



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



RGA : Comprendre, Anticiper, Prévenir

Projet IRGAK

JST DU 06/03/2025

Benjamin Dardé, ESTP
bdarde@estp.fr



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



Projet IRGAK

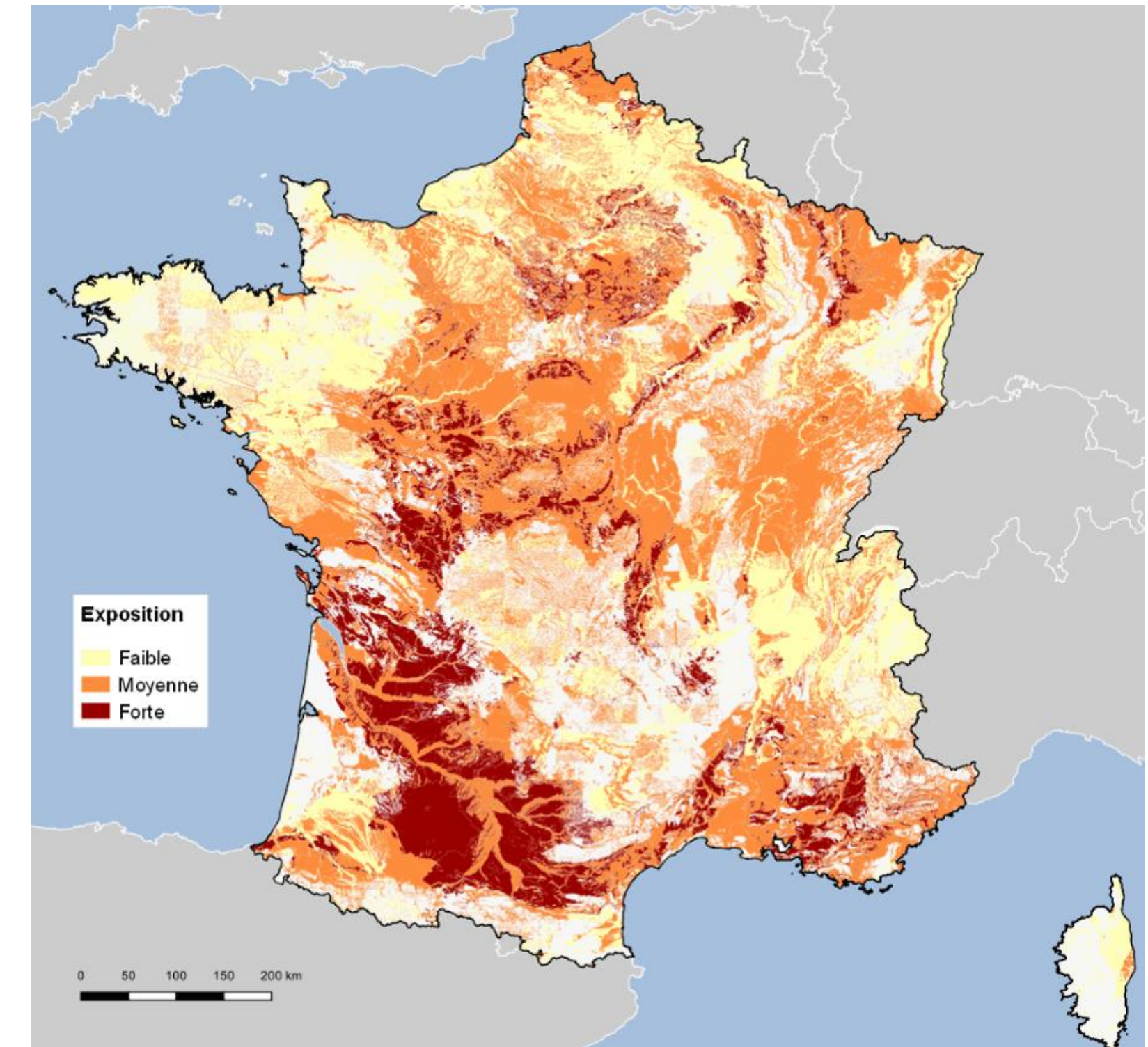
Développement d'une solution de traitement in situ

RGA : COMPRENDRE, ANTICIPER, PRÉVENIR
JST DU 06/03/2025

Alea RGA en France

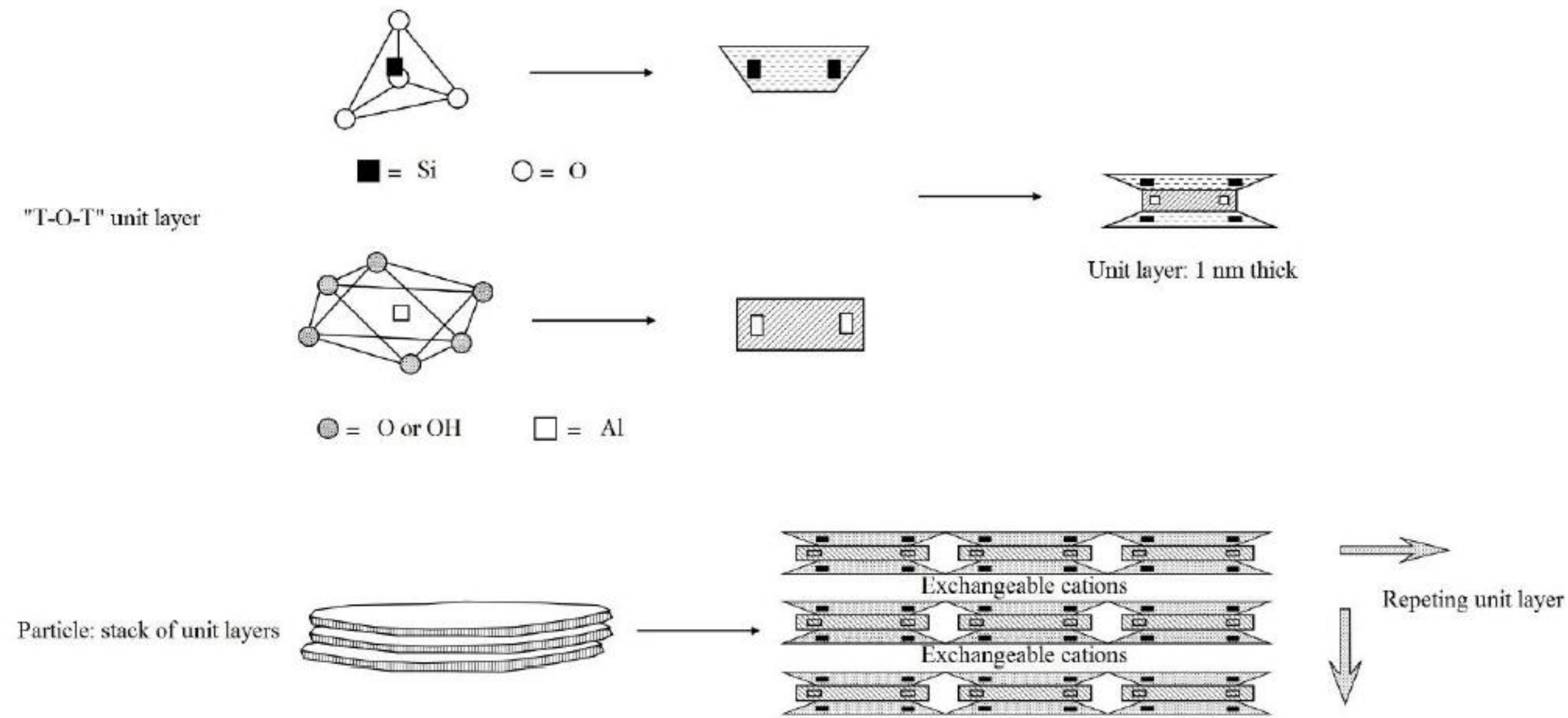
Risque naturel sécheresse :

- 54 % des constructions exposées à l'aléa Moyen à Fort en France
- Dommages structurels aux constructions
- Coût annuel : plusieurs centaines de millions d'euros
- Solution de traitement efficace et durable
- Changement climatique : aggravation



Map of the shrink-swell risk in France (georisques.gouv.fr)

Microstructure des argiles gonflantes

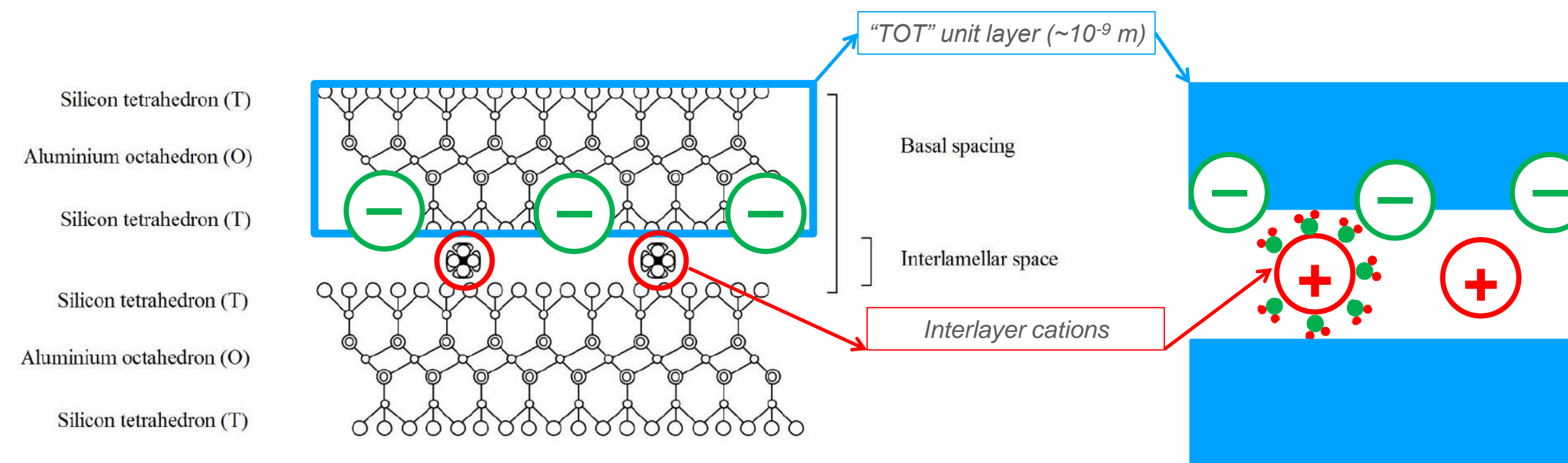


Structure of montmorillonite clay mineral (Pusch and Yong, 2006)

Microstructure des argiles gonflantes

Succession « TOT » avec charges négatives résultant de substitutions isomorphes dans les feuillets

➡ Compensation par cations entre les feuillets

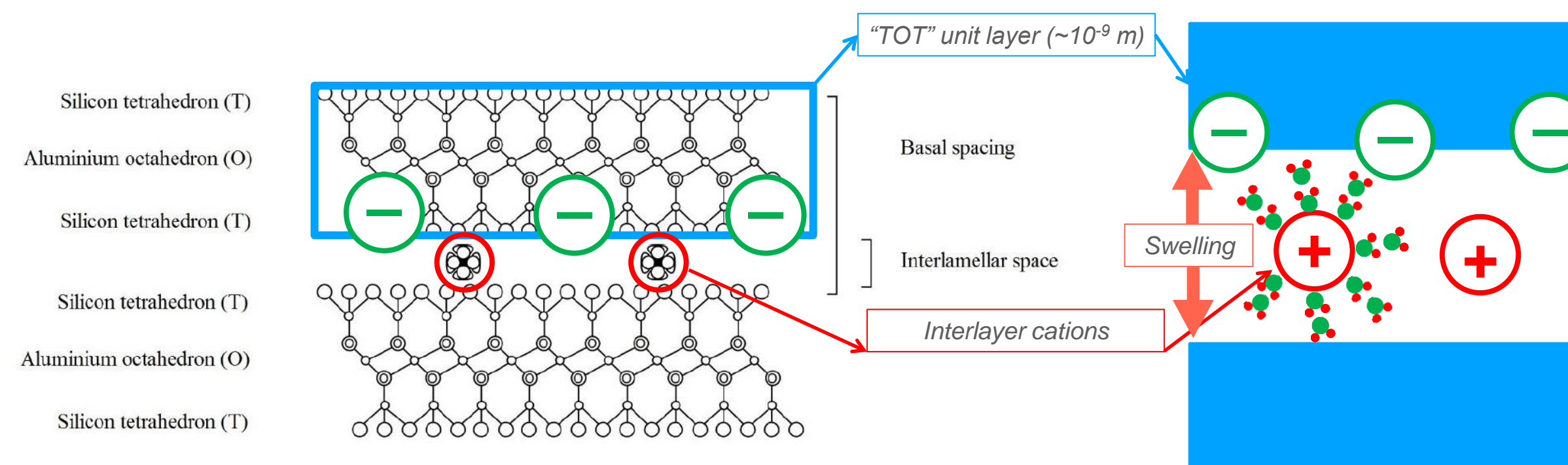


Structure of montmorillonite clay mineral (Pusch and Yong, 2006)

Microstructure des argiles gonflantes

Succession « TOT » avec charges négatives résultant de substitutions isomorphes dans les feuillets

- Compensation par cations entre les feuillets
- Faible stabilité, sensibilité à l'eau



Structure of montmorillonite clay mineral (Pusch and Yong, 2006)

IRGAK : Inhibition du RGA par fixation d'ions K^+

- K^+ : Renforcement des actions électrostatiques à l'échelle des feuillets
- Faible gonflement cristallin ; inhibition gonflement osmotique
- Stabilité dans l'espace interfoliaire
- Utilisation de longue date comme inhibiteur de gonflement dans d'autres contextes
- Risque naturel sécheresse : contraintes techniques, économiques, environnementales, sociétales particulières
- Utilisation K^+ : Nécessité de développer un protocole de traitement adapté au contexte local, basé sur une connaissance approfondie du comportement CHM du sol

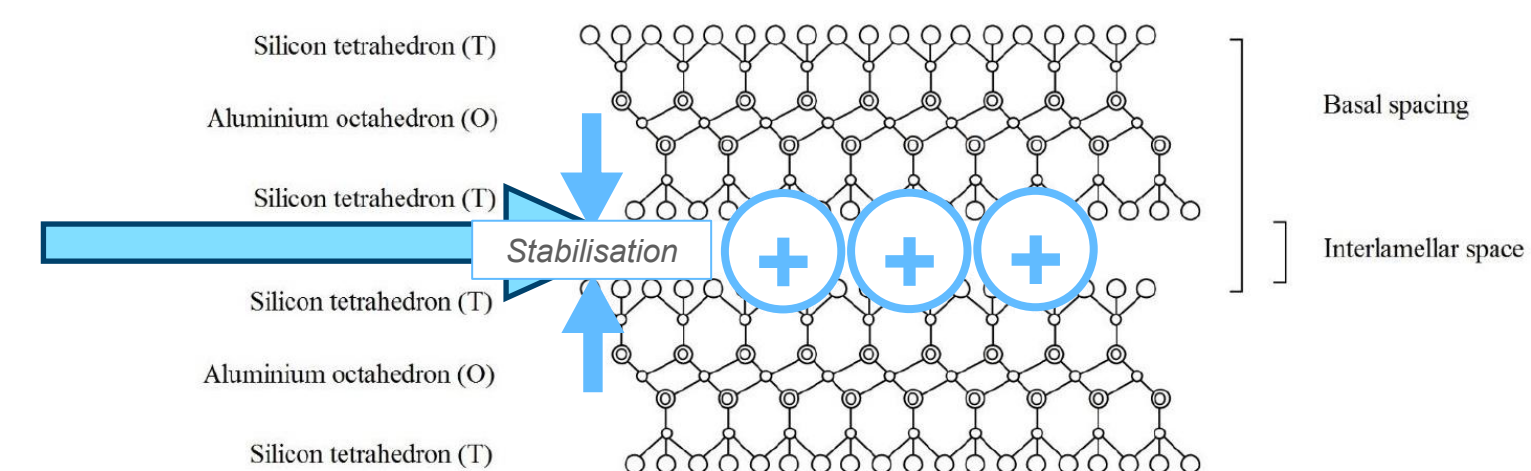
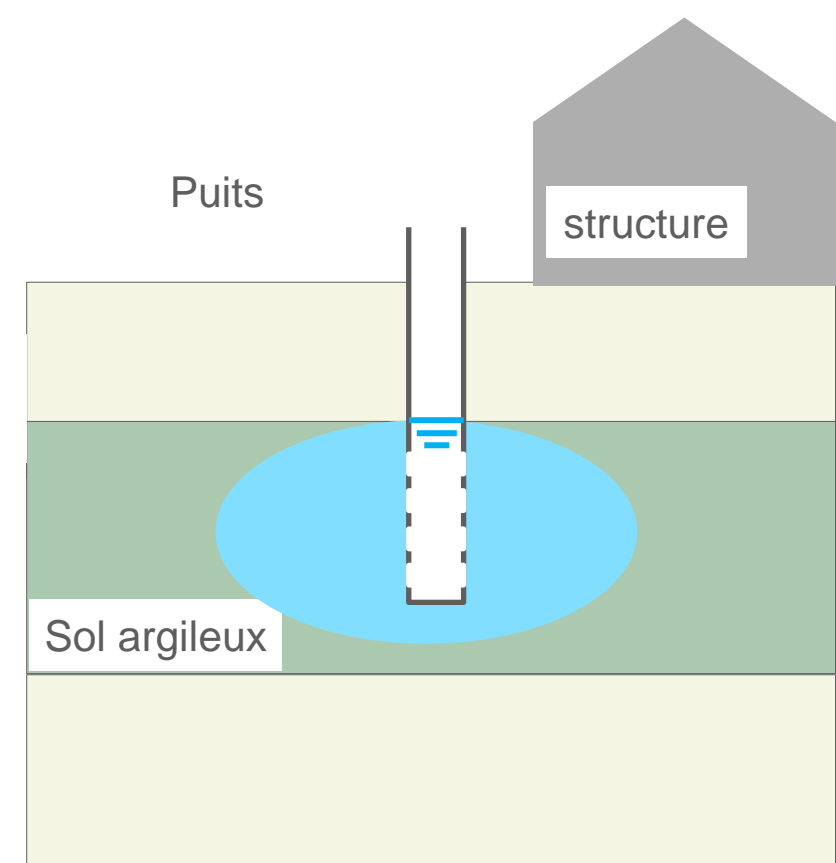
IRGAK : Inhibition du RGA par fixation d'ions K^+

- Utilisation K^+ : Nécessité de développer un protocole de traitement adapté au contexte local, basé sur une connaissance approfondie du comportement CHM du sol
- Développer une solution de traitement de sol *in situ* permettant de stabiliser le sol au cours des cycles saisonniers humidification-séchage, tenant compte de l'évolution climatique
- Objectifs scientifiques, techniques, environnementaux, économiques
- Efficacité, mise en œuvre simple et sans injection, sans impact environnemental, faible coût
- K_2SO_4 : intrant couramment utilisé en agriculture biologique, faible coût, soluble dans l'eau (K^+)

Objectif

IRGAK : Inhibition du RGA par fixation d'ions K^+

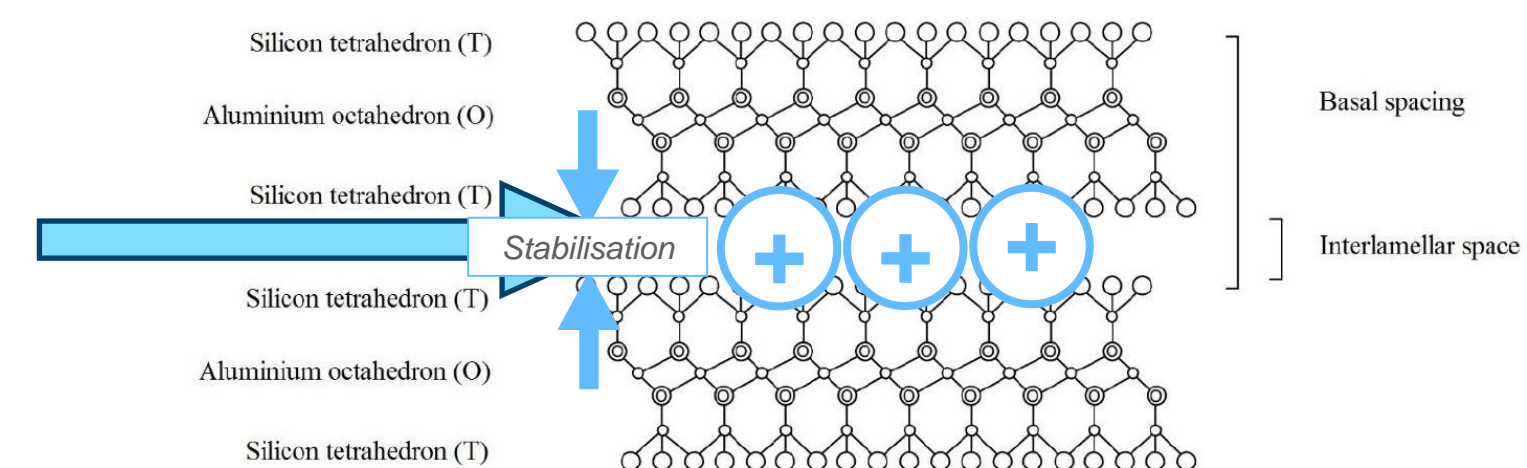
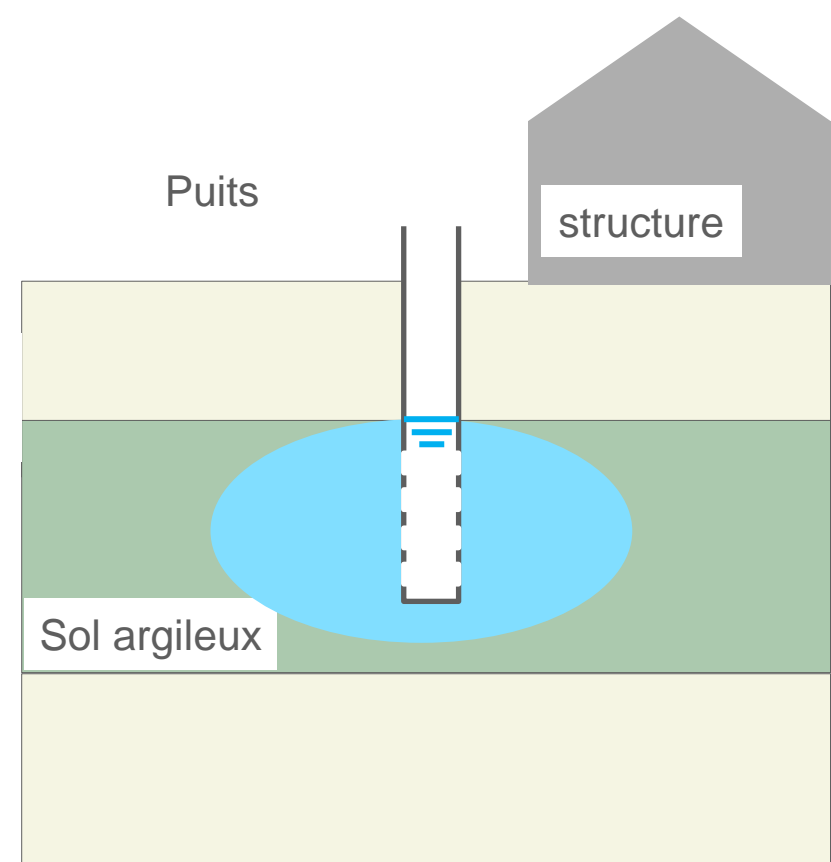
- Développer une solution de traitement de sol *in situ* permettant de stabiliser le sol au cours des cycles saisonniers humidification-séchage, tenant compte de l'évolution climatique
- Diffusion depuis puits petit diamètre : e.g. tarière + tube crépiné + eau + K^+



Objectif

IRGAK : Inhibition du RGA par fixation d'ions K^+

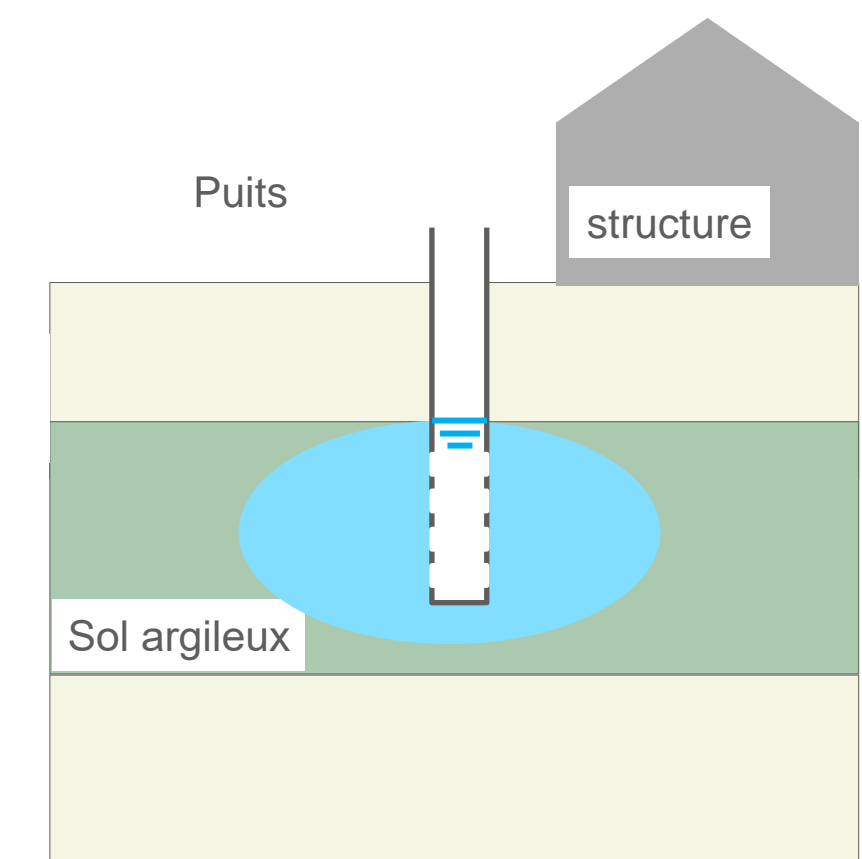
- Développer une solution de traitement de sol *in situ* permettant de stabiliser le sol au cours des cycles saisonniers humidification-séchage, tenant compte de l'évolution climatique
- Dimensionnement : prise en compte des conditions géologiques, géotechniques, hydrométéorologiques locales



- Type de sol, propriétés HM, diffusion, stabilité K^+
- Interactions sol-atmosphère, évolution future
- Investigations géotechniques courantes
- Evolution climatique locale

IRGAK : Inhibition du RGA par fixation d'ions K^+

- **Développer** une solution de traitement de sol *in situ* permettant de stabiliser le sol au cours des cycles saisonniers humidification-séchage, tenant compte de l'évolution climatique
- **Dimensionnement** : prise en compte des conditions géologiques, géotechniques, hydrométéorologiques locales
- 5 ans, 4 thèses : Etudes expérimentales et numériques multi-physiques multi-échelles
- Evaluation de l'impact environnemental : ACV
- Production d'un **guide technique** décrivant une procédure de traitement adaptée aux conditions locales



- Type de sol, propriétés HM, diffusion, stabilité K^+
- Interactions sol-atmosphère, évolution future
- Investigations géotechniques courantes
- Evolution climatique locale



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



Projet IRGAK

Développement d'une solution de traitement in situ

Développements scientifiques

RGA : COMPRENDRE, ANTICIPER, PRÉVENIR
JST DU 06/03/2025

Développer et dimensionner une procédure adaptée au contexte

- Inhibition du gonflement par K^+ connue dans d'autres domaines de l'ingénierie — e.g.:
 - Forages pétroliers (Davis 1927),
 - Stabilité de pentes argileuses (Eggestad and Sem 1976),
 - Traitement infrastructures linéaires (O'Bannon et al., 1976),
 - Stockage déchets radioactifs (Howard and Roy, 1985)
- Construction : contraintes techniques, environnementales, économiques
- Contexte, sels, concentrations, conditions, contraintes différent
- Efficacité du K_2SO_4
- Stabilité au cours de cycles humidification-séchages successifs
- Cinétique de diffusion
- Couplages CHM
- Conditions limites : influence du changement climatique sur les interactions sol-atmosphère à l'échelle locale
- Quantifier
- Corréler avec propriétés « mesurables » du sol

Développer et dimensionner une procédure adaptée au contexte

➤ Quatre axes de développements

➤ Etude expérimentale à l'échelle du laboratoire

➤ Modèles de changement d'échelle (spatiale et temporelle) des projections climatiques régionalisées

➤ Loi de comportement et simulations numériques prédictives

➤ Validation à échelle 1

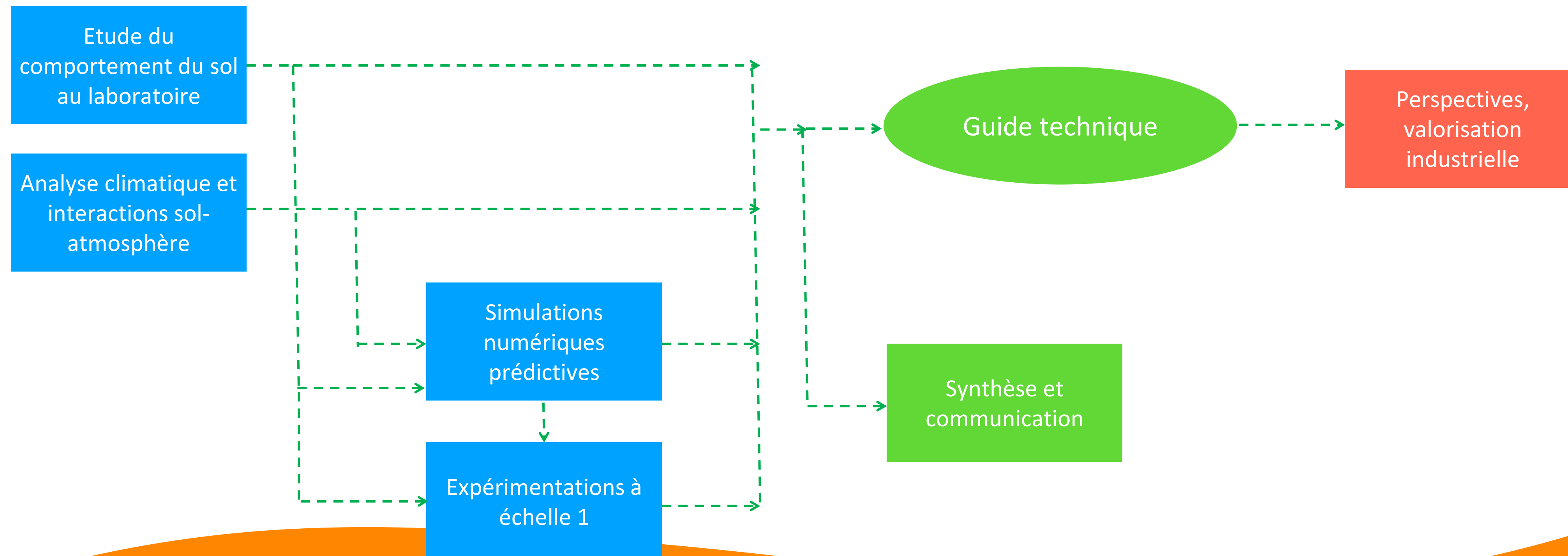
➤ Formuler recommandations à l'attention des ingénieurs et publication guide technique

09/2024

09/2029

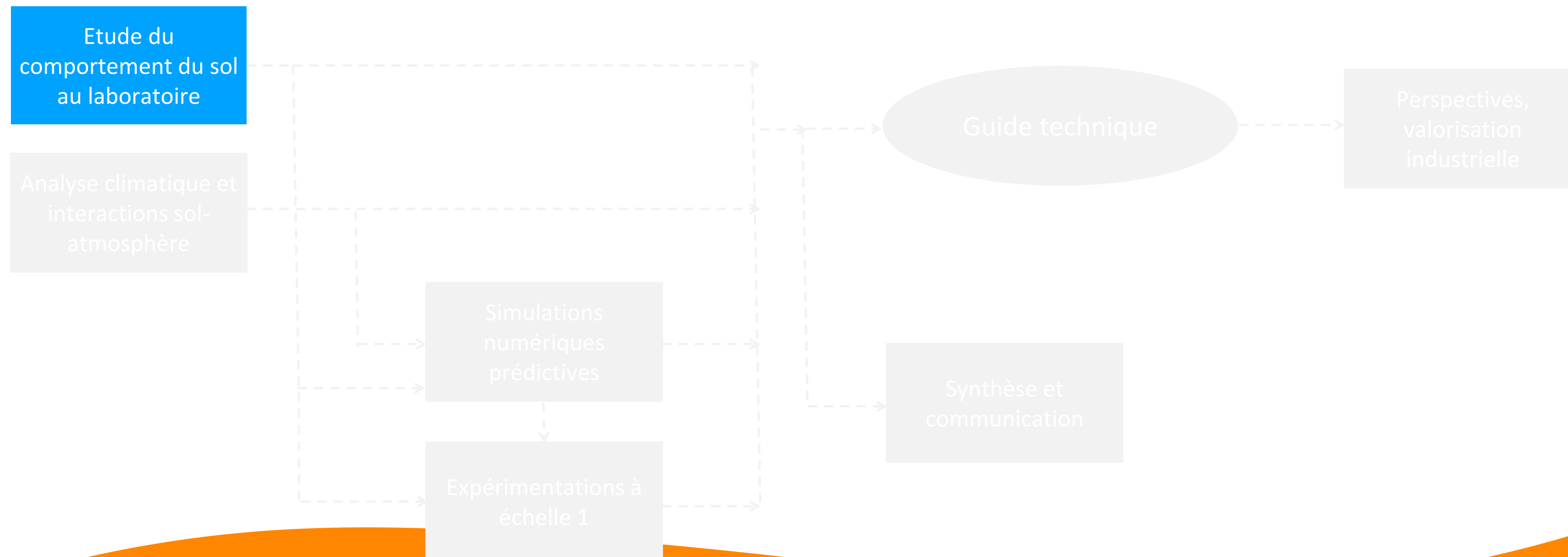
Développer et dimensionner une procédure adaptée au contexte

➤ Quatre axes de développements



Développer et dimensionner une procédure adaptée au contexte

➤ Quatre axes de développements



Etude du comportement du sol au laboratoire

- Plusieurs échelles : VER, diffusion, chambre environnementale
- Durée exposition, concentration
- Propriétés du sol : densité, état hydrique, teneur en smectite
- Gonflement/Retrait, pression de gonflement, Atterberg, VBS, compressibilité, diffusion, rétention d'eau
- Chemin de contrainte, cycles humidification-séchage
- Permettre la formulation de loi de comportement pour simulations prédictives



02/2025

02/2028

Développements scientifiques



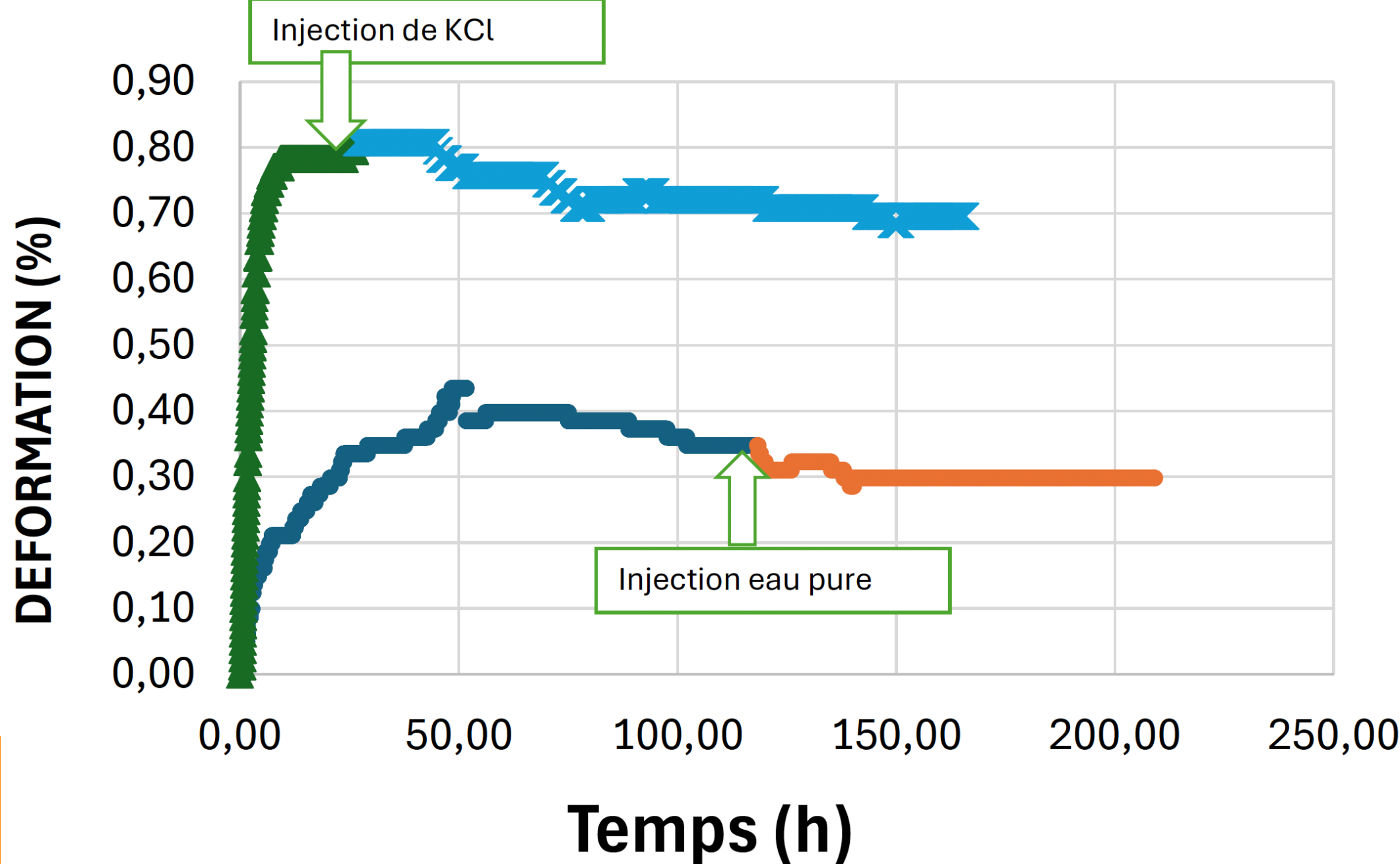
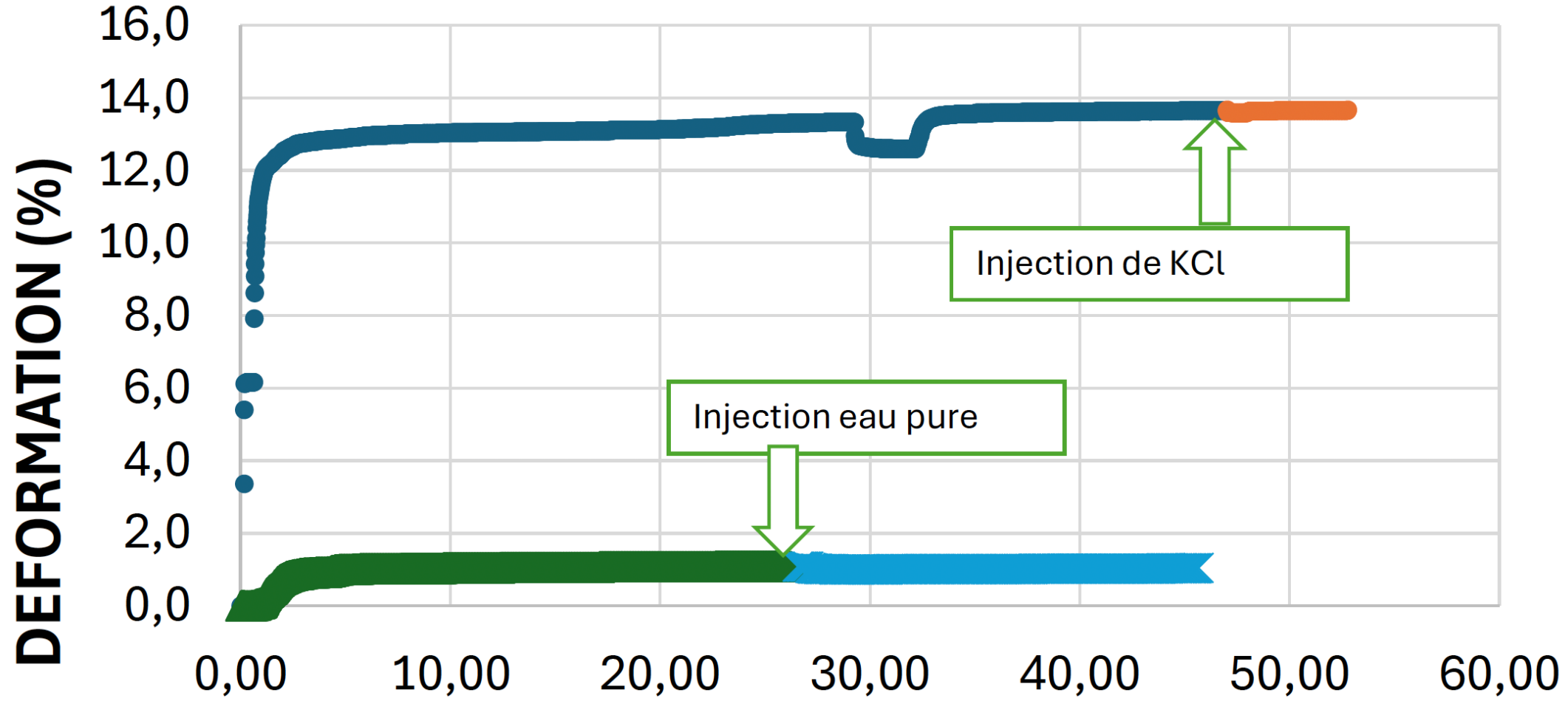
Etude du comportement du sol au laboratoire

Argile verte de Romainville :



Property	Romaii
Carbonate content (%)	
Organic matter content (%)	
Specific surface area (m ² /g)	
Blue methylene value	
Liquid limit (%)	
Plastic limit (%)	
Plasticity index (%)	
<2 μm (%)	
Specific gravity	

Essai	Contrainte verticale (kPa)	Teneur en eau initiale (%)	Premier fluid	Deuxième fluid
1	5	39	Eau	KCl
2	5	41	KCl	Eau
3	25	37	Eau	KCl
4	25	37	KCl	Eau

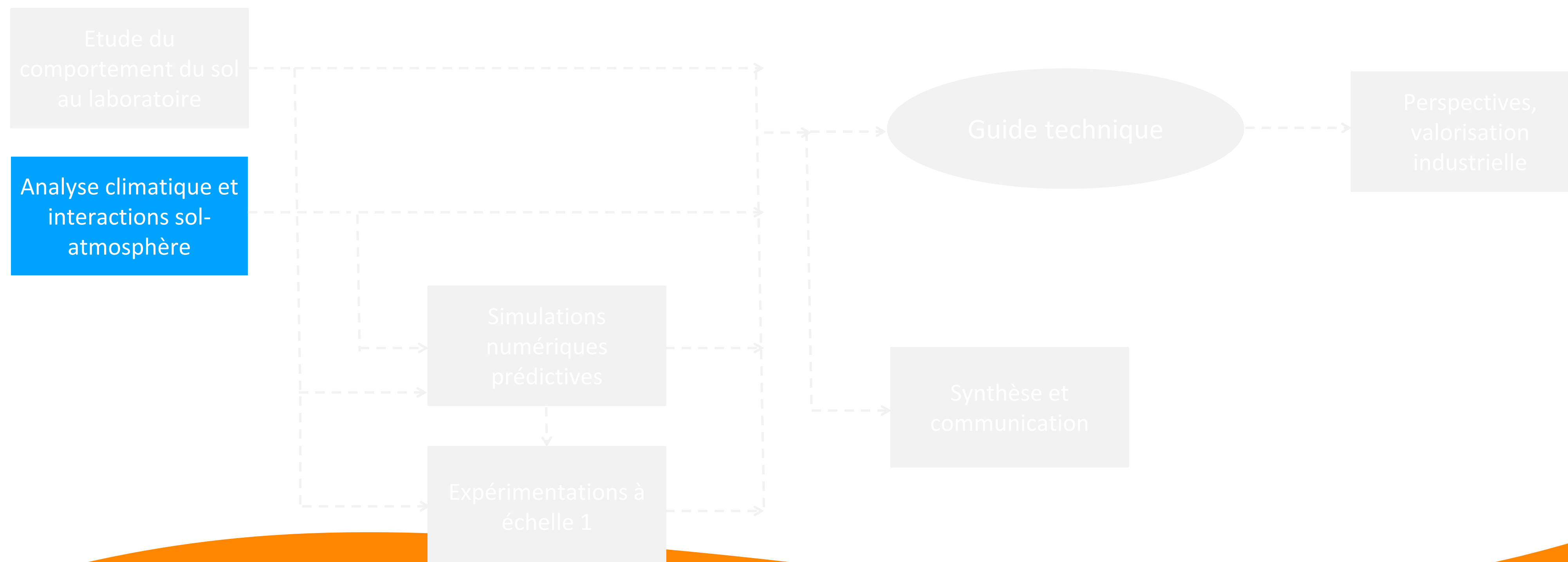


02/2025

02/2028

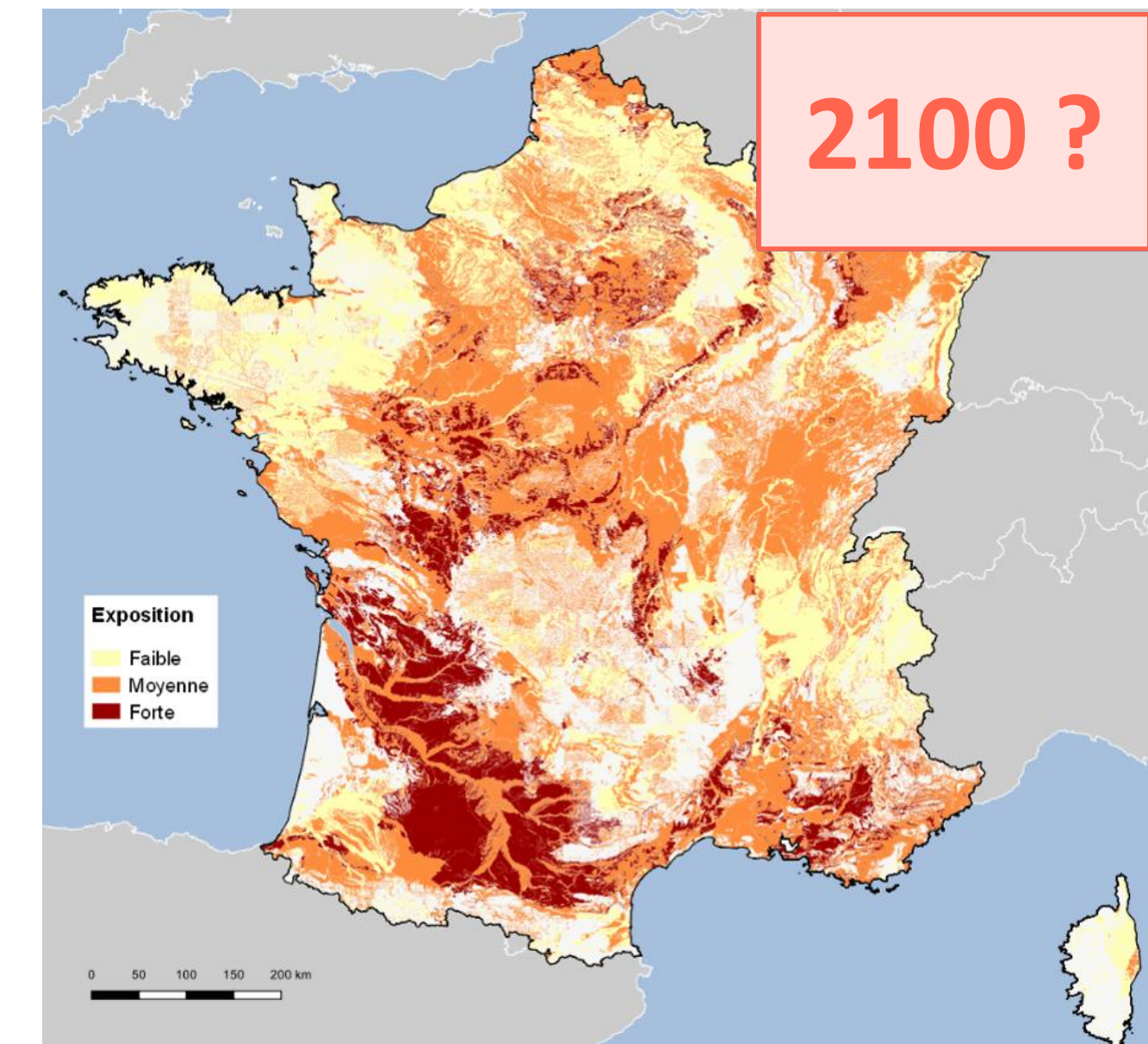
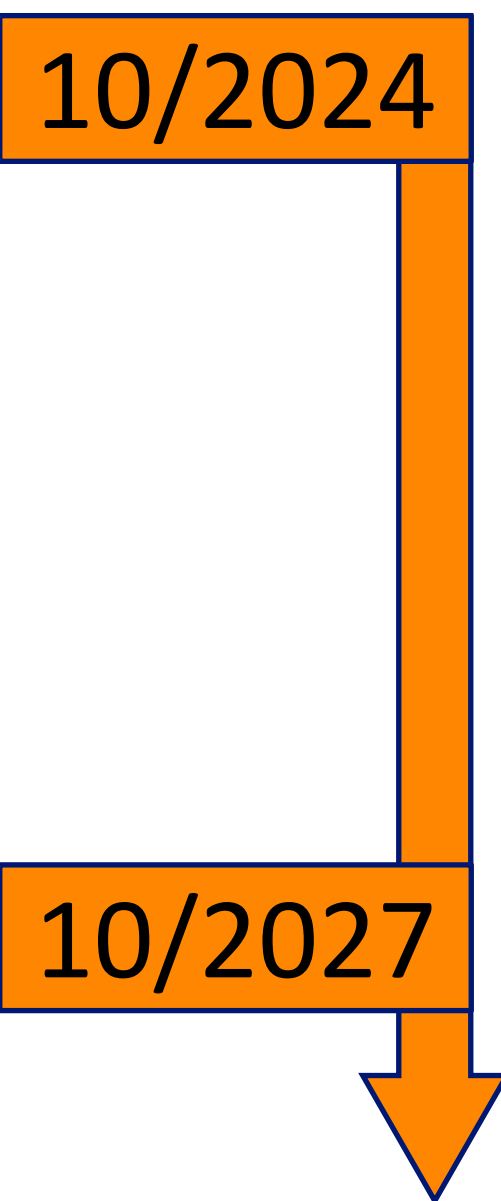
Développer et dimensionner une procédure adaptée au contexte

➤ Quatre axes de développements



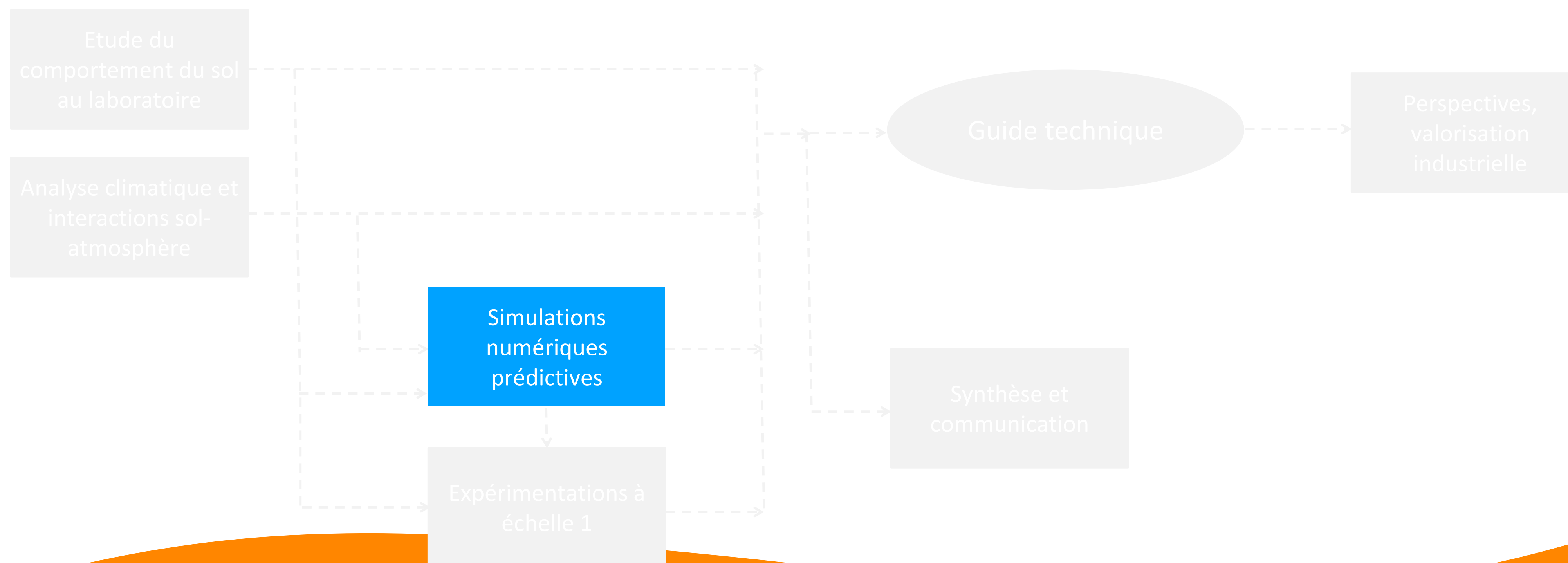
Analyse climatique et interactions sol-atmosphère

- Projections climatiques régionalisées
- Modèle de changement d'échelle : scénario extrême local, « conditions dimensionnantes »
- Interactions sol-atmosphère **locales** : « Aléa 2025 vs Aléa 2100 ? »
- Permettre la détermination de conditions limites pertinentes pour simulations prédictives



Développer et dimensionner une procédure adaptée au contexte

➤ Quatre axes de développements



Simulations numériques prédictives

10/2025

➤ Analyse résultats expérimentaux : développer et valider modèle de comportement CHM

➤ Analyse climatique : simulations représentatives conditions réelles

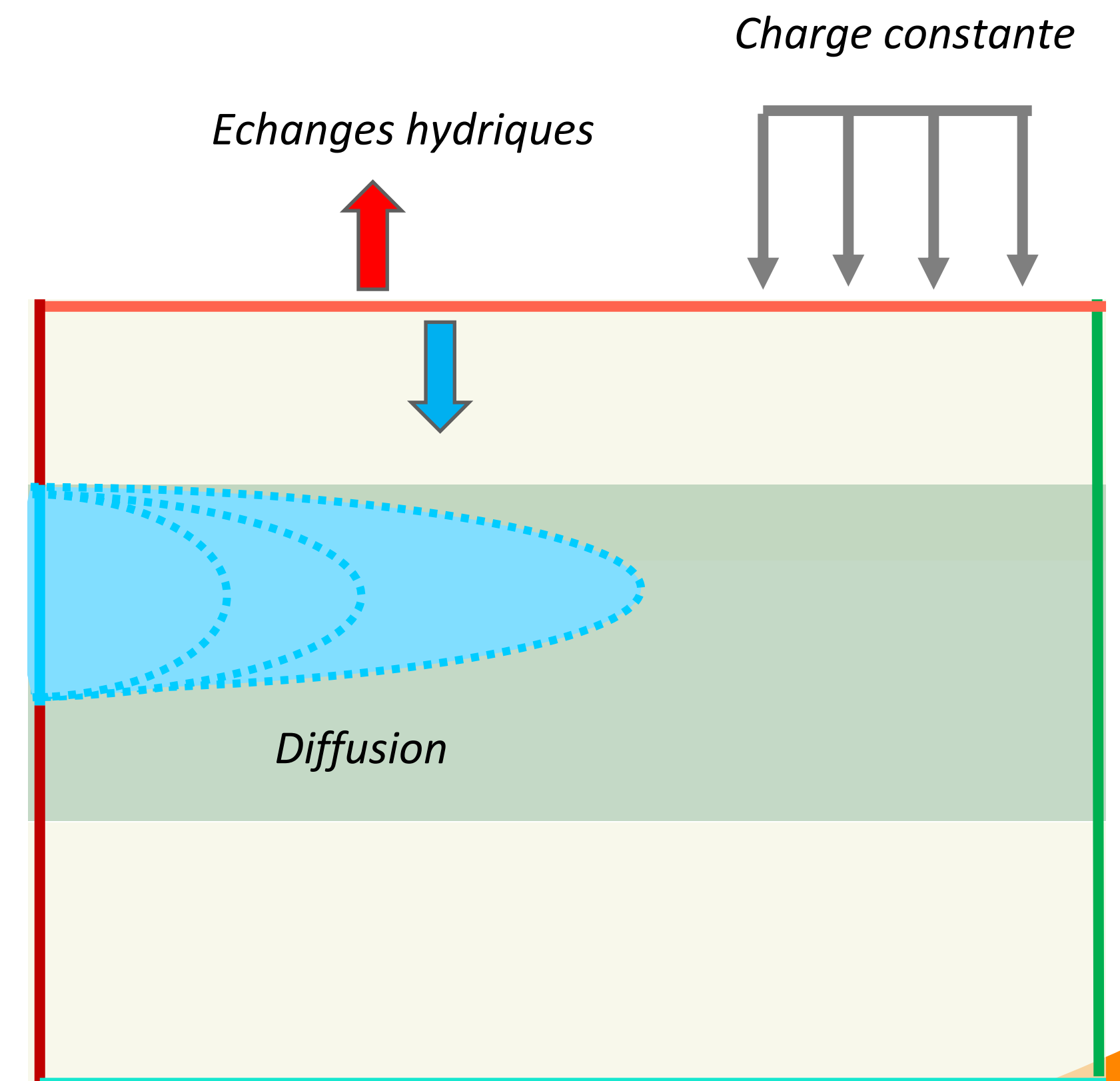
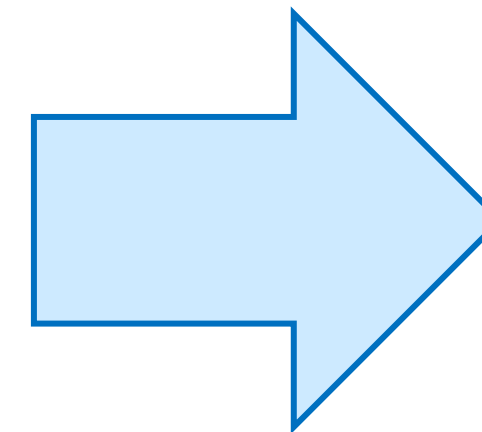
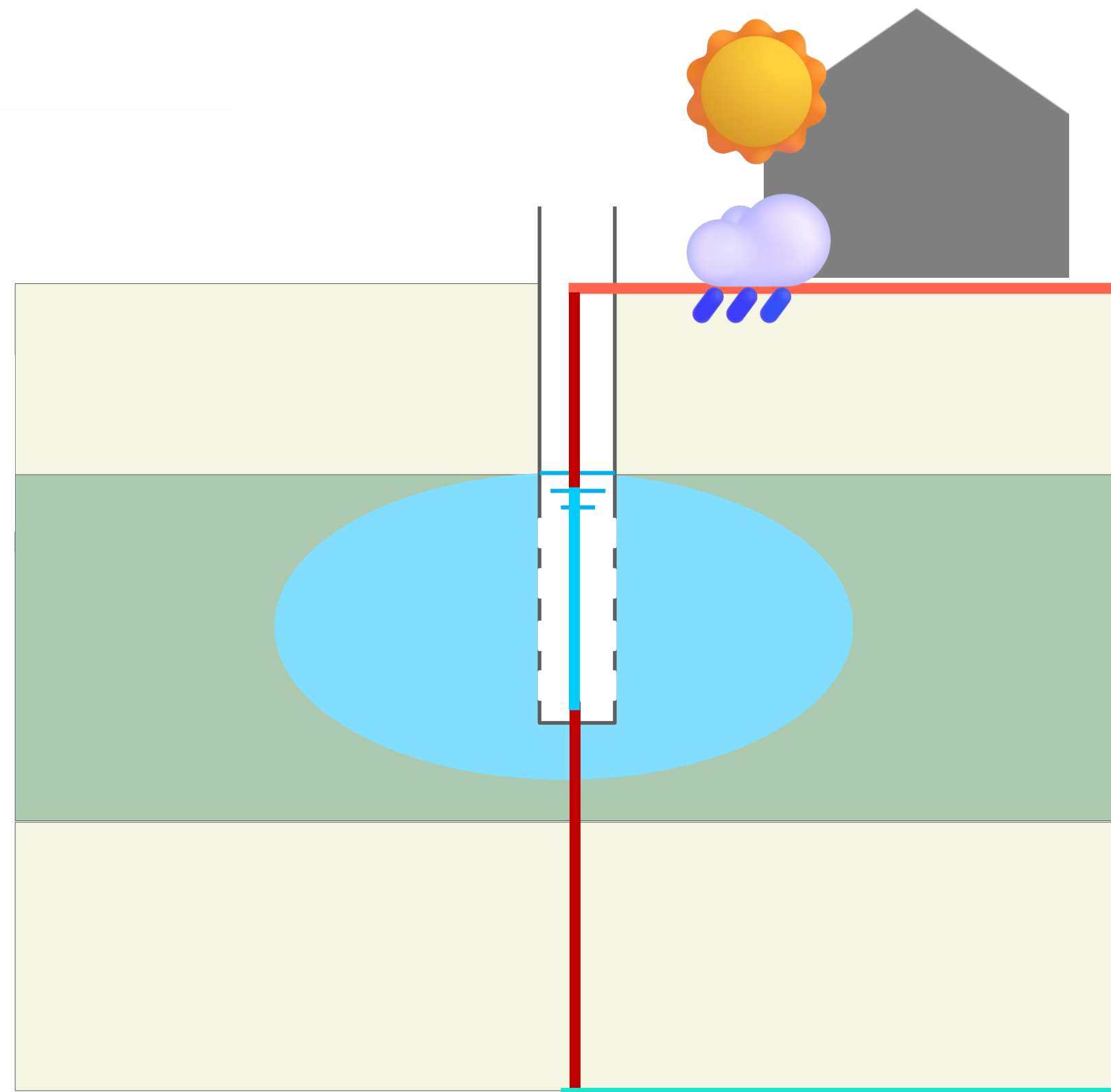
➤ Analyse statistique : corrélations paramètres modèles – résultats essais standardisés

10/2028

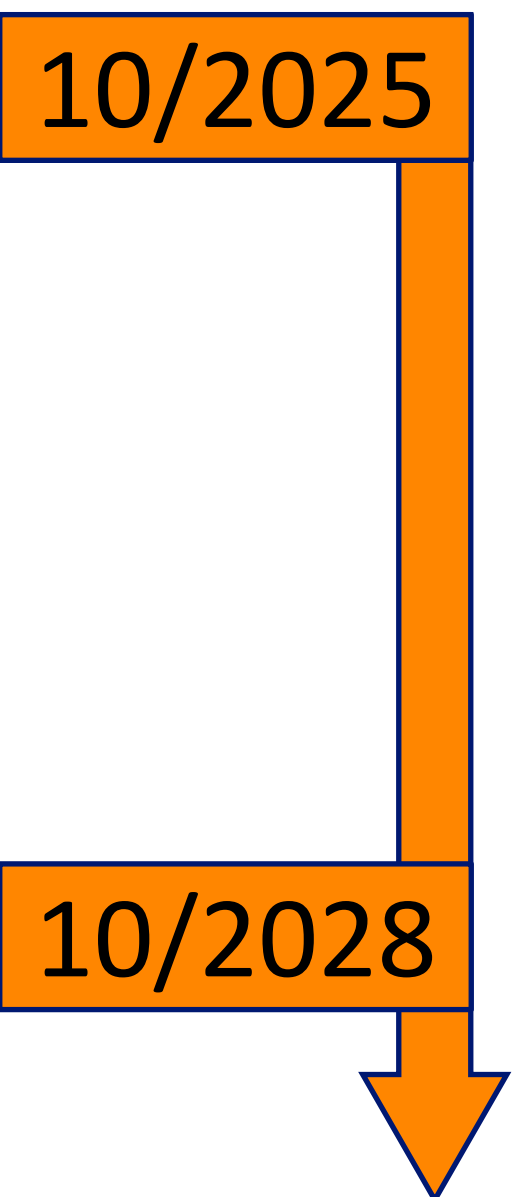
➤ Orienter recommandations adaptées au contexte et basées sur données géotechniques mesurables via essais standardisés

Développements scientifiques

Simulations numériques prédictives



Simulations numériques prédictives



➤ Orienter recommandations adaptées au contexte et basées sur données géotechniques mesurables via essais standardisés

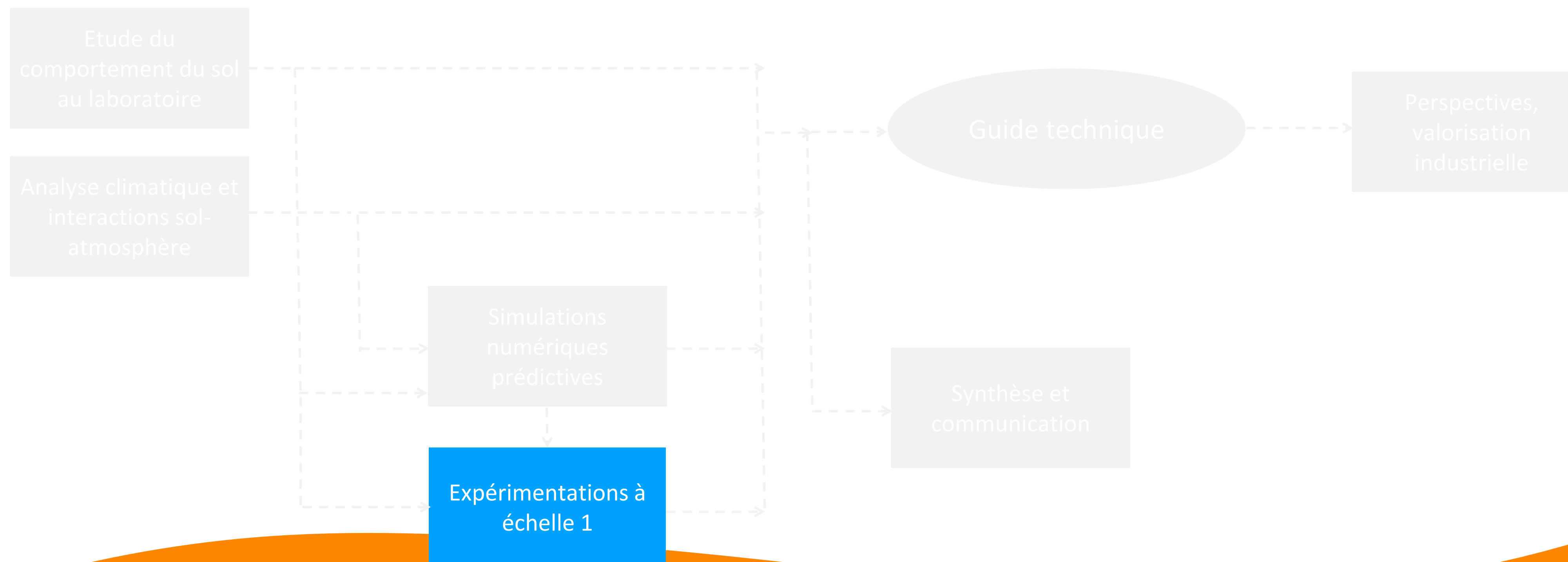
➤ Recrutement à venir :

bdarde@estp.fr

jean-michel.pereira@enpc.fr

Développer et dimensionner une procédure adaptée au contexte

➤ Quatre axes de développements

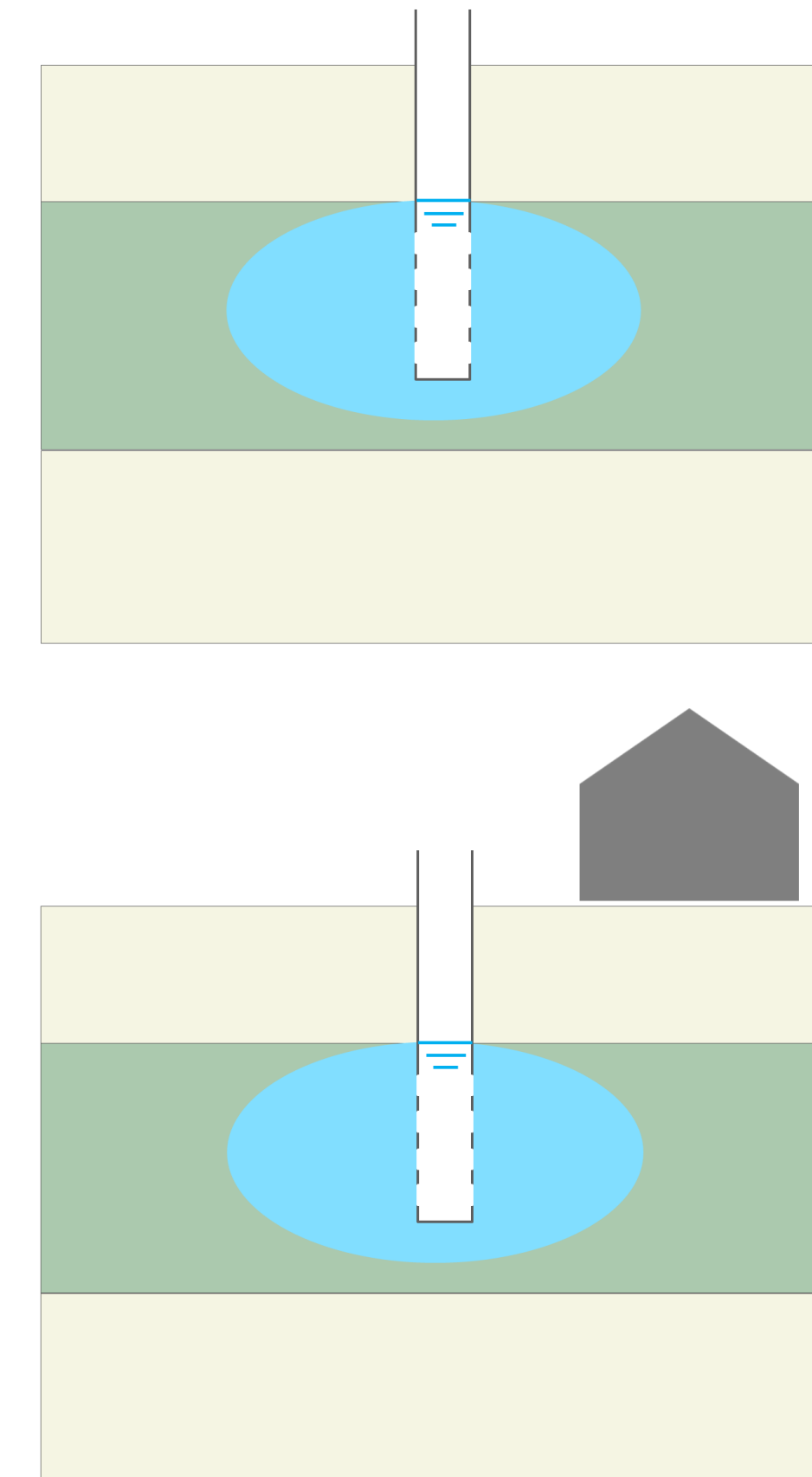


Validation à échelle 1

- Analyser la réponse du terrain en conditions réelles
- Instrumentation et suivi parcelle de sol inoccupée
- Prototype : pavillon (collaboration UGE « REMED RGA »)
- Evaluer efficacité du protocole en conditions réelles
- Recrutement en cours :

bdarde@estp.fr

anh-minh.tang@enpc.fr





cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



Projet IRGAK

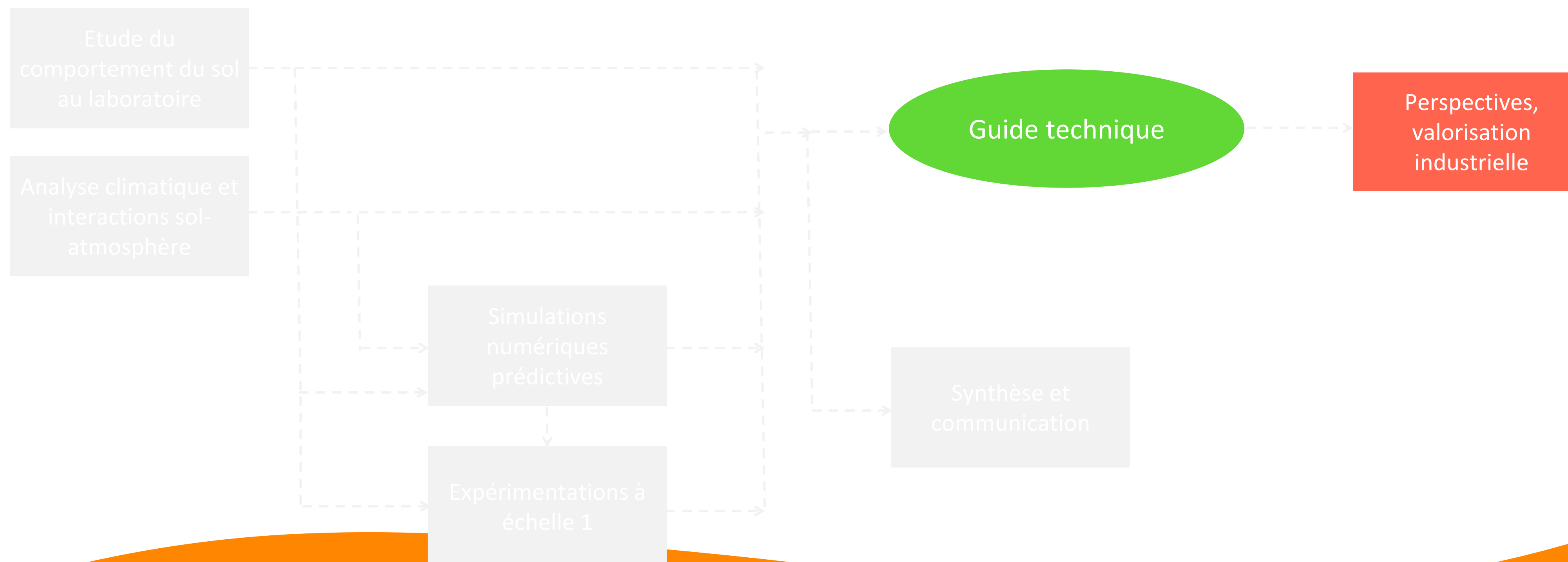
Développement d'une solution de traitement in situ

Synthèse et perspectives

RGA : COMPRENDRE, ANTICIPER, PRÉVENIR
JST DU 06/03/2025

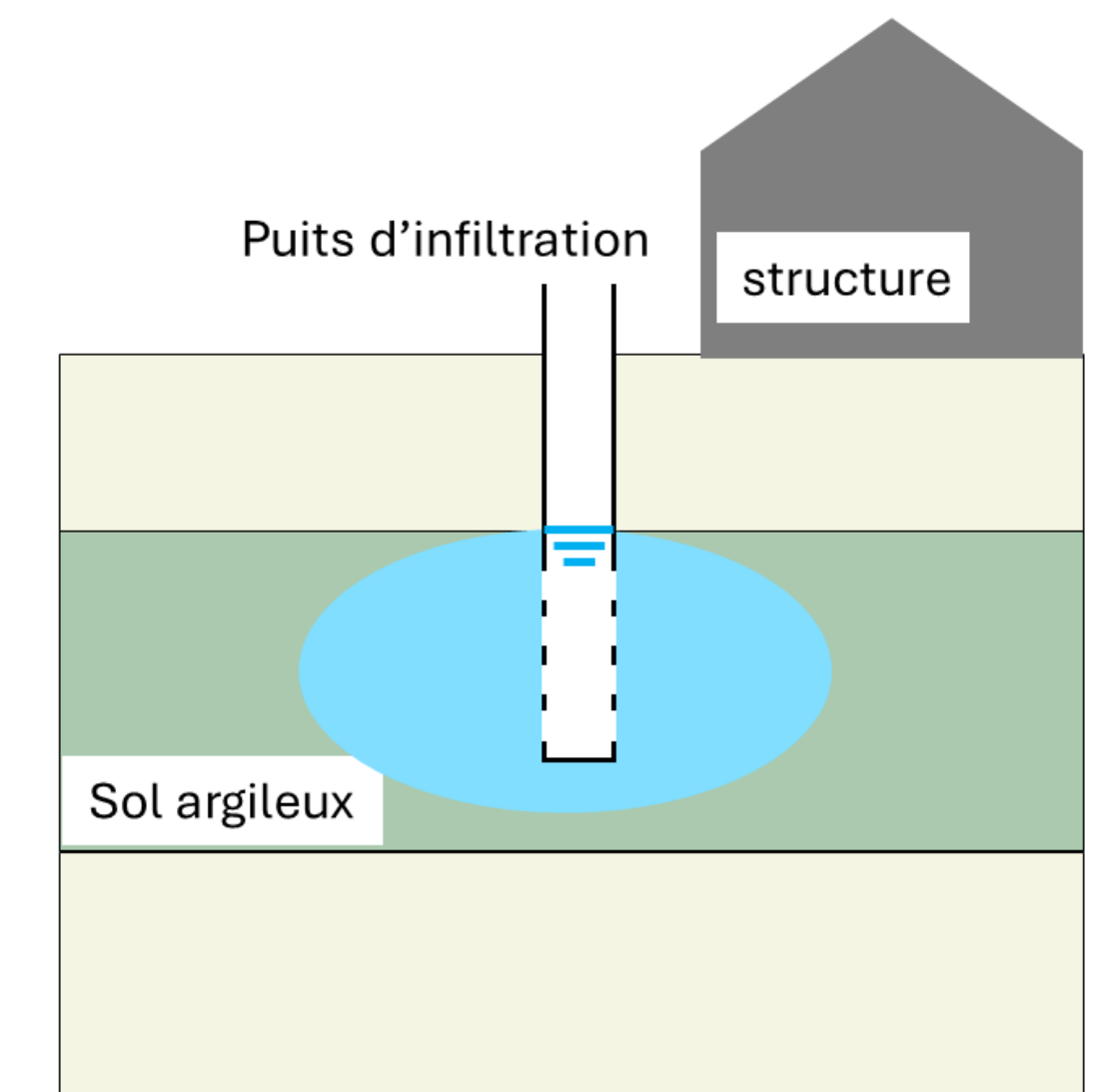
Guide technique décrivant la procédure de traitement adaptée au contexte local

➔ Faciliter le déploiement de la solution



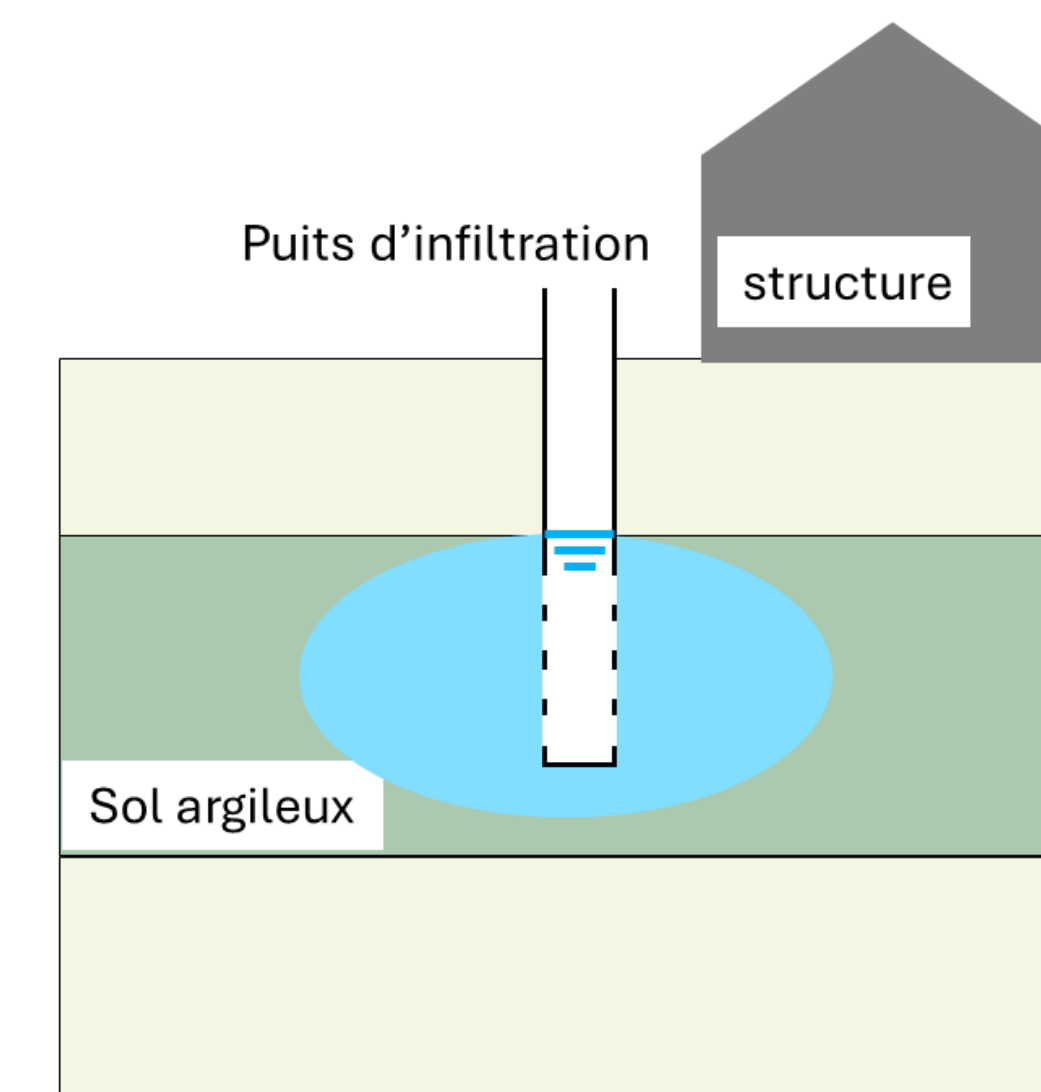
Guide technique décrivant la procédure de traitement adaptée au contexte local

- Résultats disponibles
- Contexte géotechnique : type de sol, profondeur, densité, paramètres géotechniques courants
- Contexte météorologique futur : ajuster les recommandations pour garantir la stabilité de long terme
- Réponse aux contraintes scientifiques, techniques, économiques, environnementales, pratiques



Guide technique décrivant la procédure de traitement adaptée au contexte local

- Contraintes scientifiques, techniques, économiques, environnementales, pratiques
- **Scientifique** : dimensionnement adapté au contexte d'un phénomène connu depuis plusieurs décennies
- **Technique** : technologies existantes et disponibles (sel, puits, tubes crépinés...)
- **Economique** : technologies peu coûteuses
- **Environnemental** : K_2SO_4 courant comme apport K et S en agriculture biologique
- **Pratique** : guide technique basé sur essais standardisés et évolution de l'aléa local dans le contexte du changement climatique





cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



Projet IRGAK

Développement d'une solution de traitement in situ

Merci pour votre attention

RGA : COMPRENDRE, ANTICIPER, PRÉVENIR
JST DU 06/03/2025