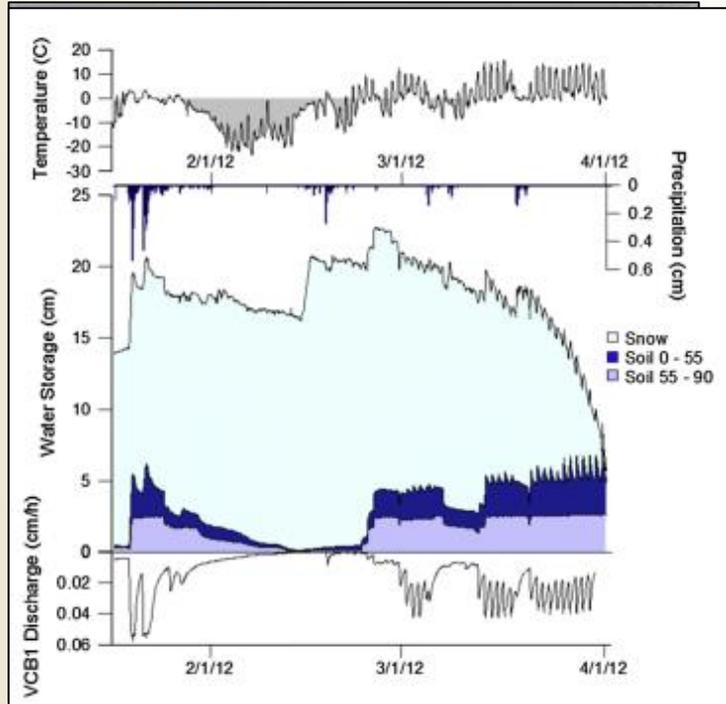


□ 20–25% de la population globale depend de la ressource karstique



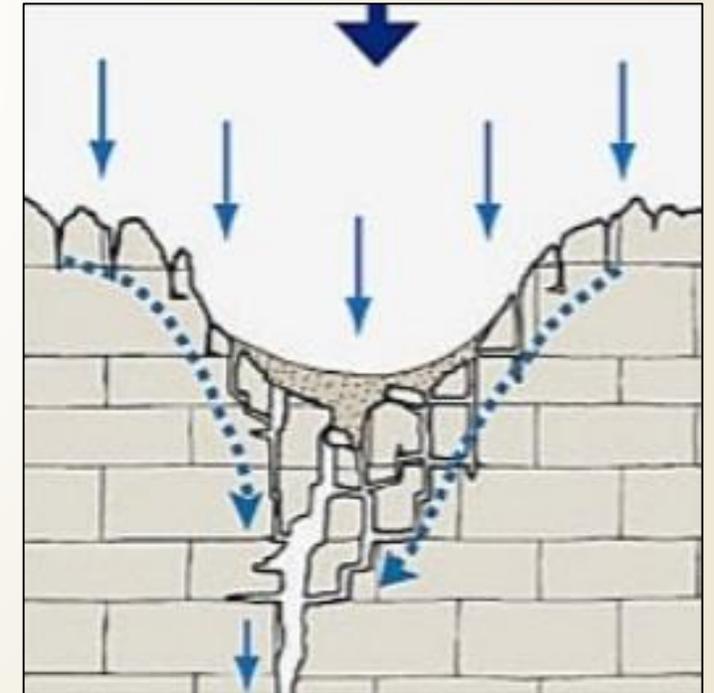
Recharge diffuse après
infiltration

Recharge retardée après fonte du
manteaux neigeux



Meeks and Hunkeler., 2015, Journal of Hydrology

Recharge concentrée après
ruissellement

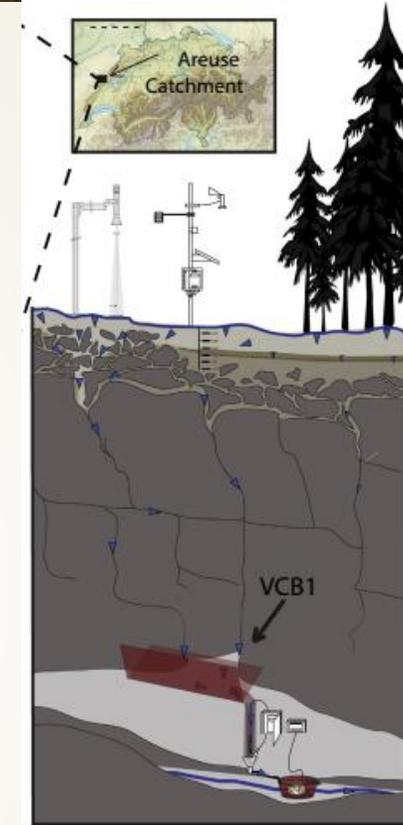


Recharge/ P importants

- >> **L'eau** se fait **rare en surface**
- >> peu de centres urbains sur les plateaux
- >> **Difficile localisation de l'eau** dans le sous-sol a partir de la surface, **recherche d'eau fastidieuse**, forages profonds

Circulation rapide (cavités, conduites)

- >> **Sensibles aux crues/sécheresse**, => crues ~ pièges de spéléologues
- >> **Sensibles aux apports de surfaces** : Qualité de l'eau très variable (orage synonyme d'arrivées d'eaux turbides)
- >> Filtration peu efficace, >> problèmes de qualités de l'eau (germes pathogènes, matières fécales, turbidité)
- >> **Gestion à court-terme** (de crise)



Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses

Recharge/ P importants

Circulation rapide (cavités, conduites)

Circulation lente (matrice)

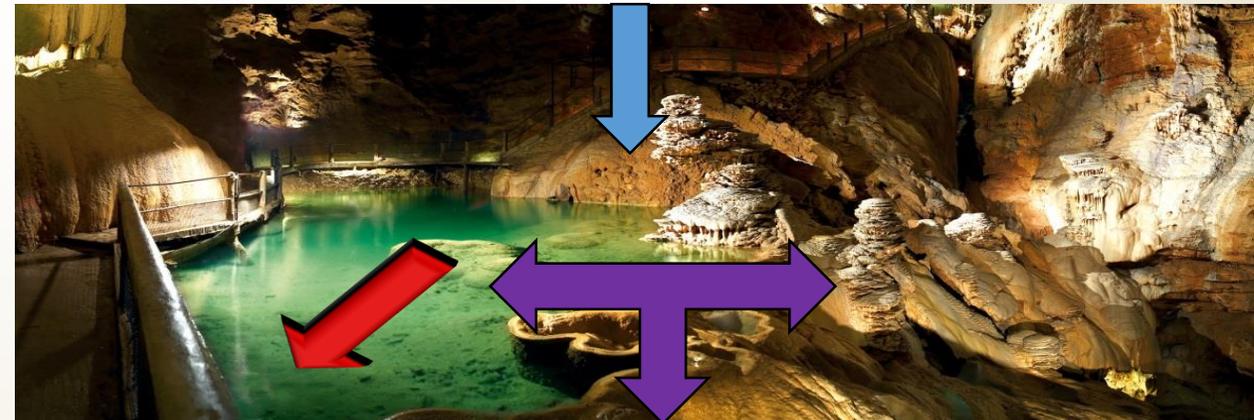
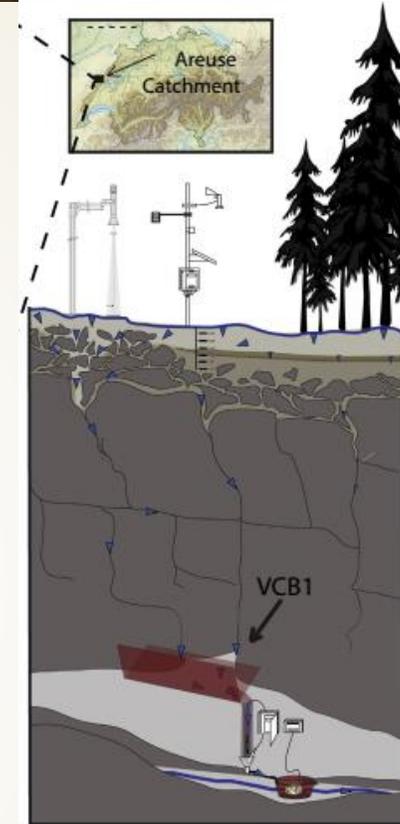
>> Inerties / vis-à-vis des processus hydrométéorologiques (pluie, ET)

>> Capacité de stockage (véritable réservoir)

>> filtration efficace, >> dégradation complète de la matière organique

>> Relargage lent d'éventuelles contaminations dissoutes

>> Gestion à long-terme



Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses

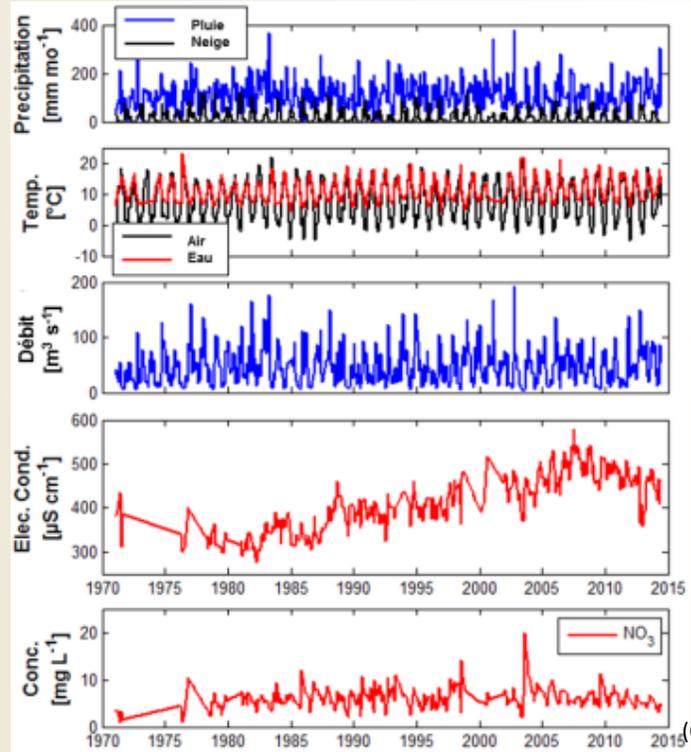
$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{n_{mat} D_{mat}}{b} \frac{\partial C_{mat}}{\partial y}$$

Variations du transport au cours du temps dans la conduite principale

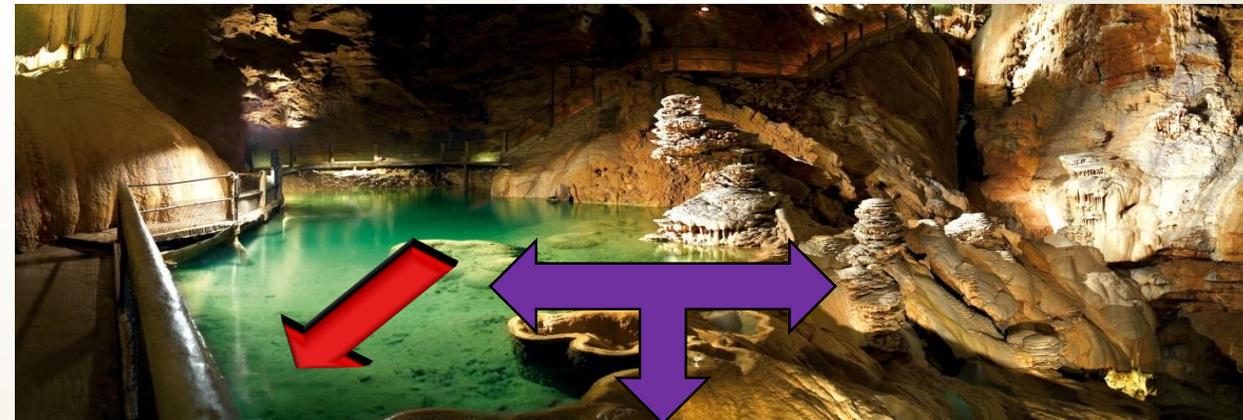
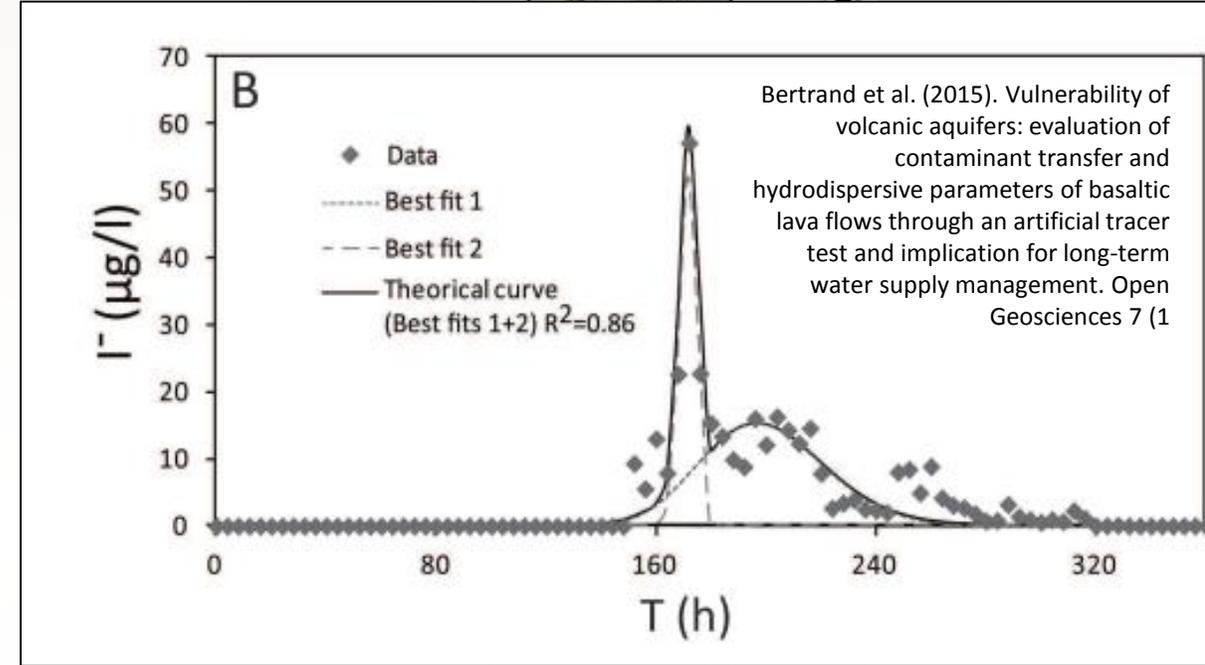
Transport « rapide » par déplacement de l'eau dans la conduite

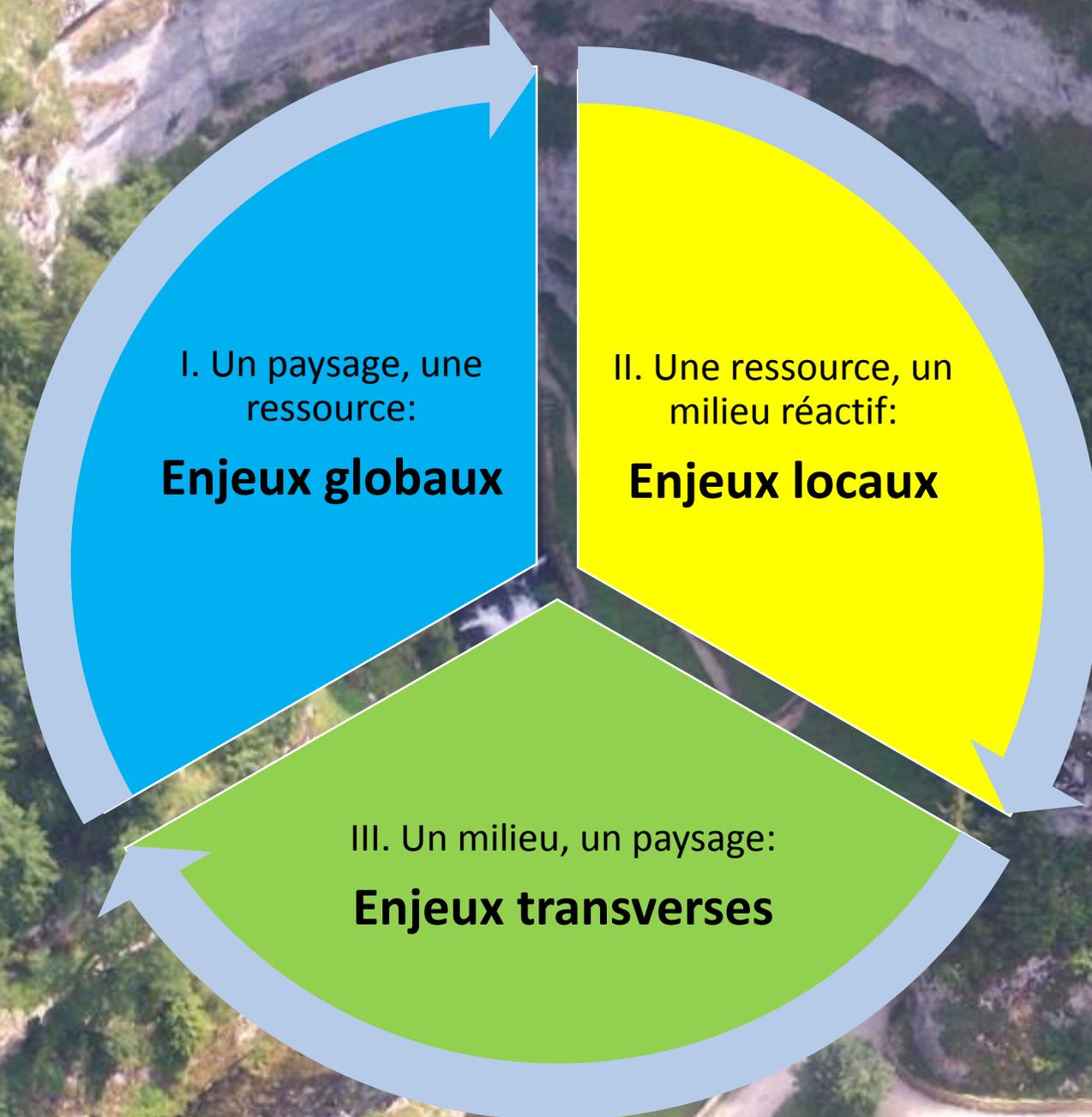
Transport « lent » par échanges avec la matrice

Maloszewski and Zuber (1985). J of Hydrology



(Charlier (2016))

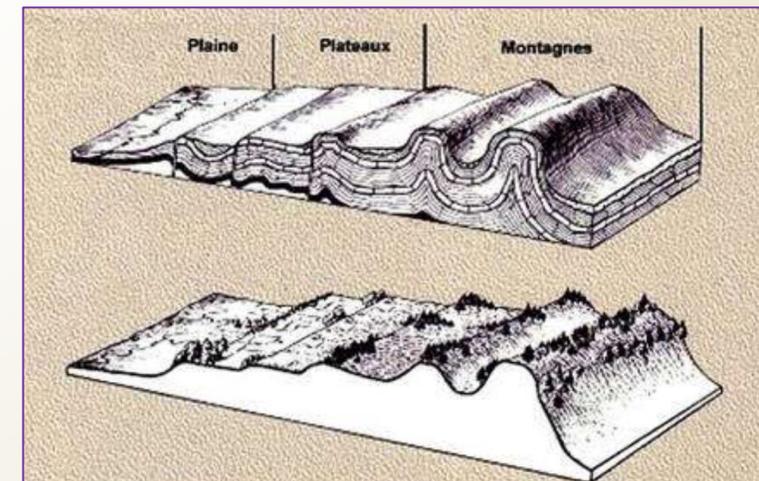
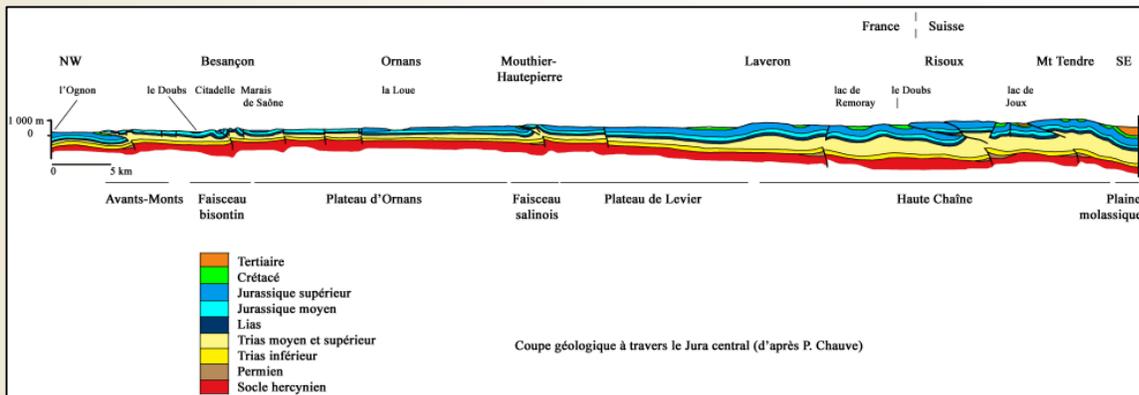
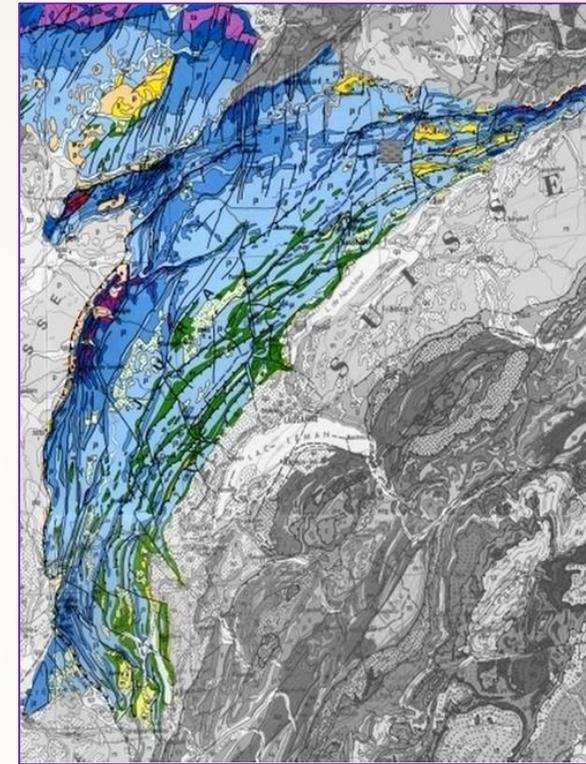
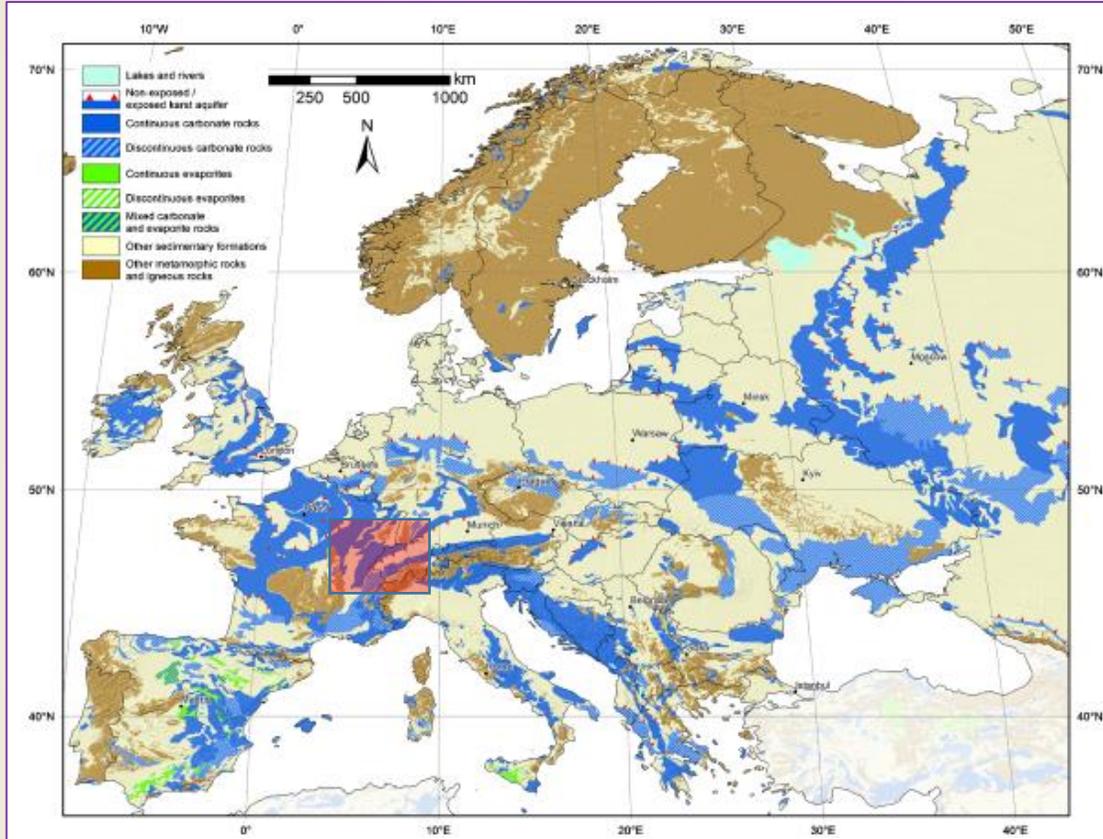




Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses



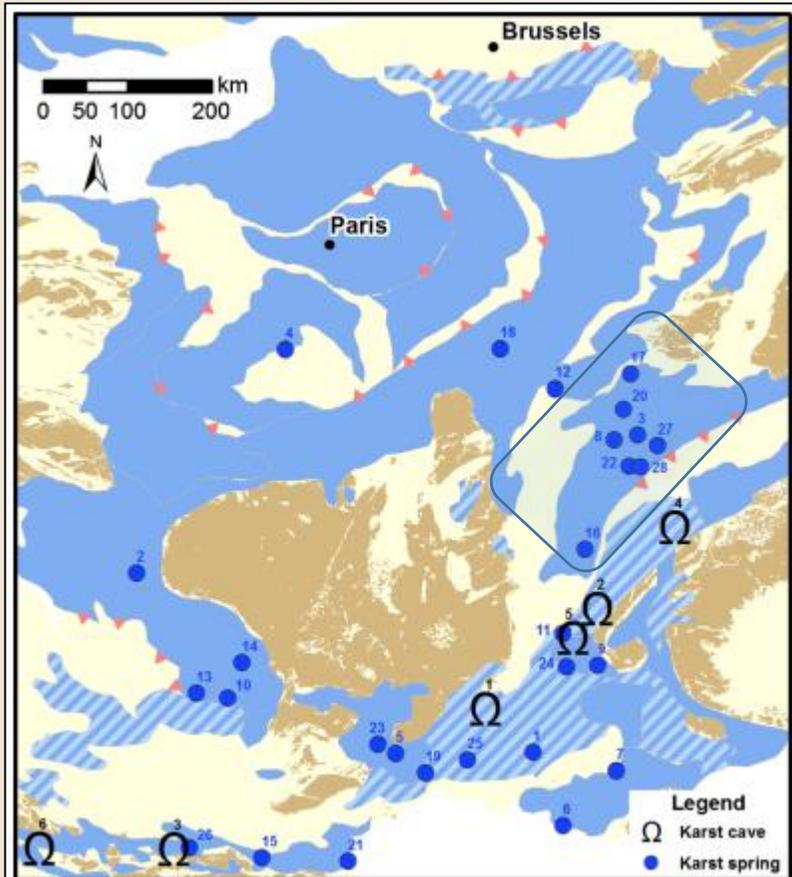
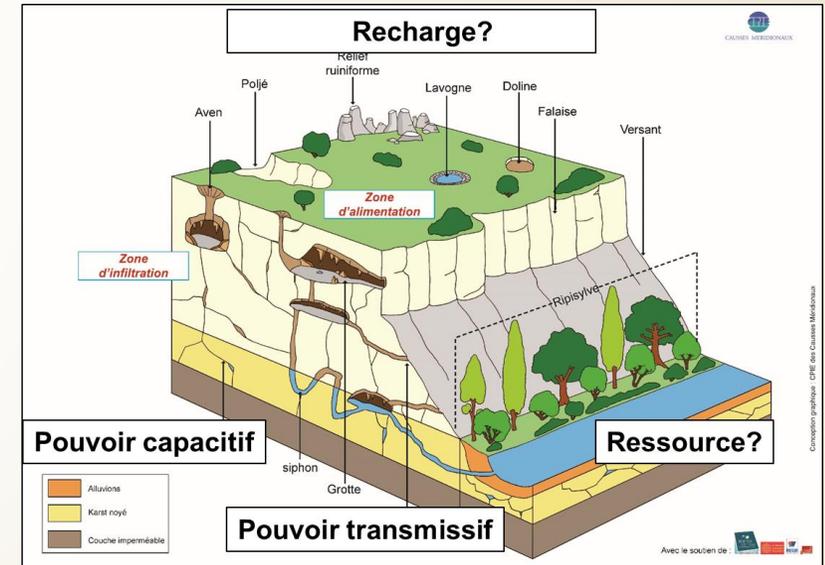


Fig. 8 Draft karst map of the example area (France) with presentation of selected springs and caves, which are summarized in Tables 3 and 4

Table 3 Summary of selected springs in the example area (France and neighboring regions), shown on the map in Fig. 8. Quantitative estimations for low-flow and high-flow discharge (m^3/s) are indicated

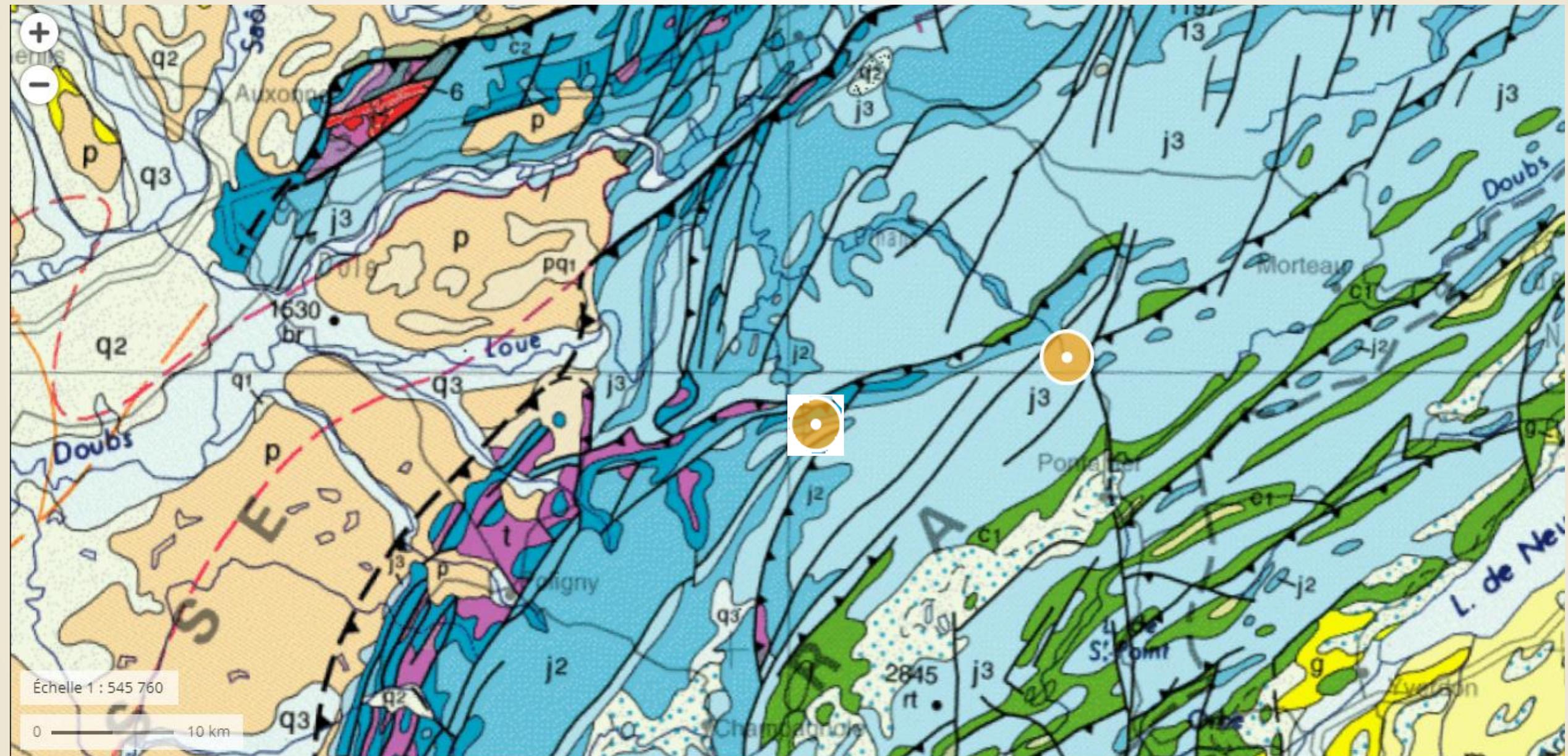
ID	Name of spring	Low [m^3/s]	High [m^3/s]
1	Vauchuse spring	4.0	150
2	Touvre spring	6.0	40
3	Loue spring	0.9	75
4	Bouillon spring	2.5	20
5	Foux de la Vis spring	1.2	245
6	Port-Miou submarine spring	3.0	50
7	Fontaine L'Evêque spring	2.3	19
8	Lison spring	0.4	91
9	Gillardes spring	3.0	60
10	Chartreux spring	1.0	50
11	Arbois spring	1.7	40
12	Bèze spring	0.9	25
13	Source Bleue and related springs	2.0	5
14	Ouyse spring	0.6	200
15	Fontestorbes spring	0.6	15
16	Groin spring	0.0	104
17	Font de Champdamoy spring	0.2	18
18	Doux spring	0.6	3
19	Lez spring	0.5	16
20	Arcier spring	0.2	10
21	Font Estramar spring	0.8	25
22	Doubs spring	0.2	19
23	Durzon spring	1.0	20
24	Archiane spring	0.1	21
25	Fontaine de Nimes spring	0.0	18
26	Aliou spring	0.0	32
27	Arcuse spring (Switzerland)	0.7	39
28	Orbe spring (Switzerland)	2.0	80



Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

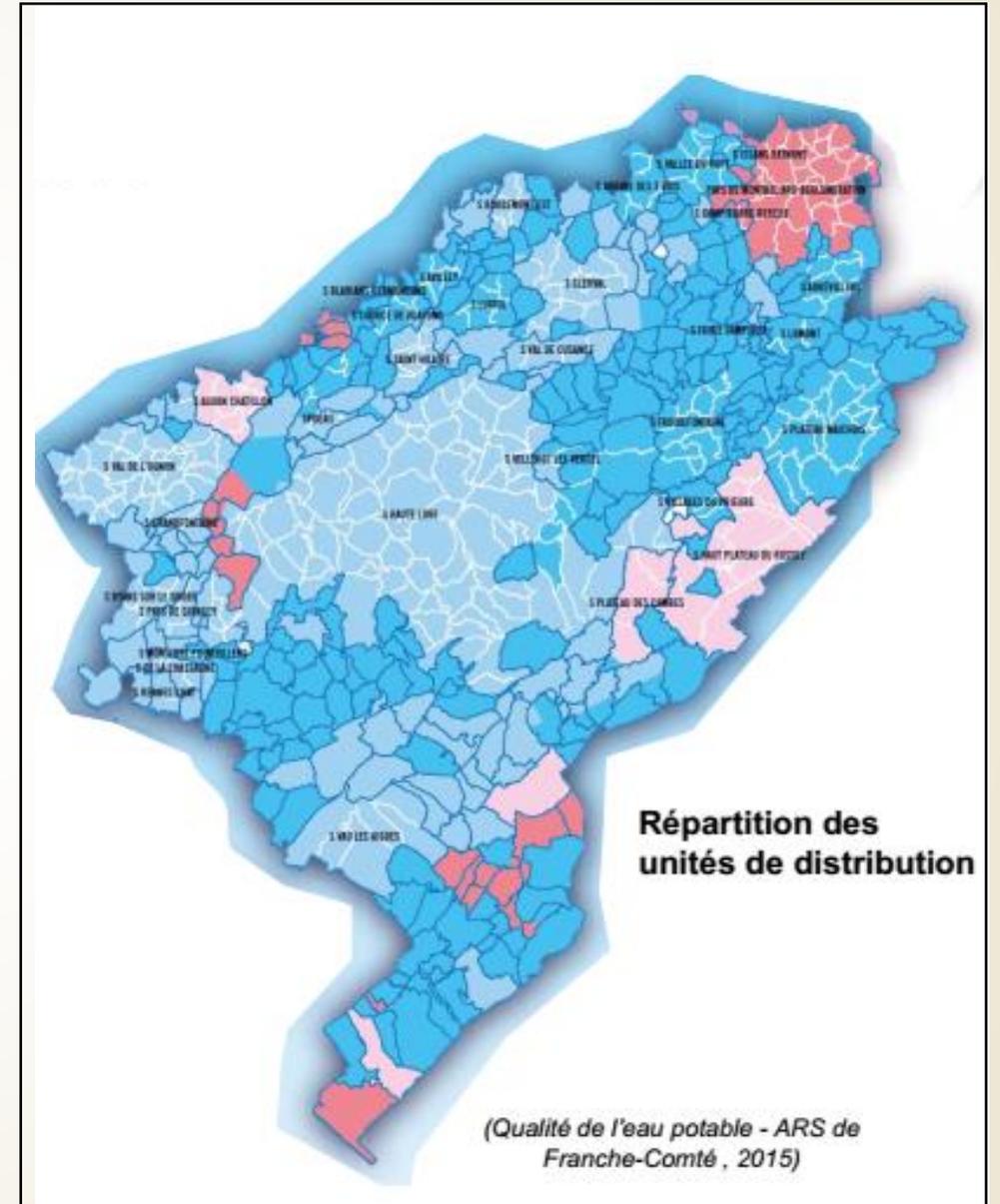
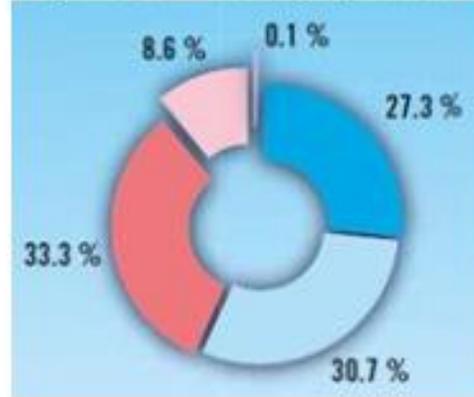
Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses



☐ 20–25% de la population globale depend de la ressource karstique

☐ 27% (au moins) de la population du Doubs depend de la ressource karstique

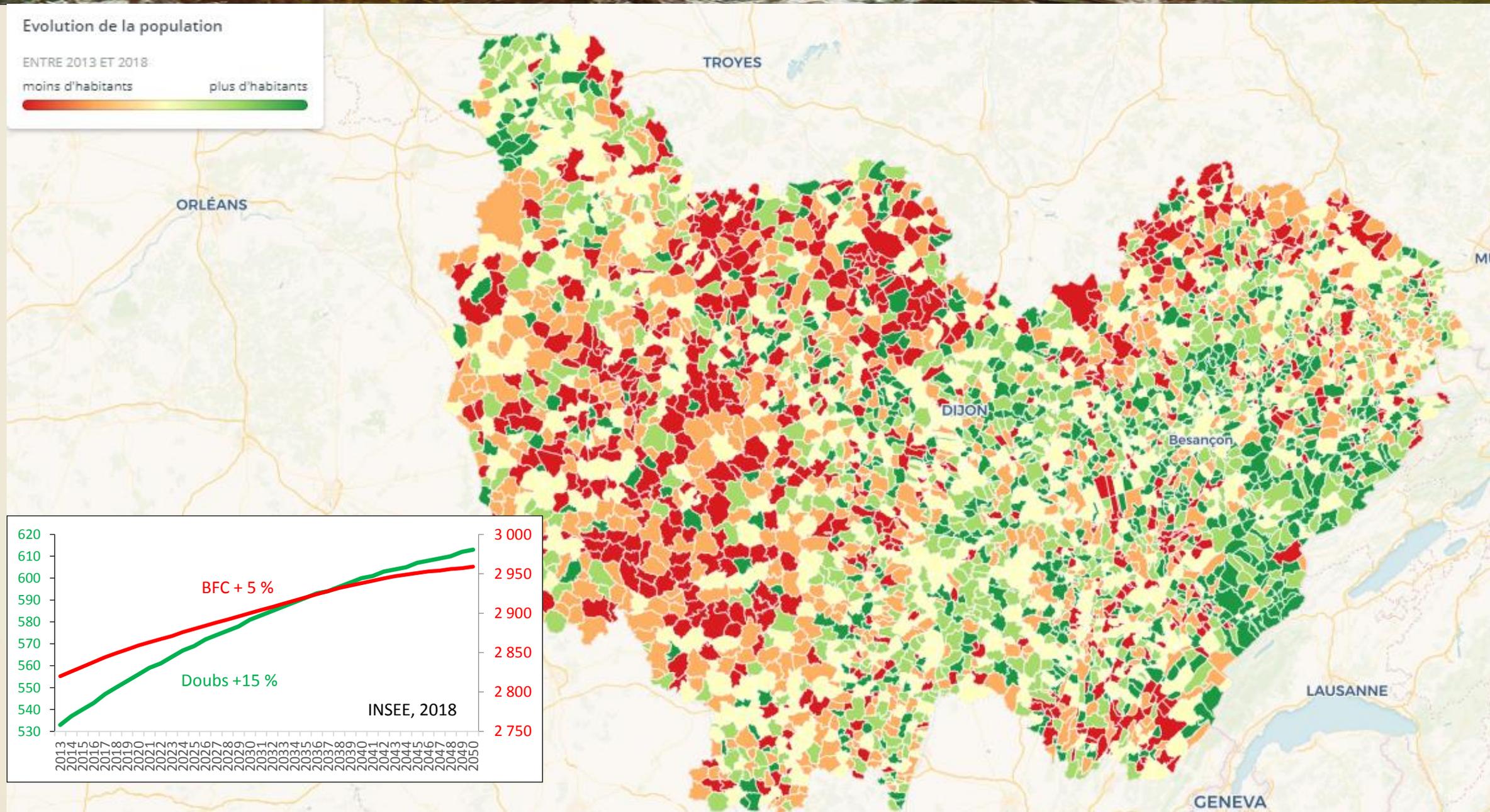
Répartition de la population

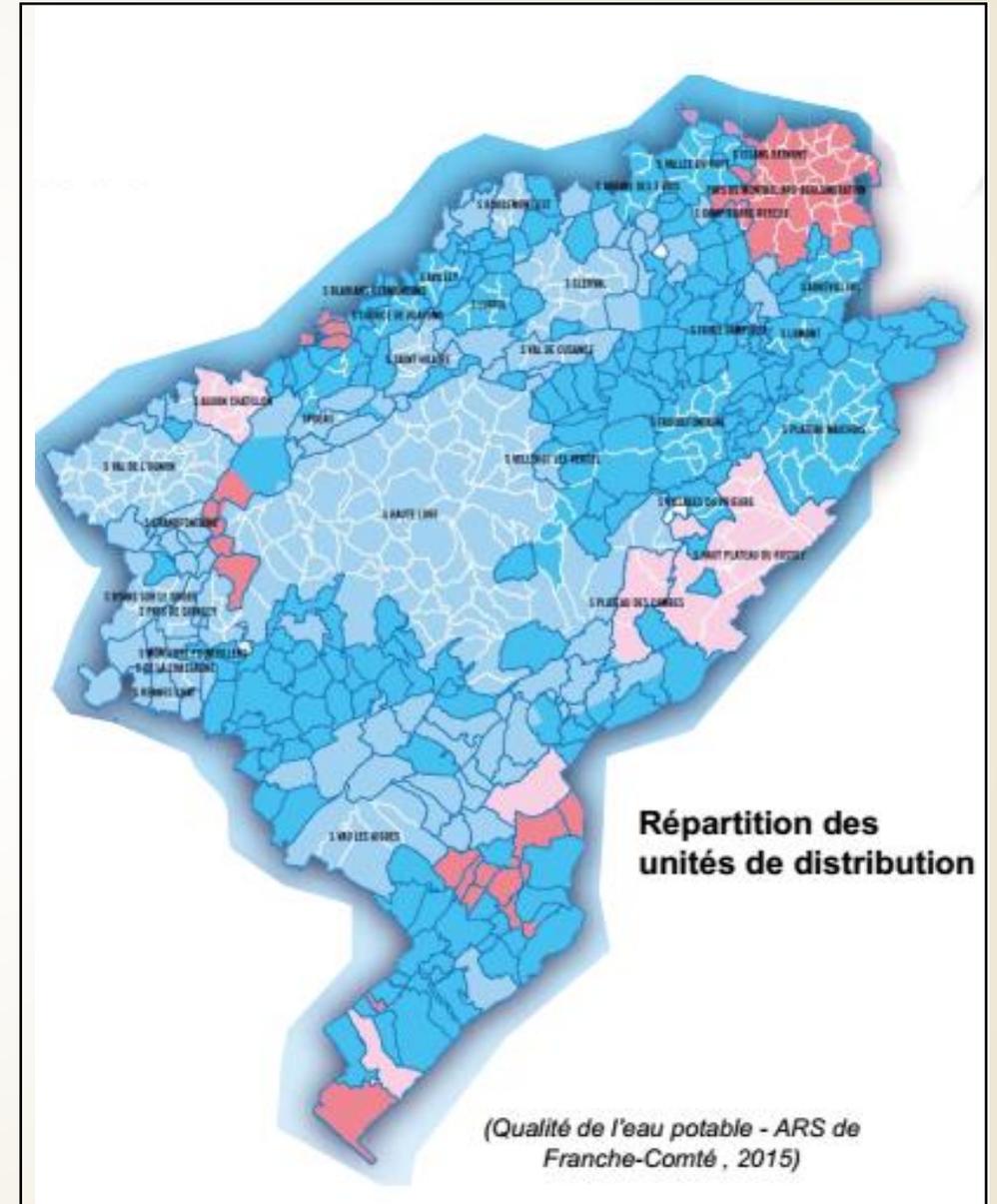
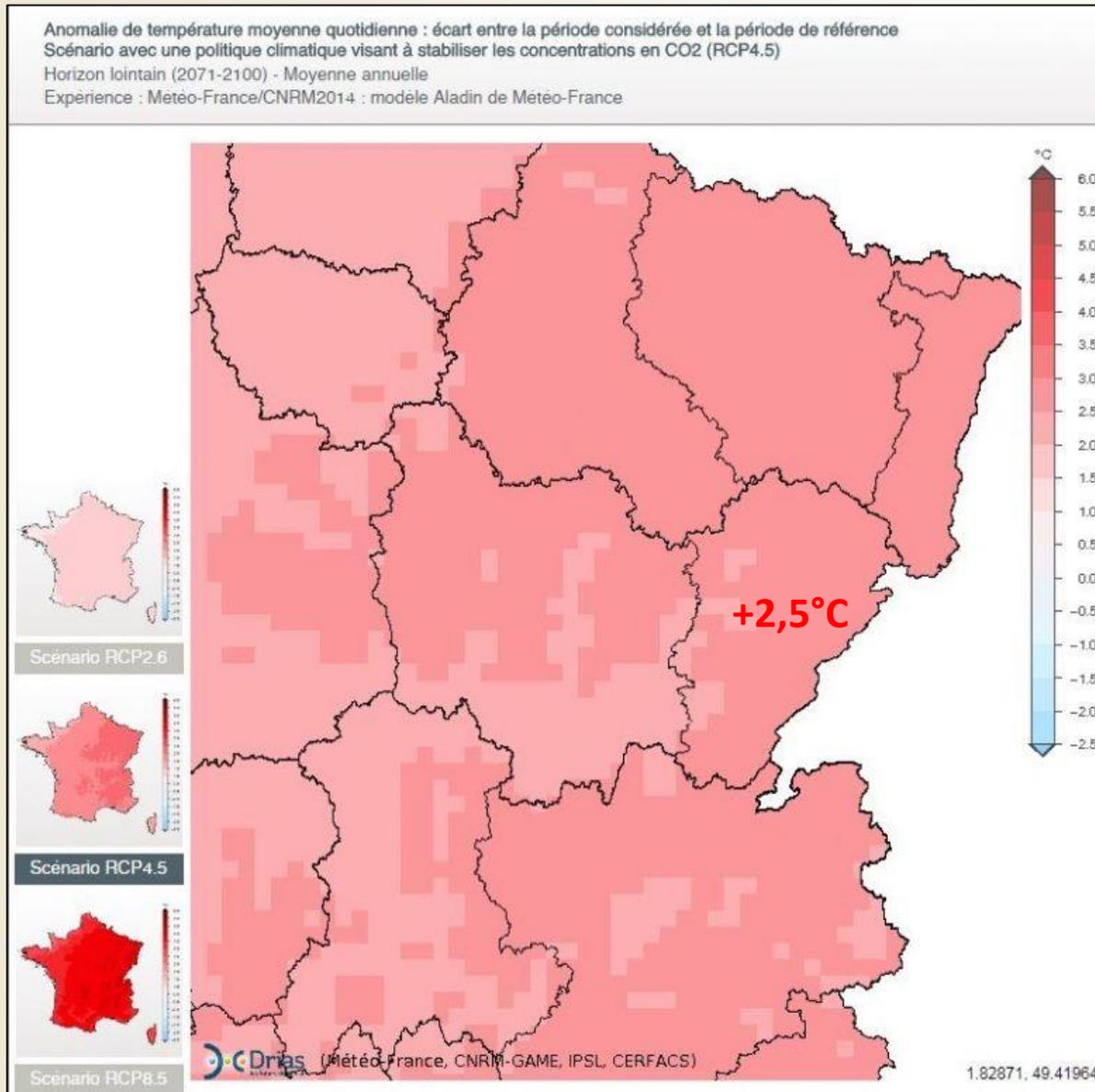


Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses

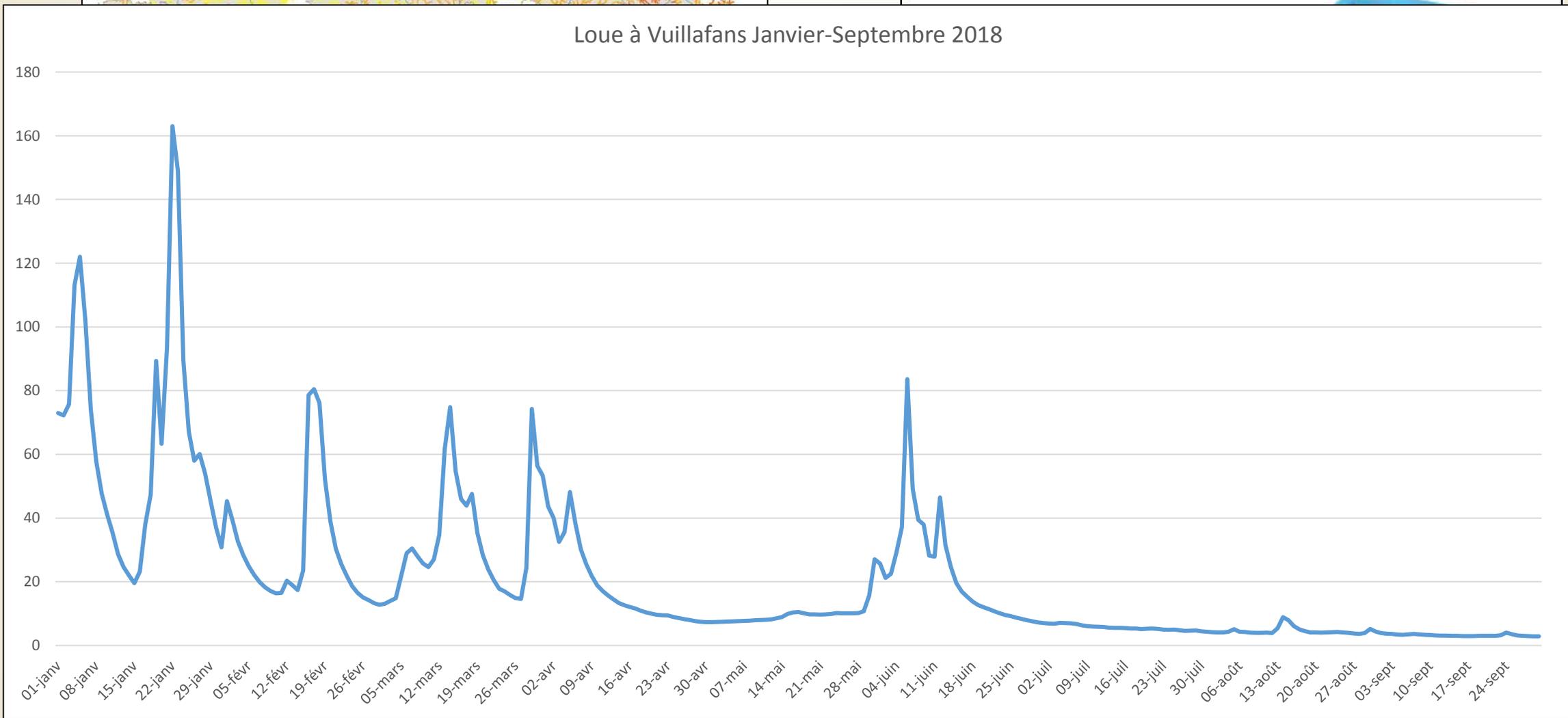
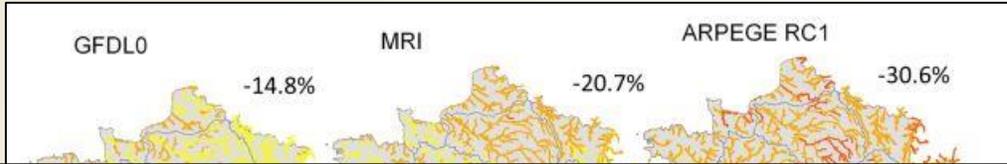




Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

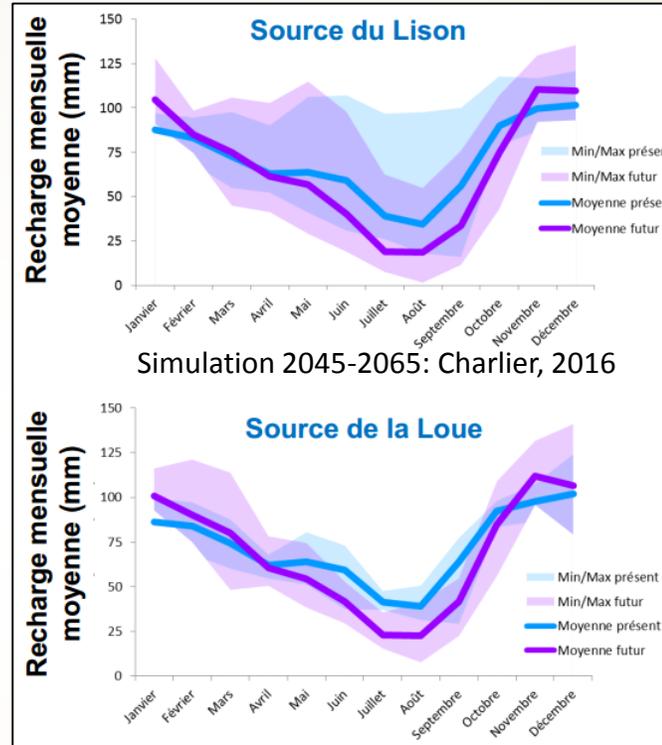
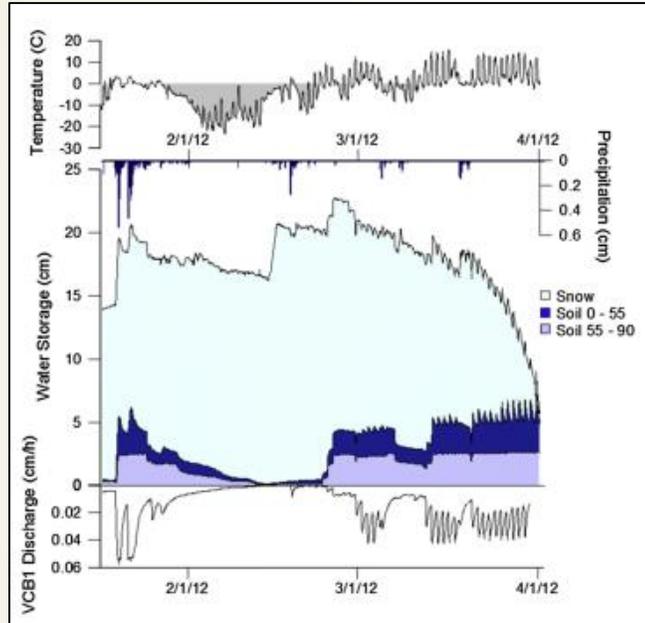
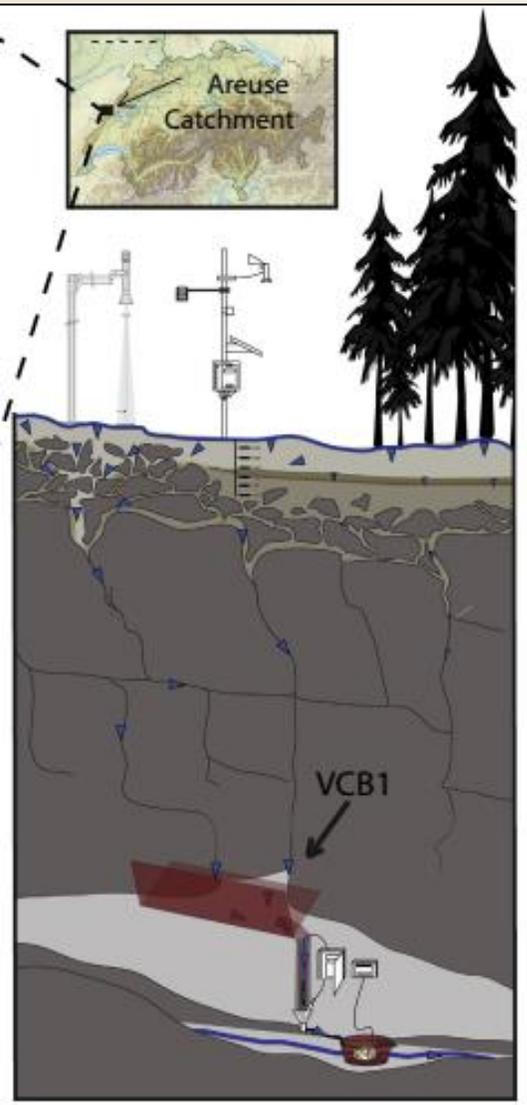
Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses



Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses



- Nature de la recharge?
- Proportion Pluie vs Neige? (changement de régime)
- Moins de recharge diffuse? Moins de transport lent?
- Plus de transport rapide?



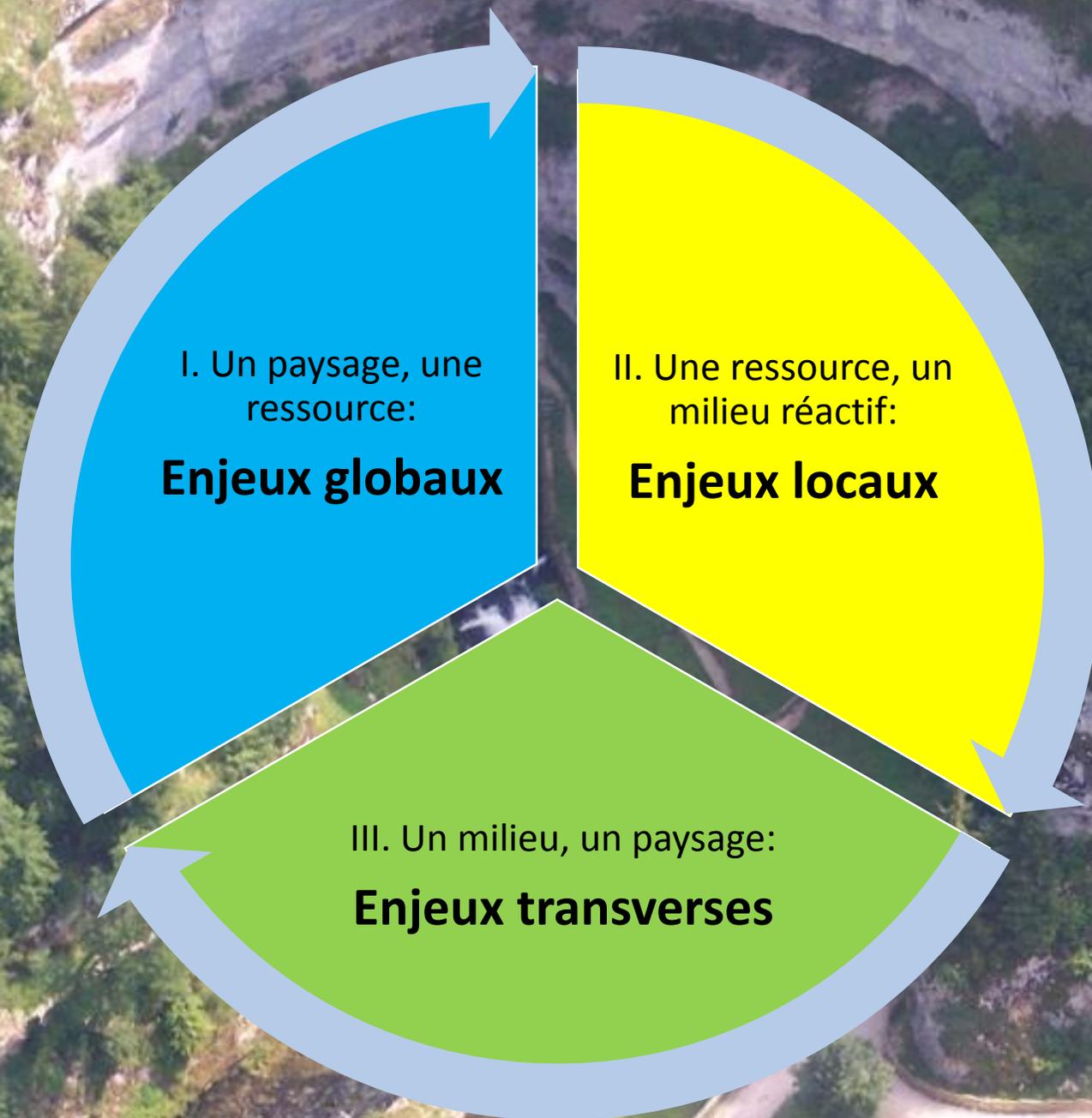
- Gestion différente?
- Usages différents?

Édition du 24 Janvier 2018

18



L'EST
RÉPUBLICAIN



Un paysage, une ressource

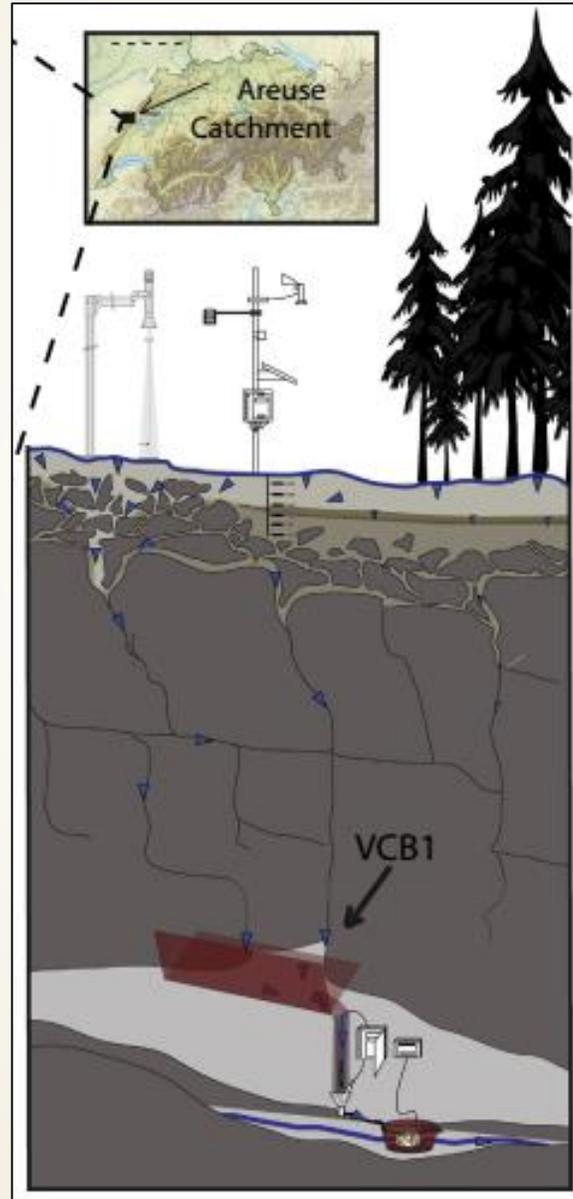
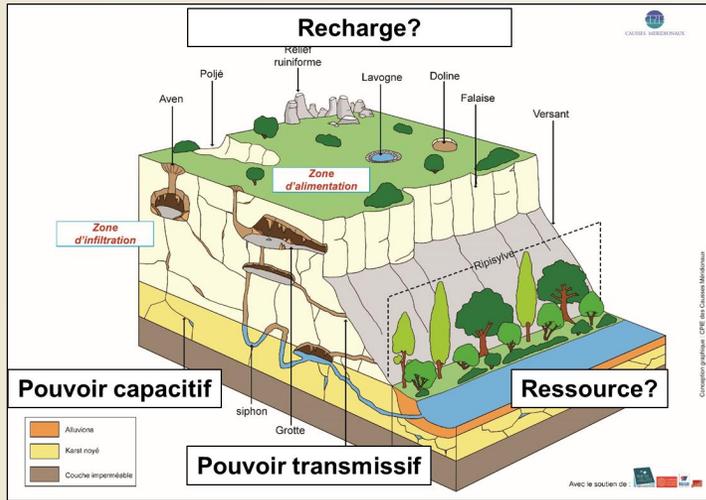
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif

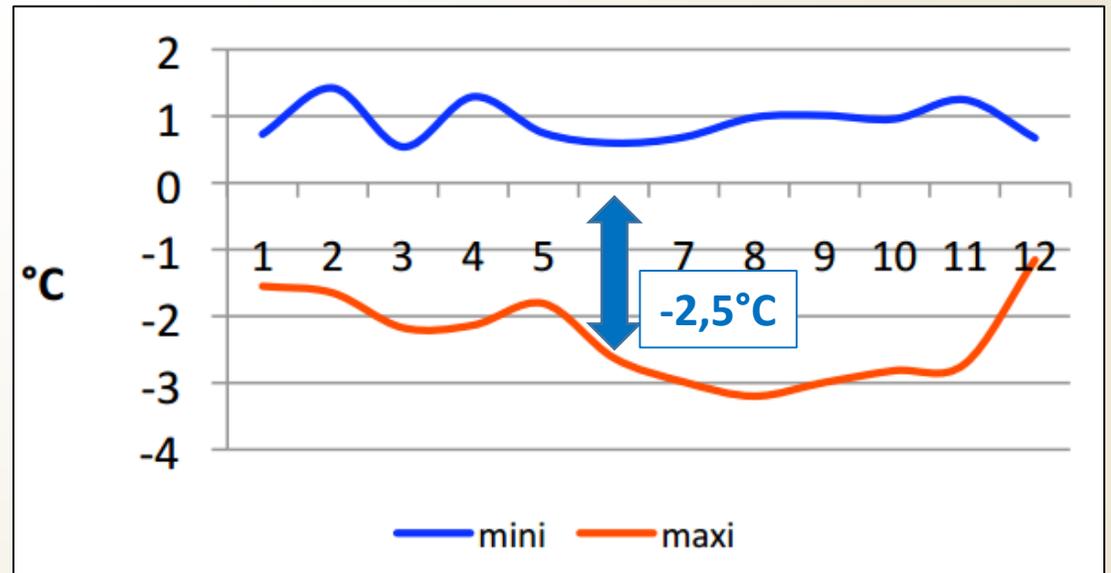
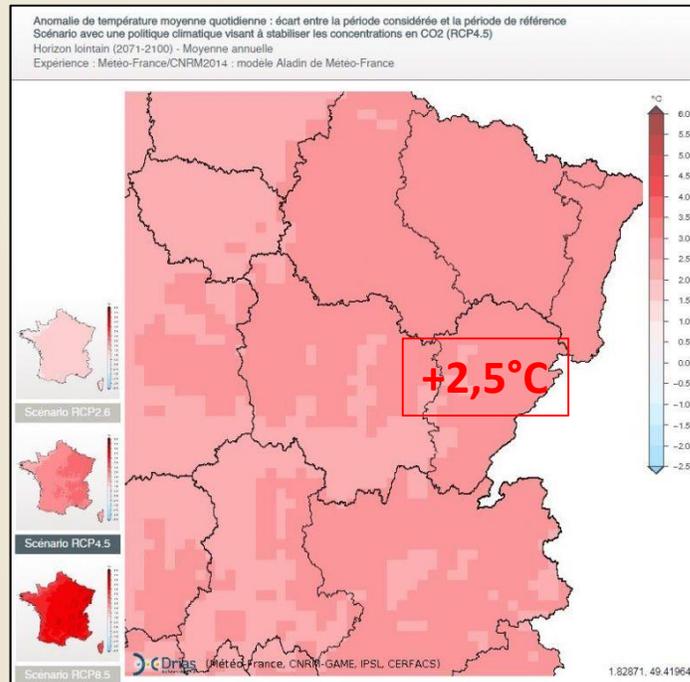
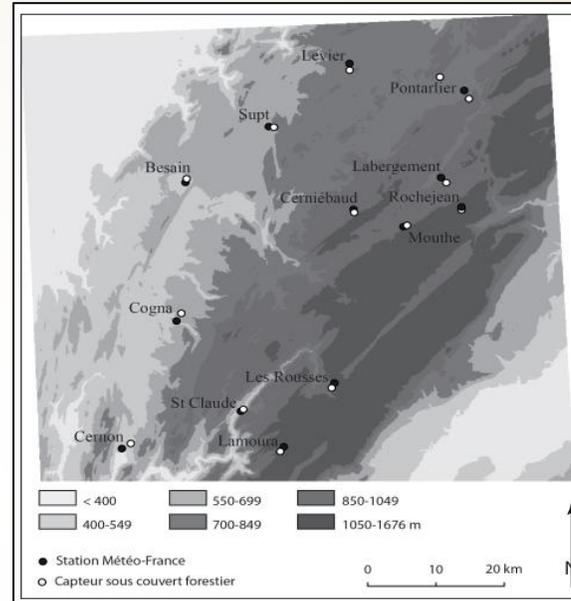
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage

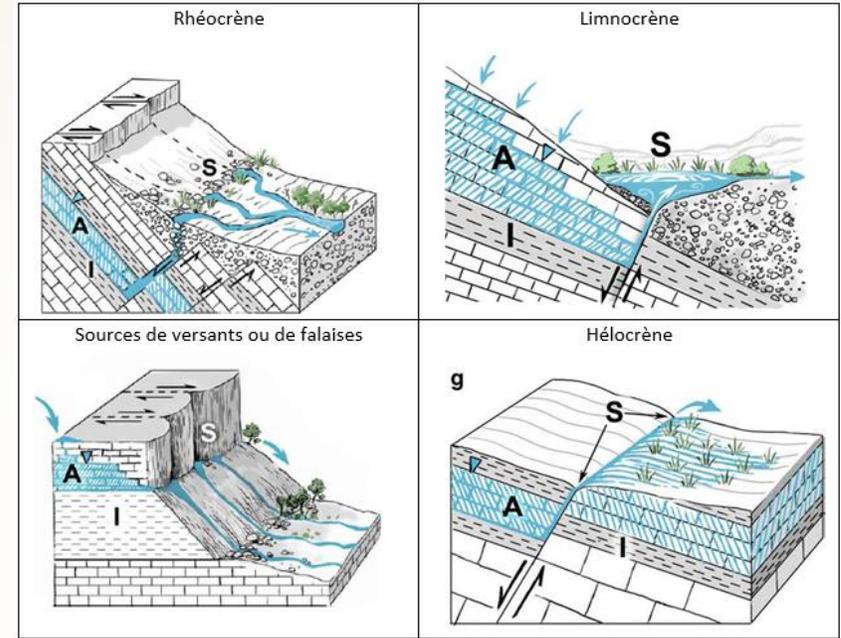
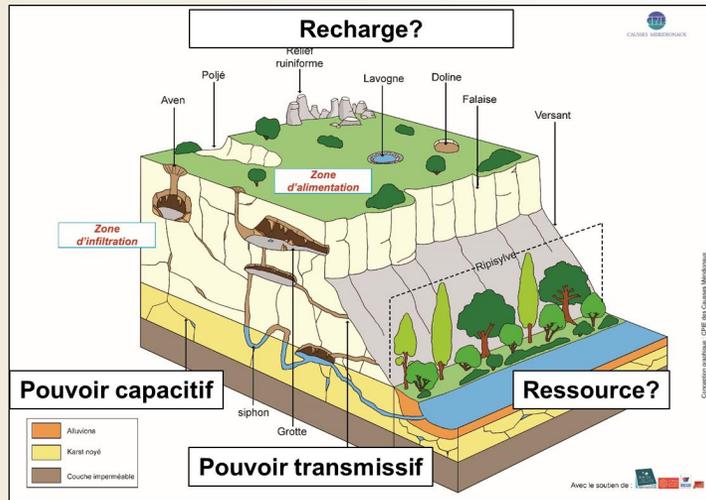
Enjeux transverses



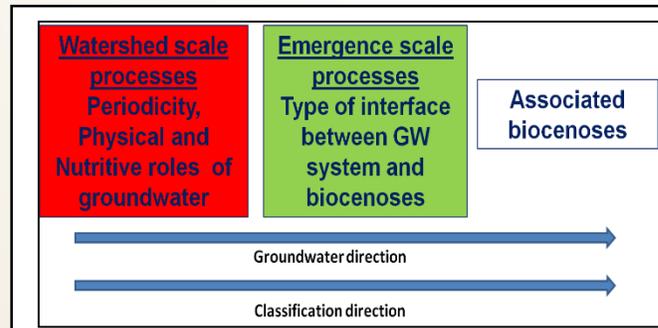
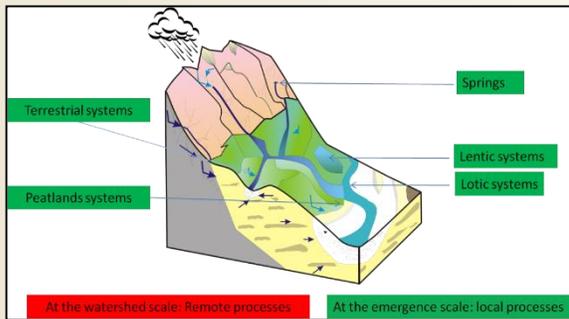
Joly D. (2014). Comparaison des températures observées sous couvert forestier et en espace ouverts dans le Jura. 27ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Jul 2014, Dijon, France



Directive Européenne sur les eaux souterraines (2006)
Ecosystèmes dépendants des eaux souterraines



Springer and Stevens. (2008). Spheres of discharge of springs. *Hydrogeology Journal*



Bertrand G., Goldscheider N., Gobat J-M., Hunkeler D. (2012). Review: from multi-scale conceptualization of groundwater-dependent ecosystems to a classification system for management purposes. *Hydrogeology Journal*

Determined by Aquifer scale attributes		Determined by emergence scale attributes: Role of the interface	GDE's denomination	Ecology in Switzerland	
Periodicity (Hydroperiod)	Nutritive role (Type of water)	Physical role (Geomorphology of spring)		Phytosociology (alliances)	Characteristic species
Permanent	Neutral to Alkaline (pH~7)	Helocrene, Rheocrene, Limnocrene	Alkaline spring ecosystems	Cratoneurion	<i>Cratoneuron filicinum</i> , <i>Saxifraga aizoides</i>
		On cliffs and hillslopes	Cliff spring ecosystems	Adiantion	<i>Adiantum capillus-veneris</i> , <i>Eucladium verticillatum</i>
Periodic	Acid (4.5<pH<7)	Helocrene, Rheocrene, Limnocrene	Acid spring ecosystems	Cardaminomontion	<i>Cardamine amara</i> , <i>Montia montana</i> , <i>Sedum villosum</i>
		Helocrene	Periodic spring ecosystems	Petasiton paradoxi	<i>Petasites paradoxus</i> , <i>Adenostyles glabra</i> ,

Un paysage, une ressource

Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif

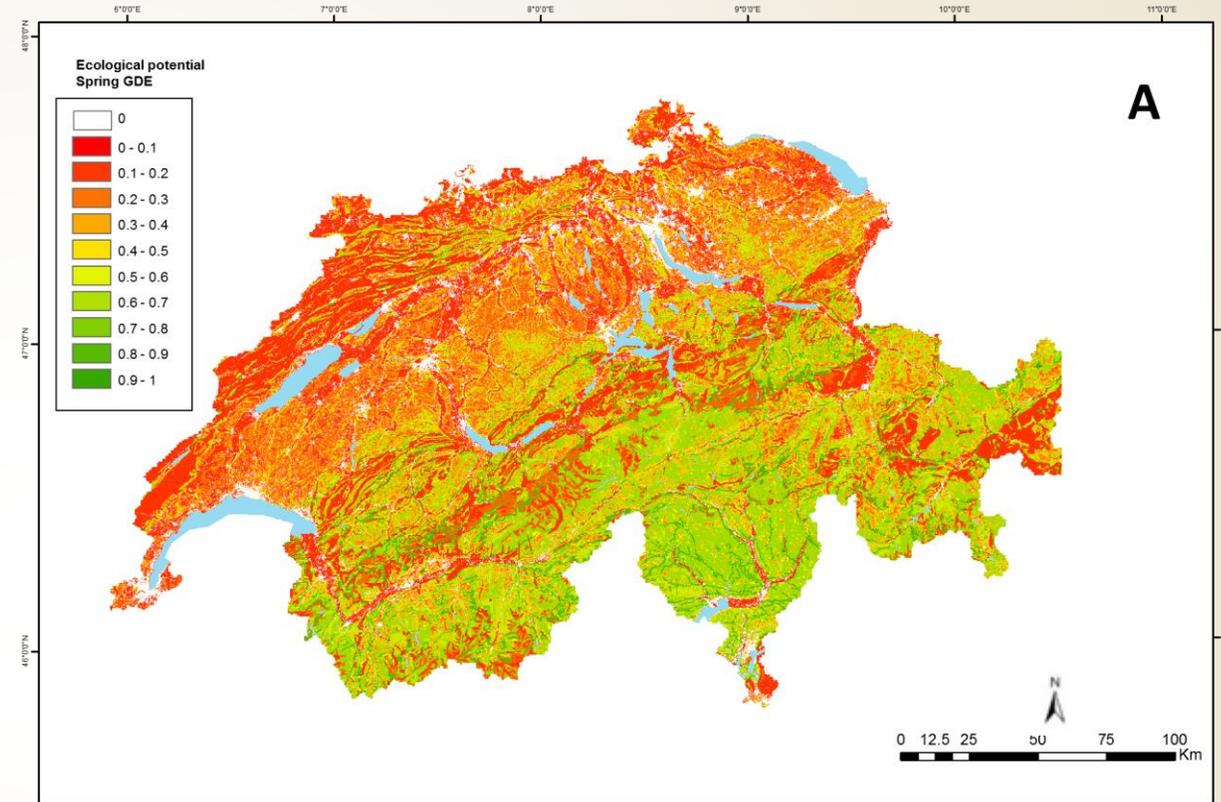
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage

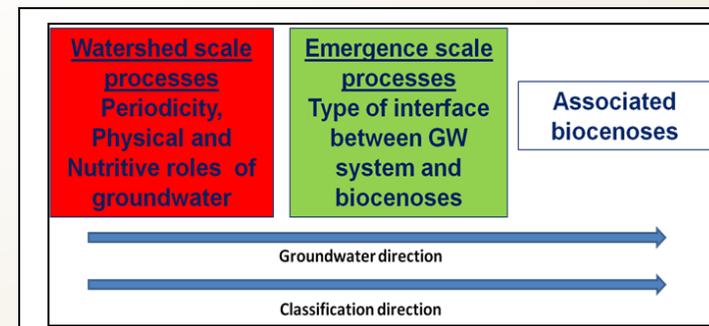
Enjeux transverses

Conceptual scheme for springs	Conditions	Conceptual criteria	Weighting (this work)	Parameters	Ecological importance degree			
	1. Piezometric surface can meet topographic surface 2. Possible emergence 3. Possible water retention in the soil 4. Anthropogenic factor due to the land use	Intrinsic geological conditions favoring groundwater discharge	0.8	1.1.a. Intrinsic conditions: aquifer favoring emergence due to low productivity (and associated heterogeneity) and without large conduct permeability (e.g. karst) Relevance: 2	If hydrogeological description is « Domain without productive reservoir » or « Low productivity aquifer » or « Low productivity aquifer in non karstified coherent rocks » = 1 If hydrogeological description is « productive reservoirs/highly productive reservoirs » or if geological descriptions is « Alluviums » or « Peat » = 0			
				Climatic factor: importance of the local recharge		0.2	1.1.b. Heff	$H_{max} > 2000 \text{ mm/yr}$: 1 $1000 < H_{max} < 2000 \text{ mm/yr}$: 0.5 $H_{max} < 1000 \text{ mm/yr}$: 0.25
		Shallow groundwater*	1	2.1. Piezometric map and topographic elevation map Relevance: 3	2.1. Piezometric map and topographic elevation map Relevance: 3	1: prof=0; 1 2: prof=1; 0.5 Prof=2; 0		
						Geological contact between two distinct productivity zones NB: To calculate this parameter, a score had been attributed to each type of reservoir If reservoir is highly productive: 5 If reservoir is productive: 4 If reservoir is variably productive (karst): 3 If reservoir is poorly productive: 2 If reservoir is poorly productive in fissured rocks: 1 Domain without productive reservoir: 0 Relevance: 2	If absolute difference between reservoir is >2: 1 If absolute difference between reservoir ranges from 1 to 2: 0.5 If absolute difference between reservoir is 0: 0.25	
							Tectonic conditions 2.2b tectonic accident is next (500 m) Relevance: 2	+500 m: 1 +500 m: 0
								2.2.c. Slope variability (within 1km²) ($S_{max} - S_{min}$) (Ruszkiczay-Rudiger et al., 2009) Relevance: 2
		Groundwater retention next to the surface	1	3.1. Soil wetness Relevance: 3 3.2. Soil permeability Relevance: 2 3.3. Indications of hydromorphy of superficial soil layer* Relevance: 2	High wetness: 2 Intermediate wetness: 1 Low wetness: 0 Poorly permeable: 2 Moderate permeability: 1 High permeability: 0 Redoxsoils: 1 Soils with hydromorphy: 0.5 Other: 0			
					Anthropogenic factor due to the land use Relevance: 3	Natural land: 1 Agricultural land: 0.5 Urbanized area: 0		

Approach(es) shown in this work: Spring GDE	Formula	Robustness (max = 1)
Used at local/regional scale	Approach 1: $EP = [0,8 \times 1.1a + 0,2 \times 1.1.b] \times [0,2 \times 2.2a + 0,2 \times 2.2.b + 0,6 \times 2.2.c] \times 4.1$	$((0,8 \times 3 + 0,2 \times 3) + (0, 2 \times 2+0, 2 \times 2 + 0,6 \times 2) + 3 \cdot 3) / 3 = 0,89$
Used at national scale scale	Approach 1: $EP = [0,8 \times 1.1a + 0,2 \times 1.1.b] \times [0,2 \times 2.2a + 0,2 \times 2.2.b + 0,6 \times 2.2.c] \times 4.1$	$((0,8 \times 3 + 0,2 \times 3) + (0, 2 \times 2+0, 2 \times 2 + 0,6 \times 2) + 3 \cdot 3) / 3 = 0,89$
Approach(es) shown in this work: Soligen GDE	Formula	Robustness (max = 1)
Used at local/regional scale	Approach 1: $EP = [0,8 \times 1.1a + 0,2 \times 1.1.b] \times [0,2 \times 2.2a + 0,2 \times 2.2.b + 0,6 \times 2.2.c] \times 3.1 \times 4.1$ Approach 2: $EP = [0,8 \times 1.1a + 0,2 \times 1.1.b] \times [0,2 \times 2.2a + 0,2 \times 2.2.b + 0,6 \times 2.2.c] \times 3.2 \times 4.1$	$((0,8 \times 3 + 0,2 \times 3) + (0, 2 \times 2+0, 2 \times 2 + 0,6 \times 2) + 3+3 \cdot 3) / 4 = 0,91$ $((0,8 \times 3 + 0,2 \times 3) + (0, 2 \times 2+0, 2 \times 2 + 0,6 \times 2) + 2+3 \cdot 3) / 4 = 0,83$
Used at national scale scale	Approach 1: $EP = [0,8 \times 1.1a + 0,2 \times 1.1.b] \times [0,2 \times 2.2a + 0,2 \times 2.2.b + 0,6 \times 2.2.c] \times 3.2 \times 4.1$	$((0,8 \times 3 + 0,2 \times 3) + (0, 2 \times 2+0, 2 \times 2 + 0,6 \times 2) + 3+3 \cdot 3) / 4 = 0,91$



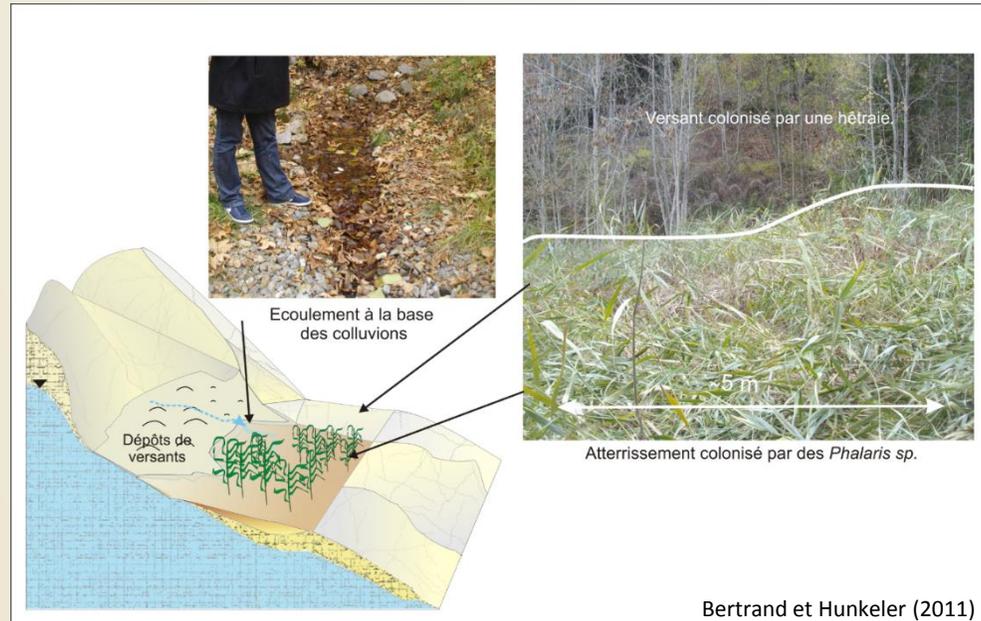
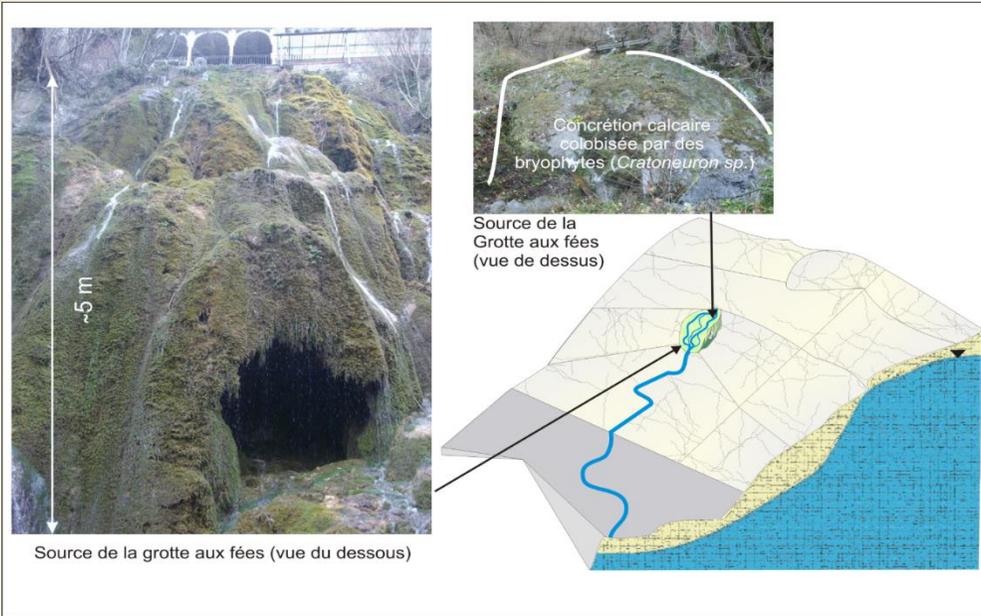
Bertrand et al., in prep, Groundwater dependent ecosystems mapping usable at local and national scales. Methodological development and applications in Switzerland



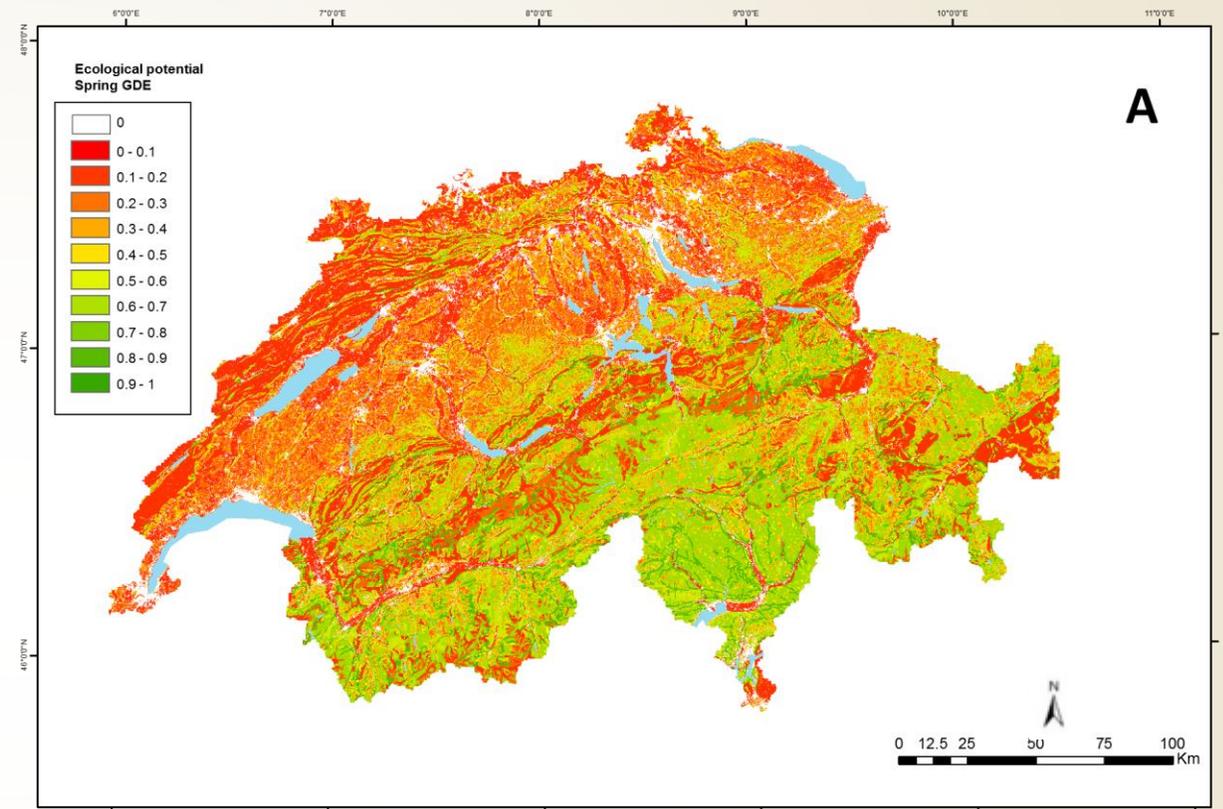
Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

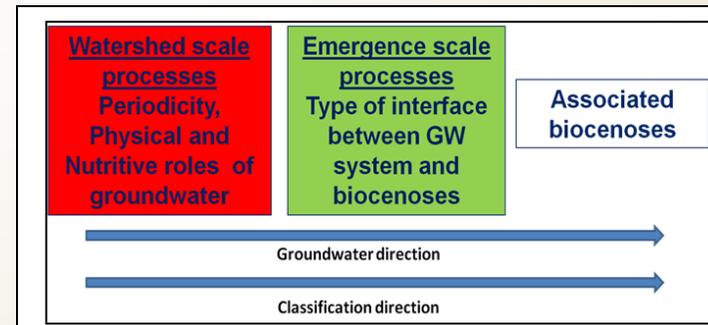
Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses



Bertrand et Hunkeler (2011)



Bertrand et al., in prep, Groundwater dependent ecosystems mapping usable at local and national scales. Methodological development and applications in Switzerland



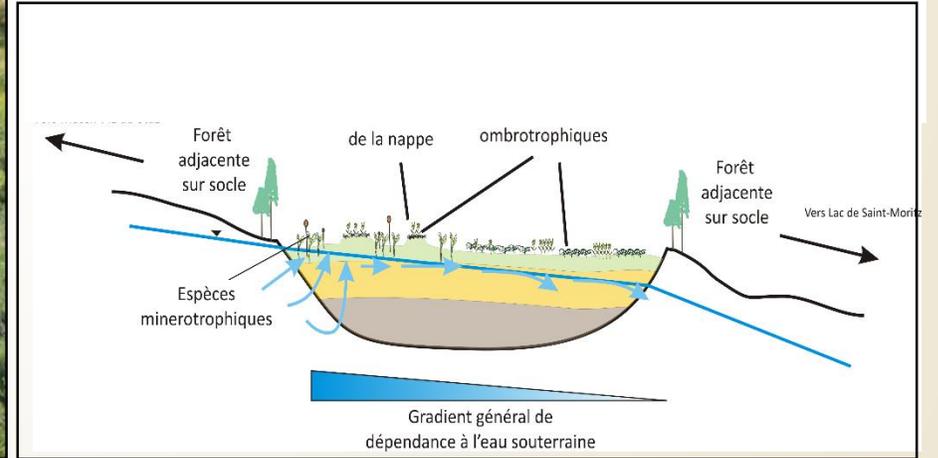
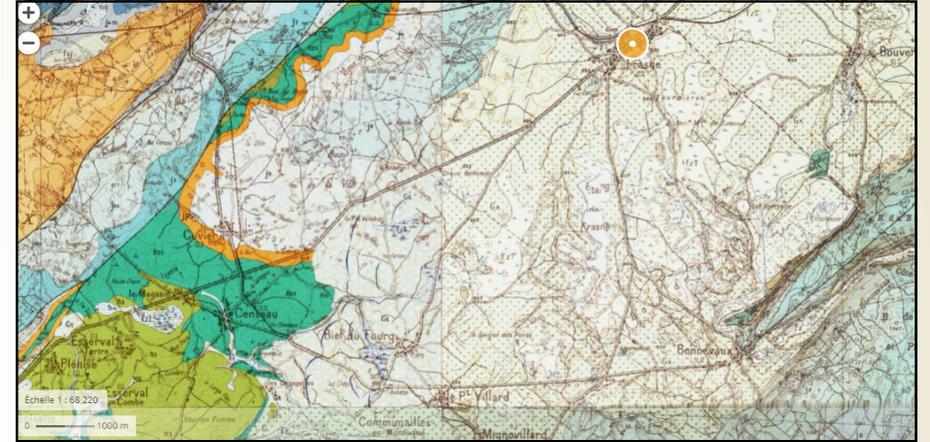
Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses



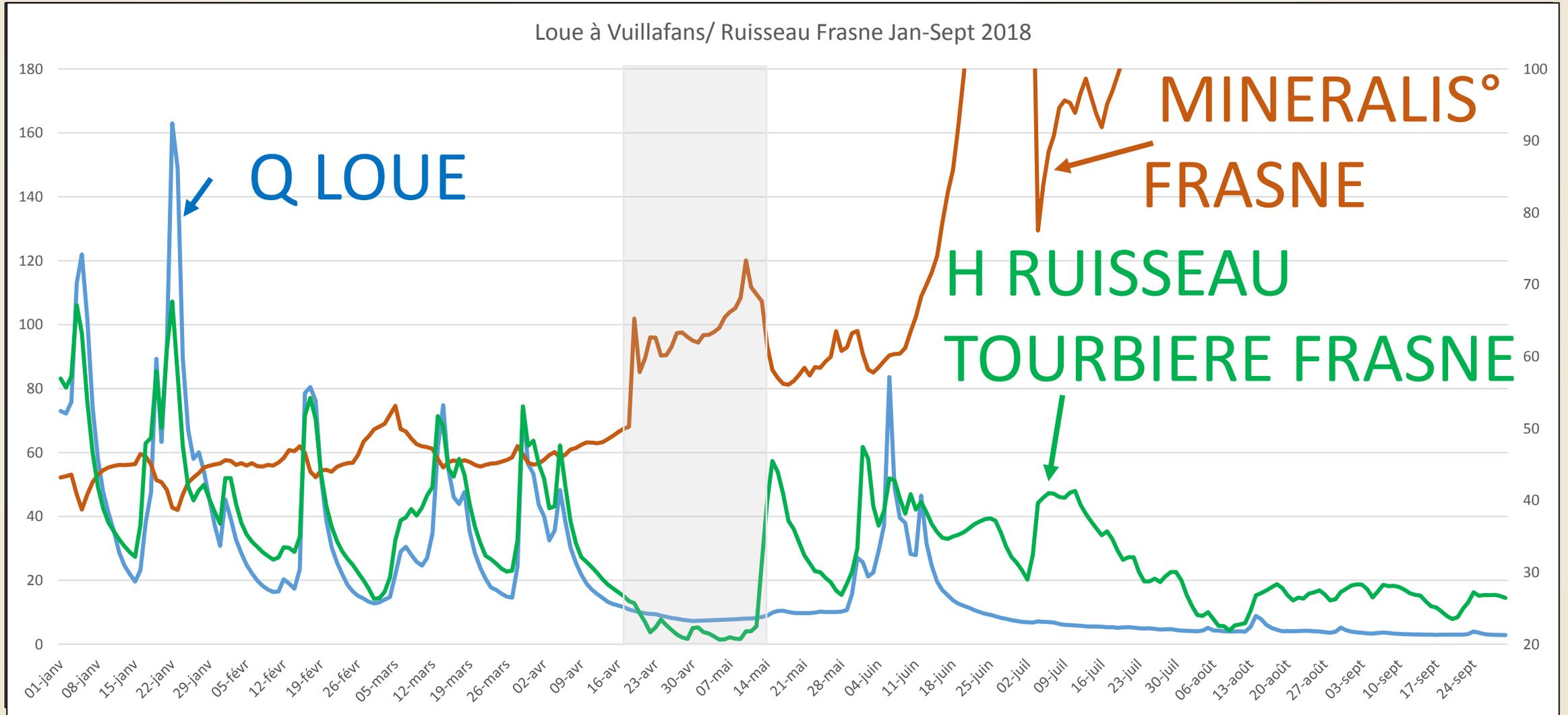
Photo G Magnon



Un paysage, une ressource
Enjeux globaux

une ressource, un milieu réactif
Enjeux locaux

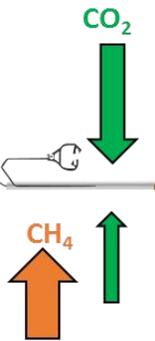
Un milieu réactif, un paysage
Enjeux transverses



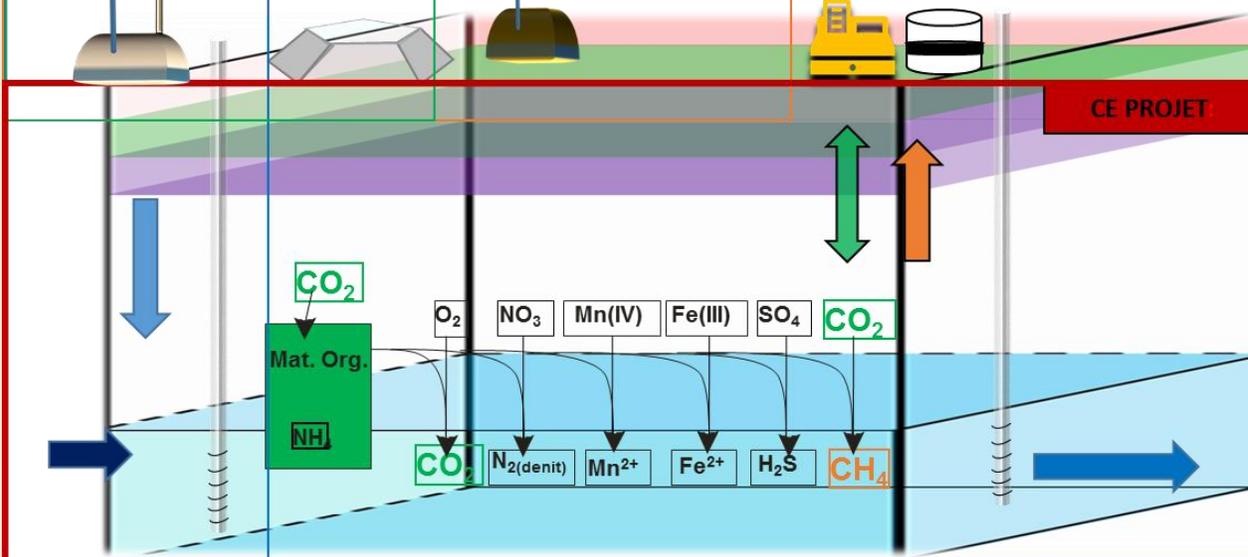
Thématique 1:
Hydroclimatologie



Thématique 3:
Bilan GES



Thématique 2:
Variabilité éco et CC



CRITICAL PEAT?

Carbon Reactivity In The Interactions Coupling Atmospheric Layer and PEATland?

Objectif spé.	Méthodologie
Effet de la quantité (hauteur) d'eau	Mesures 25 nvx piézo, mensuellement
Effet de l'origine et de la qualité de l'eau (pH, présence d'autres accepteurs d'électrons que O ₂ et CO ₂)	Prélèvement 25 piézos + Pluie + 2 Exutoires Analyses isotopiques (¹⁸ O/ ² H) Analyses hydrochimiques (DOC + TOC + majeurs)
Effet de la nature de la M.O.	Cartographie M.O. axe vertical et horizontal

VALORISATION

- LOC./RNR/ ZAAJ:** Intérêt pour la cartographie des processus à l'échelle de la tourbière de Frasne
- NAT. / OZCAR/ SNO T/SNO K:** Campagnes possibles sur autres systèmes + Fct du karst
- INTERNATIONAL:** Label european Long Term Ecosystem Research (Obs. européens)
- PUBLICATIONS:** Thématique hydro/spéciation dans la ZC => ANALYSES STAT
- PEDAGOGIE:** Travaux possibles à différentes échelles de temps: Stages de Lic/ activité CMI (courtes durée), de Master (MD) ou de Thèse (LD)

PERSPECTIVES

- Demande financement Thèse sur un sujet pluridisciplinaire: Hydro/Eco/ Biogéochimie /Physique-chimie (Thèmes BIOGEO/ECOS)**

CADRE INSTITUTIONNEL ET PARTENARIATS POTENTIELS

- RNR Frasne-Bouverans
- SNO T/ OSU THETA/ OSUC / OZCAR
- SNO K (JURASSIKARST)
- Ecole des Mines St-Etienne
- Inst. Sci. Terre Orléans
- Inst. Physique du Globe Paris
- Université de Rennes I
- University of Oulu (Finland)
- BE Lin Eco (CH)
- Cab. P. Goubet- UDA
- UBFC (STGI/ST)
- UNIL/UNINE (CH)
- ZA Arc Jurassien (eLTER)
- Pôle Karst

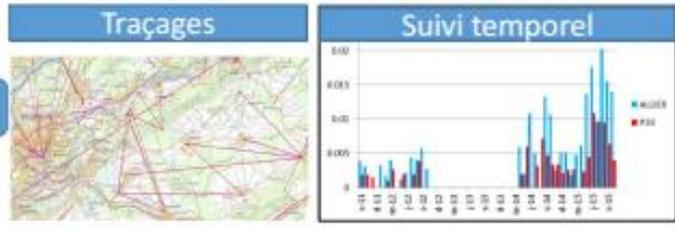
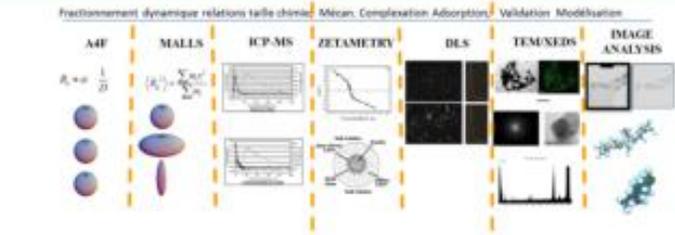
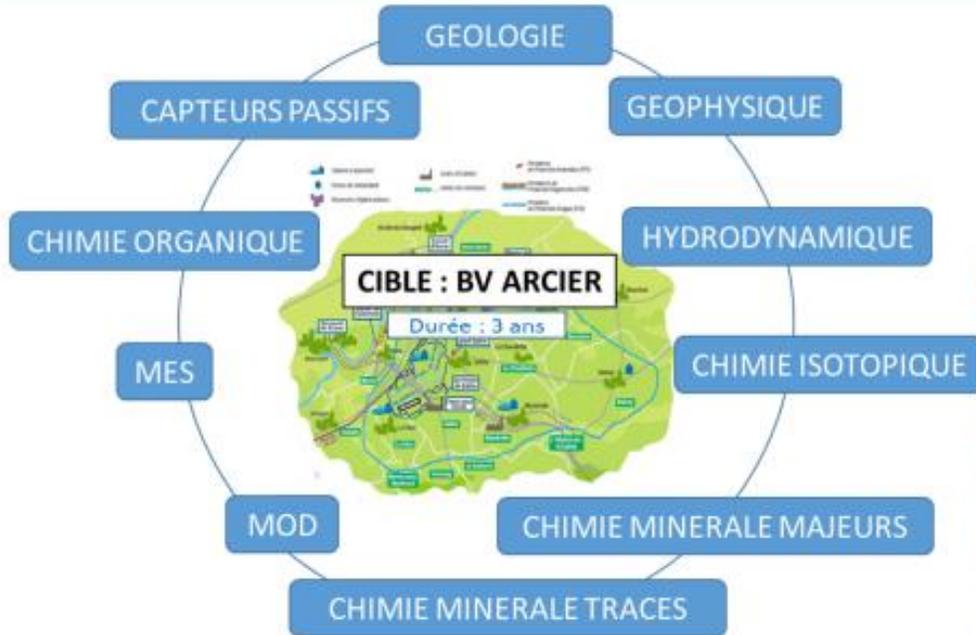


SYNTHESE BUDGET PREVISIONNEL

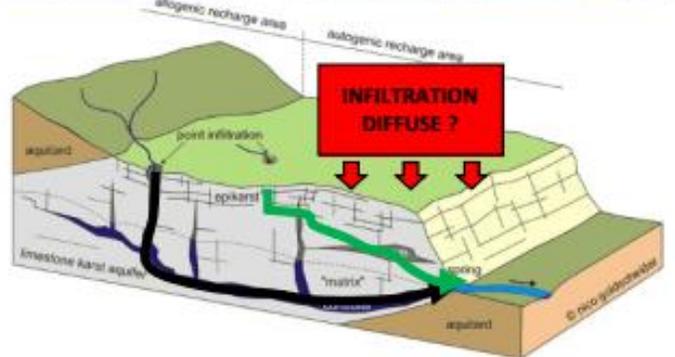
Postes de dépense	Coût total TTC (TVA= 20 %)	Recettes (Subventions)	Montant
TOTAL CONSOMMABLES	14048,6		
TOTAL ANALYSES	18378,6	Chrysalide (6 campagnes)	3969,3
TOTAL VALORISATION	3600	ANER Rég. UBFC	35300,3
TOTAL PROJET AVT CONTRIB.	36027,1		
Contribution / Labo (5%)	1801,4		
Contribution / UFR STGI (4%)	1441,1		
TOTAL PROJET AVEC CONTRIB.	39269,6	TOTAL RECETTES	39269,6

TRANSKARST 2019

Un consortium de chercheurs et gestionnaires

- Etablir un schéma conceptuel de fonctionnement géologique et hydrogéologique du BV d'Arcier ?
- Caractériser la contamination minérale et organique (concentration / flux) à l'exutoire (source d'Arcier)
- Discriminer les voies préférentielles de contamination (dissous, colloïdal, particulaire) ?
- Etudier les transferts (bilan entrées /sorties)



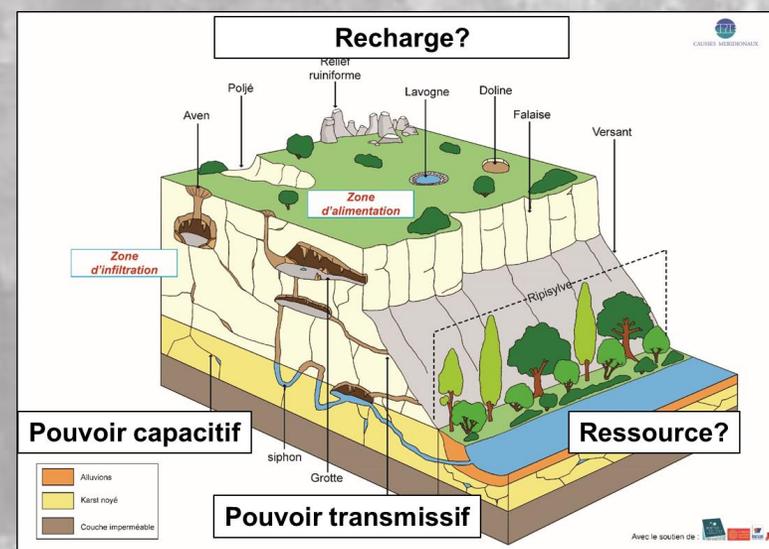
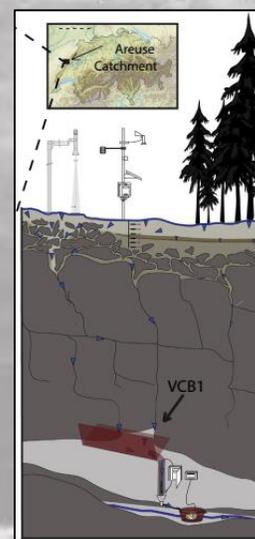
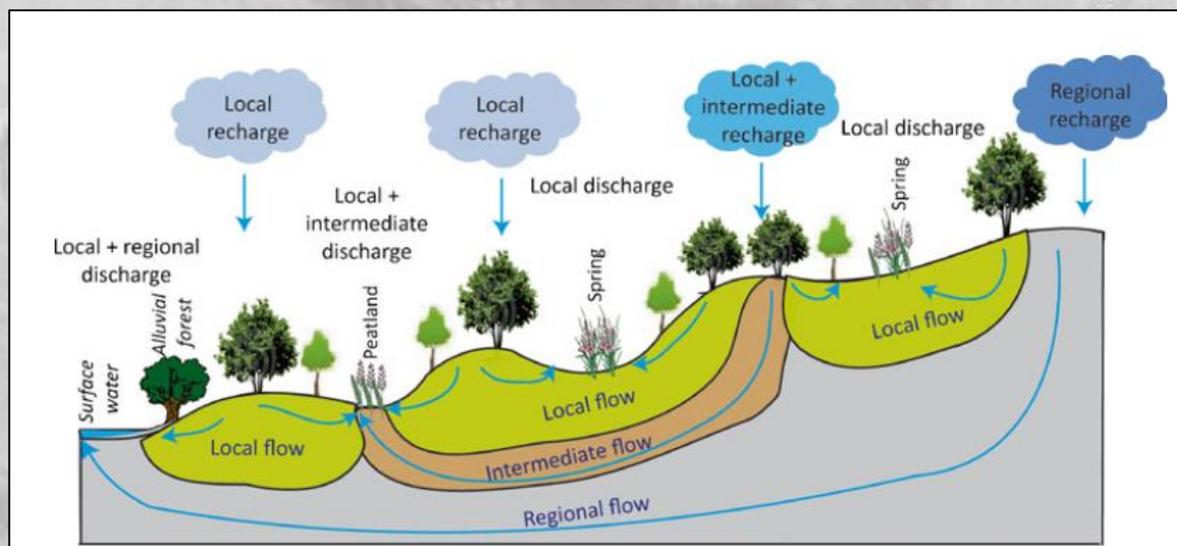
Aquifères karstiques: Synthèse des Enjeux

Globaux

- Circulations imbriquées
- Qualité physico-chimique + Cont. (dissous/turbidité)
- Transfert lent / rapide

Locaux

- Occupation des sols
- Chgts de régime (Nival => Pluvial)
- Pression démographique/usages



Transverses

- Protection des écosystèmes dépendants (DCE-DFES)
- Atténuation variabilité recharge=>stockage aux interfaces
 - Atm/Karst: Forêts = Clim' Jurassienne
 - Karst/usagers: Zones humides