



**RECHARGE NATURELLE ET ARTIFICIELLE DES NAPPES  
: QUELS POTENTIELS ?  
QUELLES IMPLICATIONS EN TERMES D'IRRIGATION  
AVEC DE L'EAU SOUTERRAINE?**

Yvan Caballero – BRGM Montpellier



Géosciences pour une Terre durable

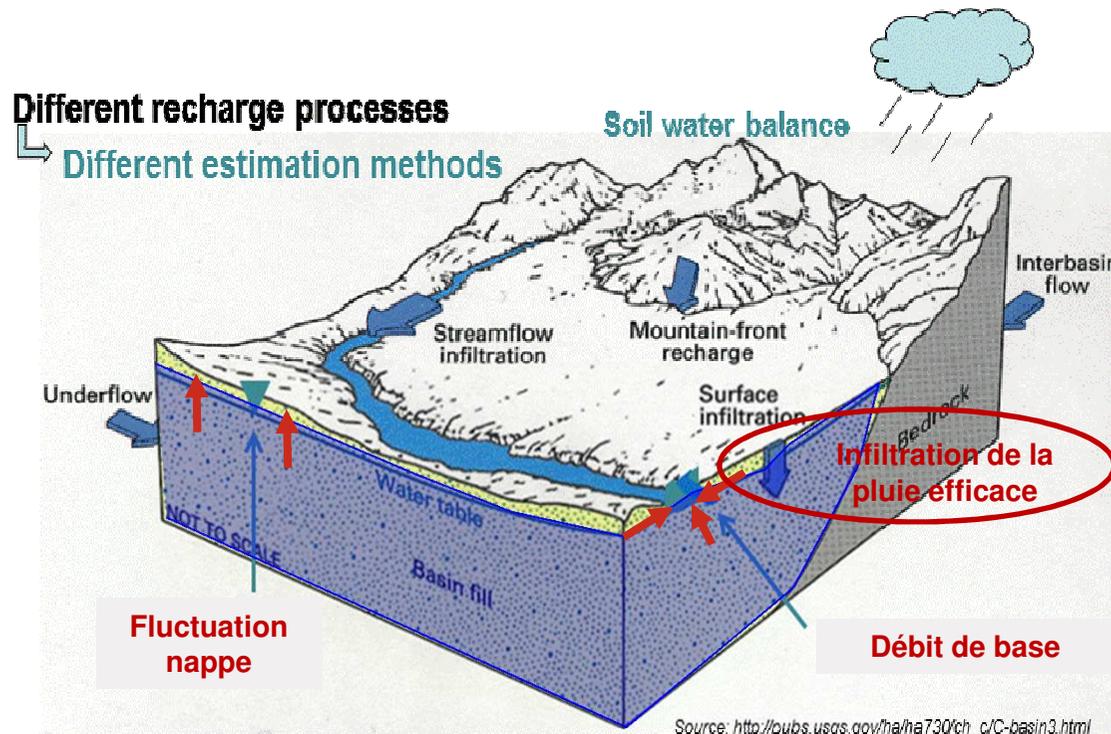
**brgm**

Journée Technique AIRMF – 12 mars 2019

# RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES → RECHARGE

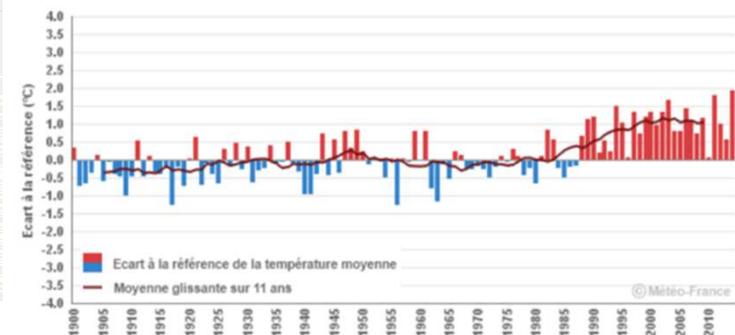
➤ **Enjeu** : La recharge comme un moyen de caractériser la part renouvelable de la ressource en eau souterraine et son évolution future.

- Plusieurs processus de recharge potentiels. Le climat impacte majoritairement l'infiltration de la pluie efficace



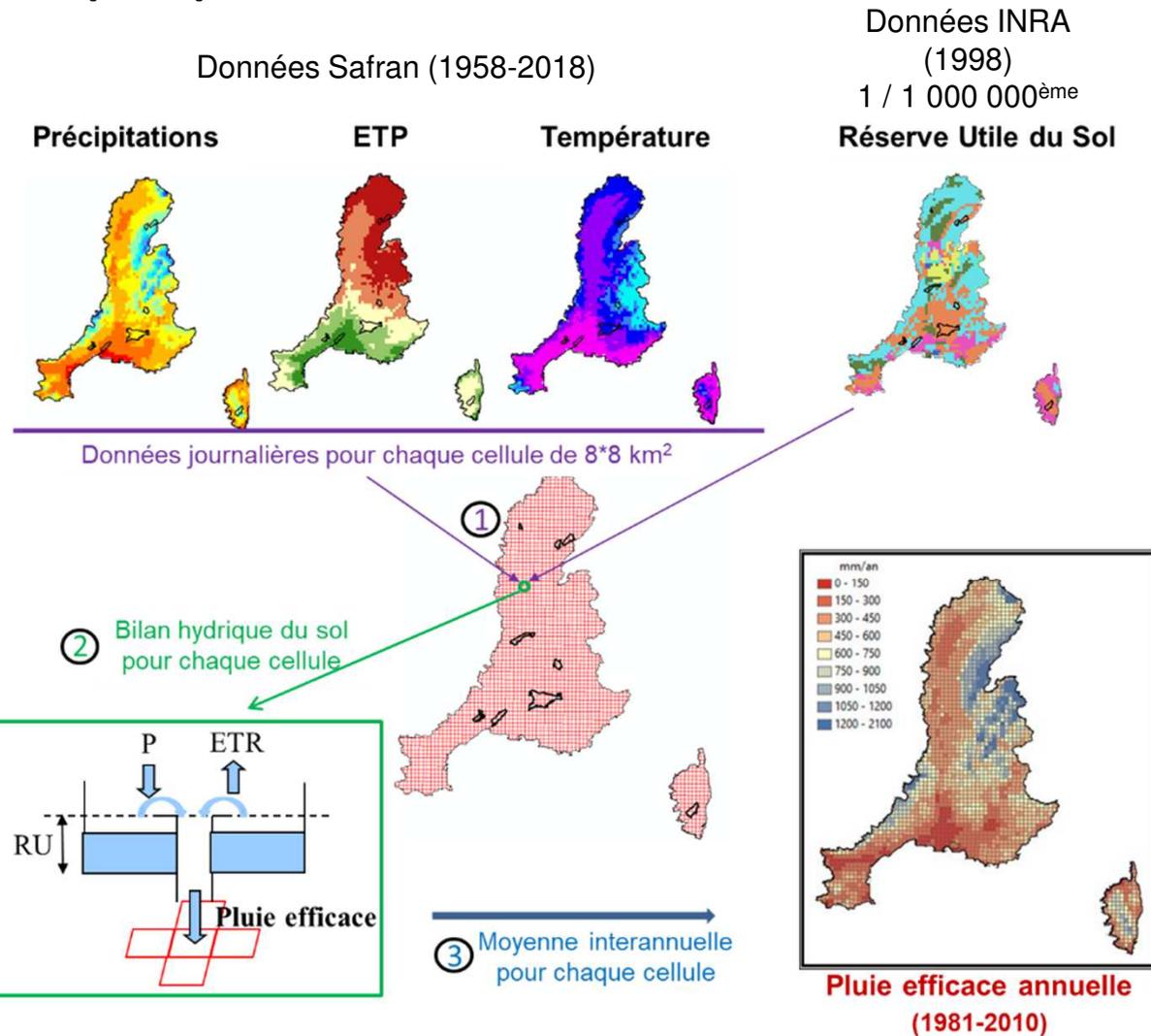
Using several recharge estimation methods provides more robust results with associated uncertainty (Scanlon et al., 2006)

Quelle évolution future  
versus  
Changement climatique?  
→ Adaptation



# RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES → RECHARGE

> Recharge par les précipitations : calcul de la Pluie Efficace → Bilan hydrique

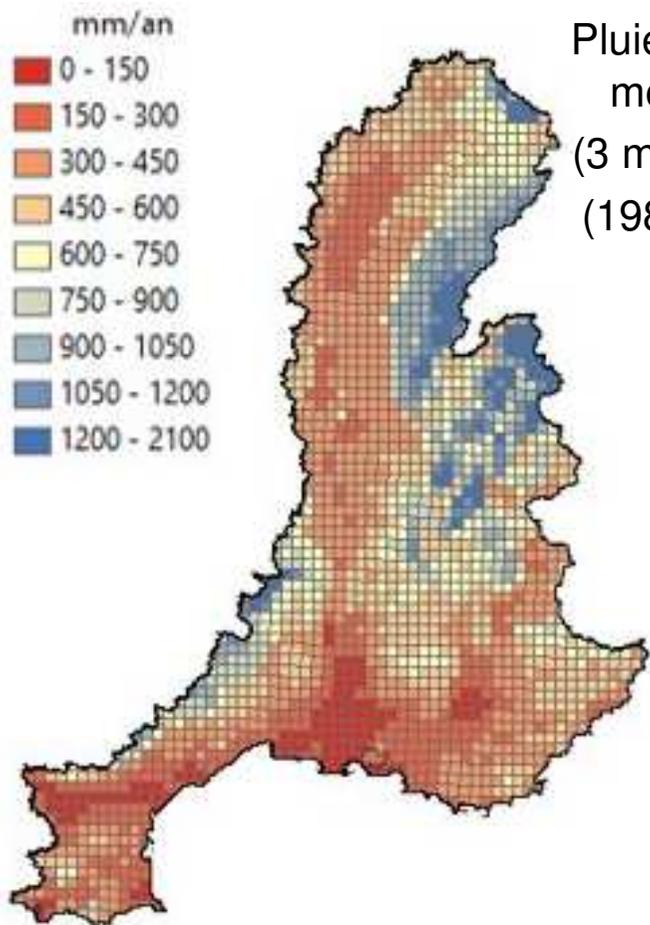


## Trois méthodes de bilan :

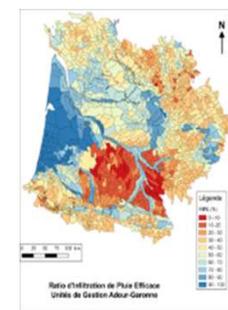
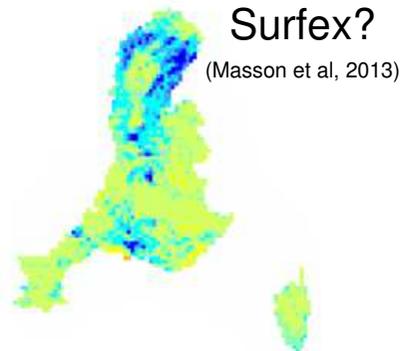
- Thornthwaite (1948)
- Dingman (2002)
- Gardenia (Thiery, 2014)

# RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES → RECHARGE

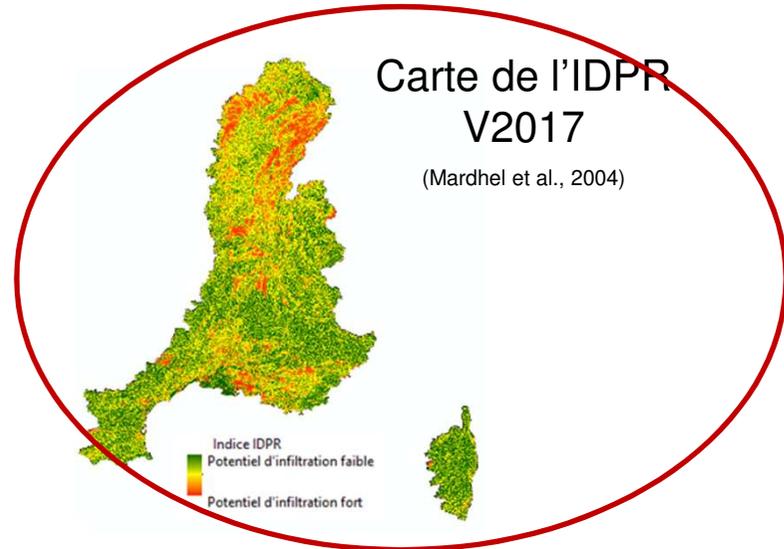
> Recharge par les précipitations : Pluie Efficace à Recharge → Coefficient d'infiltration?



Pluie efficace  
moyenne  
(3 méthodes)  
(1980-2010)

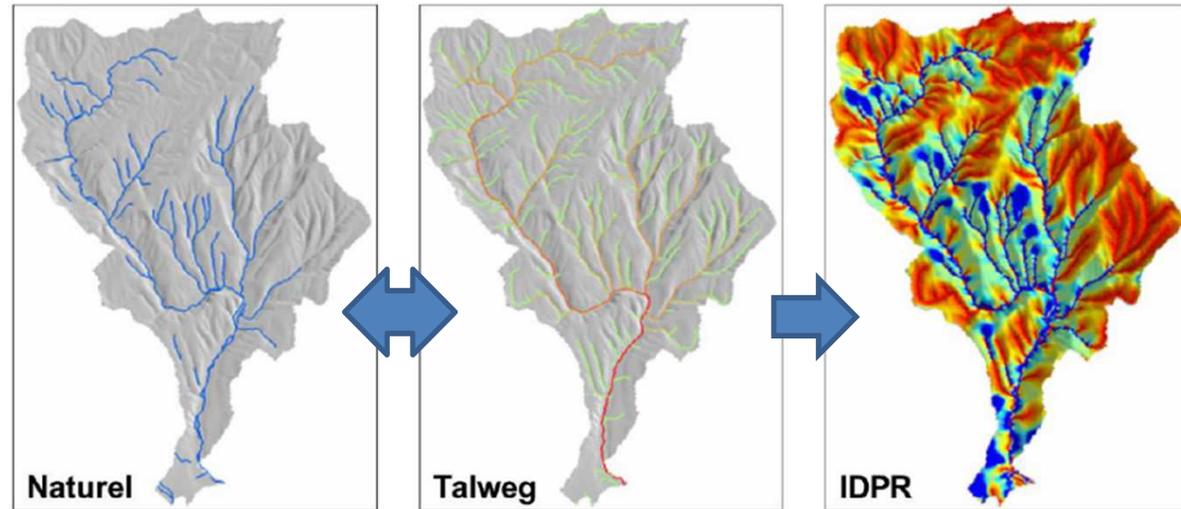


Recharge par les  
précipitations

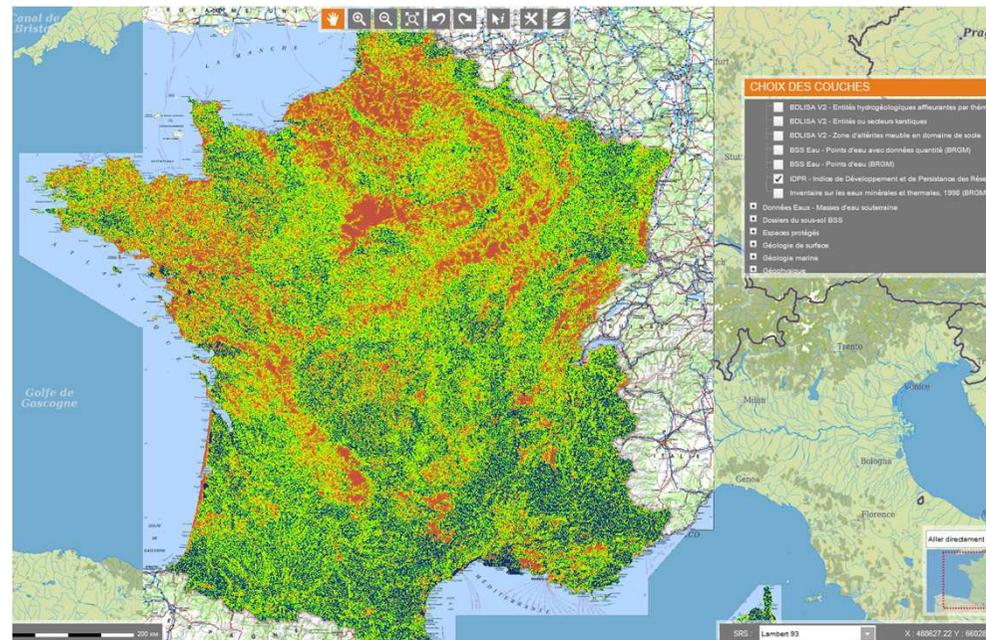


# RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES → RECHARGE

> Le concept d'IDPR:

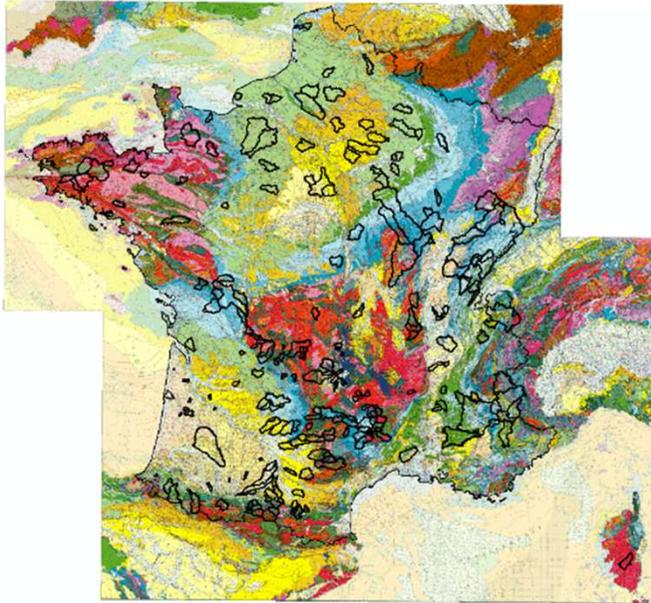


> Accessible sur [InfoTerre](https://www.geoportail.gouv.fr/):

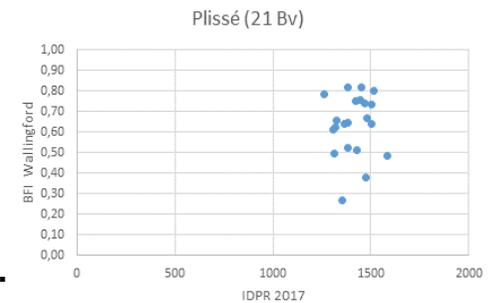
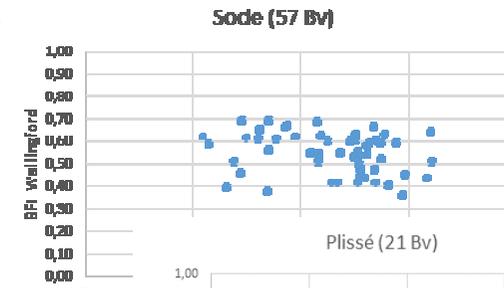
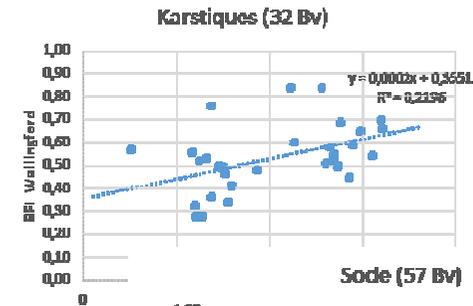
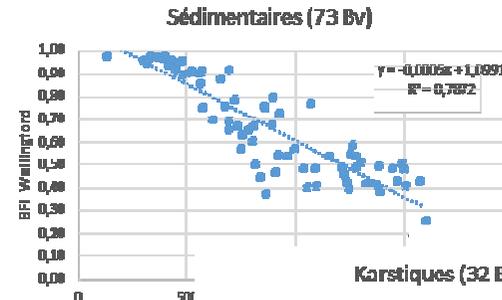


# RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES → RECHARGE

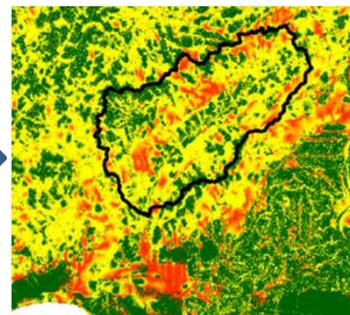
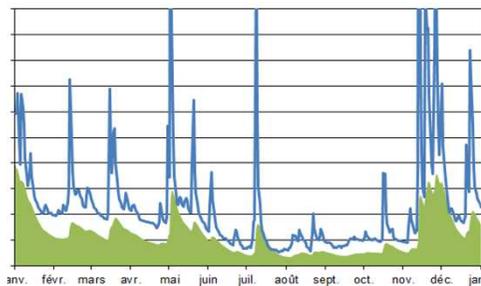
> IDPR → Coefficient d'infiltration?



> Relations fonction carac. BDLISA



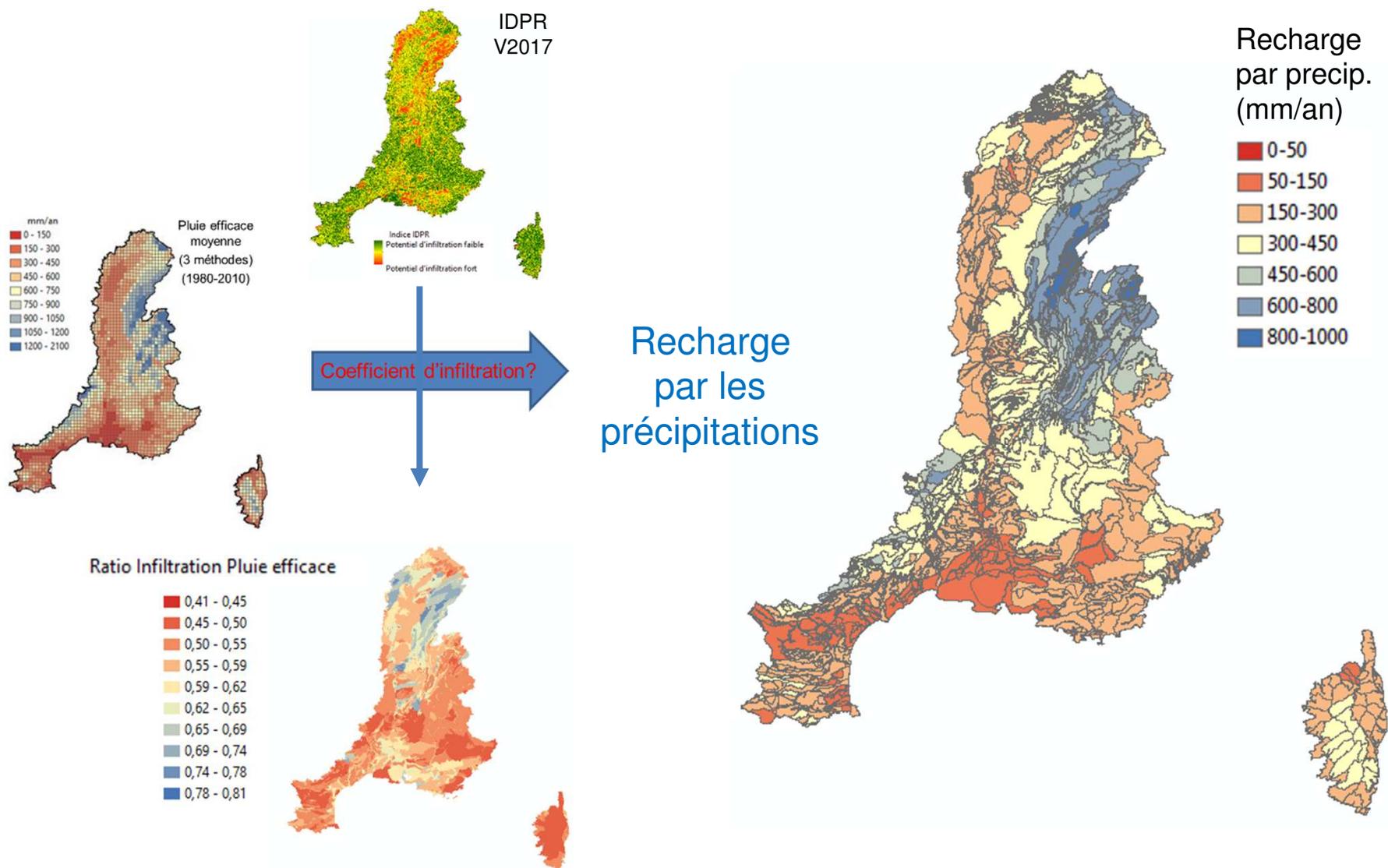
> Débit de base (BFI) / IDPR Moyen bassin



En cours de consolidation..

# RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES → RECHARGE

> Recharge moyenne annuelle par les précipitations (1980-2010) à l'échelle BDLISA



# IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

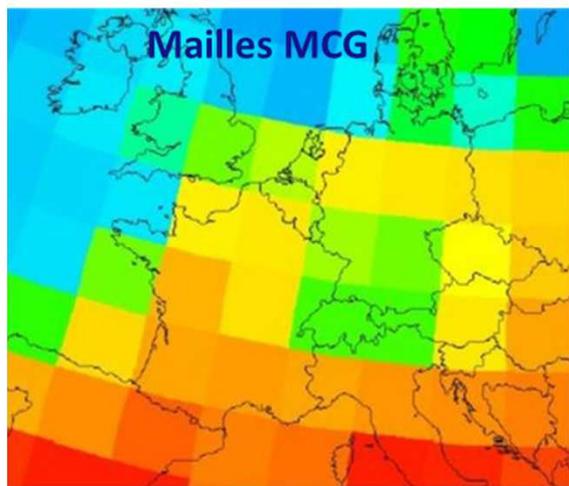
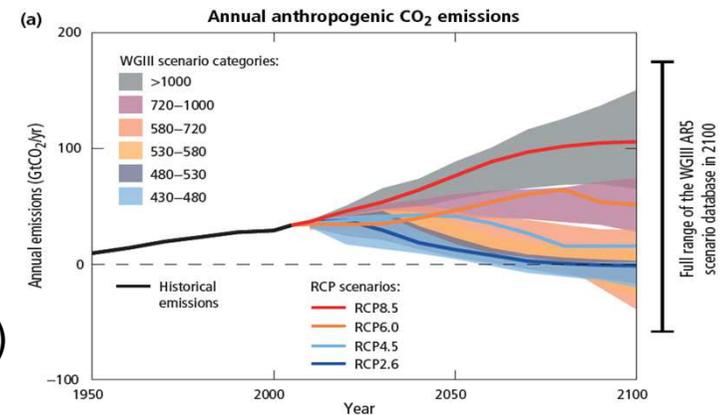
## > Scénarios climatiques → Pluie efficace future

Scénarios RCP 2.6 (optimiste) et 8.5 (tendanciel)

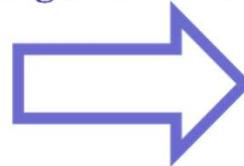
5 Modèles de climat

(NCAR CSM1, CanESM2, NorESM1, IPSL, CNRM-CM3)

2 méthodes de régionalisation: (DSCLIM / DAYON)



Changement d'échelle



Descente climatique  
*Pagé et al. (2010)*

+

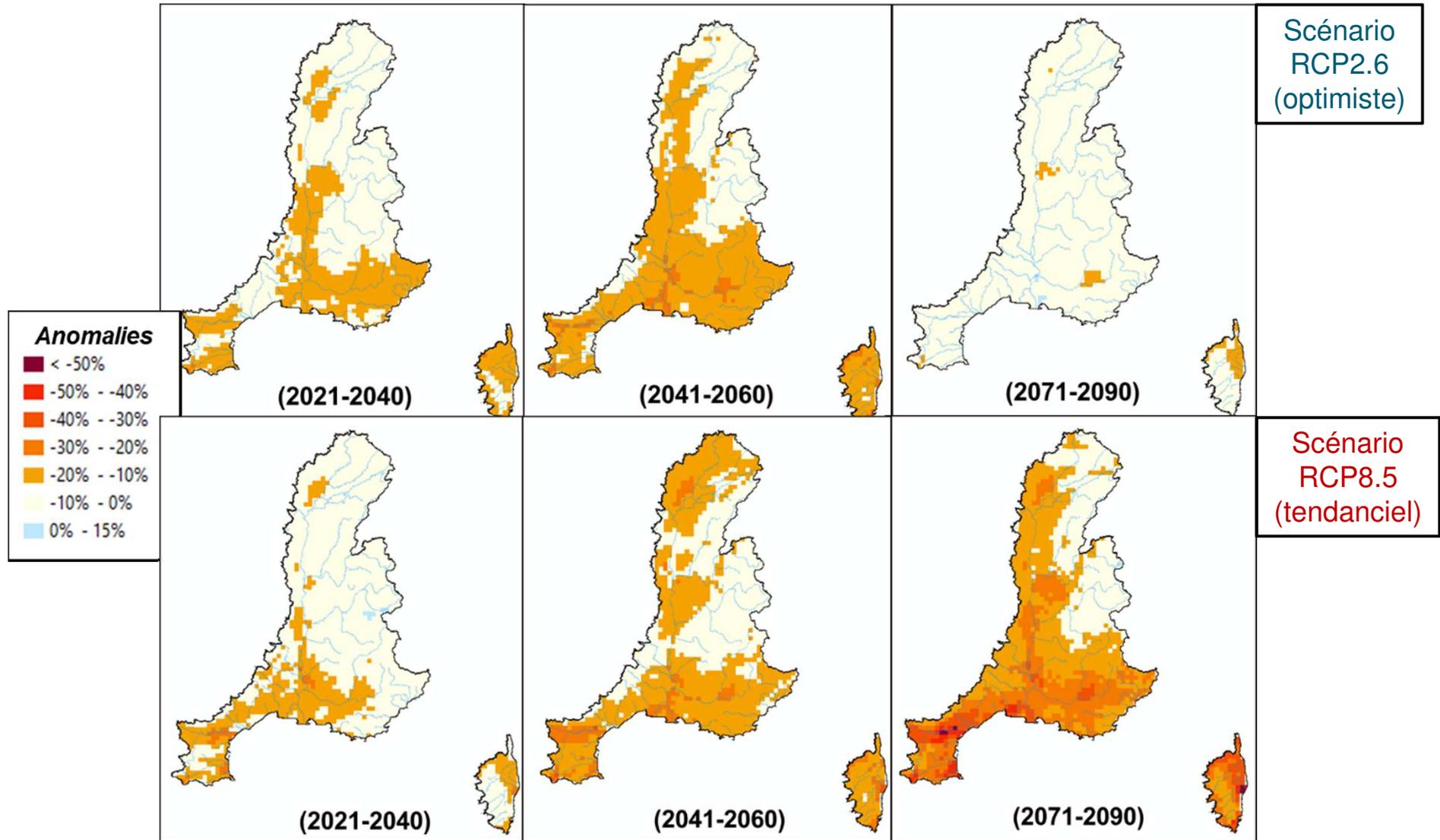
Analogues climatiques  
*Dayon (2016)*

Mailles SAFRAN (8 x 8 km)



# IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

## > Anomalies future de Pluie efficace annuelle (moy. 3 méthodes):



*Période de référence présent : moyenne interannuelle sur la période 1981-2010 (30 ans)*

# LA RECHARGE ARTIFICIELLE: UNE DES SOLUTIONS POUR FAIRE FACE AUX DÉFICITS FUTURS PROBABLES?

*La recharge ou la réalimentation artificielle (RA) d'un aquifère consiste à introduire de manière volontaire et maîtrisée, de l'eau dans une nappe pour augmenter sa recharge naturelle, en vue d'une utilisation ultérieure »*



# Quand est-il intéressant de mettre en œuvre la RA?

## ❑ Assurer un stockage supplémentaire

- Alternative à des ouvrages de stockage superficiels, transferts ou dessalement
- Réduire le risque inondation
- Adaptation au changement climatique

Propriétés	Retenue collinaire	Stockage en aquifère
Superficie de terrain requise	Elevé	Très petite
Proximité des zones urbaines	Loin	A l'intérieur
Coûts d'investissements	Elevés	Faibles
Coûts d'études	Elevés	Faibles
Débit de prise et d'approvisionnement en eau	Elevé	Faible
Pertes par évaporation	Modérées	Faibles
Problèmes d'algues toxiques	Modérés	Faibles
Moustiques	Modérés	Faibles
Pertes dans l'aquifère	Aucune	Aucune à élevées
Elimination des pathogènes	Faible	Significative
Potentiel de re-contamination	Modéré	Aucun à modéré
Energie de construction	Elevée	Faible
Energie de fonctionnement	Faible à modérée	Modérée
Milieu naturel nécessaire pour la viabilité	Vallée favorable	Aquifère favorable

Aujourd'hui surtout utilisé pour AEP...

Dillon et al. (2019)



# Quels types d'eau pour la RA?

## ❑ Eaux de surface

- Majorité des cas
- Tenir compte des contraintes type « volumes prélevables »
- Contrôler les MES (support pathogènes/contaminants et colmatage)
- Variabilité saisonnière

## ❑ Eaux usées

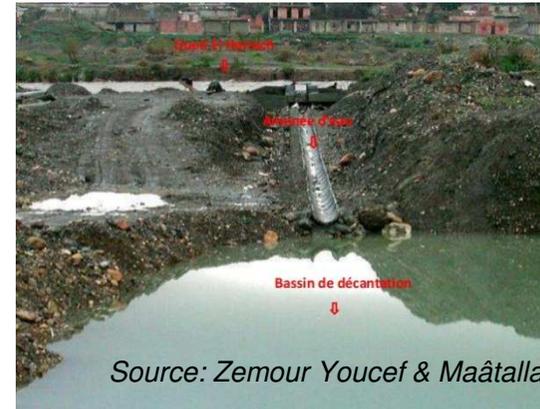
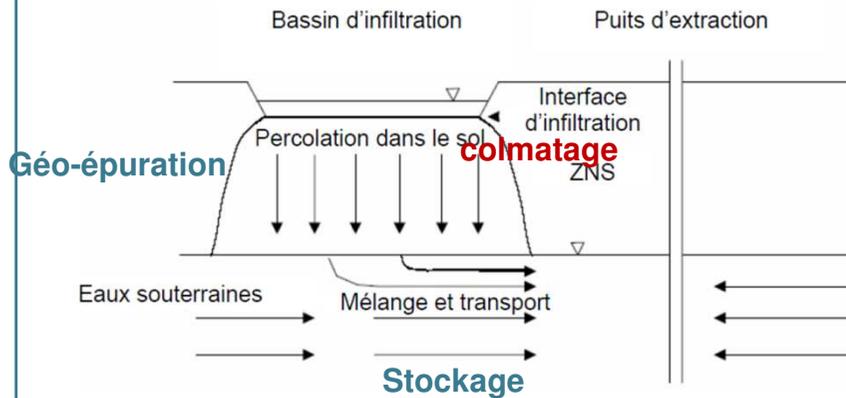
- France: Interdit de les utiliser pour RA
- Intérêt: stabilité dans le temps → arrosage golf, agriculture?
- Qualité bactériologique des eaux de rejet de STEP pas réglementée?
- Pas considérées dans le cadre de ce travail

RA intéressante pour stockage de volumes compris ~ 0,05 et 20 Mm<sup>3</sup>/an

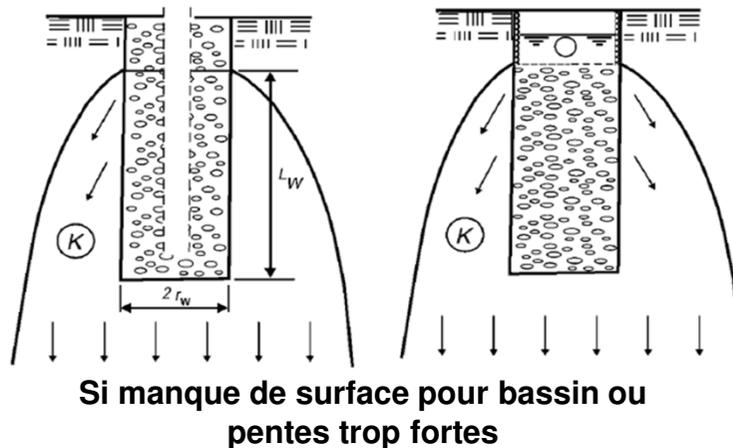
# Différents dispositifs de RA?

## ➤ Recharge indirecte

### ▪ Bassins d'infiltration



### ▪ Tranchées et puits d'infiltration



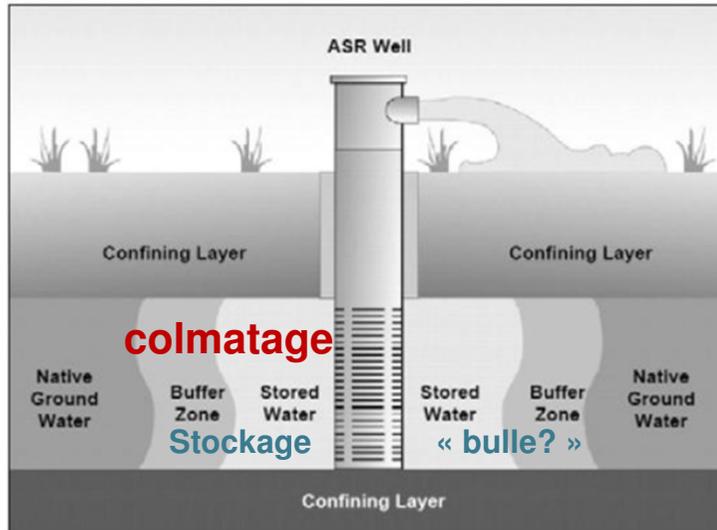
Localisation du site d'alimentation artificielle	Taux d'infiltration (en m/j)	Volume moyen infiltré (Mm <sup>3</sup> /an)
Croissy sur Seine (France)	0,5 – 3	50
Flins – Aubergenville (France)	0,15 – 1,5	7
Dortmund, Altendorf, Haltern et Krefeld (Allemagne)	2,4	220
Berlin (Allemagne)	0,4 – 3,9	70
La Haye, Amsterdam et Castricum (Pays-Bas)	0,15 – 5	102
Hardham (Sussex, Angleterre)	0,5 – 2	1
Lulea, Katrineholm (Suède)	0,24 – 15	?
Lettonie	0,7 – 1	?
Kaunas (Lituanie)	0,05 – 2,8	?

Detay (1997)

# Différents dispositifs de RA?

## ➤ Recharge directe

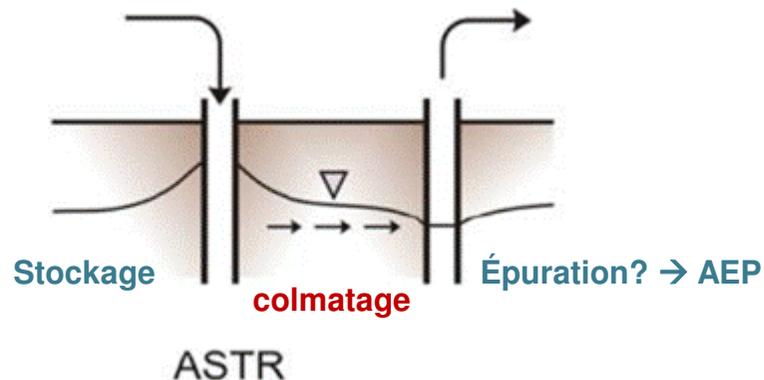
- Injection par même forage (ASR)



Localisation du projet	Taux d'injection en m <sup>3</sup> /j
Fresno, Californie (USA)	500 - 2 200
Los Angeles, Californie (USA)	2 900
Manhattan Beach, Californie (USA)	1 000 - 2 400
Orange Cove, Californie (USA)	1 700 - 2 200
San Fernando Valley, Californie (USA)	700
Tulare County, Californie (USA)	300
Orlando, Floride (USA)	500 - 51 000
Mud Lake, Idaho (USA)	500 - 2 400
Jackson County, Michigan (USA)	200
Newark, New-Jersey (USA)	1 500
Long Island, New-York (USA)	500 - 5 400
El Paso, Texas (USA)	5 600
High Plains, Texas (USA)	700 - 2 700
Williamsburg, Kentucky (USA)	700
Palo Alto, Californie (USA)	11 400
Orange County, Californie (USA)	57 000
Dashte Naz (Iran)	17 280
Tokushima (Japon)	600
Menuma (Japon)	4 000
Niigata (Japon)	20 000
Hodogaya (Japon)	840

Detay (1997)

- Injection et prélèvement par forages différents (ASTR)

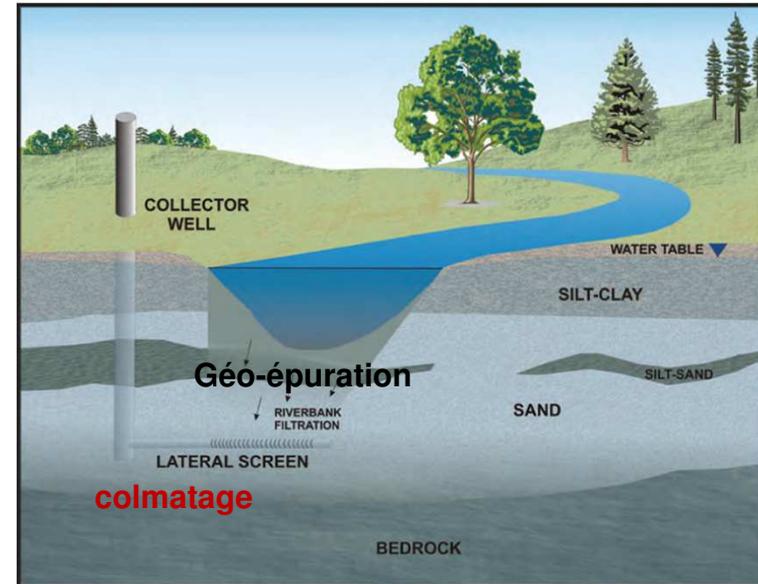
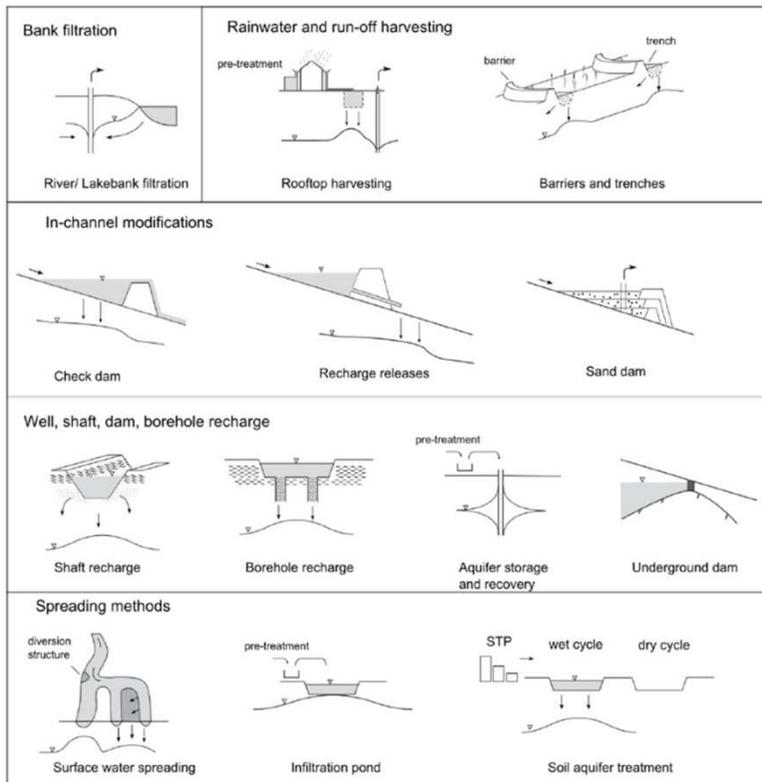


# Différents dispositifs de RA?

## ➤ Filtration par berge

- Appel d'eau d'une rivière par pompage

## ➤ Autres:



Source: Kelly and Rydlund (2006)

Combinaison de systèmes  
et multi-objectifs

# Conditions hydrogéologiques

- **Principaux paramètres:**

- Épaisseur et perméabilité de la zone non-saturée
- Perméabilité aquifère (verticale forte et horizontale faible)
- Emmagasinement et diffusivité (T/S)

- **Surtout dans les aquifères alluviaux**

- **Potentiel des formations sédimentaires (karst) et socle (local)**

- **Recharge indirecte → aquifères libres ou semi-captifs**

- **Recharge directe → aquifères captifs**

# Quelle réglementation pour la RA en France?

- **Autorisation préfectorale + étude d'impact**
- **Eau de recharge ne doit pas compromettre la réalisation des objectifs environnementaux de l'eau de la nappe**
- **Pas d'utilisation de rejets d'ICPE**
- **Ne pas perturber l'atteinte du bon état (DCE)**
- **Reuse interdite**

# Quel cadre institutionnel pour la RA?

- **RA mentionnée dans le SDAGE**
- **Principaux acteurs:**
  - ❖ Maître d'ouvrage: public / privé
  - ❖ Maître d'œuvre: BE + entreprise génie civil et/ou forage
  - ❖ Exploitant: peut être différent du MOu
  - ❖ Préfecture: autorisation
  - ❖ ARS: contrôle et surveillance
  - ❖ AE RM&C: soutien financier et redevances



# *CARTOGRAPHIE DE FAISABILITÉ DE LA RECHARGE ARTIFICIELLE (ECHELLE BASSIN)*

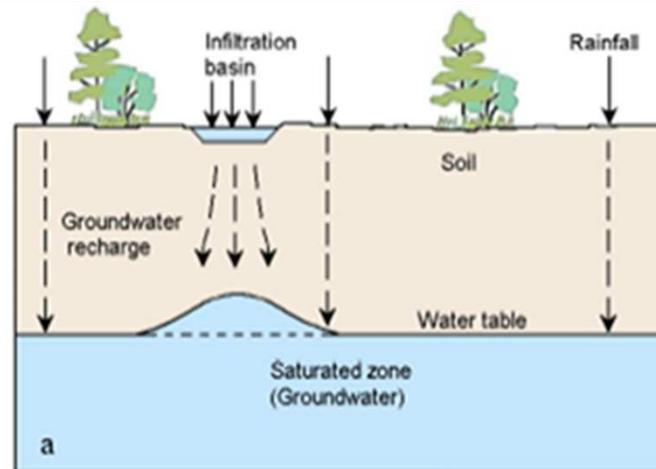


Géosciences pour une Terre durable

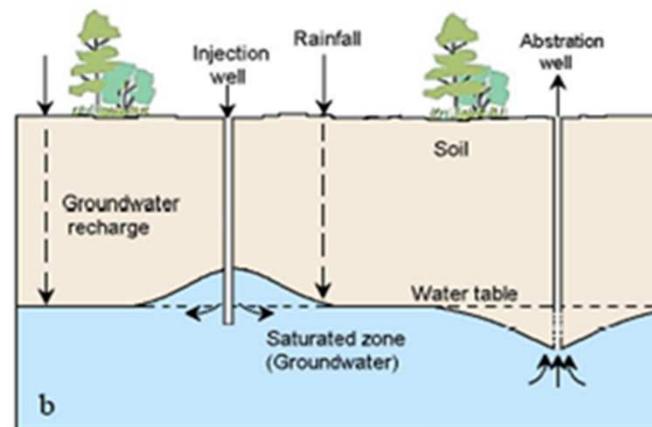
**brgm**

# TYPE DE DISPOSITIFS DE RA CONSIDÉRÉS

- Infiltration indirecte (RAI)



- Injection directe (RAD)



# RAI: 4 CRITÈRES PHYSIQUES PRIS EN COMPTE

- **PENTE:** D'après la littérature, méthodes indirectes applicables uniquement sur des terrains plats **entre 0 et 3 %**

Note attribuée	Défavorable	Très peu favorable	Peu favorable	Moyennement favorable	Favorable
Type de critère	0	1	2	3	4
Pente	-	> 30 %	8 - 30 %	3 - 8 % (moy)	0 - 3 % (moy)

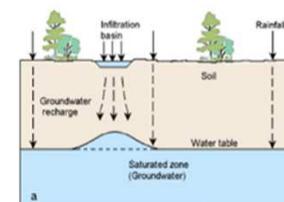
- **IDPR:** Permet de qualifier le caractère infiltrant du sol et du sous-sol

Note attribuée	Défavorable	Très peu favorable	Peu favorable	Moyennement favorable	Favorable
Type de critère	0	1	2	3	4
IDPR	-	moy > 1400	std > 400	std < 400	moy < 600

- **Epaisseur de la zone non saturée:** besoin d'espace pour stocker de l'eau.

Note attribuée	Défavorable	Très peu favorable	Peu favorable	Moyennement favorable	Favorable
Type de critère	0	1	2	3	4
Epaisseur de la ZNS	< 1m	$1 < e < 2$	71 - 100	41 - 70	<b>2-40</b>

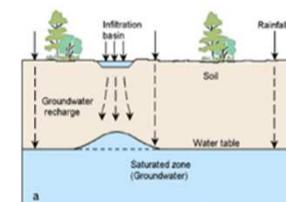
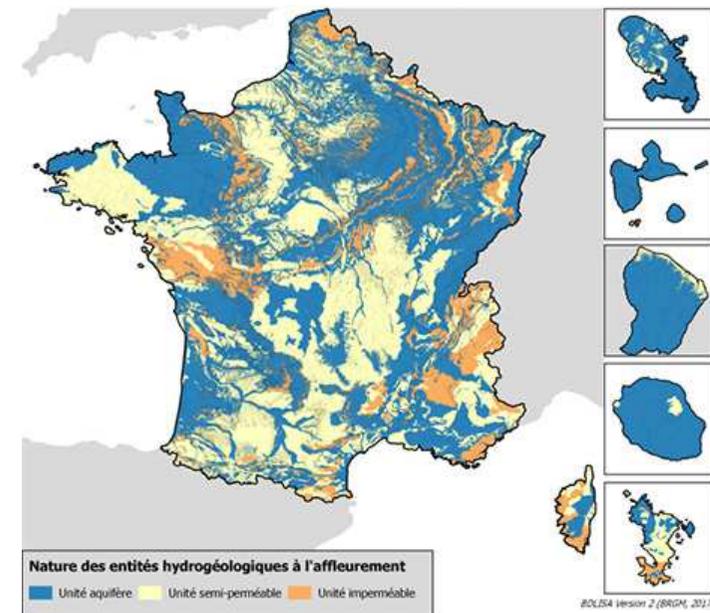
- **BD LISA:** type d'aquifère, caractéristiques hydrodynamiques favorables pour le stockage d'eau



# RAI: LA BDLISA POUR QUALIFIER LES AQUIFÈRES

- Utilisation du niveau local (3), échelle de l'ordre du 1/50 000, pour être le plus précis possible.
- Entités superficielles: ordre 1
- Critères contenus dans la table attributaire pour chaque entité:

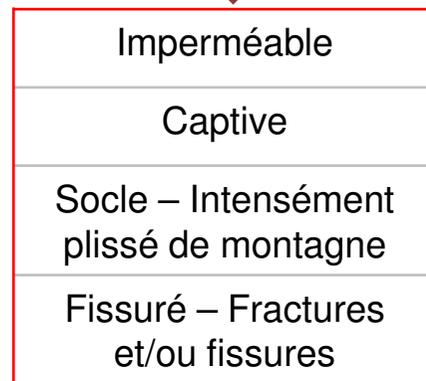
« Nature »	« Etat »	« Thème »	« Milieu »
X : NoData	X : NoData	X : NoData	X : NoData
0 : Inconnu (absent sur bassin RMC)	0 : Inconnu	0 : Inconnu	0 : Inconnu
1 : Grand système aquifère (absent sur bassin RMC)	1 : Nappe captive	1 : Alluvial	1 : Poreux
2 : Grand domaine hydrogéologique (absent sur bassin RMC)	2 : Nappe libre	2 : Sédimentaire	2 : Fissuré
3 : Système Aquifère	3 : Libres et captives	3 : Socle	3 : Karstique
4 : Domaine hydrogéologique	4 : Alternativement libre puis captive	4 : Intensément plissés de montagne	4 : Matricielle / fissures
5 : Unité aquifère	5 : Semi-captive	5 : Volcanisme	5 : Karstique / fissures
6 : Unité semi-perméable	-	-	6 : Fractures et/ou fissures
7 : Unité imperméable	-	-	7 : Matricielle / fractures
	-	-	8 : Matricielle / karstique
	-	-	9 : Matrice/fracture/ karst
	-	-	-



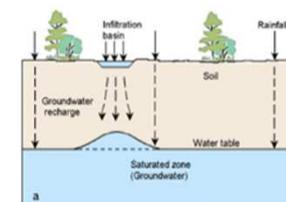
# RAI: LA BDLISA POUR QUALIFIER LES AQUIFÈRES

- Notes attribuées aux critères:

Note attribuée	Défavorable	Très peu favorable	Peu favorable	Moyennement favorable	Favorable
Type de critère	0	1	2	3	4
BDLISA: « Nature »	7-4	X-4-NoData	6	3	5
BDLISA: « Etat »	1	0-X-5-NoData	3-4	4	2
BDLISA: « Thème »	3-4	X-NoData	5-2	2	1
BDLISA: « Milieu »	2-6	X-0-NoData	3-5-9	4-7-8	1



$$BDLISA = \frac{(2 \times Nature + 1 \times Etat + 0,2 \times Milieu + 2 \times Thème)}{2 + 1 + 0,2 + 2}$$

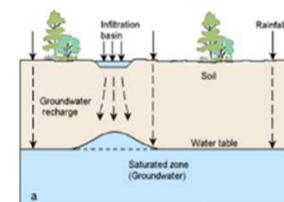
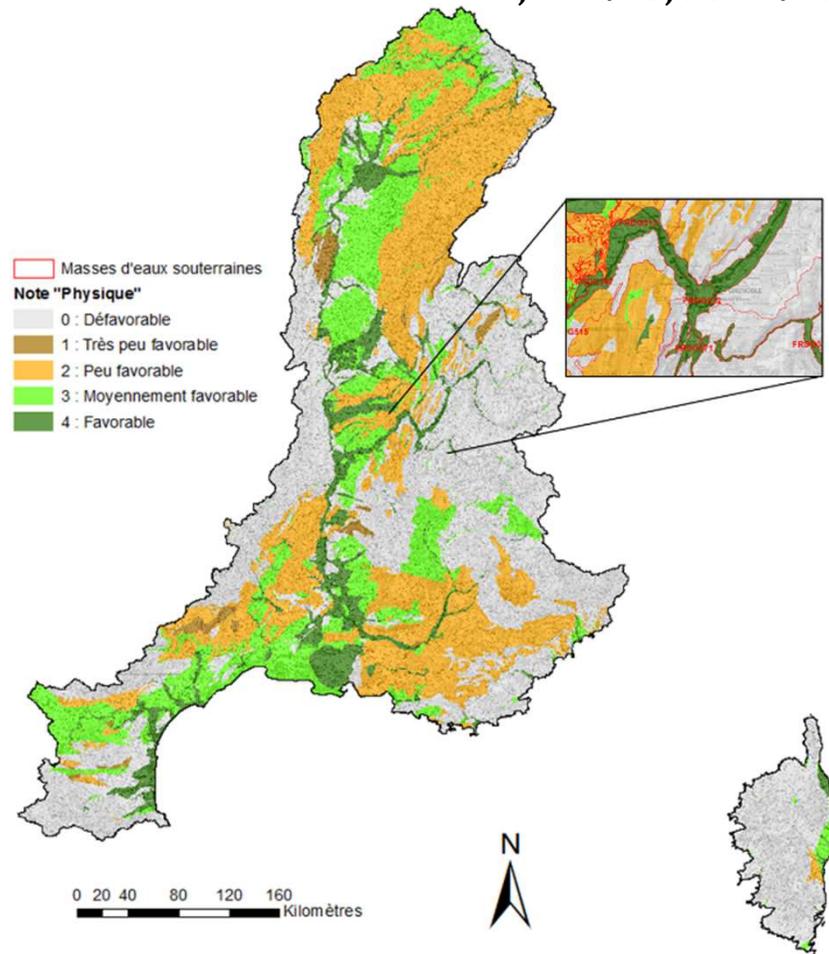


# RAI: COMBINAISON DES PARAMÈTRES PHYSIQUES

## Pondération à dire d'expert (Saaty)

- Combinaison statistique de plusieurs sensibilités/expertises pour la pondération des paramètres

$$\text{Critères Physiques} = \frac{(0.49 \times BDLISA + 0.057 \times Pente + 0.2 \times IDPR + 0.12 \times ZNS)}{0,49 + 0,057 + 0,2 + 0,12}$$





# *CARTOGRAPHIE DE FAISABILITÉ DE LA RECHARGE ARTIFICIELLE (ECHELLE LOCALE)*

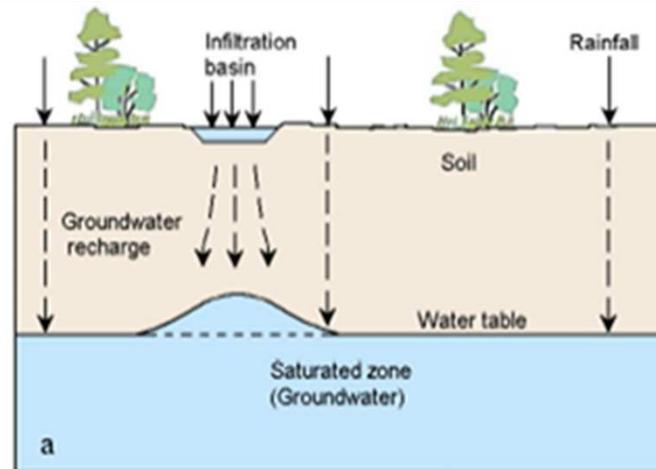


Géosciences pour une Terre durable

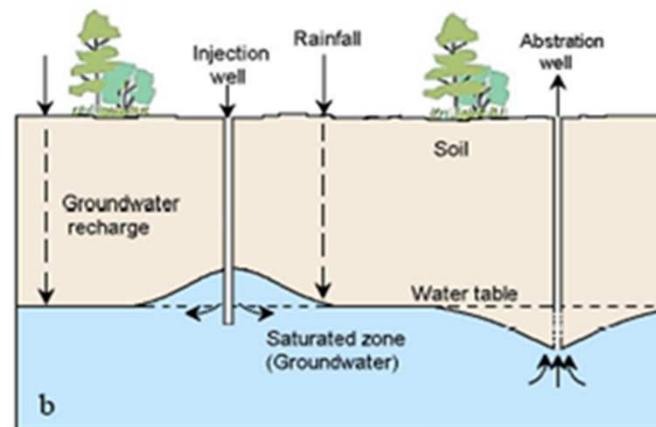
# brgm

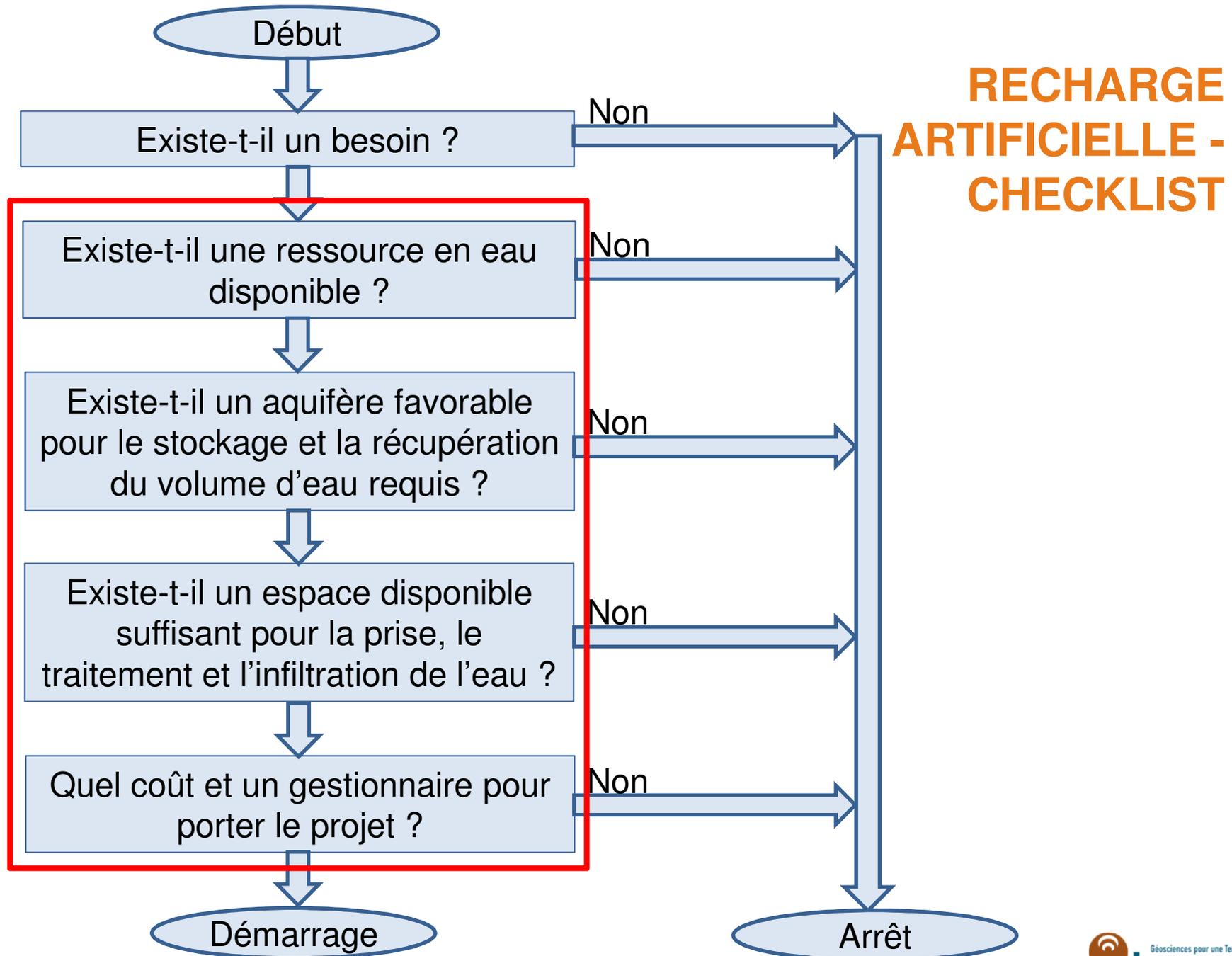
# TYPE DE DISPOSITIFS DE RA CONSIDÉRÉS

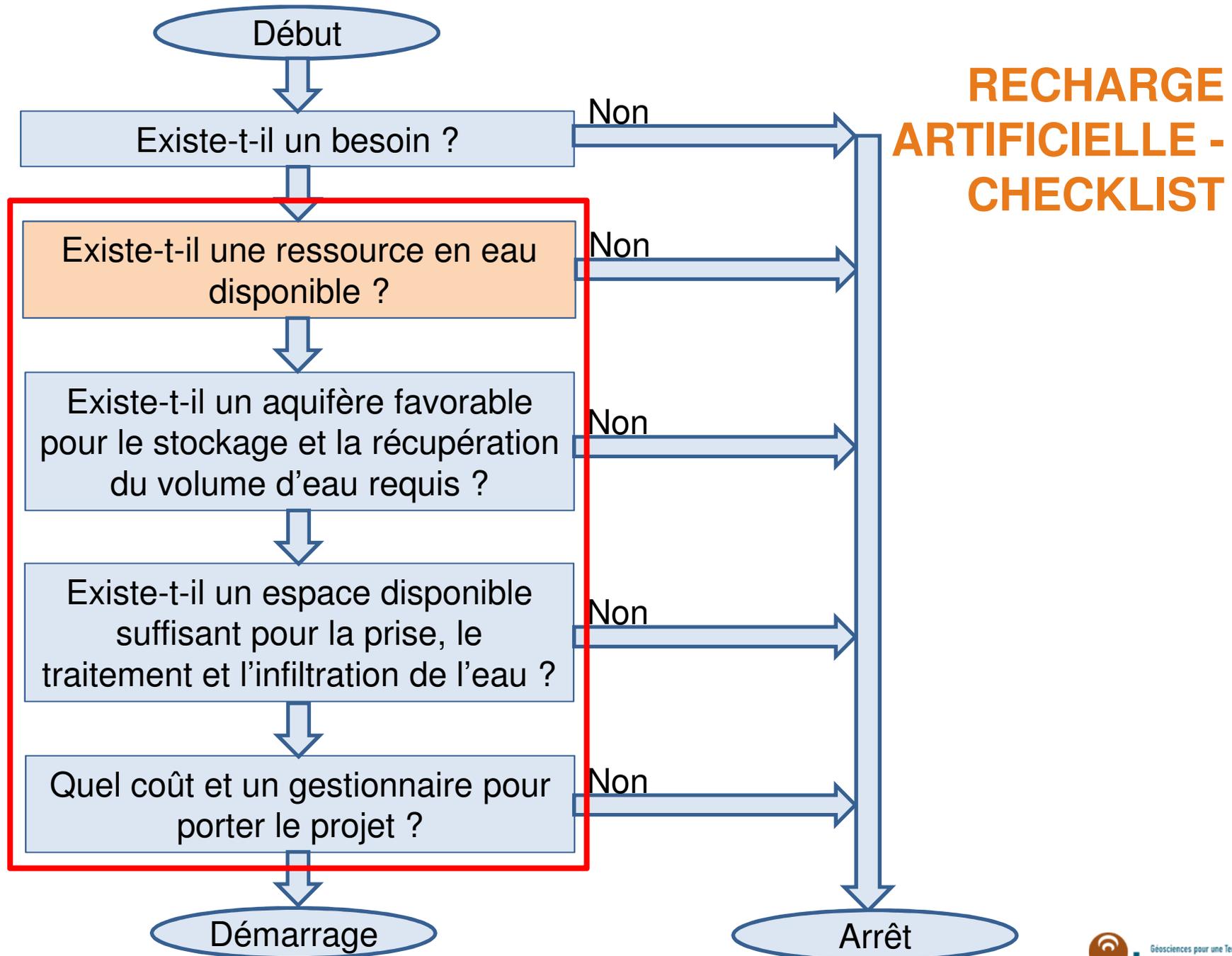
- Infiltration indirecte (RAI)



- Injection directe (RAD)







# RECHARGE ARTIFICIELLE - CHECKLIST

# EAU DE SURFACE SÉLECTIONNÉE

## CRITÈRES DE SÉLECTION : QUANTITÉ

- **Données Quantité des cours d'eau :**

Source : Banque HYDRO, rapports d'études (dont EVP)

- **Données exploitées :**

- Module
- QMNA5
- Débits réservés
- Débits objectifs d'étiage (DOE)

⇒ Dans le cas où aucun Q réservé n'est renseigné, on considère Q réservé = 1/10<sup>e</sup> du Module

- **Conditions de sélection du cours d'eau :**

RA toute l'année:

$$(Module - Q \text{ réservé}) > Q \text{ recharge}$$

RA en période d'étiage:

$$(QMNA5 - Q \text{ réservé}) > Q \text{ recharge}$$

**ET**

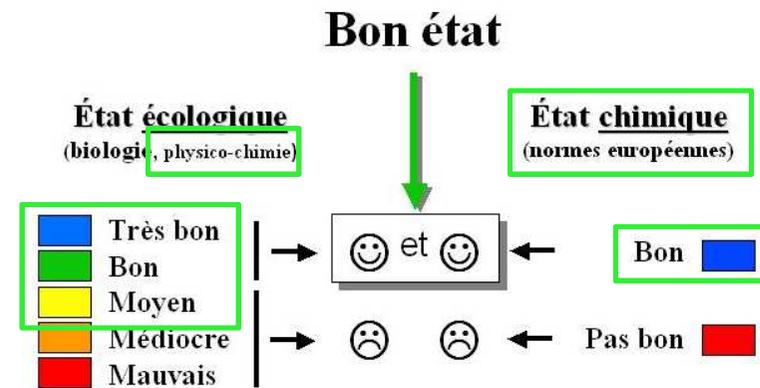
$$(QMNA5 - DOE) > Q \text{ recharge}$$

⇒ Si les dernières conditions ne sont pas respectées, pas de recharge en période d'étiage.

⇒ Dans le cas où aucune information quantitative n'est donnée, le cours d'eau est exclu.

# EAU DE SURFACE SÉLECTIONNÉE

## CRITÈRES DE SÉLECTION : QUALITÉ



- Données Qualité :

Source : Données techniques de référence du SDAGE 2016 – 2021

- Critères étudiés :

*Etat Physico-Chimique* (inclus dans l'Etat Ecologique) : Nitrates, Phosphates, MES, température, O<sub>2</sub>, conductivité, ...

*Etat Chimique* : Substances prioritaires DCE

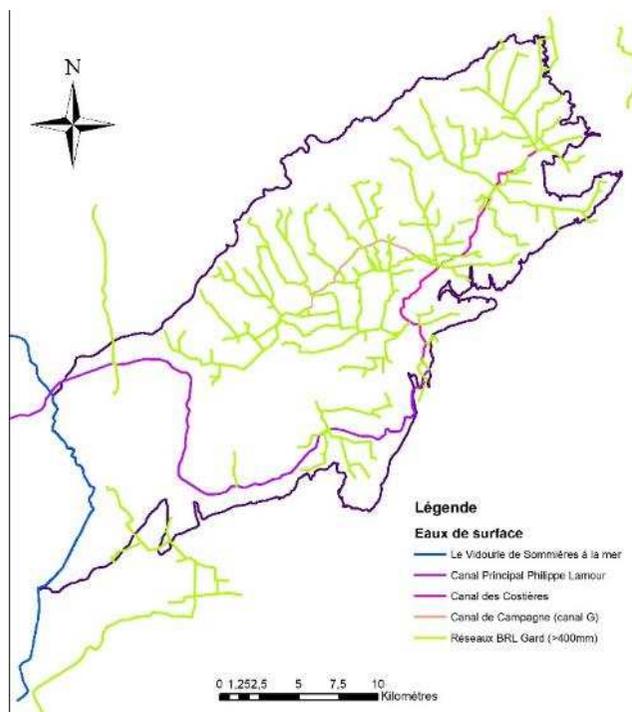
- Conditions de sélection du cours d'eau :

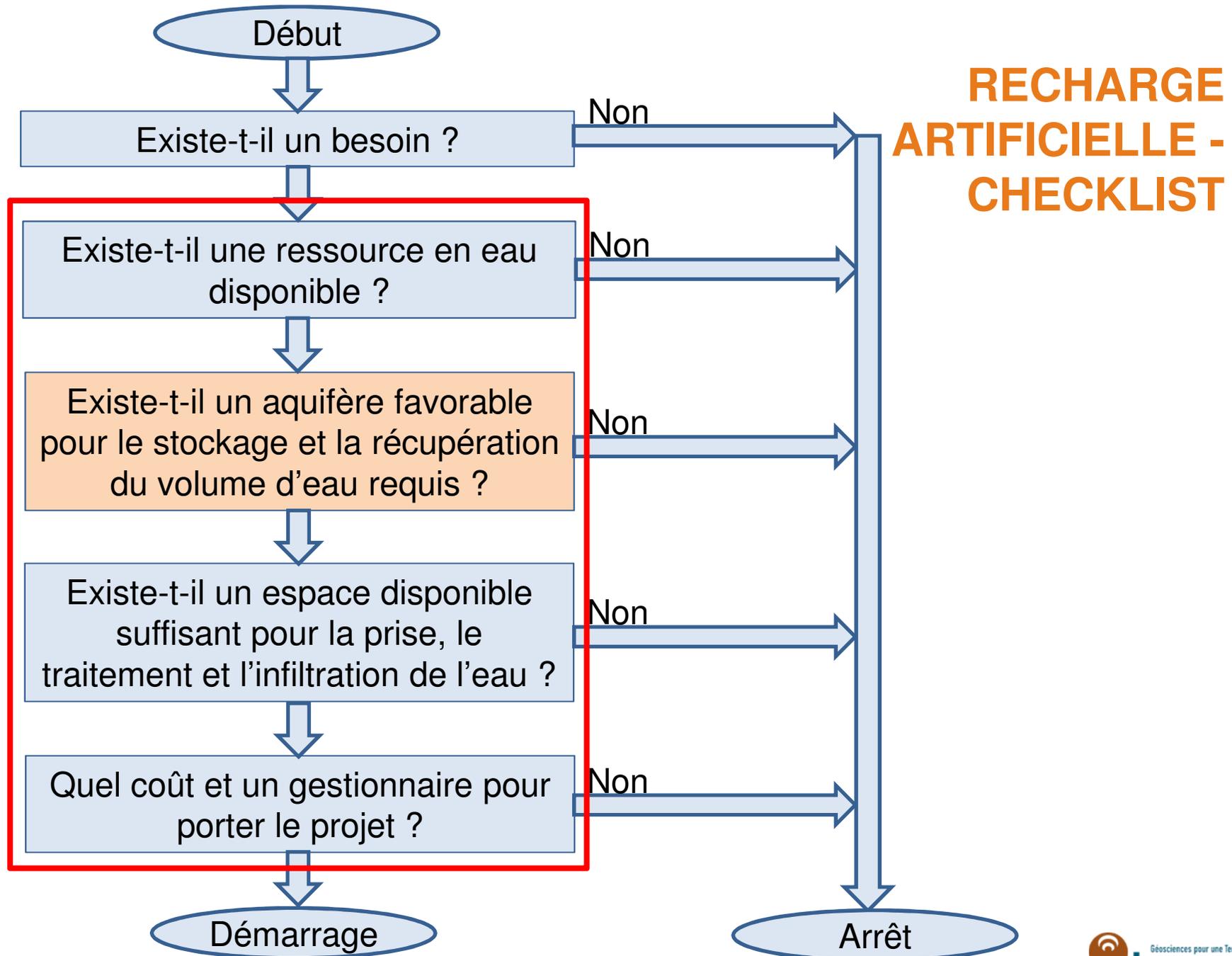
⇒ Dans le cas où aucune information qualitative n'est disponible, le cours d'eau est exclu.

# APPLICATION: VISTRENQUE ET COSTIÈRES

## RÉSULTATS

Sites Pilotes	Volumes objectifs de RA	Ressources potentielles	Critère Quantité	Critère Qualité	
				Physico-chimique	Chimique
Vistrenque et Costières	1 Mm3/an sur 243j	Le Vidourle	Possible hors période estivale	Bon	Bon
		Canaux BRL (Lamour, Costières, Campagne) et réseaux d'eau brute gardois BRL (provenance: Rhône)	Hors période estivale (éviter les conflits d'usage : AEP, irrigation)		





# RECHARGE ARTIFICIELLE - CHECKLIST

## ANALYSE SPATIALE MULTICRITÈRES

### Critères physiques:

- Epaisseur de la **ZNS** (100m\*100m, BRGM)
- **IDPR** (50m\*50m, BRGM)
- **Pente** (calculée à partir du MNT, 50m\*50m, IGN)
- **Perméabilité K** (résolutions diverses dont plus fine = 300m\*300m, issues de modèles hydrodynamiques existants)
- **Recouvrement** (d'après les cartes géologiques départementales harmonisées du BRGM, échelle 1/50 000)



$$0.25 \times EpZNS + 0.25 \times IDPR + 0.25 \times Pente + 0.15 \times K + 0.10 \times Recouvr.$$

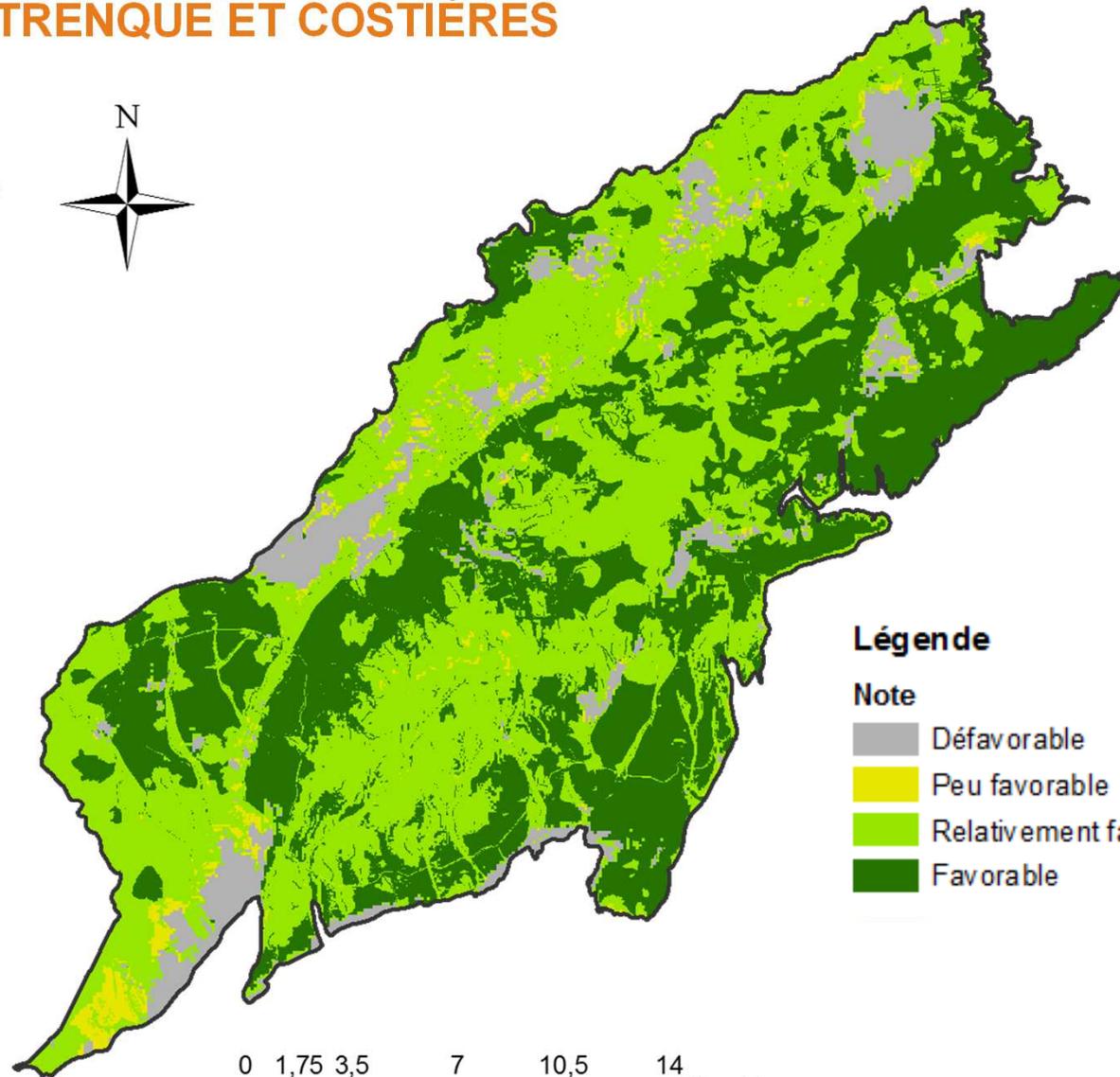
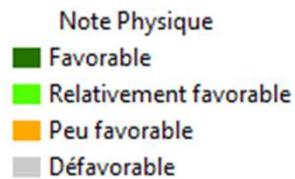
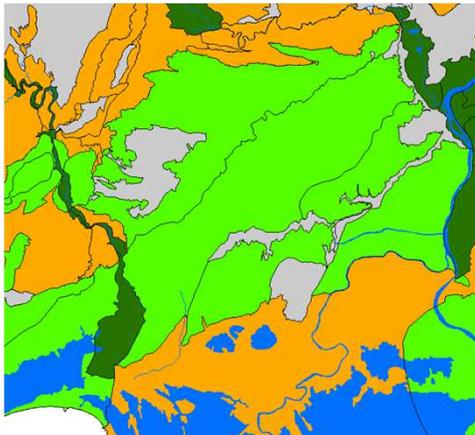
# APPLICATION: VISTRENQUE ET COSTIÈRES

BD LISA: 647AA

✓ Carte des critères physiques

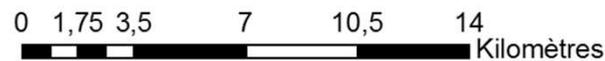
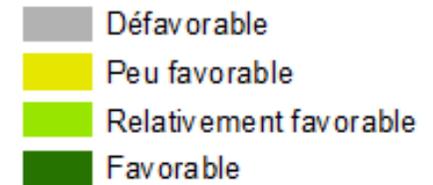


Extrait carte bassin RMC



## Légende

### Note

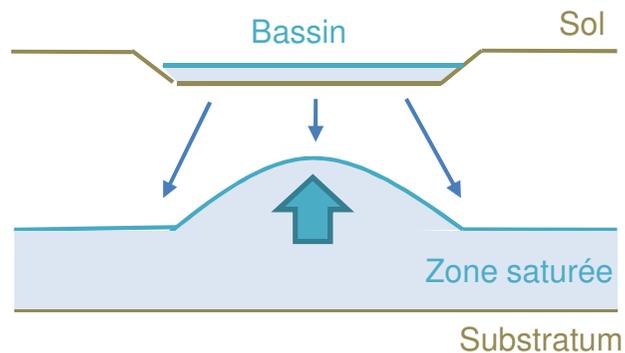


# HYDRODYNAMIQUE DU PROCESSUS DE RA

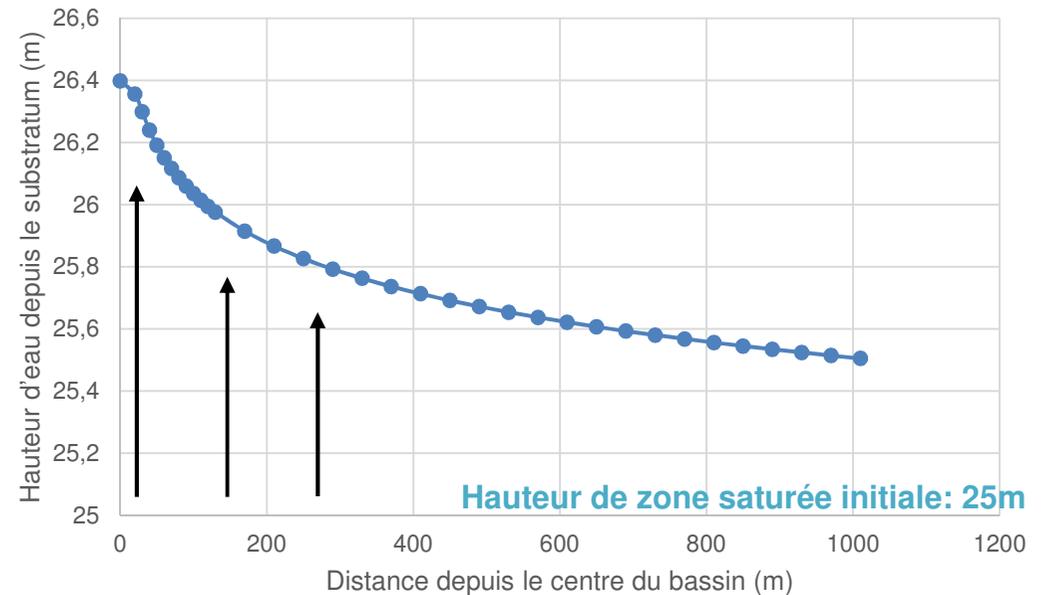
## DÔME PIÉZOMÉTRIQUE RÉSULTANT DE LA RA

**Objectif:** Estimer le dôme piézométrique induit par la RA sur site en fonction du volume rechargé

→ Utilisation de la méthode d'Hantush (1967) permettant d'estimer la hauteur et l'étendue du dôme piézométrique créé par l'infiltration de ces volumes d'eau. Prend en considération la vitesse d'infiltration, la porosité, la perméabilité du terrain, les dimensions du dispositif, la durée de la recharge, et l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère.



Exemple de dôme piézométrique  
(BLV, test 5Mm<sup>3</sup>/an)

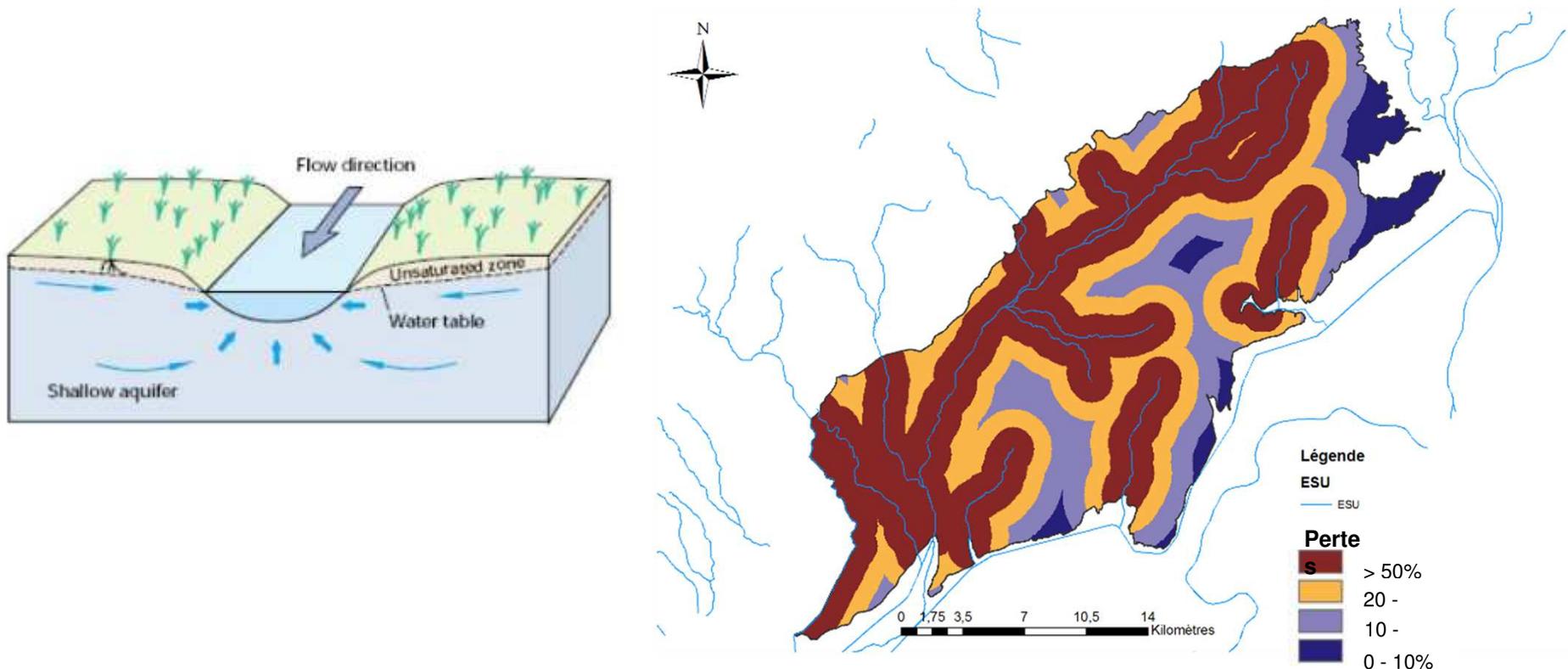


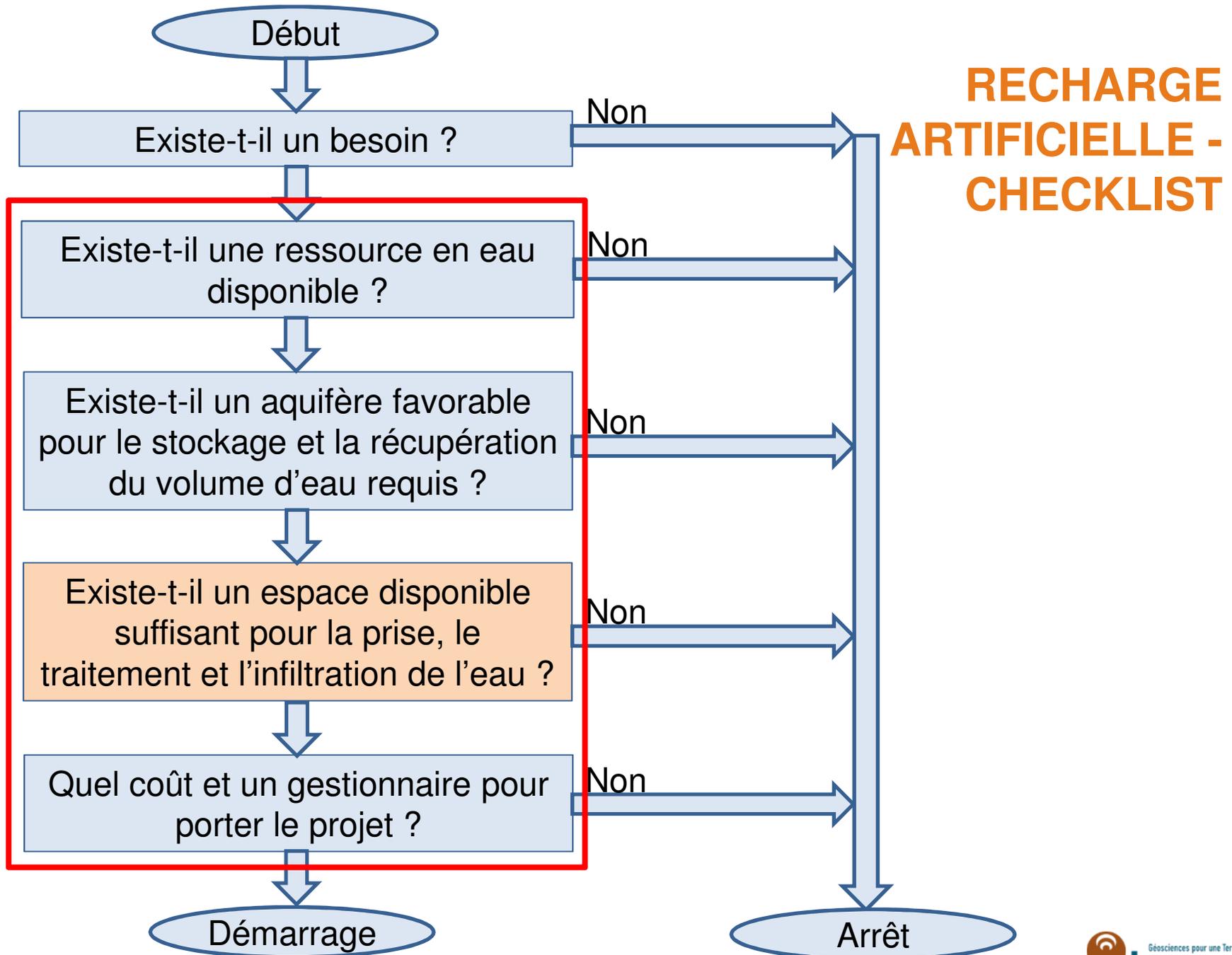
# HYDRODYNAMIQUE DU PROCESSUS DE RA

## FLUX VERS LES COURS D'EAU

**Objectif:** Répondre à l'interrogation concernant le devenir des eaux rechargées, en terme d'interaction avec les cours d'eau

→ Utilisation de solutions analytiques permettant d'évaluer les pertes en cours d'eau, en considérant les volumes infiltrés et les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.





# RECHARGE ARTIFICIELLE - CHECKLIST

## ANALYSE SPATIALE MULTICRITÈRES

### Critères de contrainte:

- **Occupation du sol** : CORINE Land Cover + BD Carto IGN (pour zones hydrographiques)
- Zones à risque d'inondations par **remontées de nappe** (cartes créées à partir de la carte EpZNS du BRGM et la connaissance du battement des nappes concernées (données ADES, biblio))
- **Zones Protégées** (Inventaire National du Patrimoine Naturel / DREAL, 2016)

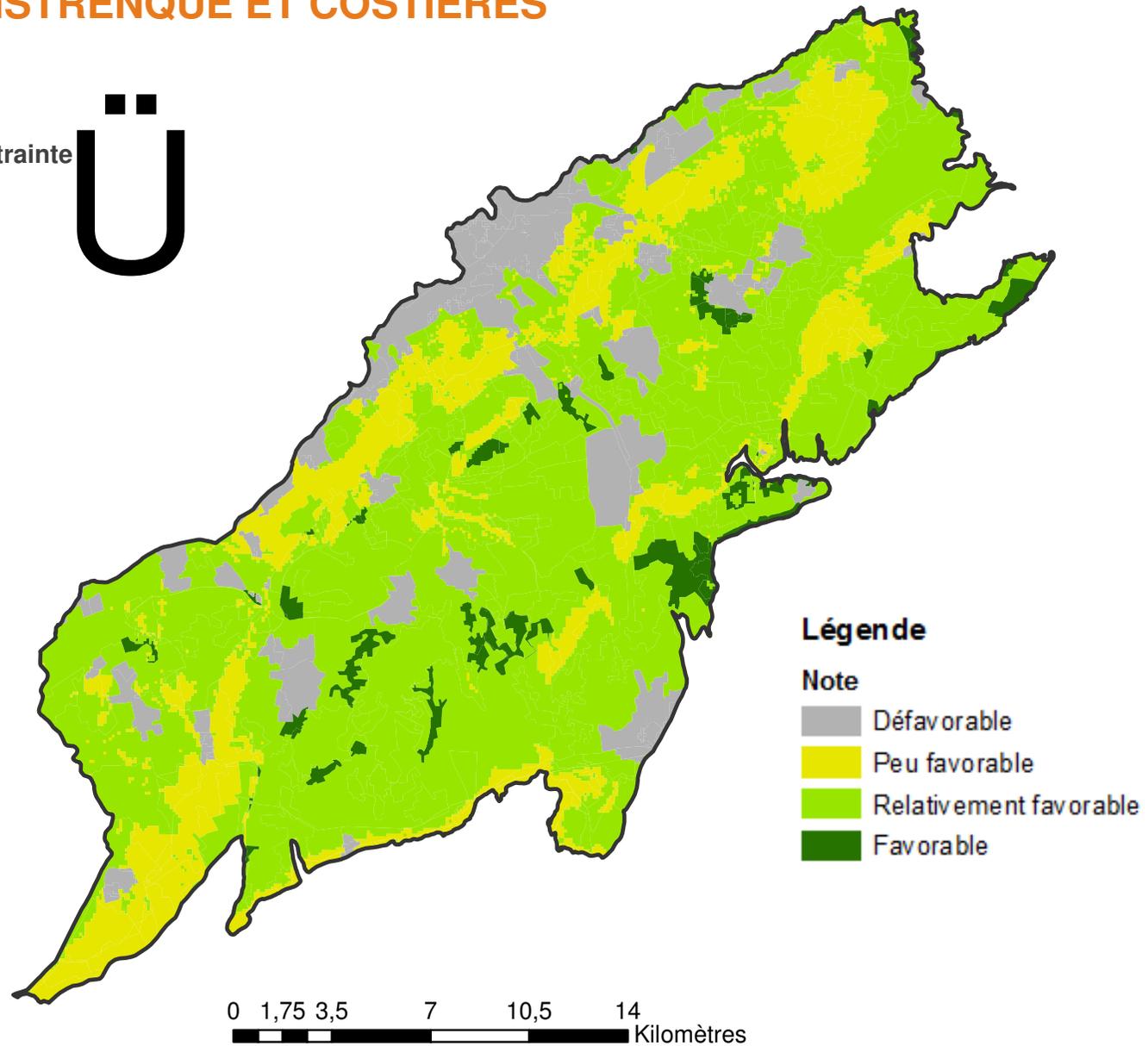


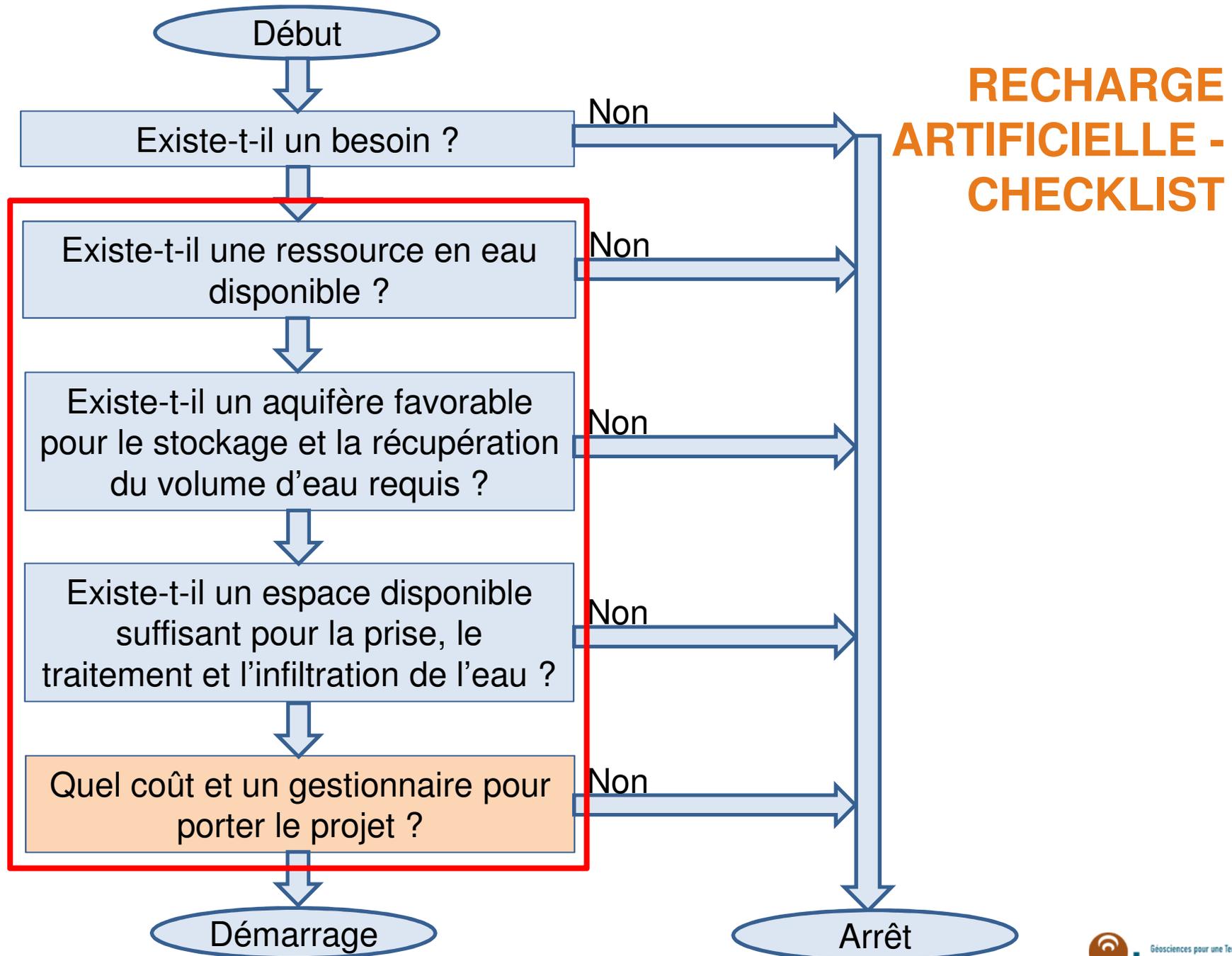
$$(1 \times \text{Occ. Sol} + 1 \times \text{Rem. Nappe} + 1 \times \text{Zones Prot.}) / 3$$

# APPLICATION: VISTRENQUE ET COSTIÈRES

BD LISA: 647AA

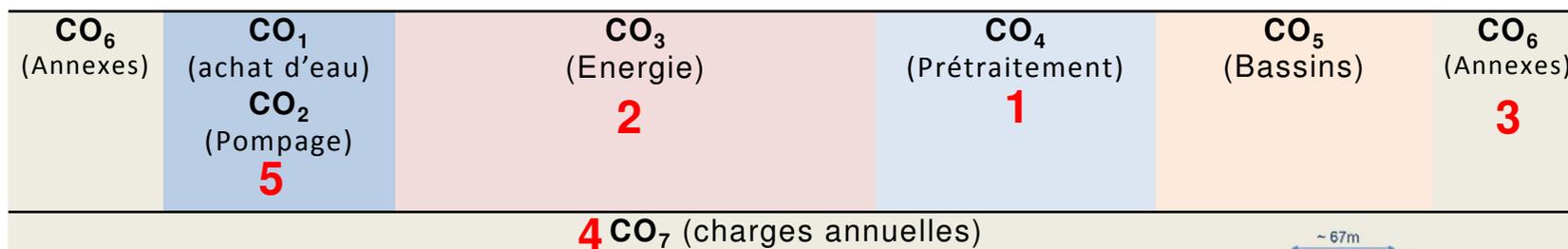
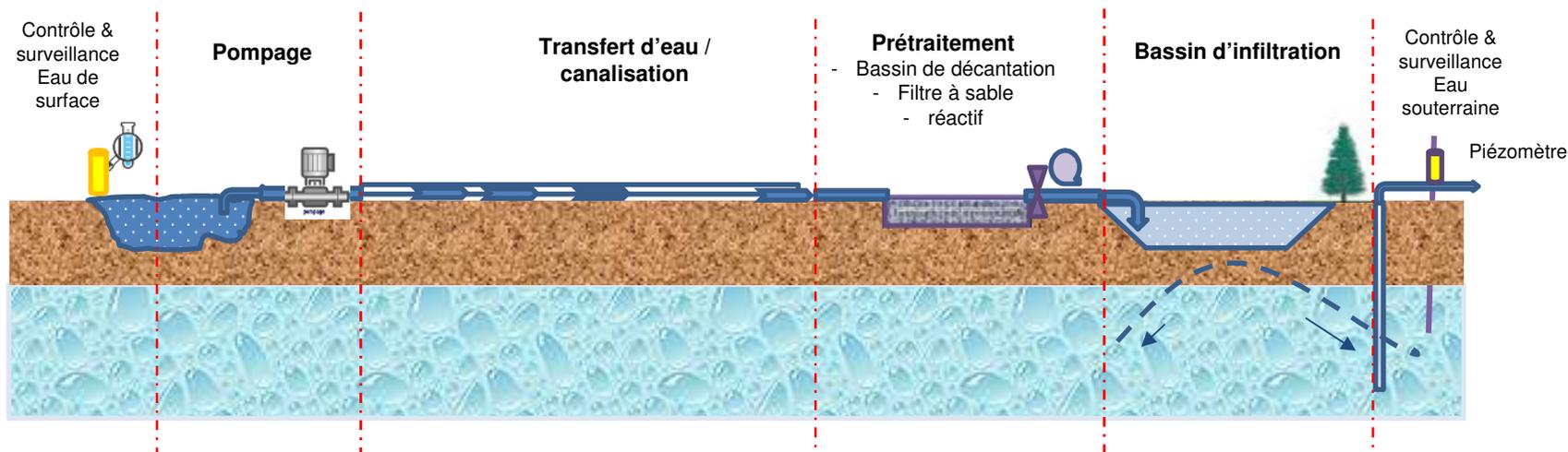
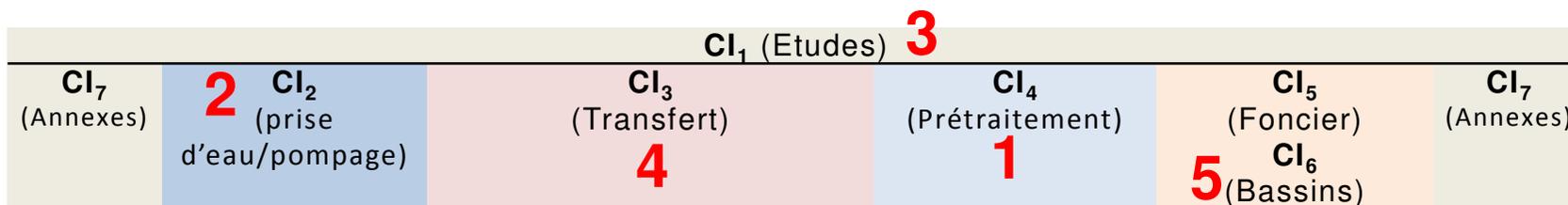
✓ Carte des critères de contrainte





# SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UN DISPOSITIF DE RA INDIRECTE

## RÉPARTITION DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES DES COÛTS D'INVESTISSEMENT (CI) ET DES COÛTS OPÉRATIONNELS (CO)



**Exemple générique**

- ✓ Q<sub>r</sub> = 1 Mm<sup>3</sup>/an
- ✓ N<sub>j</sub> = 243 jours
- ✓ i = 1 m/j



# CARTOGRAPHIE ISO-COÛT

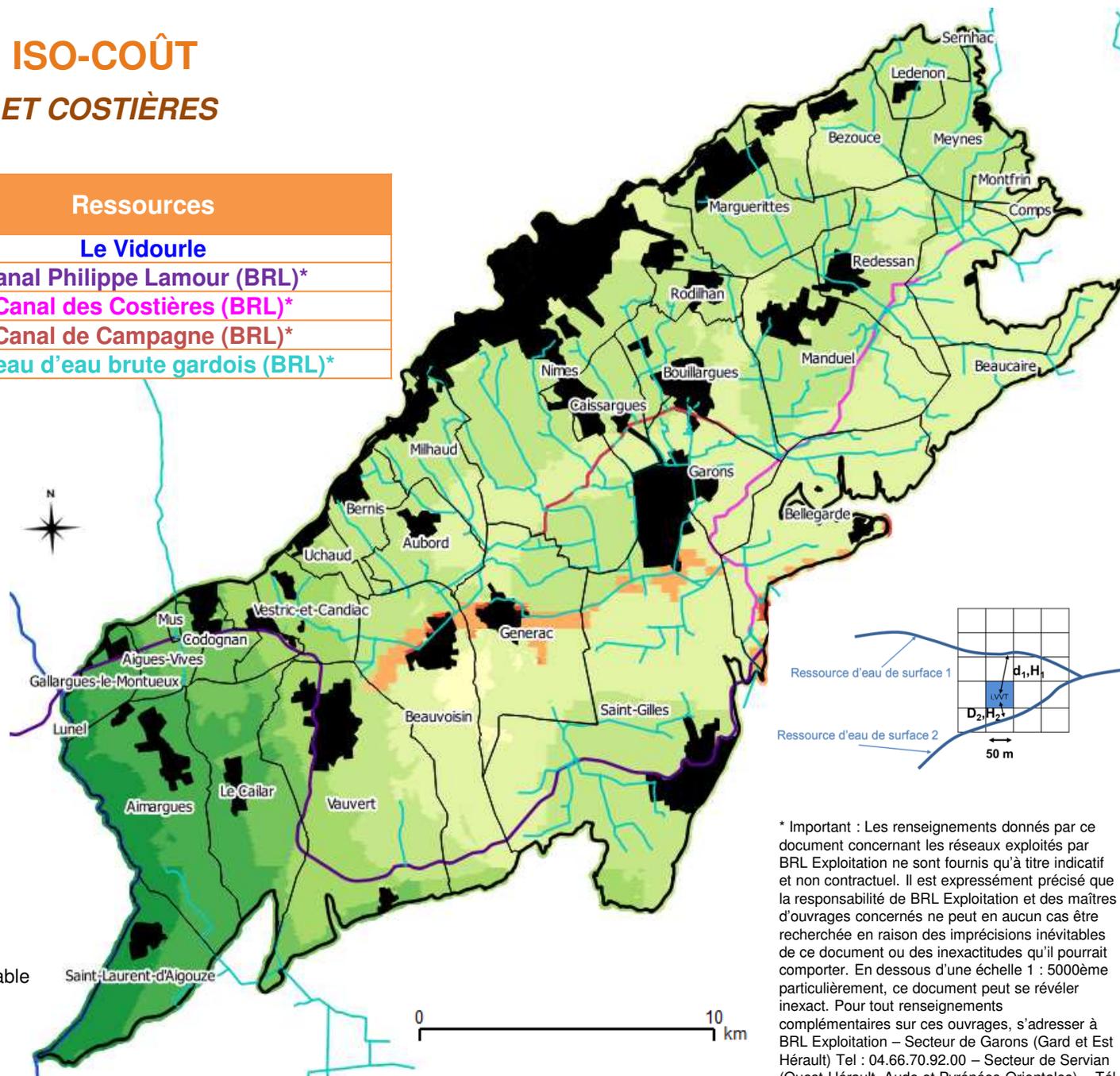
## CAS 2: VISTRENQUE ET COSTIÈRES

Qr	Nj	Ressources
1 Mm <sup>3</sup> /an	243j	Le Vidourle
		Canal Philippe Lamour (BRL)*
		Canal des Costières (BRL)*
		Canal de Campagne (BRL)*
		Réseau d'eau brute gardois (BRL)*

### CRA tot (€/m<sup>3</sup>)

- 0.1353 - 0.1500
- 0.1500 - 0.2000
- 0.2000 - 0.2500
- 0.2500 - 0.3000
- 0.3000 - 0.3500
- 0.3500 - 0.4000
- 0.4000 - 0.4500
- 0.4500 - 0.5000
- 0.5000 - 0.5500
- 0.5500 - 0.6000
- 0.6000 - 0.6500
- 0.6500 - 0.7000
- 0.7000 - 0.7059

■ Zones carte contraintes défavorable



\* Important : Les renseignements donnés par ce document concernant les réseaux exploités par BRL Exploitation ne sont fournis qu'à titre indicatif et non contractuel. Il est expressément précisé que la responsabilité de BRL Exploitation et des maîtres d'ouvrages concernés ne peut en aucun cas être recherchée en raison des imprécisions inévitables de ce document ou des inexactitudes qu'il pourrait comporter. En dessous d'une échelle 1 : 5000ème particulièrement, ce document peut se révéler inexact. Pour tout renseignements complémentaires sur ces ouvrages, s'adresser à BRL Exploitation – Secteur de Garons (Gard et Est Hérault) Tel : 04.66.70.92.00 – Secteur de Servian (Ouest Hérault, Aude et Pyrénées-Orientales) – Tél : 04.67.32.68.00

# CONCLUSION

Les méthodes proposées permettent d'identifier, à différentes échelles spatiales, un site favorable à la recharge artificielle grâce à la prise en compte de différents critères, suivant l'échelle spatiale visée.

Elles peuvent être mobilisées pour identifier le potentiel de mise en œuvre de stratégies de stockage de la ressource en eau souterraine via des dispositifs de recharge artificielle indirecte ou directe.

Les qualité du résultat cartographique obtenu dépend de la disponibilité et de la qualité de la connaissance des critères utilisés et doit être vérifiée pour la mise en œuvre effective d'un projet de recharge artificielle

