



**HAL**  
open science

# L'eau souterraine, une ressource en eau critique pour les forêts et les sociétés humaines en état de stress hydrique

Simon Damien Carrière

## ► To cite this version:

Simon Damien Carrière. L'eau souterraine, une ressource en eau critique pour les forêts et les sociétés humaines en état de stress hydrique. Sciences de l'environnement. Sorbonne Université, 2024. tel-04791954

**HAL Id: tel-04791954**

**<https://hal.science/tel-04791954v1>**

Submitted on 19 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

**SORBONNE UNIVERSITE**  
**FACULTE DES SCIENCES ET INGENIERIE**

**Dossier scientifique présenté en vue de l'obtention de**  
**L'HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES**

**L'EAU SOUTERRAINE, UNE RESSOURCE EN EAU CRITIQUE**  
**POUR LES FORETS ET LES SOCIETES HUMAINES**  
**EN ETAT DE STRESS HYDRIQUE**

Par

Simon D. Carrière

*Soutenue le 26 juin 2024, devant le jury :*

*Frédéric NGUYEN*

*Nathalie BREDA*

*Patrick LACHASSAGNE*

*Isabelle BRAUD*

*Roger MOUSSA*

*Valérie PLAGNES*

*Damien JOUGNOT*

*PR, Université de Liège*

*DR, INRAE – UMR SILVA*

*DR, IRD – UMR HSM*

*DR, INRAE – UR RiverLy*

*DR, INRAE – UMR LISAH*

*PR, Sorbonne Université - UMR METIS*

*DR, CNRS – UMR METIS*

*Rapporteur*

*Rapporteur*

*Rapporteur*

*Examineur*

*Examineur*

*Examineur*

*Examineur*

# Table des matières

Chapitre I : Activités de recherche .....	4
I.1 Résumé.....	4
I.1.1 Français.....	4
I.1.2 English .....	5
I.2 Prolégomènes.....	6
I.2.1 Les eaux souterraines.....	6
I.2.1.1 Vision générale d’une ressource critique .....	6
I.2.1.2 La géophysique : une approche singulière d’exploration des eaux souterraines .....	8
I.2.2 Parallèle entre deux zones d’intérêt complémentaires .....	11
I.2.2.1 Les sites forestiers méditerranéens .....	12
I.2.2.2 Le Sud de Madagascar.....	14
I.3 Interaction complexe entre végétation et eau souterraine en milieux forestier.....	17
I.3.1 Etude géophysique de la structure et de la dynamique de l’eau dans les sous-sols forestiers ....	17
I.3.1.1 Contexte .....	17
I.3.1.2 Travaux .....	19
I.3.1.2.1 Etude de la structure .....	19
I.3.1.2.2 Etude du fonctionnement .....	21
I.3.2 Etude isotopique et géophysique des prélèvements d’eau par les arbres .....	26
I.3.2.1 Contexte .....	26
I.3.2.2 Travaux .....	27
I.3.2.2.1 Approche isotopique .....	27
I.3.2.2.2 Approche géophysique.....	29
I.3.3 Perspectives : Quantification de l’eau totale disponible pour les arbres – Projets GITAW et TAW-Tree .....	36
I.3.3.1 Contexte .....	36
I.3.3.2 Plan de travail.....	37
I.4 Importance des eaux souterraines pour les sociétés humaines en état de stress hydrique .....	38
I.4.1 Exploration hydrogéologique d’une zone peu documentée en contexte humanitaire .....	38
I.4.1.1 Contexte .....	38
I.4.1.2 Travaux .....	40
I.4.1.2.1 Hydrochimie .....	40
I.4.1.2.2 Géophysique.....	41

I.4.1.2.3 Isotopie et piézométrie .....	44
I.4.2 Production des données nécessaires à la gestion durable des eaux souterraines .....	46
I.4.2.1 Mise en place de l'observatoire GROSoM pour suivre la dynamique des eaux souterraines	46
I.4.2.1.1 Contexte .....	46
I.4.2.1.2 Travaux .....	46
I.4.2.2 Estimation spatialisée des précipitations à l'aide de produits maillés.....	47
I.4.2.2.1 Contexte .....	47
I.4.2.2.2 Travaux .....	49
I.4.2.3 Estimation spatialisée de l'évapotranspiration .....	50
I.4.2.3.1 Contexte .....	50
I.4.2.3.2 Travaux .....	50
I.4.3 Perspectives : Effet en cascade des sécheresses sur la végétation, les eaux souterraines et la santé humaine – Projets SuFECiS et DIGAP.....	54
I.4.3.1 Contexte .....	54
I.4.3.2 Plan de travail.....	54
I.5 Bibliographie .....	57
Chapitre II : Synthèse des valorisations scientifiques .....	67

# Chapitre I : Activités de recherche

## I.1 Résumé

### I.1.1 Français

Les eaux souterraines jouent un rôle majeur pour les écosystèmes et nos sociétés, tout particulièrement dans les régions du monde soumises au stress hydrique où elles constituent une ressource en eau critique. Comment améliorer durablement l'exploitation et la gestion de cette ressource invisible et si difficile à appréhender ? Nous avons besoin de mieux comprendre les conditions d'entrée de l'eau dans les aquifères pour mieux comprendre la disponibilité de la ressource d'eau souterraine pour les différents usages humains.

Ce rapport tentera d'apporter des éléments de réponse à cette vaste problématique en mêlant des approches classiques de l'hydrogéologie quantitative avec de la géophysique, de l'isotopie, de l'écologie fonctionnelle ou encore des approches tirées de l'hydrologie spatiale. Ces travaux sont menés dans deux zones contrastées et complémentaires : i) la région méditerranéenne et ii) le Sud-Ouest de Madagascar. Les travaux y sont menés à deux échelles différentes, échelle de la parcelle dans le premier cas et échelle régionale à nationale dans le deuxième.

Les résultats s'organisent en deux grandes parties. La première partie traite du développement de méthodologies permettant d'améliorer la caractérisation de la structure et du fonctionnement des hydrosystèmes karstiques en contexte forestier. Les résultats sont ensuite utilisés pour améliorer les connaissances de l'utilisation de l'eau par les arbres. La deuxième partie consiste à proposer des approches adaptées au contexte humanitaire pour explorer les eaux souterraines dans des milieux hydrogéologiques complexes. Ce travail se poursuit avec le développement d'outils de gestion qui permettent de suivre la dynamique des eaux souterraines et d'estimer la recharge à l'échelle régionale.

En perspective et dans la continuité des travaux précédents, deux axes de recherche se dessinent pour les prochaines années : i) l'amélioration de la caractérisation de l'eau disponible pour les arbres en milieu forestier et ii) la caractérisation de l'impact de la disponibilité en eau souterraine sur la santé humaine dans un contexte de stress hydrique intense.

## I.1.2 English

Groundwater plays a major role in ecosystems and human societies. This is particularly true in water-stressed regions of the world, where groundwater is a critical water resource. How can we sustainably improve the use and management of this invisible resource that is so difficult to understand? We need to better understand the conditions under which water enters aquifers in order to better understand the availability of the groundwater resource for different human uses.

This report will attempt to provide some answers to this vast issue by combining classical approaches of quantitative hydrogeology with geophysics, isotopy, functional ecology and spatial hydrology. This work is being carried out in two contrasting and complementary areas: i) the Mediterranean region and ii) southwest Madagascar. The work is being carried out at two different scales: plot scale in the first case, and regional to national scale in the second.

The results are organized into two main parts. The first part deals with the development of methodologies to improve characterization of karst hydrosystem structure and function in a forest context. The results are then used to improve knowledge of how trees use water. The second part involves proposing approaches adapted to the humanitarian context for exploring groundwater in complex hydrogeological environments. This work is followed by the development of management tools for monitoring groundwater dynamics and estimating recharge on a regional scale.

As a continuation of previous work, two lines of research are emerging for the coming years: i) improved characterization of the water available to trees in forest environments, and ii) characterization of groundwater availability's impact on human health in a context of intense water stress.

## I.2 Prolégomènes

### I.2.1 Les eaux souterraines

#### I.2.1.1 Vision générale d'une ressource critique

Le cycle l'eau rend les eaux de surface (lacs et rivières) les plus disponibles pour les prélèvements anthropiques à l'échelle globale (Döll et Fiedler 2008). Cependant, les eaux souterraines représentent le stock d'eau douce liquide le plus important sur Terre (Fig. 1). Dans de nombreuses régions du monde, les eaux souterraines fournissent plus de 90 % de l'approvisionnement en eau potable (Howard et al. 2006). Elles sont particulièrement essentielles dans les zones arides et semi-arides où les eaux de surface sont absentes pendant une grande partie de l'année.

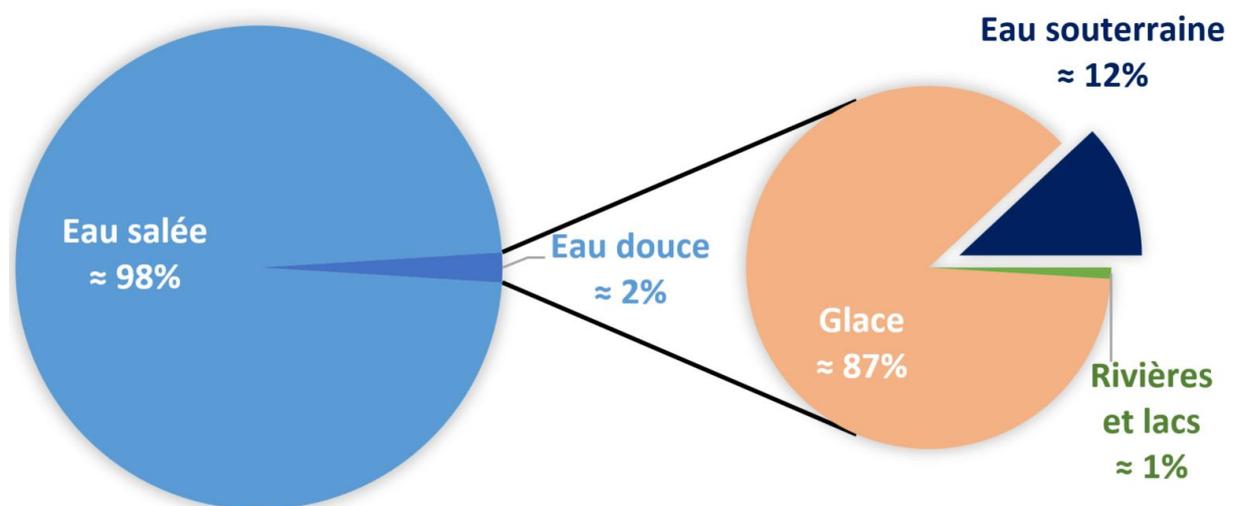


Figure 1 : La répartition de l'eau dans le monde.

Les eaux souterraines sont souvent méconnues car elles sont invisibles et difficile d'accès. Ces caractéristiques rendent leur gestion complexe car il est généralement difficile de les quantifier et de suivre leur qualité. Les eaux souterraines se trouvent dans des réservoirs géologiques, nommés « aquifères », qui peuvent être de trois grands types (poreux, fissuré, karstifié) avec de nombreuses variantes intermédiaires possible (Fig. 2).

Du fait de la difficulté d'investigation des eaux souterraines, il est impossible de caractériser en tout point un aquifère. Les hydrogéologues cherchent donc à rendre l'invisible compréhensible par les acteurs et gestionnaires de l'eau à travers différentes approches : le traçage naturel, la modélisation, la géophysique ou encore les suivis hydrodynamiques.

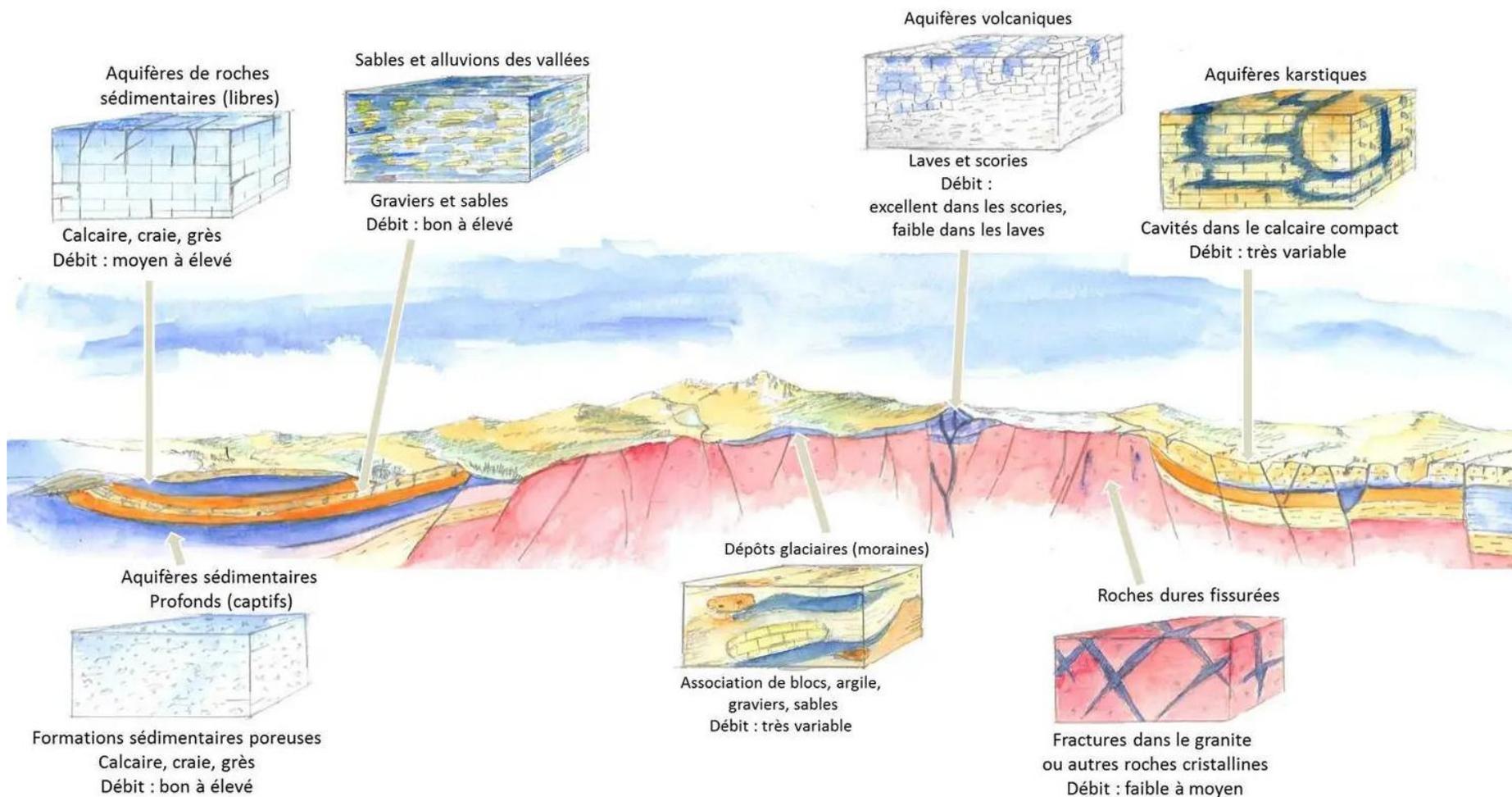


Figure 2 : Les principaux types d'aquifères (© BRGM - Marylène Imbault).

La recharge d'un aquifère est d'une importance majeure car elle contrôle la quantité maximale d'eau exploitable tout en préservant la ressource souterraine. Les questions liées aux processus de recharge naturelle (Fig. 3) animent la communauté depuis plusieurs dizaines d'années (e.g. Darling et Bath 1988, George et al. 1999 ; de Vries et Simmers 2002 ; Zomlot et al. 2017 ; Nowreen et al. 2020). Bien que la recharge se produise dans les horizons superficiels du sous-sol, les plus facilement accessibles, une grande incertitude demeure dans son estimation.

Les processus liés à la recharge sont à l'interface entre la surface et le monde souterrain, c'est-à-dire au cœur de ce que l'on appelle la « zone critique ». La zone critique désigne la pellicule la plus externe de la planète Terre, imparfaitement définie « entre le ciel et les roches », où interagissent l'eau, les gaz, les minéraux des roches pour donner naissance aux sols, aux eaux, aux êtres vivants qui la peuplent. Depuis son développement aux Etats Unis, la science de la zone critique se répand dans le monde en mettant en avant des approches pluridisciplinaires.

Ce rapport abordera les questions de recharge selon une approche « zone critique » dans deux zones contrastées et complémentaires : i) les forêts qui sont souvent des milieux hétérogènes pour lesquels une large marge d'amélioration est possible dans l'estimation de la recharge ; ii) une région semi-aride où les populations humaines ont une forte dépendance aux eaux souterraines et où il est indispensable de connaître la recharge pour promouvoir une gestion durable des ressources.

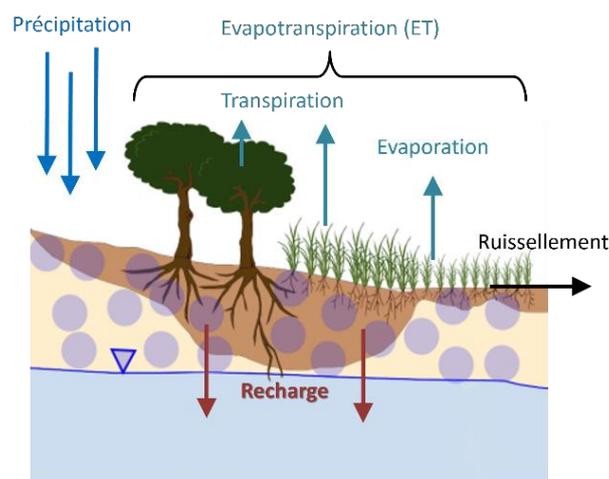


Figure 3 : Schéma simplifié des principales interactions hydrologiques.

### 1.2.1.2 La géophysique : une approche singulière d'exploration des eaux souterraines

La géophysique de proche surface offre un large éventail de méthodes pour caractériser le sous-sol et les processus associés. Chaque méthode présente des avantages (e.g. précision, sensibilité à un paramètre donné) et des inconvénients (e.g. manque de profondeur d'investigation, temps d'acquisition) que l'utilisateur doit considérer en fonction de la zone d'étude et des objectifs fixés. Chalikakis et al. (2011) ont par exemple synthétisé le potentiel des méthodes géophysiques pour l'étude hydrogéologique des systèmes karstiques (Table 1). On compte six principales méthodes géophysiques basées sur des principes physiques différents : électrique, électromagnétique, sismique, gravimétrie, magnétique et résonance magnétique des protons. La mise en œuvre des différentes méthodes se décline en une vingtaine de techniques dont la majorité est listée dans la table 1.

Ground based geophysics		Adequacy of the method											Remarks		
		With sedimentary covering					Without sedimentary covering					Sedimentary covering			
Method	Measurement technique	Boundaries	Fractured zone	Preferential pathways	Cavities		Boundaries	Fractured zone	Preferential pathways	Cavities		Type	Thickness	Rent cost per week	Min number of operators
					Air-filled	Water-filled				Air-filled	Water-filled				
Electrical	ES	+++	++	+	0	0	+++	+	+	0	0	++	+++	II	3
	ERT	++	++	++	++	++	+++	++	++	+++	++	+++	++	III	2
	Mise-à-la-masse	0	0	++	0	++	0	+	++	0	++	0	0	II	2
	SP	0	++	+++	0	++	0	++	+++	0	++	+	0	I	2
EM	Slingram	++	++	++	+	+	++	++	++	++	++	+++	++	II	2
	TDEM	+++	+	0	0	0	+++	+	0	0	0	+++	+++	II	2
	GPR	0	+	+	+	+	+	+++	++	+++	++	+	0	II	3
	CSAMT	+++	++	++	+	+	+++	+++	++	+	+	+++	+++	IV	2
Seismic	VLF res.-RMT	++	++	++	+	+	+++	+++	+++	+	+	+++	+++	II	2
	VLF EM	+++	+++	+++	+	+	++	+++	+++	+	+	++	+	II	2
	Tomography	+++	++	++	++	++	+++	++	++	++	++	++	++	IV	2
	MASW	++	++	++	++	++	++	+++	++	++	++	++	++	IV	3
Microgravity	Profiling or mapping	0	++	+	+++	++	0	+	+	+++	++	0	0	III	2
Magnetic	Profiling or mapping	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	++	0	II	2
MRS	Sounding	0	0	0	0	+++	0	0	0	0	+++	+	0	V	2

+++ recommended; ++ appropriate but incomplete; + appropriate but limited; 0 not recommended

I <300 €; II 301–600 €; III 601–1000 €; IV 1,001–2,000 €; V >2001 €

Rental prices can vary depending on the geographical area, equipment type and model, time of rental etc.

CSAMT controlled source audio magnetotelluric; EM electromagnetic; ERT electrical resistivity tomography; ES electrical sounding; GPR ground penetrating radar; MASW multichannel analysis of surface waves; MRS magnetic resonance sounding; RF-EM radio frequency electromagnetic; RMT radio magnetotellurics (enhanced VLF-R); SASW spectral analysis of surface wave; SP self potential; TDEM time domain electromagnetic; VLF very low frequency; VLF-R very low frequency-resistivity

Table 1 : Adéquation de la géophysique de proche surface pour l'exploration des systèmes karstiques (Chalikakis et al. 2011).

Les méthodes d'exploration géophysique ont initialement été développées pour la prospection minière et pétrolière, qui comprend des investigations jusqu'à quelques kilomètres de profondeur avec une faible résolution variant selon la profondeur (dizaine à centaine de mètres), (e.g. Dobrin et Van Nostrand 1956 ; Hatherly 2013). Leur utilisation a ensuite été dérivée à d'autres domaines tels que l'archéologie (Wynn 1986), la géotechnique (Henderson 1992), la glaciologie et l'étude du permafrost (Kneisel et al. 2008) ou encore les risques naturels (e.g. Jongmans et Garambois 2007). Plus récemment, la géophysique a été utilisée pour traiter des questions liées à l'eau (Fig. 4) en donnant naissance au domaine de l'hydrogéophysique (e.g. Guérin 2005 ; Robinson et al. 2008 ; Auken et al. 2009 ; Hubbard et Linde 2011 ; Binley et al. 2015). L'hydrogéophysique englobe les études qui utilisent des méthodes géophysiques pour caractériser des systèmes hydrogéologiques (e.g. Chalikakis et al. 2011), des propriétés hydrodynamiques des aquifères (e.g. Vouillamoz et al. 2012), l'écoulement des eaux souterraines (e.g. Revil et Jardani 2013 ; Jougnot et al. 2020) et la dynamique de l'eau dans les sols (e.g. Robinson et al. 2008).

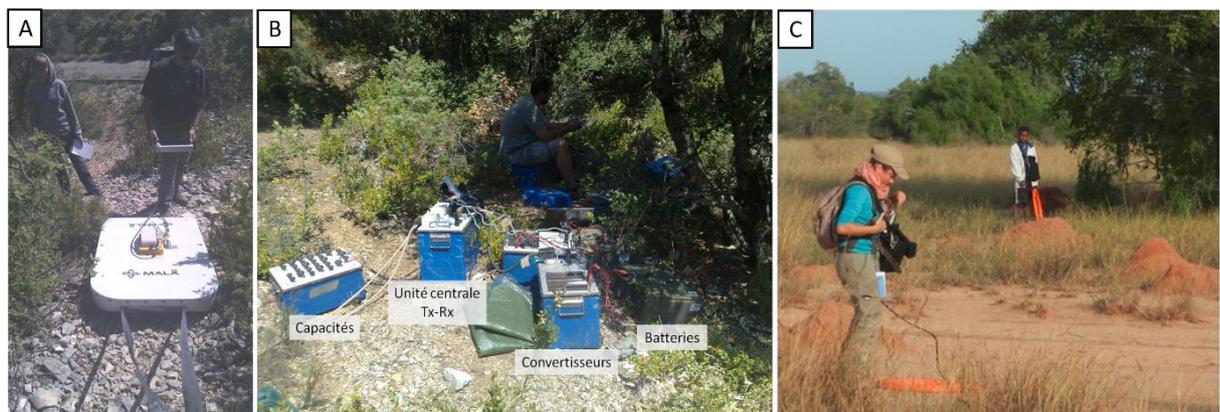


Figure 4 : Mise en œuvre de trois techniques géophysique pour la prospection des eaux souterraines : A) Géoradar avec une antenne MALÅ de 250 MHz ; B) Résonance Magnétique des Protons avec le NUMIS PLUS de IRIS ; C) Induction électromagnétique avec l'EM34 de GEONICS.

Les enjeux liés à l'agronomie ont également été explorés par géophysique : la caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols agricoles (e.g., Doussan et Ruy 2009 ; Besson et al. 2010), l'utilisation de l'eau par les cultures (e.g., Michot et al. 2003 ; Srayeddin et Doussan 2009), l'hétérogénéité des sols (e.g. Séger et al. 2014), la profondeur des sols (e.g. Doolittle et al. 1994), ou l'étude d'autres propriétés telles que la porosité, la densité, la teneur en argile ou la salinité (e.g. Romero-Ruiz et al. 2018). L'objectif opérationnel de ces études est d'utiliser la géophysique pour la planification et la gestion agricole (e.g. Samouëlian et al. 2005). Récemment, Garré et al. (2021) ont officialisé le terme d' « agrogéophysique ».

Au cours des dernières décades, les géophysiciens se sont intéressés à l'étude du sous-sol forestier tandis que les écologues se sont intéressés aux méthodes géophysiques pour mieux comprendre ces environnements complexes et hétérogènes. Jayawickreme et al. (2014) ont proposé une première courte *review* de l'application de la géophysique dans les études d'écologie. Plus récemment, Loiseau et al. (2023) ont proposé une *review* exhaustive de l'utilisation de la géophysique pour explorer des questions d'écologie forestière.

-----  
Box 1 : Evolution de la géophysique appliquée à l'écologie

*Doit-on parler aujourd'hui d'« éco-géophysique » ? Est-ce que ce terme savant accolant deux différentes disciplines avec un tiré, ne participera à maintenir les scientifiques dans leurs domaines d'expertise ? Au-delà de ces questions sémantiques, nous avons besoin de mêler profondément les sciences dans la dynamique d'étude de la zone critique afin d'améliorer notre compréhension des éco-hydrosystèmes. Dans ce cadre, la géophysique apporte une vision spatialisée permettant d'imager les structures et temporelle permettant d'étudier des processus.*

-----

## 1.2.2 Parallèle entre deux zones d'intérêt complémentaires

Les deux zones abordées dans ce rapport sont à la fois contrastées et complémentaires sur plusieurs aspects. Le Sud-Ouest de Madagascar est une zone semi-aride tandis que la région méditerranéenne française est une région tempérée en voie d'aridification. Il est intéressant de constater que les deux zones d'intérêt bénéficient de pluviométries limitées avec 669 mm/an à Avignon sur la période 1980-2020 et 391 mm/an à l'aéroport de Tuléar sur la même période (Fig. 5). Sachant que la pluviométrie à Avignon a été de 484 mm/an sur les 3 dernières années (2020-2022).

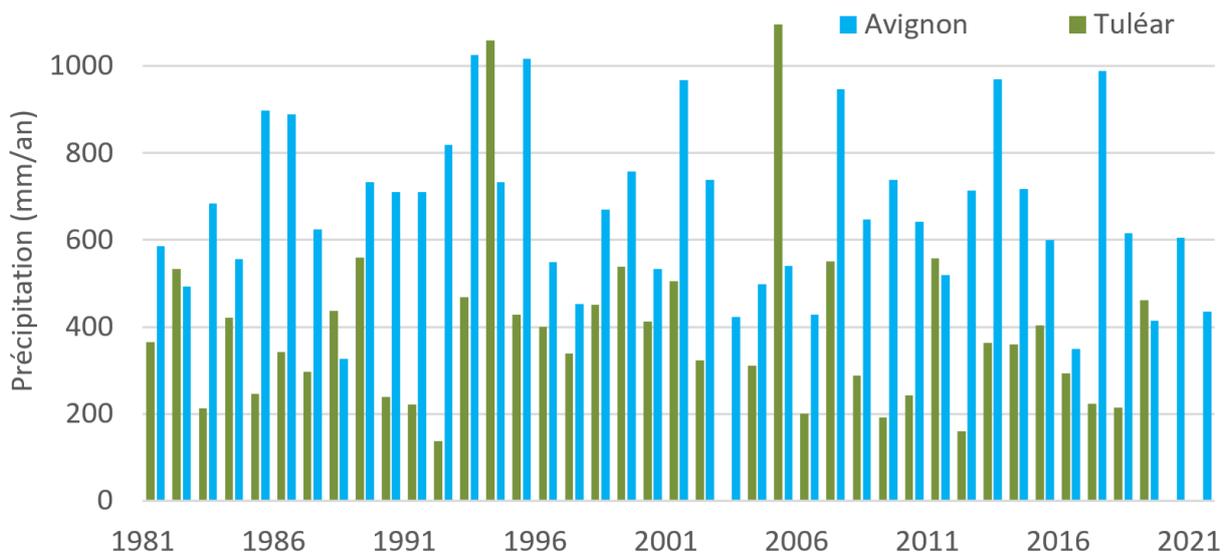


Figure 5 : Evolution des précipitations annuelles à Tuléar et Avignon entre 1980 et 2020.

L'occupation des sols évolue dans des sens opposés concernant les surfaces forestières. Madagascar a perdu 44% de ses forêts en 50 ans alors que la forêt française a gagné 30% sur la même période. La culture sur brulis et la déprise agricole sont respectivement les principales causes de ces évolutions. Actuellement, la surface forestière occupe 21% du territoire à Madagascar et 31% en France. Les paysages typiques rencontrés dans ces deux zones illustrent bien ces chiffres (Fig. 6).

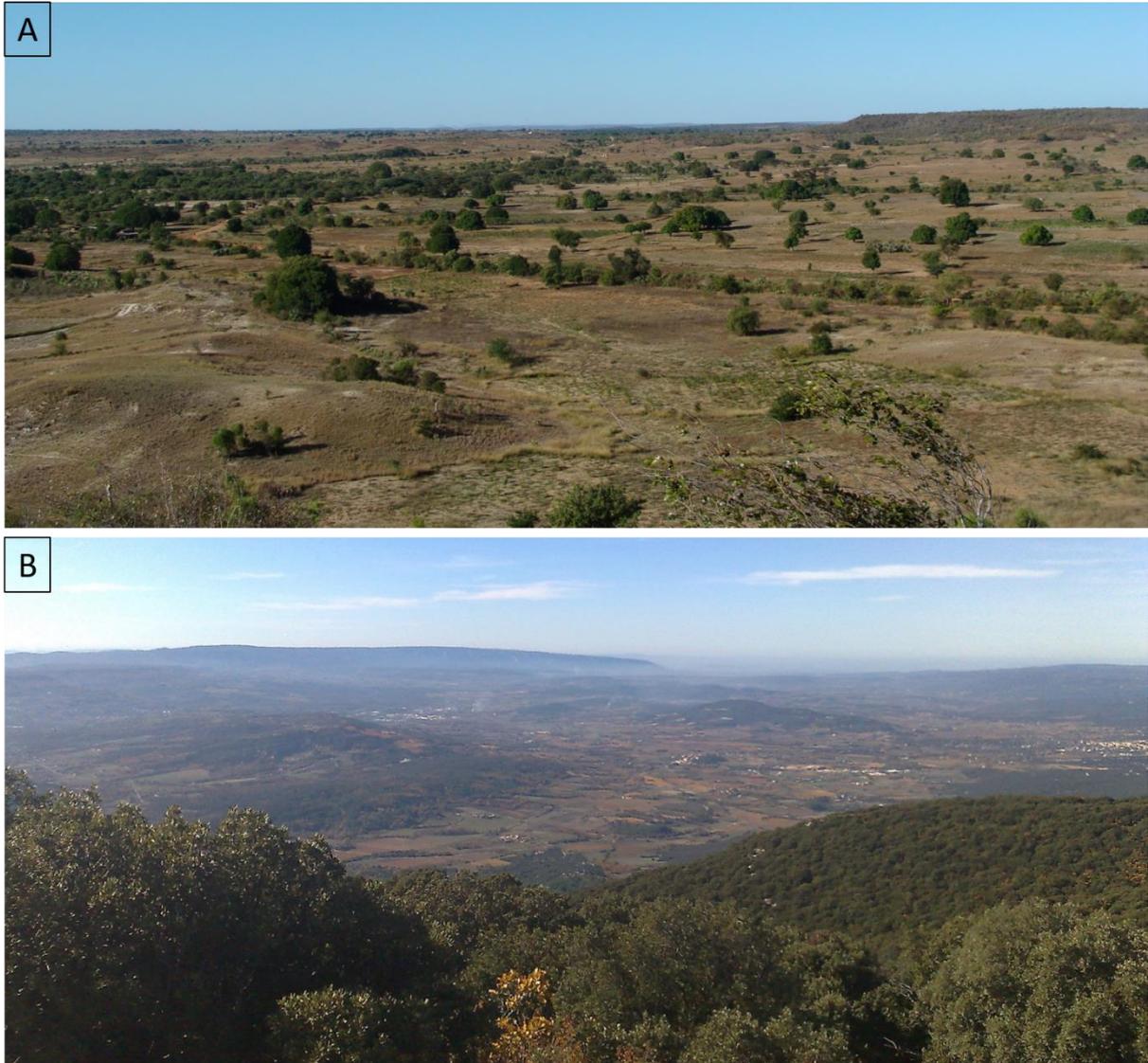


Figure 6 : Paysage typique d'une région rurale dans le Sud de Madagascar dans le district de Betioky-Atssimo, (A) et dans la région méditerranéenne en France dans le Vaucluse (B).

### 1.2.2.1 Les sites forestiers méditerranéens

Les sites expérimentaux forestiers étudiés se situent tous en zone méditerranéenne (Table 2) : le laboratoire souterrain à bas bruit (LSBB), le Mont Ventoux, Font-Blanche, Valliguières. Les sites expérimentaux étudiés sont des parcelles de taille assez réduites (hectométrique à kilométrique) qui ont été intensivement investiguées (e.g. prospection géophysique, suivis isotopiques, hydrodynamique, potentiels hydriques du sol et des feuilles, tour à flux, flux de sève, suivis de croissance, biomasse).

NOM	POSITION	ESPECES DOMINANTES	SURFACE INVESTIGUEE (M)	ROCHE	PRECIPITATION (MM/AN)	INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE
LSBB	43.9366°N 5.4660°E 530 m	Chêne vert	150x50	Calcaire Crétacé	909	SNO Karst et H+ (OZCAR)
MONT VENTOUX	44.1788°N 5.2441°E 1340 m	Sapin, Hêtre	100x100	Calcaire Crétacé	1258	SNO Karst (OZCAR)
FONT-BLANCHE	43.2407°N; 5.6786°E; 430 m	Pin d'Alep, Chêne vert	100*100	Calcaire Crétacé	700	ICOS, AnaEE, SNO Karst
VALLIGUIERES	44.0201°N; 4.6244°E; 260 m	Cèdre de l'Atlas	200*200	Calcaire Crétacé	770	

Table 2 : Synthèse des quatre sites étudiés.

- Le LSBB est un laboratoire de recherche souterrain et interdisciplinaire créé en 1997 sur la commune de Rustrel (84). Ce laboratoire (UAR 3538) a pour tutelle le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et Avignon Université et fait partie des services nationaux d'observation (SNO) H<sup>+</sup> et Karst. Le site bénéficie de conditions de bas bruit électromagnétique exceptionnelles et les travaux qui y sont menés sont très diversifiés (e.g. développement électronique, physique (matière noire et ondes gravitationnelles), géologie, hydrogéologie, géophysique). Les expérimentations dont il est question dans ce rapport se déroulent principalement en surface sur une parcelle forestière située au-dessus du LSBB à 530 m d'altitude. La forêt de Rustrel évolue à l'état naturel depuis près de 100 ans. Elle est dominée par un peuplement clairsemé de chênes verts (*Quercus ilex* L.) qui représente >85 % de la surface terrière (Carrière et al. 2017). La hauteur des arbres dominants est d'environ 4 m. Le sous-étage est une couche arbustive clairsemée qui représente 15 % de la surface terrière et comprend *Buxus sempervirens* L., *Juniperus communis* L. et *Juniperus phoenicea* L. (Carrière et al. 2017). Sur l'ensemble du site du LSBB, les roches calcaires du Crétacé qui affleurent ont un faciès urgonien (roches formées en zone sub-récifale). Ces roches sont karstifiées et les eaux qui s'y infiltrent sont drainées par le système karstique de la Fontaine de Vaucluse. Les sols, de type rendzine, sont généralement très peu développés (quelques dizaines de centimètres au maximum), hétérogènes et rocailloux. On suppose que dans un tel contexte les arbres font appel aux ressources en eau « profonde » (plusieurs mètres à dizaine de mètre) pour survivre lors des périodes de sécheresse.
- Sur le Mont Ventoux, la parcelle étudiée (DVX5) est située à 1340 m d'altitude sur le versant nord qui est dominé par le sapin blanc (*Abies alba* Mill.) qui occupe 86,3 % de la surface terrière et le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) qui occupe 13,7 % de la surface terrière. La hauteur des arbres dominants est d'environ 17 m. L'étude a été menée sur une parcelle d'environ 100\*100 m. Cette parcelle a été précédemment étudiée en détail par Nourtier et al. (2014). Ils ont utilisé la géophysique (tomographie de résistivité électrique (ERT)) pour caractériser les conditions du sol et pour relier la mortalité du sapin blanc à la sécheresse. La parcelle étudiée dans ce rapport est située sur un substratum calcaire du Crétacé. Le sol y est très hétérogène et rocailloux. Le site est localisé dans le périmètre l'alimentation de la source karstique de Fontaine de Vaucluse (Puig 1989), soit au sein du SNO Karst.

- Le site de Font-Blanche est situé sur la commune de Ceyreste. Il est géré depuis 2007 par l'INRAE et fait partie des réseaux ICOS (*Integrated Carbon Observation System*) et AnaEE (Analyses et Expérimentations sur les Ecosystèmes). Ce site est lourdement instrumenté avec des suivis en temps réel (e.g. tour à flux, flux de sève, respiration du sol, humidité du sol et potentiel hydrique) et saisonniers (e.g. potentiels hydriques foliaires, litière, phénologie).

La forêt est peuplée par un mélange de pins d'Alep (*Pinus Halepensis Mill.*) avec 71.4 % de la surface terrière dominant un sous-étage de chênes verts (*Quercus Ilex L.*) qui représente 28 % et 0.6 % d'autres essences.

Ce site est lui aussi positionné sur un substratum calcaire karstifié du Crétacé au faciès urgonien. Le sol y est rocailleux et peu épais. Le positionnement géographique du site, sur le système karstique de Port-Miou, l'insère dans le périmètre du SNO Karst.
- Le site de Valliguières est situé sur la commune du même nom, à 20 km au nord-ouest d'Avignon. La zone d'étude s'étend sur 16 parcelles réparties sur 1 km \* 500 m. Il a été créé en 1991 sur une plantation en monoculture de cèdres de l'Atlas (*Cedrus Atlantica*). L'objectif général de ce plan expérimental était d'évaluer les effets des traitements sylvicoles (éclaircie et élagage) sur la croissance des arbres (Courbet et al. 2019). Il y a eu un sous-solage avant la plantation en 1967, une éclaircie a eu lieu en 1992 conduisant à 4 densités (1200, 800, 600 et 400 tiges par hectare) et chaque éclaircie a été combinée à 4 hauteurs d'élagage en 1992 et 1996.

La roche calcaire à faciès urgonien a permis le développement d'un sol peu épais (17 à 70 cm) de type rendzine. Ce sol karstique hétérogène présente une forte proportion de cailloux (75 à 80 %).

### 1.2.2.2 Le Sud de Madagascar

Situé dans l'Ouest de l'Océan Indien, Madagascar est la 5<sup>ème</sup> plus grande île du monde avec plus de 587000 km<sup>2</sup>. La population totale est de 29 millions d'habitants et souffre d'un des taux de pauvreté les plus élevés au monde (World Bank 2023). Le climat de Madagascar est extrêmement contrasté selon les régions. Le caractère insulaire du pays donne des pluviométries contrastées entre les côtes est et ouest. La côte est, exposée aux alizées reçoit environ 3500 mm de précipitation par an de façon assez bien répartie (Fig. 7). La côte ouest, sous le vent, reçoit autour de 400 à 1000 mm/an de pluie lors de l'unique saison des pluies qui se déroule de décembre à mars. La région des Hauts-Plateaux, située autour de 1500 m d'altitude, reçoit environ 1400 mm/an de précipitations lors la saison des pluies (décembre à mars). Du fait de l'altitude les températures peuvent frôler les 0 °c en hivers (juin à août).

La région semi-aride du sud-ouest de Madagascar couvre douze districts (~80 000 km<sup>2</sup>) et compte une population d'environ 2 000 000 de personnes. C'est la région la plus pauvre du pays, la malnutrition y est chronique et les problèmes de santé placent régulièrement le Sud-Ouest de Madagascar en situation de crise humanitaire (FEWS NET 2023). La zone d'étude, situé au sud de l'axe Tuléar (ou Toliara) - Fort-Dauphin (ou Tolagnaro), est une zone semi-aride qui reçoit en moyenne 400 mm/an de pluies mais avec une forte variabilité interannuelle. Madagascar est régulièrement exposé aux cyclones (Aruna 2013, Fundi 2015, Eketsang 2019). Ces événements extrêmes expliquent généralement de fortes pluies observées certaines années dans le Sud-Ouest. Au cours des 5 dernières années les cumuls ont difficilement dépassé les 200 mm/an (Fig. 5). On suppose que ces sécheresses successives sont partiellement à l'origine de la situation humanitaire dégradée qui persiste. Cependant, ces crises ont été insuffisamment anticipées par les acteurs humanitaires du fait du manque de connaissance pour caractériser et quantifier les mécanismes qui transforment une sécheresse en crise humanitaire.

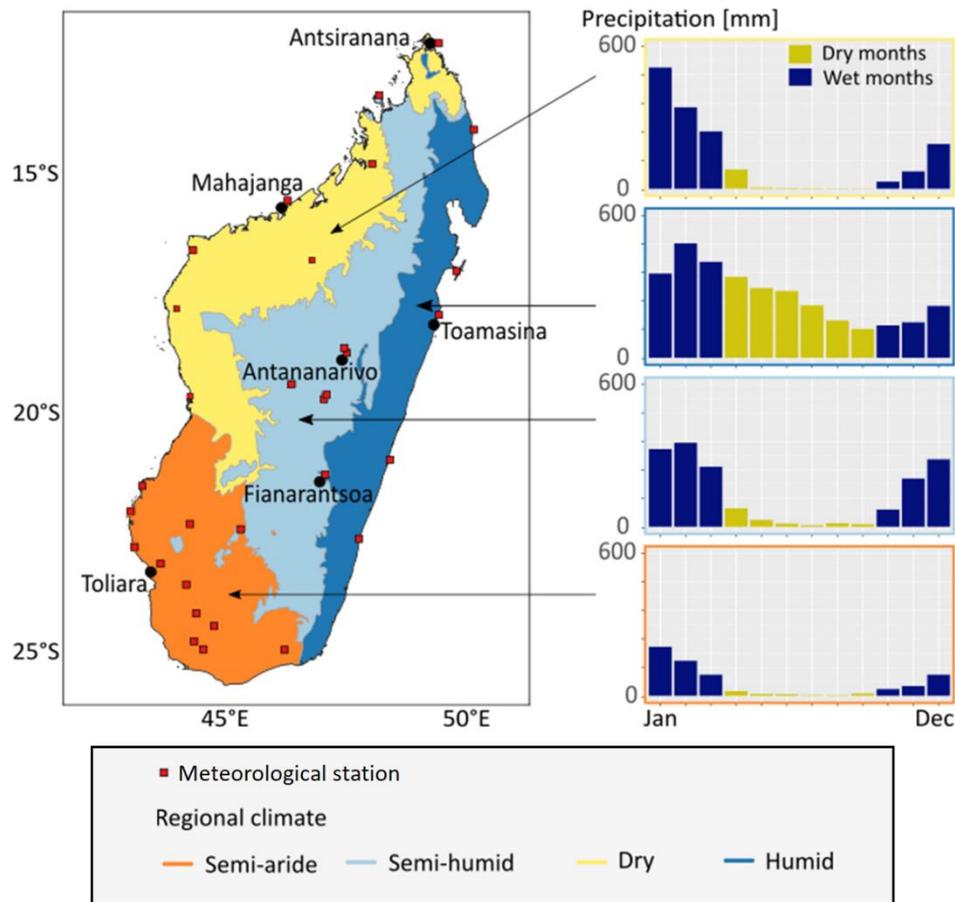


Figure 7 : Carte climatique Madagascar, fond de carte bioclimatique de Cornet (1974).

Les eaux souterraines ont une place très importante dans cette région quasiment dépourvue d'eau de surface (lacs et rivières). L'Onilahy est le seul fleuve de la région qui atteint la mer de façon permanente. La plupart des cours d'eau ont un cheminement limité dans l'espace, aux roches de socle les plus imperméables, et dans le temps, autour de la saison des pluies. Des mares temporaires peuvent également permettre aux populations d'accéder à une eau de qualité généralement mauvaise pendant la saison des pluies et durant les premières semaines de la saison sèche. Dans ce contexte, l'eau souterraine est la seule ressource disponible toute l'année même si de nombreux puits tarissent pendant la saison sèche.

L'hydrogéologie du sud de Madagascar est contrôlée par un contexte géologique très varié (Fig. 8). Les formations les plus anciennes se trouvent au nord-ouest (socle cristallin et socle sédimentaire) et des formations plus récentes se trouvent dans le Sud-Ouest (Tertiaire). On rencontre tous les grands types d'aquifères : sédimentaires (e.g. sables, grès, calcaire), plutoniques (e.g. granite, diorite), métamorphiques (e.g. schistes, gneiss, micaschistes) et également des formations volcaniques liées à l'ancien volcan d'Androy.

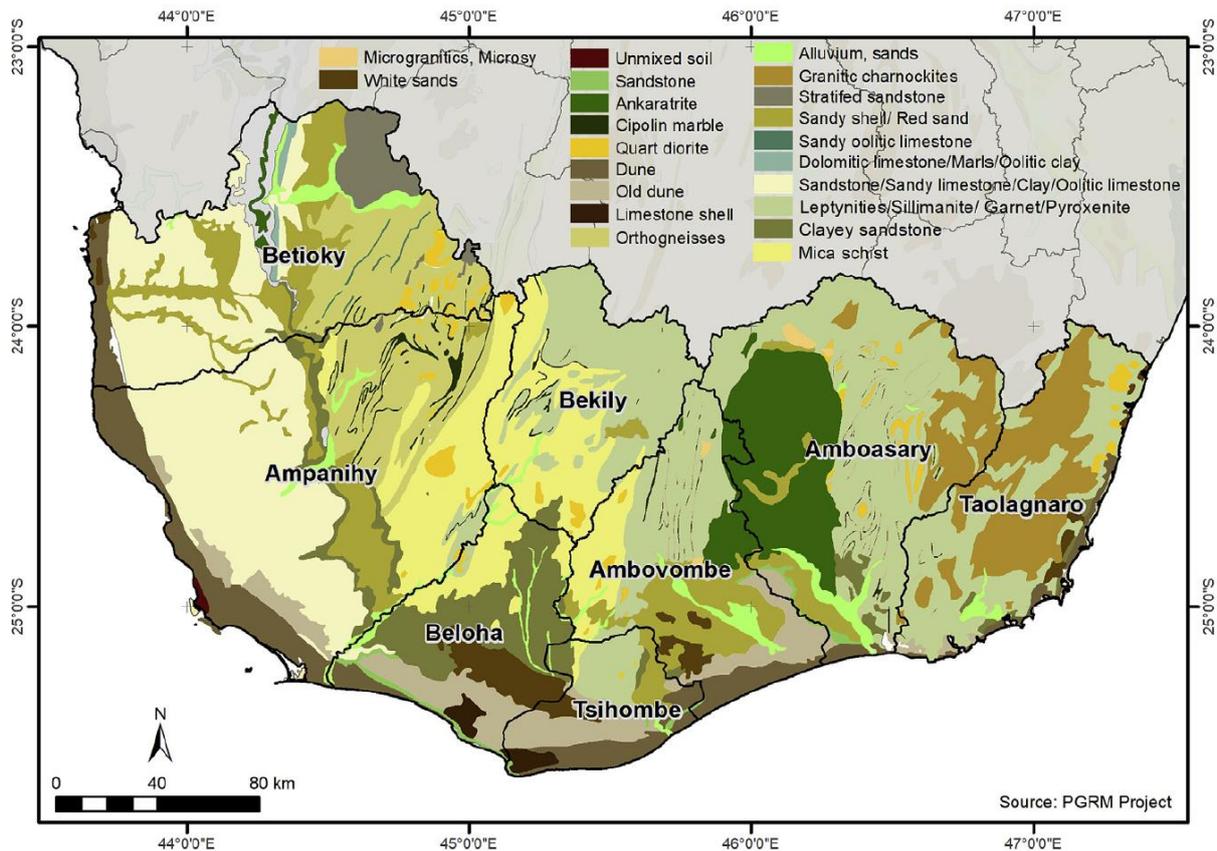


Figure 8 : Carte géologique simplifiée du sud de Madagascar (Serele et al. 2019).

Travailler sur le Sud-Ouest de Madagascar permet de se concentrer sur une zone où les préoccupations humanitaires sont fortes. De plus, cette région constitue un site d'étude unique qui met en évidence les possibles interactions entre les sciences de l'eau et les sciences humaines pour deux principales raisons : i) du taux de pauvreté qui rend ces populations, essentiellement rurales, très vulnérables aux aléas climatiques, et ii) du niveau de développement extrêmement faible qui fait que peu de facteurs anthropiques viendront perturber nos analyses (pas d'infrastructure de transport de l'eau et le recours à l'irrigation est négligeable).

## I.3 Interaction complexe entre végétation et eau souterraine en milieu forestier

Cette première section du résumé des activités de recherche est dédiée à présenter des travaux menés en contexte forestier méditerranéen sur un milieu karstique. L'étude des transferts d'eau dans ces milieux complexes et souvent mal compris, présente une large marge d'amélioration dans la compréhension des processus. Ces travaux combinent différentes approches tirées de l'hydrogéologie (e.g. géophysique, traçage isotopie) et de l'écophysiologie végétale (e.g. potentiel hydrique, suivi de défoliation). Cette section s'articule en trois grandes parties.

La première partie a tout d'abord consisté à caractériser de la structure géologique de la zone non saturée du karst en combinant le GPR (*ground penetrating radar*) et l'ERT (*electrical resistivity tomography*) qui sont complémentaires par leurs résolutions et leurs profondeurs d'investigation. Ensuite l'étude des circulations de l'eau dans la zone non saturée du karst a été réalisée au pas de temps saisonnier avec l'ERT, la résonance magnétique des protons (RMP) et la gravimétrie puis au pas de temps événementiel avec l'ERT qui est automatisable et a permis de faire un suivi horaire.

La deuxième partie traite la caractérisation des prélèvements d'eau par les arbres et des différentes stratégies mises en œuvre au niveau inter-espèces ou inter-individus. L'association de la géophysique et du traçage isotopique permet d'étudier les stratégies d'adaptation des parties aériennes ou souterraines des arbres pour faire face au stress hydrique.

La troisième partie présente les perspectives de travaux pour les années à venir. Il s'agit de la caractérisation de l'eau totale disponible pour les arbres sur la base de différentes approches complémentaires (e.g. géophysique, micro-météorologie, télédétection, modélisation de surface). Ce nouveau projet à l'interface entre sciences hydrologiques et écologie fonctionnelle ouvre des perspectives de recherche encourageantes.

### I.3.1 Etude géophysique de la structure et de la dynamique de l'eau dans les sous-sols forestiers

#### I.3.1.1 Contexte

Pour comprendre l'impact des sécheresses sur les forêts, il est indispensable de savoir où se trouve l'eau dans le milieu souterrain et en quelle quantité. Pour mener ce travail les approches géophysiques sont d'une grande utilité car elles permettent de caractériser la zone étudiée de façon non invasive et spatialisée. Cependant les approches géophysiques ont souvent besoin d'être combinées entre elle car chacune présente des points forts et faibles qui sont complémentaires. Les résultats géophysiques doivent être nécessairement associés à d'autres observations de terrain (e.g. géologie structurale, données de forage, hydrochimie) pour mener à des interprétations robustes et ancrées dans la réalité de terrain.

Les travaux présentés ci-dessous ont été menés dans des mieu karstiques qui sont particulièrement complexes du fait de leur discontinuité et de leur hétérogénéité. Dans les régions anthropisées du monde, les zones allouées au développement des forêts sont souvent les « mauvaises terres », où les sols sont rocailloux, peu développés et ne permettent pas le développement d'une agriculture productive. C'est souvent le cas des zones où le karst se retrouve à l'affleurement. En région méditerranéenne, le karst représente 30 à 70% des roches affleurantes (Bakalowicz et Dörfliger 2005) et il est souvent colonisé par

les forêts lorsque les ressources en eau permettent leur développement. C'est que l'on peut constater à l'Est d'Avignon sur le périmètre d'alimentation de la Fontaine-de-Vaucluse (Fig. 9). On notera que les zones les plus vertes, qui signalent les forêts sur la photo aérienne (Fig. 9A), correspondent aux affleurements de roches calcaires karstifiées crétacé et jurassique (Fig. 9B).

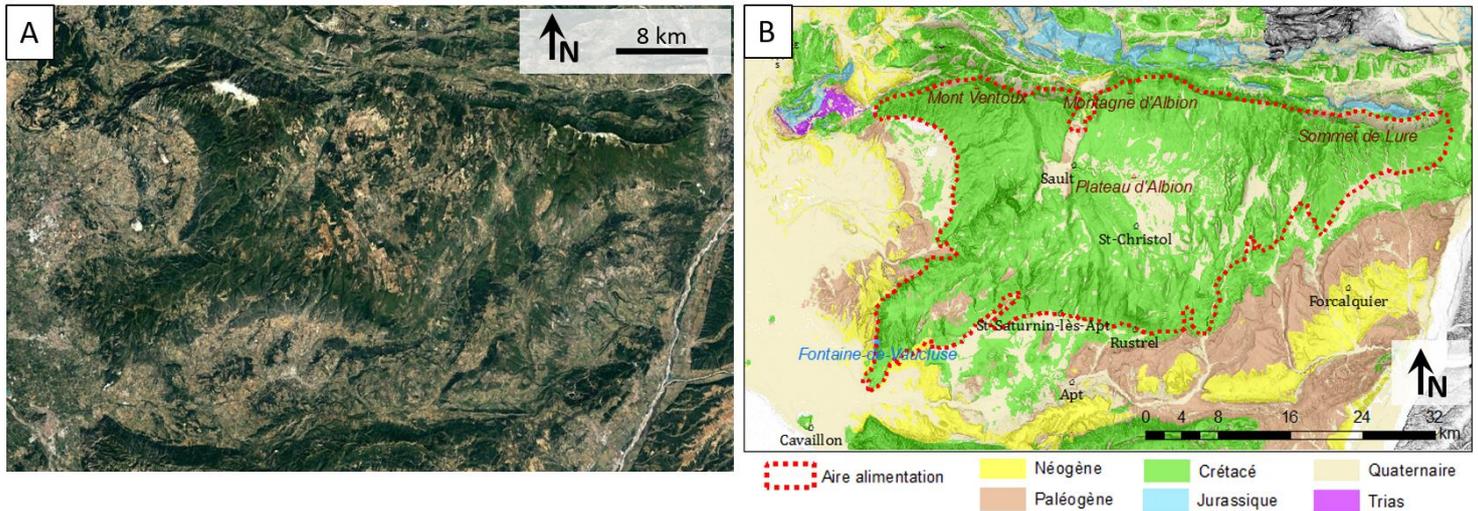


Figure 9 : Relation entre la présence de forêt et l'affleurement des roches karstifiées (Crétacé, Jurassique) à l'Ouest d'Avignon. A) Photo aérienne. B) Carte géologique simplifiée (Ollivier 2019).

Chalikakis et al. (2011) ont réalisé une synthèse bibliographique sur l'utilisation de la géophysique pour étudier les milieux karstiques. Cette synthèse a montré que beaucoup d'études géophysiques sur le karst étaient assez descriptives car elles consistaient souvent à évaluer le potentiel des différentes techniques géophysiques pour détecter les différentes structures géologiques associées au karst. Cette étape était indispensable pour l'évolution de la communauté géophysique. Dès lors, il était nécessaire d'aller vers une utilisation de la géophysique visant à améliorer la compréhension hydrogéologique des systèmes karstiques. Les travaux qui suivent ont contribué à cette évolution.

Ces travaux ont été réalisés sur le site de la sortie de secours du LSBB (Table 2). La zone investiguée s'étend sur environ 2 ha et se situe au-dessus du tunnel du LSBB (Fig. 10A). Sous le site, à l'intérieur du tunnel du LSBB, un point d'écoulement (ou suintement) nommé « point D » est suivi depuis 2002 d'un point de vue hydrodynamique (débit), hydrochimique (ions majeurs, carbone organique total) et isotopique ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ), (Barbel-Perrineau 2013). Le point D se situe à 33 m de profondeur sous le site expérimental (Fig. 10B) et environ 450 m au-dessus de la zone noyée du karst de Fontaine-de-Vaucluse. Cet écoulement situé dans la zone non saturée du karst questionne par la stabilité hydrochimique et la pérennité de son débit (Fig. 10C) alors que d'autres points écoulements suivis plus profondément dans le LSBB présentent des dynamiques très variables dans le temps comme attendu dans les milieux karstiques (Garry et al. 2008). Les investigations géophysiques ont consisté à caractériser les structures géologiques et comprendre les écoulements d'eaux souterraines qui alimentent le point D.

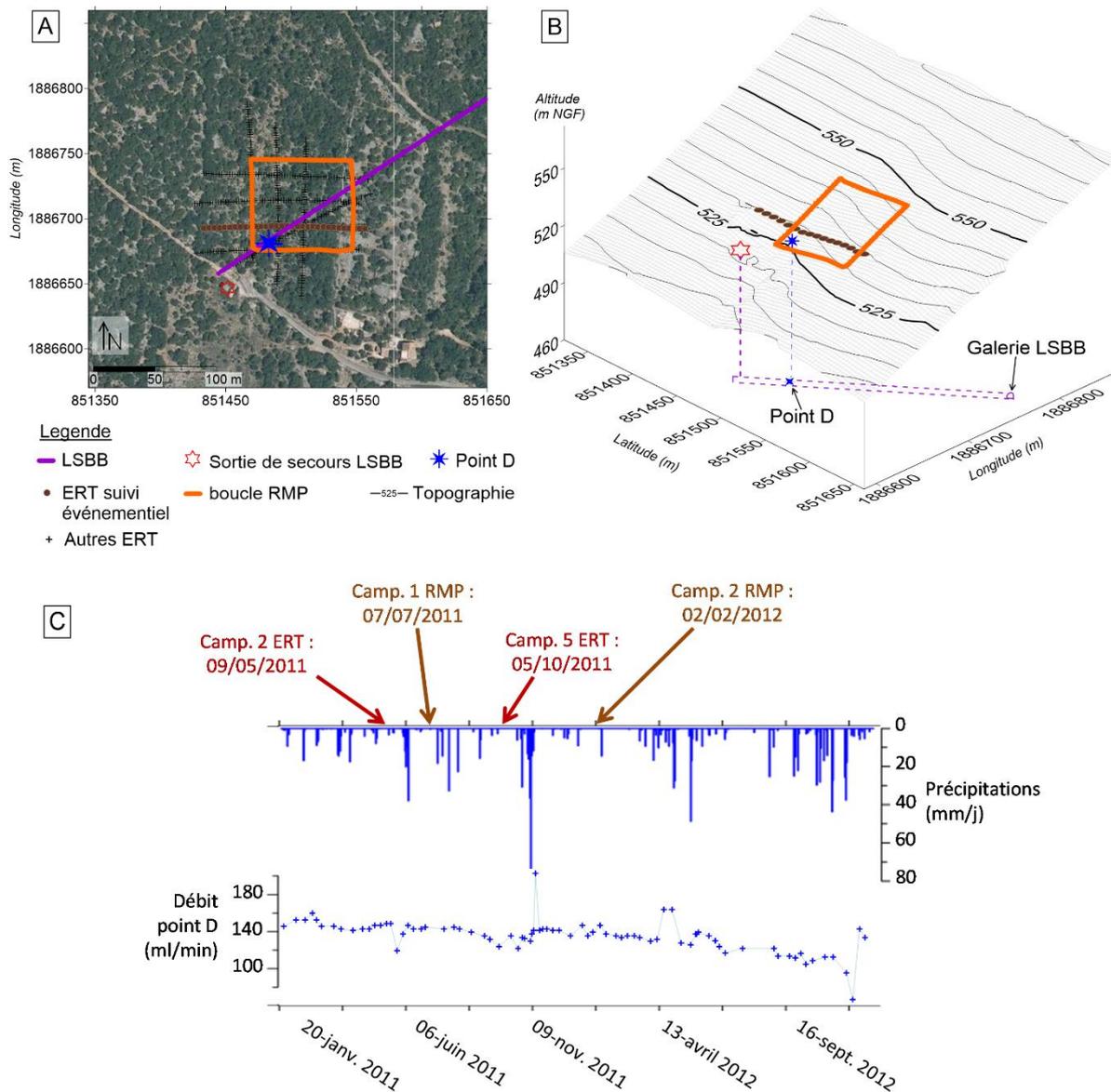


Figure 10 : Site expérimental du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) : A) Emplacement des mesures géophysiques sur photo aérienne ; B) Représentation pseudo 3D du site ; C) Dynamique des précipitations et du débit du point D en 2011 et 2012 avec le positionnement des principales campagnes.

### 1.3.1.2 Travaux

#### 1.3.1.2.1 Etude de la structure

Premièrement la zone d'étude a été explorée pour améliorer la compréhension des structures géologiques (Carrière 2014). Ce travail a été effectué par la combinaison de l'ERT (ABEM Terrameter, 64 électrodes) et du GPR (Malå RAMAC, 100 et 250 MHz). Afin de recouper les deux grandes directions de linéaments du secteur (N0 à N25 ° et N100 à N120 °) des profils ont été réalisés selon les directions N/S et E/W (Fig. 10).

Le processus classique de traitement des données ERT consiste à inverser les résistivités apparentes afin de générer un modèle de résistivité « vrai » ou « interprété » du sous-sol. Cependant, la réalisation de cartes de résistivités apparentes à différentes pseudo-profondeurs peut se révéler intéressante pour informer sur la structuration générale de la zone. Dans le cas du LSBB cette structuration apparaît clairement orientée N10 à N25 ° (Fig. 11). Ces résultats confirment les observations de linéaments sur photo aérienne.

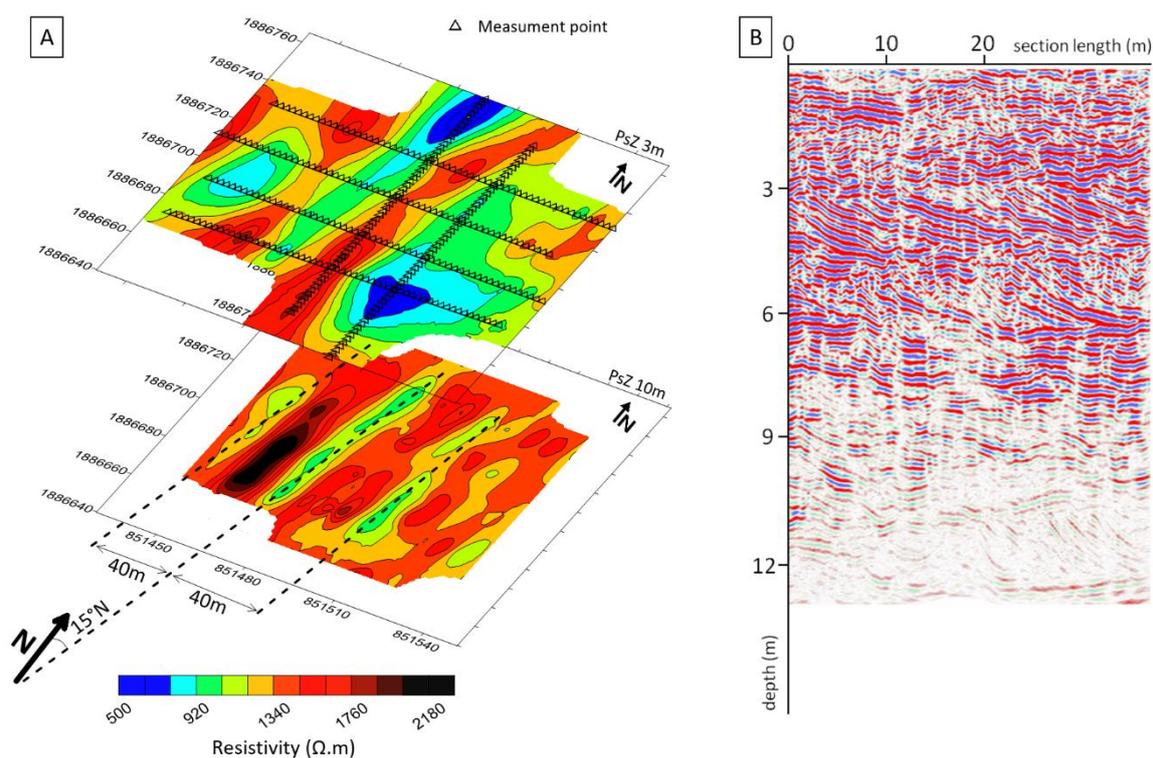


Figure 11 : A) Carte de résistivité apparente interpolée à partir de six profils ERT (*electrical resistivity tomography*) aux pseudo-profondeurs 3 et 10 m (Mai 2011). Dispositif de mesure Wenner-Schlumberger avec 64 électrodes et 2 m d'espacement. B) Tronçon de profil GPR (*ground penetrating radar*) avec une antenne 250 MHz (section LSBB01, Nord/Sud), (Carrière et al. 2013).

Le GPR offre une imagerie de haute résolution, décimétrique à métrique selon la profondeur, qui permet de détecter des fractures ou des failles ainsi que différentes structures sédimentaires. Deux types de stratifications ont ainsi été identifiés sur le site de la sortie de secours du LSBB : des stratifications régulières près de la surface et des stratifications obliques plus en profondeur à partir de 5 à 7 m. La profondeur d'investigation du GPR reste limitée vers 12 m, voire à 1 ou 2 m lorsqu'une couverture argileuse atténue le signal GPR. Les panneaux de résistivités inversées permettent de visualiser la distribution des résistivités dans le sous-sol jusqu'à près de 40 m de profondeur, soit jusqu'au niveau de la galerie du LSBB (Fig. 12). Une zone de résistivité modérée (900  $\Omega.m$ ) par rapport à la roche encaissante (plus de 2000  $\Omega.m$ ) a été identifiée au-dessus du point D. Cette zone pourrait être le témoin d'une teneur en eau ou en argile localement plus forte. Cette zone correspond également aux stratifications obliques détectées par GPR. Ces formes de stratification témoignent de conditions de dépôt plus agitées ayant donné naissance à un calcaire relativement plus poreux. L'hypothèse d'une teneur en eau localement plus élevée et induisant des valeurs de résistivité plus faibles semble donc la plus probable. Selon cette hypothèse un stock d'eau dans une zone assimilable à un milieu poreux, à l'aplomb du point D, pourrait également contribuer à expliquer l'hydrodynamique atypique de ce point d'écoulement.

Suite à cette première étape, les campagnes de mesures suivantes, destinées à améliorer la compréhension de l'hydrodynamique du point D, ont pu être organisées et planifiées selon les aprioris sur la structure géologique et les premières hypothèses de fonctionnement hydrogéologique.

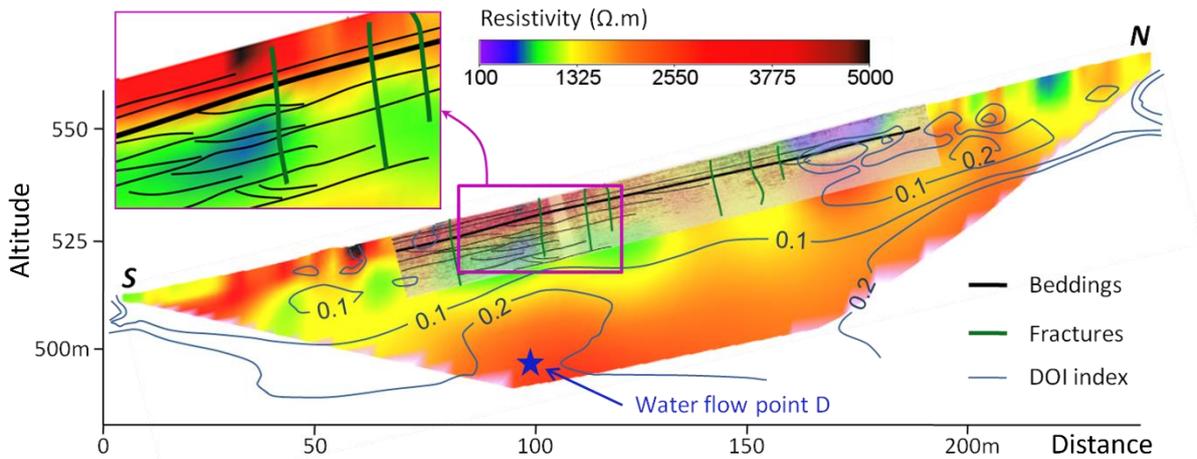


Figure 12 : Superposition des sections ERT (*electrical resistivity tomography*) et GPR (*ground penetrating radar*). La section ERT (LSBB01) est orientée Nord/Sud et mesure 252 m de long (64 électrodes, 4 m d'espacement), (itération 3, RMS=1.11 %). L'indice DOI (*depth of investigation*) permet de repérer les zones les moins fiables (DOI > 0.2). L'antenne GPR utilisée était la 250 MHz (Carrière et al. 2013).

### 1.3.1.2.2 Etude du fonctionnement

Deuxièmement la zone d'étude a été explorée pour améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du site (Carrière et al. 2016). Dans un contexte géologique stable et des conditions de mesure équivalentes ou corrigées, les variations temporelles des différents signaux géophysiques peuvent être attribuées à une variation du stock d'eau dans le sous-sol. Dans la suite de ce document, les variations des signaux géophysiques ont été étudiées à deux échelles de temps : (i) à l'échelle saisonnière pour caractériser une dynamique générale, plutôt lente et (ii) à l'échelle événementielle afin de comprendre des phénomènes ponctuels et rapides.

#### Pas de temps saisonnier

Au pas de temps saisonnier, les différentes investigations géophysiques ont permis de mettre en évidence les variations du signal géophysique liées aux fluctuations du stock d'eau. L'ERT permet d'évaluer rapidement et de manière distribuée l'état d'humectation des premiers horizons du sous-sol. La RMP et la gravimétrie sont particulièrement utiles pour détecter des variations de teneurs en eau à plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Les campagnes ERT 2 et 5 ont été réalisées respectivement en mai (humide) et octobre (sec) 2011. Le modèle de variation de résistivité inversée (Fig. 13C) permet la mise en évidence d'une forte augmentation de la résistivité dans les premiers mètres du sous-sol. Cela traduit un fort dessèchement superficiel entre les deux campagnes. Certaines zones présentent de légères diminutions de résistivité qui n'impliquent probablement pas de réelles variations de teneur en eau mais plutôt des artefacts liés au traitement des données par inversion qui prennent place sous les zones de résistivité extrême. Ce type d'artéfact est bien

connu en ERT (e.g. Clément et al. 2009 ; Clément et al. 2011) mais reste difficilement contournable même si l'amélioration des outils de traitement des données tend à les limiter.

Plus en profondeur, l'ERT ne permet pas de détecter des variations de résistivité. Pourtant la zone à résistivité modérée, d'environ 900  $\Omega.m$ , apparaît sur les deux modèles de résistivités inversées. Celle-ci ne subit pas de changement considérable de résistivité. Si la zone à résistivité modérée correspond bien à la présence d'un stock d'eau, il semble que celui-ci soit suffisamment important pour ne pas être notablement affecté par les variations saisonnières. Ce constat pourrait expliquer la pérennité et la faible variabilité du débit du point d'écoulement D.

Enfin, l'assèchement des premiers mètres du sous-sol ne semble pas avoir d'impact sur l'hydrodynamique du point D. Ces premiers horizons, constitués de sol et de roche altérée, permettent difficilement à la forêt de survivre lors des périodes de fort stress hydrique. En effet, la modélisation des échanges sol/plante/atmosphère réalisée avec Castanea (Carrière et al. 2017) montre que la forêt traverse une période de fort stress hydrique avec des taux de remplissage de la réserve utile proche de 0 %. Ce n'est donc pas le compartiment superficiel (sol/épikarst) qui soutient le débit d'étiage du point D. Les mesures RMP ont permis d'apporter une information complémentaire sur la présence d'eau plus en profondeur.

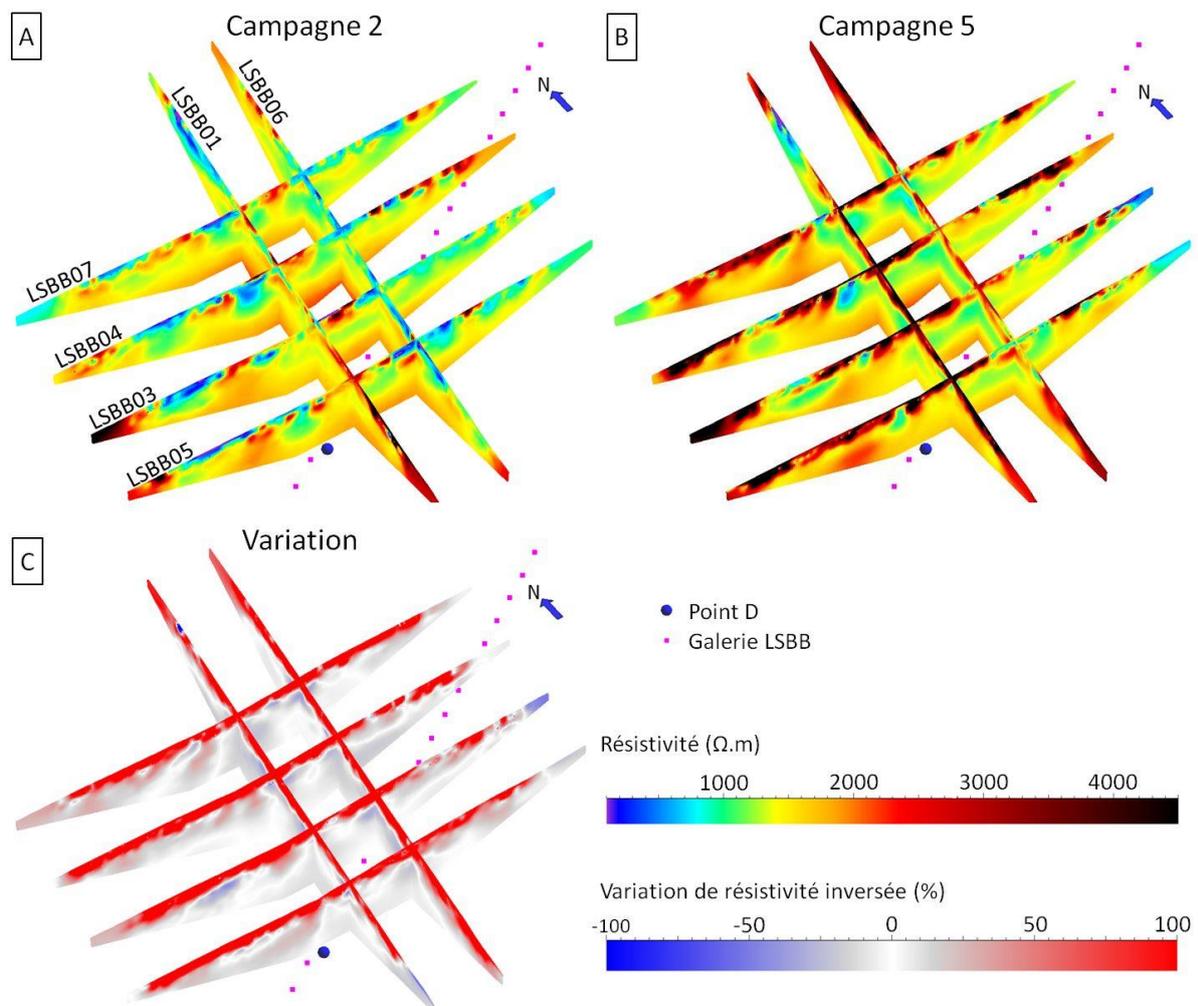


Figure 13 : Comparaison des campagnes 2 et 5 inversées en 3D "time-lapse" avec le logiciel BERT. (A) Modèle de résistivité de la campagne 2 ; (B) Modèle de résistivité de la campagne 5 ( $\chi^2 = 3.1$  et  $RMS = 4.6\%$ ) ; (C) Variation de la résistivité entre les campagnes 2 et 5.

Les mesures de RMP de la campagne 1 ont permis de confirmer la présence d'eau libre au-dessus du point D entre 5 à 20 m de profondeur (Fig. 14). On observe également une forte teneur en eau au-delà de 35 m de profondeur. Ces fortes teneurs en eau sont cohérentes avec certains niveaux des calcaires urgoniens localisés dans l'unité U3 (Masse et Fenerci-Masse 2013) à forte porosité (Léonide et al. 2014) observés par GPR vers 3 à 7 m sous le site (Carrière et al. 2013). La variation saisonnière du signal RMP (Fig. 14) indique que cette eau est mobile. Des mesures gravimétriques « *surface-to-depth* » ont confirmé cette variation de teneur en eau entre octobre 2011 et avril 2012 (Carrière 2014).

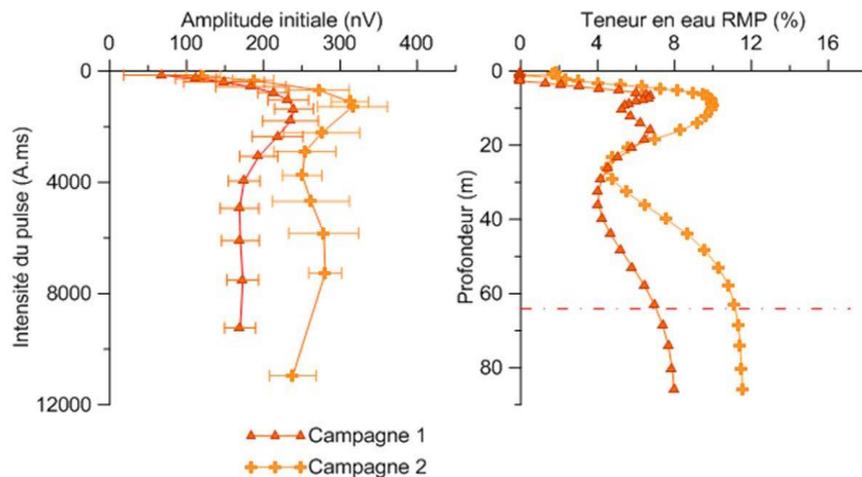


Figure 14 : Variation temporelle du signal de résonance magnétique des protons (RMP) brut (à gauche) et inversé (à droite) entre la campagne 1 de Juillet 2011 (sec) et la campagne 2 de Février 2012 (humide), (Carrière 2014).

#### Pas de temps évènementiel

Au pas de temps évènementiel, l'objectif était d'étudier des phénomènes ponctuels et rapides qui s'opèrent au cours des événements pluvieux (e.g. infiltration préférentielles). L'ERT est une technique robuste, rapide et automatisable, qui a pu être mise en œuvre pour suivre les infiltrations lors de l'épisode pluvieux d'octobre/novembre 2011 (230 mm sur 17 jours). Les résultats de ce suivi ERT évènementiel sont présentés ci-après en deux parties : (i) analyse des résistivités inversées, (ii) analyse de la variation des résistivités apparentes (Carrière et al. 2015 ; Carrière et Chalikakis 2022).

L'analyse des modèles de résistivités inversées constitue l'approche d'interprétation la plus courante de l'ERT. De nombreuses combinaisons de stratégies d'inversion et de logiciels ont été comparées avec des paramètres d'inversion équivalents selon les logiciels BERT, Res2Dinv et DC2Dinv (Carrière 2014). Les différentes inversions convergent vers une même interprétation. On constate de très forts changements de résistivité près de la surface, qui témoignent du passage d'un état très sec à un état très humide (Fig. 15). Après un cumul de précipitation de 80 à 100 mm (temps 4 ; Fig. 15B) la résistivité de l'horizon superficiel se stabilise. Cet horizon superficiel concentre alors la majorité des lignes de courant et laisse peu de signal pour caractériser les horizons plus profonds et plus résistants. En effet, en profondeur les variations de résistivité (Fig. 15C) par rapport à l'état initial y sont dominées par des artefacts liés au processus d'inversion. L'interprétation des parties profondes est donc impossible car ces augmentations n'ont aucune

réalité physique. Ces artefacts d'inversion sont bien connus dans la communauté des spécialistes du suivi ERT pour être une des limitations de l'inversion du *time-lapse* ERT (e.g. Clément et al. 2010). Dans ce contexte, il semble difficile d'identifier des processus d'infiltration préférentielle. Cependant des transferts d'eau s'opèrent bien entre la surface et le point D puisque l'on constate une augmentation du débit et une hausse de la conductivité électrique qui témoigne de la mobilisation d'eaux plus anciennes.

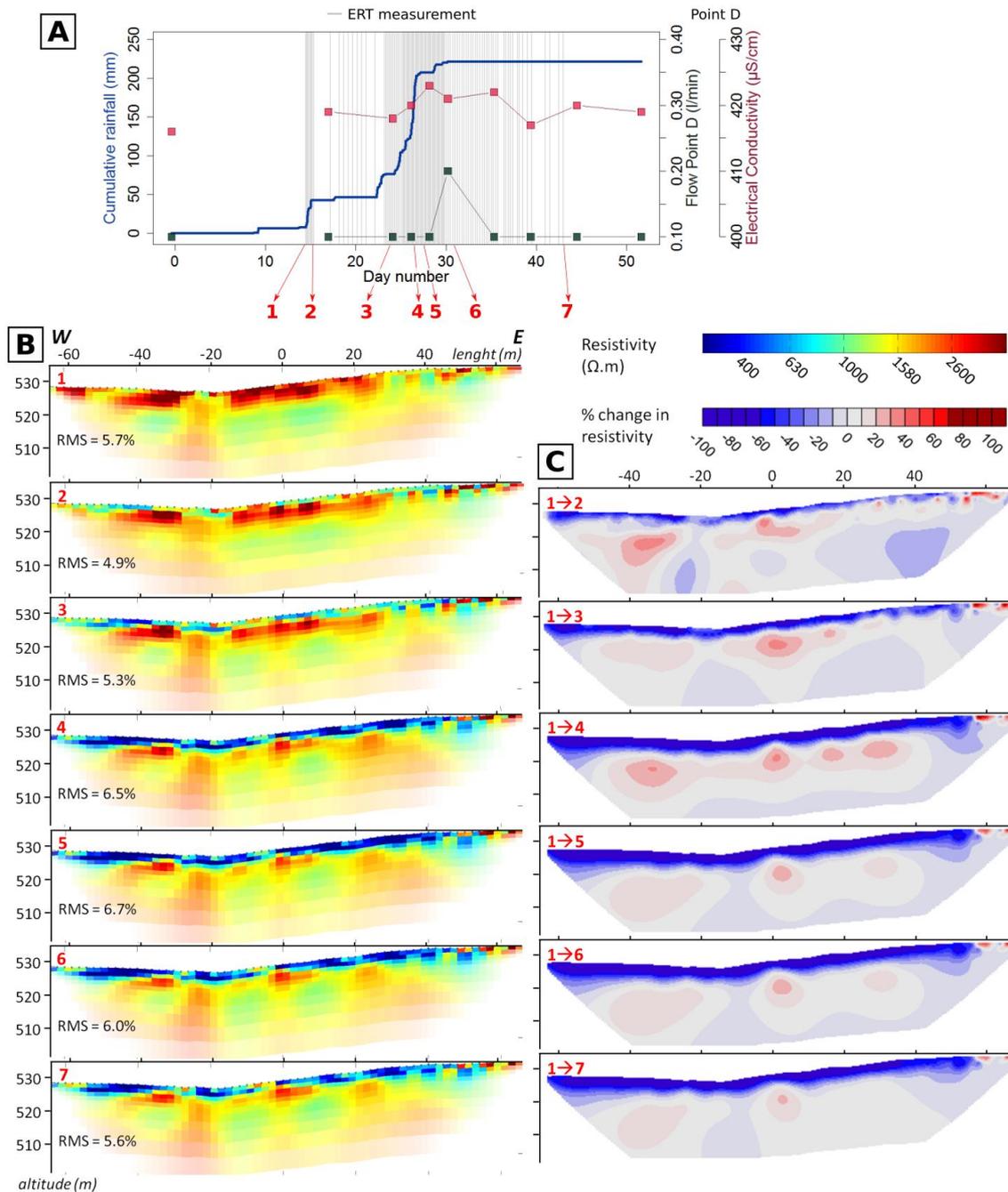


Figure 15 : Résultats du suivi ERT (*electrical resistivity tomography*) obtenus lors de l'événement pluvieux d'octobre/novembre 2011. A) Pluies cumulées et évolution du débit et de la conductivité du point D situé à 33 m sous le site. B) Résultats de 7 modèles ERT représentatifs de la dynamique de l'eau. C) Variation de la résistivité par rapport à l'état initial.

L'analyse des résistivités apparentes est généralement peu considérée de nos jours. Cependant, la figure 16, qui représente les variations horaires de résistivité apparente, permet d'enrichir l'interprétation des résistivités inversées. Les zones aux couleurs froides mettent en évidence une diminution de la résistivité qui pourrait traduire une dynamique d'humectation du sous-sol, tandis que les couleurs chaudes pourraient traduire une dynamique de ressuyage. L'interprétation des sections de la figure 16 doit être faite avec une grande précaution car les changements de résistivité apparente qui apparaissent à une pseudo-profondeur de 15 m pourraient être uniquement liés aux conditions de surface. Il ne faut donc pas interpréter hâtivement la propagation de l'eau vers la profondeur.

Au début de l'événement pluvieux, l'humectation du sol et du sous-sol semble se faire de manière relativement homogène. Les quelques disparités observables sur l'ensemble du profil pourraient bien s'expliquer par l'interception de la pluie par les arbres. Après les premières averses, les résistivités se stabilisent rapidement. Au plus fort de l'événement pluvieux, les phénomènes d'humectation du sous-sol se font de manière très hétérogène. Elles pourraient être reliées à des variations en profondeur car l'horizon proche de la surface est alors déjà totalement saturé en eau (Fig. 16 ; temps 3).

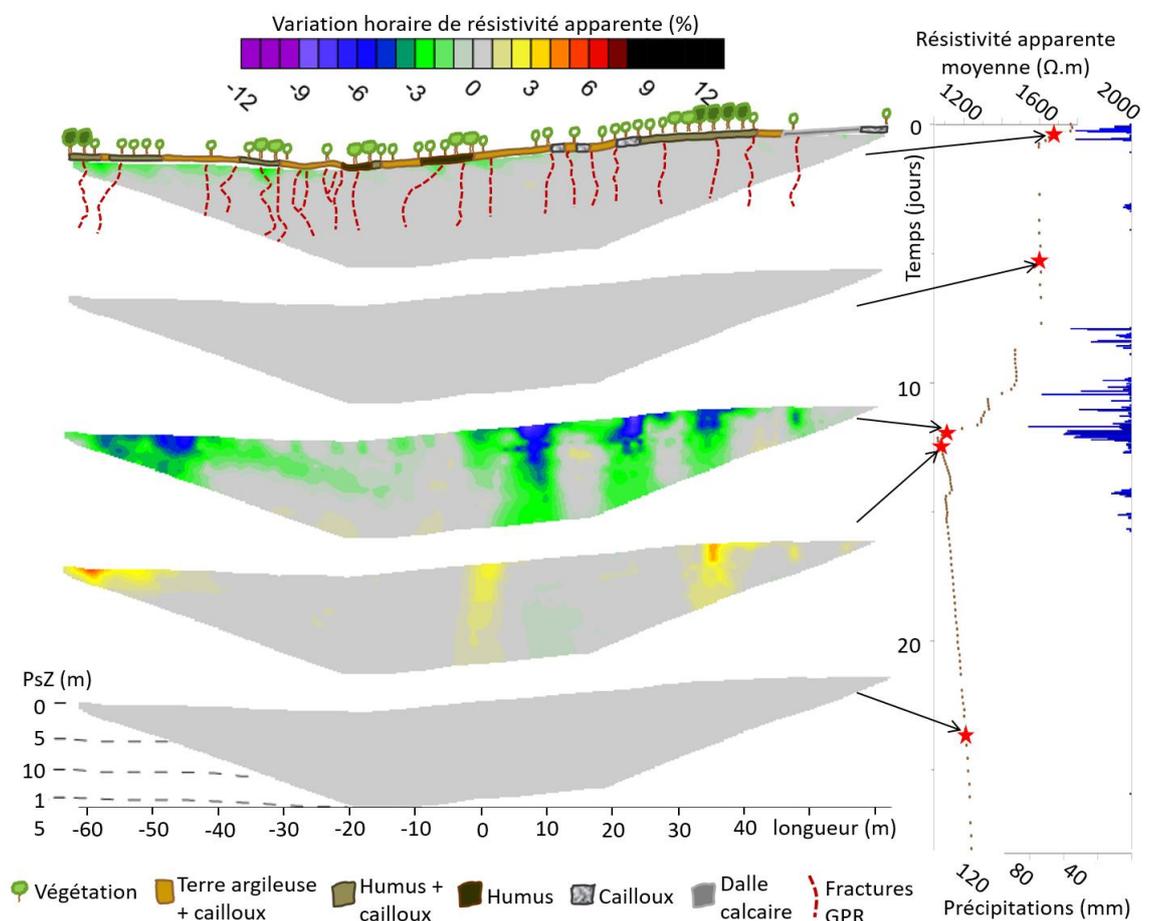


Figure 16 : A) Variation horaire de la résistivité apparente entre deux pas de temps consécutifs. Positionnement des fractures détectées par le GPR (*ground penetrating radar*) et représentation de base de la végétation et de la couverture du sol. B) Évolution de la résistivité apparente moyenne pendant le suivi ERT (*electrical resistivity tomography*) en fonction de la pluie. Chaque point marron représente une section ERT (Carrière et al. 2015, modifié).

Une dynamique de ressuyage apparaît lorsque l'intensité de la pluie diminue (Fig. 16 ; temps 4). Cette observation révèle une dynamique de l'eau particulièrement rapide aux abscisses -60 m ; 0 m ; 40 m. Ces trois zones marquent des chemins préférentiels par lesquels les dynamiques d'humectation et de ressuyage se produisent plus facilement.

Le point D présente une dynamique atypique car son débit n'est pas caractéristique d'un milieu karstique, à l'inverse des autres points d'écoulements suivis plus profondément dans le LSBB. Le stock d'eau qui alimente ce point d'écoulement semble être réapprovisionné avec un temps de déphasage pluie/débit de l'ordre de 6 mois (Carrière et al. 2017), à l'exception de quelques pics de débit observés lors de certains événements pluvieux (Fig. 15A). La zone qui présente une résistivité modérée et des stratifications obliques semble être la zone de stockage de l'eau qui alimente le point D.

Les hypothèses formulées sur la base des résultats géophysiques ont été confirmées par une campagne de forage mené en 2015 dans le cadre du projet InterWell. Trois forages, positionnés en triangle autour du point D, ont tous rencontré de l'eau (Chalikakis et al. 2021). Cependant, le débit d'approvisionnement est très faible, à l'image des circulations d'eau très lentes que l'on peut attendre dans la matrice poreuse.

Les formations poreuses localisées au-dessus du point D ne représentent pas une exception car les résultats RMP ont montré la présence de formations similaires avec une extension plus importante en-dessous de la galerie du LSBB. Ces faciès poreux des calcaires urgoniens sont largement répandus sur le bassin versant de Fontaine-de-Vaucluse et pourraient jouer un rôle déterminant pour la régulation des flux d'eau à l'échelle du bassin versant (Carrière et al. 2016). Cependant, on ne sait pas si cette eau « profonde » peut être utilisée par la végétation. La section suivante exposera quelques éléments de réponse à cette interrogation.

## I.3.2 Etude isotopique et géophysique des prélèvements d'eau par les arbres

### I.3.2.1 Contexte

Les forêts couvrent près d'un tiers de la surface terrestre de la planète. Comprendre la réponse des forêts aux sécheresses est crucial dans le contexte de changement climatique, en raison de leurs multiples impacts sur les écosystèmes et les sociétés (Kirilenko et Sedjo 2007 ; Bonan 2008 ; Taylor et al. 2013). En effet, les changements climatiques ont un fort impact sur la végétation (Allen et al. 2010 ; Anderegg 2015) et les changements dans la couverture végétale ont un fort impact sur les processus hydrologiques (Scanlon et al. 2005 ; Noretto et al. 2012). Il est essentiel de décrypter les interactions complexes entre le couvert végétal et les processus hydrologiques pour améliorer la prévisibilité des impacts des changements climatiques sur le cycle hydrologique.

La capacité à prélever de l'eau en profondeur est une caractéristique essentielle pour supporter les périodes de sécheresse. On sait que ces caractéristiques varient d'une espèce et d'un individu à l'autre (Ehleringer et Dawson 1992 ; Querejeta et al. 2007 ; Pivovarov et al. 2016 ; Brum et al. 2019). La théorie des équilibres éco-hydrologiques suppose que la végétation se développe en fonction des contraintes imposées par les réserves d'eau disponibles (Eagleson 1982 ; Eagleson et Tellers 1982). Cependant, lorsque les régimes de stress changent, ces équilibres se transforment en déséquilibres, et les arbres qui ont bénéficié de ressources hydriques importantes peuvent devenir les plus sensibles à de nouveaux stress hydriques plus intenses (Cailleret et al. 2014 ; Nourtier et al. 2014 ; Preisler et al. 2019). Les relations entre réserve en eau et végétation sont complexes car elles sont variables dans l'espace et dans le temps.

Pour étudier l'eau du sol et du sous-sol, les écologues forestiers font généralement appel à des méthodes de prospection intrusives (e.g. sondes d'humidité) voire destructives (e.g. fosses pédologiques,

prélèvement à la tarière) qui apportent une information ponctuelle (e.g. Rutter et Fourt, 1965 ; Bailey et al. 2005 ; Diochon et al. 2009). La représentativité spatiale de ces mesures est souvent limitée dans des environnements hétérogènes (Robinson et al. 2008) et en particulier dans les forêts en contexte karstique comme celles étudiées ci-après. La profondeur d'investigation est également limitée alors que les horizons profonds jouent un rôle déterminant pour la survie des arbres en période sécheresse.

Cette section est dédiée à mettre en avant les contributions potentielles de la géophysique de proche surface et du traçage isotopique pour étudier les différentes stratégies d'utilisation de l'eau pour faire face au stress hydrique. La première est une approche non-invasive qui permet de caractériser la variabilité spatiale des conditions édaphiques (e.g. Dahlin 2001 ; Chalikakis et al. 2011). Contrairement aux techniques classiques (e.g. fosses pédologiques, sonde à neutrons ou capteurs d'humidité par réflectométrie dans le domaine temporel (TDR)), la géophysique fournit une caractérisation intégrée et non-invasive permettant de mettre en œuvre des suivis. La deuxième approche est le traçage des isotopes de l'eau ( $\delta^{18}\text{O}$ ), qui est utilisé pour déterminer l'origine de l'eau extraite par les plantes (Dawson 1993 ; Querejeta et al. 2007 ; Nie et al. 2012 ; Ding et al. 2018).

### 1.3.2.2 Travaux

#### 1.3.2.2.1 Approche isotopique

L'origine de l'eau transpirée par les arbres a été étudiée par traçage isotopique lors de deux périodes estivales contrastées : i) 2014 qui fut un été plutôt humide ; ii) 2015 qui fut un été plutôt sec. Les suivis ont été réalisés sur 3 à 5 arbres : chênes verts sur le site de Rustrel et des hêtres et sapins sur le Mont Ventoux (Table 2). Trois à quatre branches de lumière ont été prélevées par arbres vers midi solaire. L'eau des échantillons a été extraite selon un processus cryogénique sous vide (Ehleringer and Osmond 1989 ; West et al. 2006).

Les précipitations ont été collectées au moyen de pluviomètres et stockées dans des bidons installés dans une fosse à l'abri de la lumière pour limiter les variations de température. De plus, ces bidons ont été équipés d'un capillaire à pression atmosphérique selon le protocole de l'Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA 2014) afin de limiter les échanges entre l'eau collectée et l'atmosphère. Sur chaque site, l'eau de drainage a été collectée à 20 cm sous la surface à travers un mini-lysimètre dirigé vers un bidon similaire à ceux utilisés pour les précipitations. Il a été choisi de collecter l'eau de drainage car le sol rocaillieux ne permettait pas d'installer de bougies poreuses. Les eaux de pluie et les eaux de drainage ont été analysées séparément, et comme les deux tendances étaient similaires, les deux valeurs ont été fusionnées (moyenne arithmétique) pour représenter le signal "eau peu profonde" (Fig. 17).

Les eaux profondes ont été prélevées en deux points pour chaque site : i) les points d'infiltration D et C pour Rustrel, ii) la source Contrat et la source Mont Serein sur le site du Mont Ventoux. Pour chaque site, ces deux points ont été fusionnés pour représenter le signal "eau profonde" de la zone vadose karstique (Fig. 17).

Les analyses de tous les échantillons ont initialement été réalisées avec un spectromètre laser (Los Gatos) à Avignon Université. Pendant l'étude, les résultats de Martín-Gómez et al. (2015) ont montré un risque de biais analytique causé par la présence de carbone organique lors de l'utilisation d'un spectromètre laser. Les échantillons ont donc été ré-analysés avec un spectromètre de masse selon la technique d'équilibrage du  $\text{CO}_2$  à l'Université de Montpellier. La comparaison des deux types d'analyses n'a pas montré de différences significatives (Carrière et al. 2020a). Les analyses isotopiques de l'eau du bois ont fourni des données de  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$  (Carrière et al. 2020a) mais il a été choisi d'exploiter uniquement le  $\delta^{18}\text{O}$ . Ce choix se justifie par une suspicion que le  $\delta^2\text{H}$  était affecté par un fractionnement isotopique indésirable. Barbeta et al. (2022) ont montré que ce fractionnement isotopique serait lié à une pollution des échantillons par l'eau du parenchyme. Cette eau est extraite lors du processus d'extraction cryogénique et sa composition

isotopique est significativement différente de l'eau du xylème, en particulier pour le  $\delta^2\text{H}$ . Ces conclusions ont conforté notre choix de n'interpréter que le  $\delta^{18}\text{O}$ . Enfin, l'origine de l'eau transpirée par les arbres a été déterminée selon une équation de bilan de masse d'un système à deux sources (Dawson 1993 ; Phillips et Ehleringer 1995).

Le potentiel hydrique foliaire de base ( $\Psi_P$ ) et le potentiel minimum ( $\Psi_M$ ) ont été mesurés pour 10 individus de chaque espèce lors de chaque campagne de prélèvement isotopique. Cette mesure informe sur le niveau de stress hydrique des arbres. Les mesures ont été réalisées avec une bombe à pression de Scholander. Les échantillons  $\Psi_M$  ont été prélevés sur des branches ensoleillées lorsque le temps n'était pas nuageux. À chaque date et pour chaque arbre, au moins trois feuilles ont été échantillonnées, immédiatement placées dans un sac en plastique saturé de vapeur d'eau, et stockées dans une glacière jusqu'à la mesure. Les mesures ont été effectuées moins d'une heure après l'échantillonnage.

Les résultats de ces travaux montrent que lorsque le stress hydrique des arbres augmente, la fraction d'eau profonde augmente dans le xylème (Carriere et al. 2020b). En effet, les arbres prélèvent plus d'eau profonde en 2015 qu'en 2014 (Fig. 17). Ces résultats sont cohérents avec ceux de Barbeta et al. (2015) qui ont montré que la proportion d'eau souterraine varie entre 25 et 50 %. Cependant, ces auteurs n'ont pas identifié de différence entre les espèces étudiées. Notre étude montre que les trois espèces suivies dans cette étude exploitent le réservoir d'eau profonde de manière différente (Fig. 17). Le sapin n'exploite l'eau profonde qu'en cas de sécheresse sévère. Le hêtre exploite plus d'eau profonde et plus tôt dans la période estivale. Le chêne vert exploite l'eau profonde pendant la majeure partie de la période estivale et la contribution de l'eau profonde augmente régulièrement pendant la sécheresse. Ces différences entre les espèces peuvent être associées à la fois (i) aux caractéristiques du site et (ii) à la physiologie de l'espèce.

i) Les caractéristiques des sites étudiés sont similaires d'un point de vue géologique et pédologique, mais les conditions climatiques sont sensiblement différentes. Le site de Rustrel, où pousse le chêne vert, reçoit moins de pluie et a une demande évapotranspiratoire plus élevée. Ce contexte climatique rend le site de Rustrel plus aride (Table 2), ce qui contraint les chênes à dépendre davantage des eaux profondes pour satisfaire leur demande en eau. Le site du Ventoux est plus humide et la sécheresse survient plus tard dans la période estivale. C'est probablement la raison pour laquelle le hêtre et le sapin exploitent principalement l'eau peu profonde jusqu'au début de la sécheresse sévère (août 2015).

ii) La physiologie peut également expliquer les différences entre les espèces. Le hêtre et le sapin peuvent être facilement comparés car ils se développent en mélange sur le site du Ventoux. Les résultats mettent en évidence des différences dans la façon dont ces deux espèces utilisent le réservoir d'eau profonde. La différence de  $\Psi_P$  au cours de la période estivale entre le sapin (-0,88 Mpa en moyenne) et le hêtre (-0,64 Mpa en moyenne) indique qu'ils n'ont pas accès aux mêmes ressources en eau. Étant donné que les deux espèces sont présentes sur le même site, il est supposé que ces différences sont dues à des différences de profondeur d'enracinement. Le  $\Psi_P$  systématiquement plus faible du sapin signifie que sa profondeur d'enracinement globale est plus faible. Cette hypothèse est cohérente avec les résultats isotopiques qui montrent que le sapin ne prélève quasiment pas d'eau dans la réserve profonde sauf en cas de sécheresse sévère (août 2015).

D'un point de vue méthodologique, ces travaux ont montré que la combinaison du traçage isotopique et du suivi du potentiel hydrique foliaire est pertinente. Le traçage isotopique seul permet de déterminer l'origine de l'eau. Le suivi du potentiel hydrique foliaire permet quant à lui d'évaluer le niveau de stress lié à l'eau. La combinaison ces deux approches a permis de montrer que les arbres adaptent leur absorption d'eau en fonction du niveau de sécheresse. Plus la sécheresse est importante, plus l'eau exploitée par les arbres est profonde.

L'objectif des études ultérieures sera de quantifier cette contribution en ajoutant au suivi isotopique actuel des mesures de flux de sève ou une modélisation écophysologique. De cette manière, il sera possible de convertir les proportions d'eau en volumes d'eau prélevée dans chaque réservoir. Ces quantités seraient plus faciles à interpréter et seraient utiles pour la modélisation écophysologique et hydrogéologique.

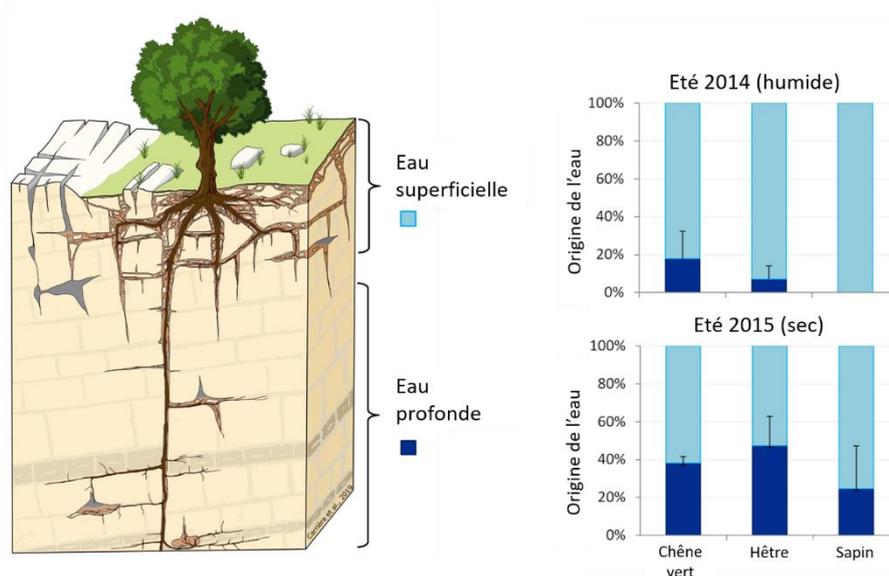


Figure 17 : Contribution des réservoirs superficiels et profonds déterminée par traçage isotopique pour la transpiration des arbres (chêne vert à Rustrel, hêtre et sapin Mont Ventoux) lors de deux périodes estivales contrastées 2014 (plutôt humide) et 2015 (plutôt sec), modifié d'après Carrière et al. (2020b).

### 1.3.2.2 Approche géophysique

Les approches géophysiques restent encore peu utilisées en écologie forestière malgré un potentiel prometteur et surtout complémentaire avec les approches classiquement utilisées par les écologues. C'est pour cette raison qu'une revue bibliographique a été réalisée afin de faire un bilan des avancées dans le domaine (Loiseau et al. 2023). L'article fait ressortir trois thèmes sur lesquels la géophysique de proche surface semble particulièrement pertinente en écologie forestière: i) détecter et décrire les systèmes racinaires des arbres (e.g. Mary 2015 ; Rodríguez-Robles et al. 2017); ii) suivre la distribution spatiale et la dynamique de l'eau (e.g. Jayawickreme et al. 2010 ; Fan et al. 2015) ; iii) caractériser l'hétérogénéité spatiale des propriétés du sous-sol (e.g. Meyer et al. 2007 ; Carrière et al. 2021c). La géophysique peut être aussi utilisée pour imager et cartographier la structure des troncs d'arbre (Al Hagrey 2007) ou étudier les changements de teneur en eau du tronc (Mares et al. 2016 ; Losso et al. 2020). La figure 18 illustre la mise en œuvre des différentes techniques géophysiques en milieu forestier.

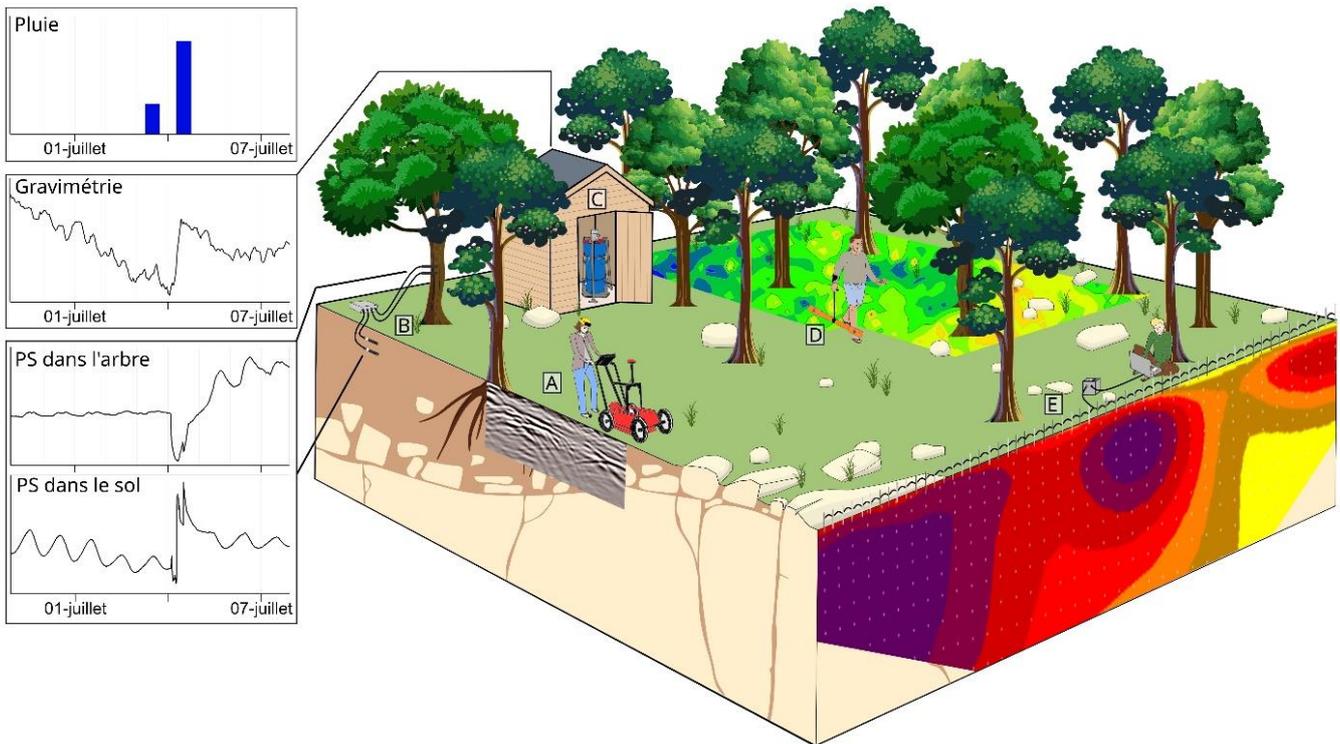


Figure 18 : Mise en œuvre sur le terrain des principales techniques géophysiques abordées. Les méthodes illustrées sont A) le GPR (*ground penetrating radar*), utilisé pour détecter les racines grossières ; B) le potentiel spontané (SP), utilisé pour suivre les circulations de l'eau ; C) la gravimétrie, utilisée pour suivre les réserves d'eau ; D) l'EMI (*electromagnetic induction*), utilisée pour caractériser l'hétérogénéité spatiale des propriétés du sous-sol ; et E) la ERT (*electrical resistivity tomography*), utilisée pour caractériser l'hétérogénéité spatiale des propriétés du sous-sol et, éventuellement, suivre la dynamique de l'eau (Loiseau et al. 2023).

La cartographie d'induction électromagnétique (EMI ou Slingram) est une approche rapide et efficace pour cerner la structuration générale d'un site expérimental (Carrière et al. 2021a). Des mesures ont été réalisées à l'aide de l'appareil EM31-MK2 distribué par la société Geonics. L'appareil a été utilisé en mode « dipôle horizontal », fournissant ainsi une profondeur d'investigation de l'ordre de 4 m. Deux sites ont été cartographiés : i) Font-Blanche qui est une forêt dominée par des pins d'Alep et des chênes verts en régénération naturelle ; ii) Valliguières qui est une forêt de cèdres de l'Atlas en monoculture et ayant subi des opérations d'éclaircie et élagages (Table 2).

Une campagne de photographie hémisphérique menée sur les deux sites a permis de déterminer un indice de végétation appelé le PAI (*plant area index*) qui exprime la surface de feuilles et de branches par unité de surface. Le PAI est considéré être un indicateur robuste de la biomasse.

Les résultats géophysiques montrent que les deux sites présentent des hétérogénéités importantes avec des zones plus ou moins conductrices. Des tests de profondeur de sol à la barre à mine corroborés par les profils d'ERT ont permis de conclure que les zones les plus conductrices correspondent à des sols plus profonds alors que les zones les plus résistantes correspondent à des sols peu épais ou rocailloux. La combinaison des résultats d'EMI et de PAI révèle une association positive entre ces deux paramètres sur le site de Font-Blanche (Fig. 19A). Cela signifie que c'est dans les zones où le sol est le plus développé que la biomasse est la plus importante. Cette observation est cohérente avec la théorie des équilibres éco-hydrologiques (Eagleson 1982 ; Eagleson et Tellers 1982). Cependant, on ne constate pas d'association significative entre ces deux paramètres sur le site de Valliguières à l'échelle de l'ensemble de la zone étudiée

(Fig. 19B). En revanche, on retrouve une corrélation significative sur le site de Valliguières si l'on réalise cette même analyse à l'échelle de petites parcelles où les arbres ont tous subi le même traitement. Carrière et al. (2021a) ont conclu que, sur le site de Valliguières, les effets anthropiques surpassent les effets naturels concernant le développement de la biomasse.

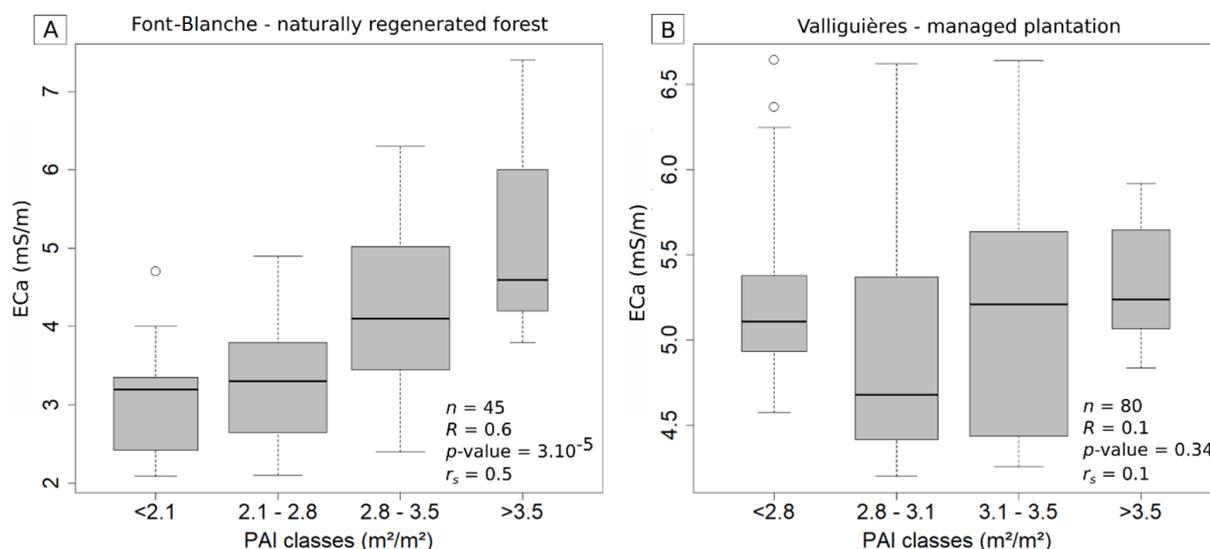


Figure 19 : Diagrammes en boîte à moustaches de la conductivité électrique apparente du sol ( $ECa$ ) mesurée avec l'appareil EM31 par rapport aux classes d'indice de surface végétale (PAI ; *Plant Area Index*) dans (A) la forêt de Font-Blanche et (B) la forêt de Valliguières.  $n$  est le nombre de valeurs,  $R$  est la corrélation de Pearson, la  $p$ -valeur est calculée sur la corrélation de Pearson,  $r_s$  est la corrélation de Spearman (Carrière et al. 2021).

L'ERT est l'une des techniques géophysiques les plus largement utilisées en recherche et en ingénierie. Cette approche permet de caractériser la distribution spatiale des propriétés géo-électriques du sous-sol. Le caractère non destructif de la mesure permet de réaliser des suivis temporels qui permettent de suivre la dynamique de l'eau.

À l'automne 2011, un suivi ERT a été réalisé au cours d'un épisode pluvieux méditerranéen (230 mm de pluie en 17 jours) sur le site du LSBB (Table 2). La section ERT a été répétée 120 fois avant, pendant et après cet événement de 30 jours (Fig. 15). L'objectif principal était d'évaluer l'efficacité et les limites de l'ERT pour surveiller l'infiltration d'eau dans des conditions naturelles (Carrière et al. 2015 ; Carrière et Chalikakis 2022). Cette expérience a permis de retenir deux profils de résistivité l'un en période très sèche (avant la pluie) et l'autre en période très humide (4 jours après la pluie). Le changement de résistivité est exprimé par le PVR (*percent variation en resistivity*) dans la figure 20. Après correction de l'effet de la température sur la résistivité, l'essentiel de la variation de résistivité est lié à un changement de contenu en eau. Cette variation maximale de résistivité exprime la capacité du sol et sous-sol à stocker de l'eau, une notion proche de ce que les agronomes appellent la réserve utile. On constate sur la figure 20 que le PVR est assez variable latéralement le long du profil. Cela signifie que les arbres bénéficient de conditions variables selon leur positionnement sur le profil. Les travaux de Carrière et al. (2020c et d) ont consisté à étudier la réponse inter-individuelle des arbres à la sécheresse en fonction de leurs conditions micro-environnementales de sol et sous-sol.

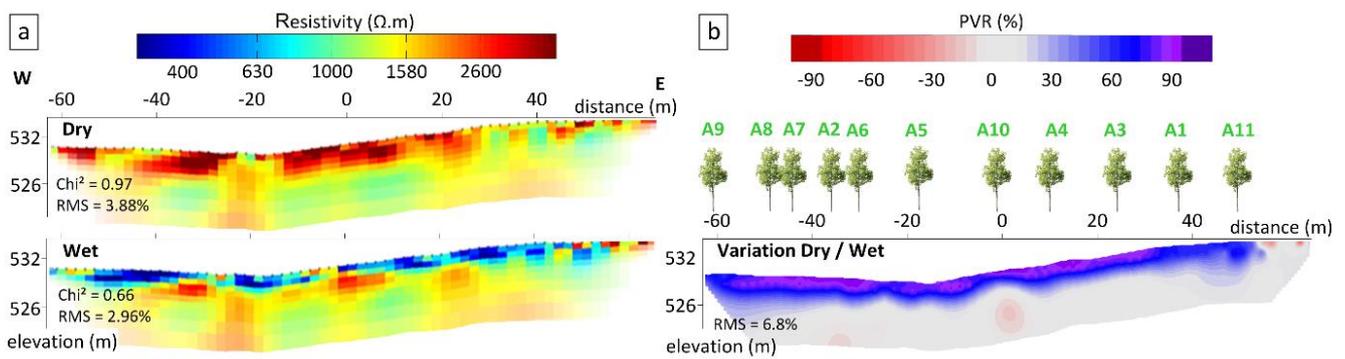


Figure 20 : Résultats d'ERT (*electrical resistivity tomography*). (a) Modèles ERT inversés pour les dates "sèche" et "humide" (respectivement avant et après un événement pluvieux en novembre 2011) ; dispositif Gradient ; 64 électrodes ; l'incertitude du modèle ERT, basée sur la densité de la ligne de courant, est représentée par les atténuations de couleur sur les bords et le bas du profil de résistivité. (b) Pourcentage de variation de la résistivité (PVR) entre les deux modèles de résistivité (sec/humide).

Les travaux de Carrière et al. (2020c) ont plutôt porté sur l'adaptation des parties aériennes des arbres pour répondre au stress hydrique. La figure 21 résume les relations les plus significatives entre les caractéristiques des arbres et le PVR. Les variations de  $\Psi$  entre les dates les plus humides et les plus sèches ( $\Psi_{wet} - \Psi_{dry}$ ) sont positivement corrélées avec la PVR (Fig. 21a ;  $R^2 = 0.51$ ), ce qui suggère que les arbres ayant plus d'eau disponible dans les couches supérieures (0-2 m) présentent également de plus grandes variations de  $\Psi$ . De manière cohérente, une relation significative a été trouvée entre le PVR et le niveau de défoliation des arbres après la sécheresse extrême de 2016-2017 (Fig. 21b ;  $R^2 = 0.67$ ). Au niveau des feuilles, une relation négative significative a été trouvée entre la composition isotopique du carbone des feuilles ( $\delta^{13}C$ ) et le PVR dans la partie supérieure de la canopée (Fig. 21c ;  $R^2 = 0.33$ ). Cela indique que les arbres qui poussent avec moins d'eau disponible dans la couche supérieure présentent également une plus grande efficacité d'utilisation de l'eau. La relation entre LMA (*leaf mass area*) et PVR est présentée dans la figure 21d. Pour les feuilles de la partie supérieure de la canopée le  $R^2$  était égal à 0.67, mais la relation n'était pas significative pour les feuilles de la partie inférieure. Aucune corrélation significative n'a été trouvée pour les feuilles qui ont poussé pendant le printemps humide (2014).

Ces résultats montrent que les arbres bénéficiant d'une plus faible réserve en eau du sol adaptent leur feuillage pour être plus économe en eau. Cette stratégie semble efficace car elle permet de limiter la chute du potentiel hydrique durant les périodes de stress hydrique les plus sévères. Cette relation contre intuitive est cohérente avec les travaux d'autres auteurs (e.g. Nourtier et al. 2014 ; Preisler et al. 2019).

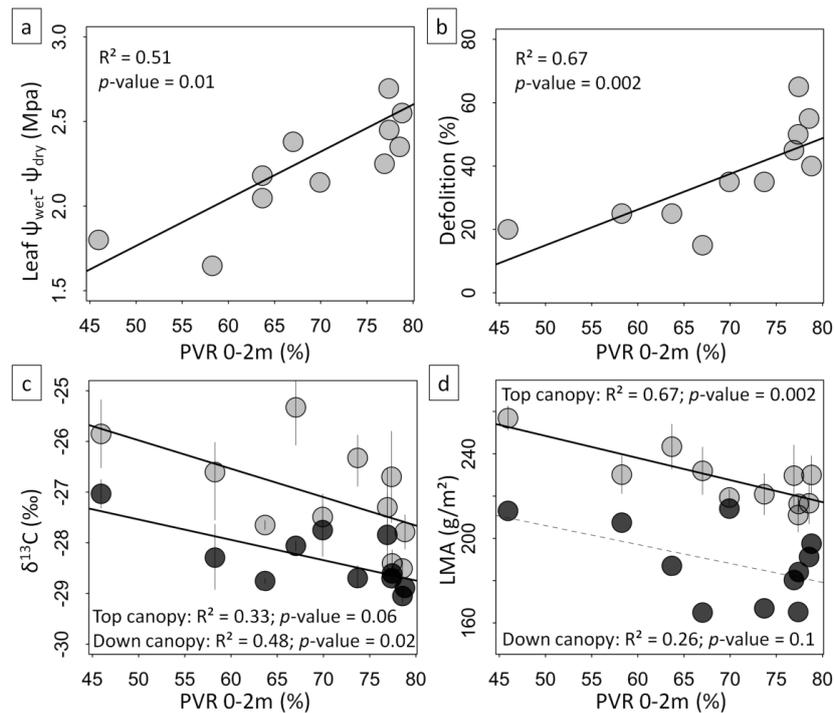


Figure 21 : Relations entre différents traits marquant des réponses des arbres à la sécheresse en fonction du pourcentage de variation de la résistivité (PVR) calculé sur les deux premiers mètres du sous-sol. Les modèles linéaires ajustés sont représentés en lignes noires lorsqu'ils sont significatifs (en pointillés dans le cas contraire) : (a) Différence de potentiel hydrique de base des feuilles entre une période sèche et une date humide ( $\Psi_{\text{wet}} - \Psi_{\text{dry}}$ ). (b) Taux de défoliation (%) après l'épisode de sécheresse 2016-2017. (c)  $\delta^{13}\text{C}$  foliaire pour la partie supérieure du couvert (gris) et la partie inférieure (noir). (d) Masse foliaire par surface (LMA) pour la partie supérieure du couvert (gris) et la partie inférieure (noir).

Les travaux de Carrière et al. (2020d) ont poussé l'étude de la relation contre intuitive exposée ci-dessus afin de comprendre si les arbres étaient capables d'adapter leurs prélèvements d'eau en fonction de leurs conditions micro-environnementales de sous-sol. Cette étude a été réalisée avec une combinaison originale de données géophysiques (PVR ; Carrière et Chalikakis 2022), isotopiques ( $\delta^{18}\text{O}$  ; Carrière et al. 2020a) et écophysologique ( $\Psi_p$ ).

Lors de la saison estivale 2015, les déficits hydriques des arbres ont augmenté progressivement, comme le montre la nette diminution des potentiels hydriques entre juin et août (Fig. 22a). Parallèlement, la différence entre  $\Psi_p$  et  $\Psi_M$  a eu tendance à diminuer pendant la saison estivale, ce qui suggère que les arbres régulent plus leur transpiration lorsque la sécheresse augmente. À l'échelle individuelle (Fig. 22b), l'arbre A11 était systématiquement moins stressé que l'arbre A3. De plus, l'écart de  $\Psi_p$  entre les individus augmente avec la sécheresse.

Lors d'un déficit hydrique modéré ( $\Psi_p > -2$  MPa, juin et juillet), il n'y a pas de relation claire entre  $\Psi_p$  et  $\delta^{18}\text{O}$  du xylème (Fig. 22b ; p-value > 0,4). En revanche, au plus fort de la sécheresse (août 2015), une relation négative significative a été observée entre  $\Psi_p$  et  $\delta^{18}\text{O}$  du xylème (p-value < 0,001). Cela signifie que les arbres les moins stressés (avec les  $\Psi_p$  les plus élevés) avaient un signal isotopique plus proche du signal isotopique des eaux souterraines, tandis que les arbres les plus stressés (avec les  $\Psi_p$  les plus bas) avaient un signal isotopique plus proche des eaux peu profondes. Il n'y a pas de relation entre  $\Psi_M$  et  $\delta^{18}\text{O}$  à n'importe quelle période de 2015. Cela est probablement dû au fait que  $\Psi_M$  dépend de l'état hydrique du

sol, mais aussi de facteurs environnementaux (lumière et déficit de pression de vapeur) et biologiques supplémentaires (conductance hydraulique de la plante, transpiration de l'arbre) qui ont brouillé ses relations avec les paramètres liés au sol.

La relation PVR /  $\delta^{18}\text{O}$  ne présente aucune relation significative parmi les individus lorsque le stress est modéré, mais une relation significative ( $p$ -value < 0,05) a été observée dans des conditions plus sèches (Fig. 22c). Les arbres ayant un faible PVR entre 0 et 2 m (c'est-à-dire une faible capacité de rétention de l'eau ; TAW (*total available water*)) avaient un signal  $\delta^{18}\text{O}$  plus proche des eaux souterraines, tandis que les arbres ayant un PVR élevé (0-2 m) avaient un signal isotopique plus proche des eaux peu profondes. Ces résultats signifient que les arbres qui ont une faible réserve en eau en surface (faible TAW et PVR) prélèvent significativement plus d'eau profonde en période sèche et subissent un stress hydrique moins intense.

Pour conclure, les travaux de Carrière et al. (2020c) ont montré que les arbres sont capables d'adapter leur parties aériennes en fonction des conditions édaphiques et Carrière et al. (2020d) ont montré indirectement que les arbres adaptent leurs parties souterraines pour prélever l'eau plus ou moins profondément. La variabilité intra-spécifique de réponse à la sécheresse est encore peu considérée dans les études d'écologie forestière. Pourtant c'est une forme d'adaptation qui pourrait jouer un rôle important dans l'adaptation des couverts forestiers aux changements climatiques. La géophysique apporte une information spatialisée et intégrée qui est pertinent pour mieux comprendre les enjeux qui se situent à cette échelle de travail.

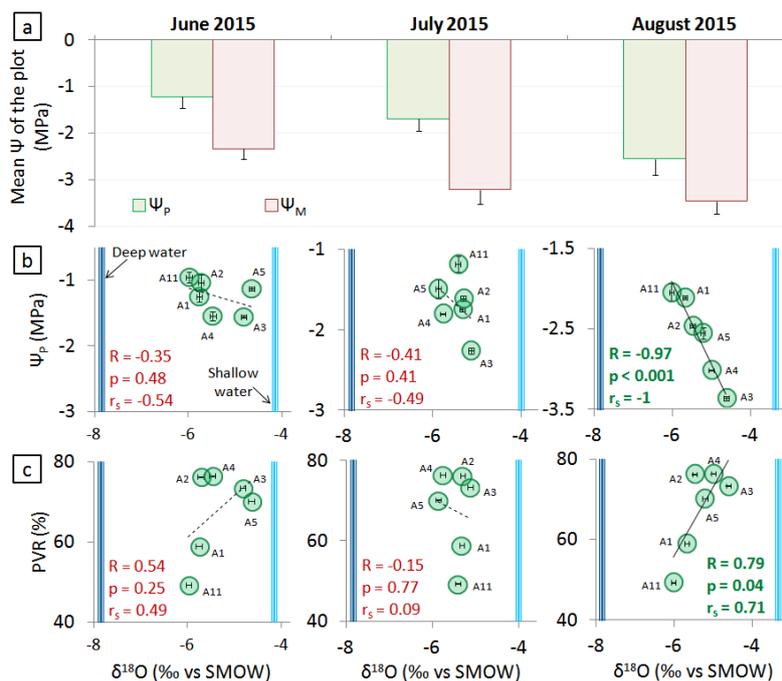
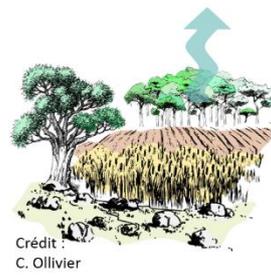


Figure 22 : a) Valeurs moyennes et écart-type du potentiel hydrique foliaire de base ( $\Psi_P$ ) et minimum ( $\Psi_M$ ) pour les mois de juin, juillet et août 2015 ; b) Relation entre  $\Psi_P$  et le signal isotopique du xylème ( $\delta^{18}\text{O}$ ) pour chaque individu (chaque point est un arbre dont le numéro se réfère à la figure 20b), les barres verticales bleu foncé et bleu clair représentent respectivement les signaux isotopiques des eaux souterraines et des eaux peu profondes représentées dans la figure 17.  $R$  est la corrélation de Pearson,  $p$  est la  $p$ -value, et  $r_s$  est la corrélation de Spearman ; c) Relation entre PVR (*percent variation en resistivity*) et  $\delta^{18}\text{O}$  du xylème au cours de l'été 2015 (Carrière et al. 2020d).

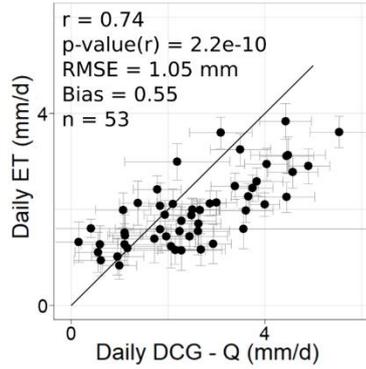
La gravimétrie à supra-conducteur est une technique géophysique qui a révolutionné l'hydrogravimétrie puisqu'elle permet de réaliser des suivis de l'accélération de la pesanteur en continue et avec une grande précision durant plusieurs années voire dizaines d'année. L'hydrogravimétrie consiste à convertir le signal géophysique en lame d'eau pour expliquer des processus hydrologiques. Cependant, les effets à grande échelle (e.g. les marées, le mouvement polaire, la charge atmosphérique) limitent les interprétations hydrogravimétriques car malgré l'application des meilleurs traitements pour supprimer ces effets indésirables, le signal reste parfois bruité. Pour contourner cette limitation, Carrière et al. (2021b) ont choisi de travailler sur la différence entre deux gravimètres supraconducteurs espacés verticalement de 512 m dans le Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) de Rustrel. La soustraction des signaux permet d'éliminer les effets à grande échelle et de concentrer les variations de signal sur une zone globalement comprise entre les deux gravimètres. Ce dispositif expérimental unique au monde a permis d'obtenir un signal de grande qualité. Dans ce contexte, il a été possible d'étudier l'évapotranspiration (ET) journalière de la forêt de Rustrel (Table 2). Sachant que l'ET est l'un des processus hydrologiques parmi les plus fins et les plus difficiles à quantifier.

Les résultats de Carrière et al. (2021b) ont permis de relier la décroissance journalière du signal gravimétrique avec l'ET journalière (Fig. 23). Les simulations d'ET du modèle de bilan hydrique SimpKcET ont été utilisées (Ollivier et al. 2021) car elles sont supposées être très fiables dans la zone étudiée puis le modèle a été validé sur trois tours à flux proches ainsi que les débits de la Fontaine-de-Vaucluse (exutoire de l'hydrosystème karstique). Les travaux ont montré une corrélation significative entre la décroissance du signal gravimétrique et l'ET modélisée ( $p\text{-value} = 4.10^{-10}$ ). Toutefois, cette approche n'est efficace que pendant les périodes sans pluie car les événements pluvieux bouleversent le signal gravimétrique. De plus, la configuration du LSBB, avec deux gravimètres supra-conducteurs, est très coûteuse et lourde à mettre en place car les gravimètres supra-conducteurs sont peu mobiles.

Une nouvelle expérimentation sera réalisée sur le site de Puéchabon (34) en 2024 avec un nouveau gravimètre (Muquans) qui est plus facile à déployer. Ce site est équipé d'une tour à flux et l'ET attendue devrait être plus forte qu'à Rustrel. Ces conditions devraient donc produire un signal gravimétrique légèrement plus important et compenser la moindre sensibilité de ce nouveau gravimètre par rapport à un gravimètre supr-conducteur. La gravimétrie n'a pas la prétention de remplacer les approches classiques de l'ET (lysimétrie, eddy covariance, scintillométrie) mais elle pourrait apporter ponctuellement une information complémentaire qui serait plus intégratrice et permettrait d'améliorer la quantification de l'ET.



Crédit :  
C. Ollivier



Crédit :  
J. Hinderer

Figure 23 : Corrélation entre l'évapotranspiration (ET) modélisée avec SimpKcET (Ollivier et al. 2021) et la variation journalière du signal gravimétrique soustraite du flux d'eau vers la profondeur ou débit à l'exutoire (DCG – Q).  $r$  est la corrélation de Pearson ;  $RMSE$  est l'erreur quadratique moyenne ;  $n$  est le nombre de jours considérés durant la période estivale 2020 (Carrière et al. 2021b).

### I.3.3 Perspectives : Quantification de l'eau totale disponible pour les arbres – Projets GITAW et TAW-Tree

#### I.3.3.1 Contexte

L'accès à l'eau du sol est essentiel pour la résistance et la résilience des forêts aux sécheresses (e.g. Preisler 2019 ; Carrière et al. 2020b, c, d). Pourtant, la capacité de rétention de l'eau du sol, c'est-à-dire la quantité totale d'eau que les arbres peuvent extraire du sol, reste encore souvent mal quantifiée à ce jour. La réserve utile (RU) est considérée comme un paramètre clé dans la modélisation du bilan hydrique des forêts (Granier et al. 1999), du bilan du carbone (Dufrêne et al. 2005), de la croissance (Guillemot et al. 2017) et de la survie des arbres (Preisler et al. 2019 ; Ruffault et al. 2022). Cependant, le concept de RU présente deux inconvénients majeurs qui remettent en question sa pertinence dans un contexte de déficit hydrique croissant, en particulier dans le cas des forêts. Premièrement, l'estimation de la RU est classiquement basée sur l'intégration des fonctions de pédotransfert sur une profondeur de 1 à 2 mètres (Baize et Jabiol 2011). Cette méthode sous-estime considérablement la capacité des arbres à développer des racines beaucoup plus profondes (jusqu'à 5-10 m dans les zones tempérées et méditerranéennes). Cependant, il n'existe actuellement pas de méthodologie pour quantifier ces prélèvements profonds car le volume de sol réellement exploré par les racines est difficile à déterminer. Deuxièmement, l'estimation de la RU est généralement réalisée à l'échelle d'un peuplement forestier et ne tient pas compte de la grande hétérogénéité spatiale de son sol. Cette hétérogénéité a pour conséquence que l'accès à l'eau du sol peut varier considérablement entre les arbres conspécifiques et interspécifiques d'une forêt (Carrière et al. 2020b, d).

Les projets GITAW (Geophysical and Isotopic estimation of Total Available Water in forests) et TAW-Tree (*Total Available Water to Tree*) sont deux projets ayant pour objectif commun de revisiter le concept de réserve utile (RU). Le projet GITAW est financé par Emergence Sorbonne Université pour la période 2023-2025 et le projet TAW-Tree est financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour la période 2024-2028.

Ces projets interdisciplinaires sont à l'intersection de l'écologie forestière et des sciences hydrologiques. Le concept de TAW (*Total Available Water* - eau totale disponible), qui se rapproche de la RU, sera développé avec deux ambitions principales : i) mieux prendre en compte la variabilité spatiale des ressources en eau au sein des peuplements forestiers et ii) inclure les ressources en eau profonde qui jouent un rôle crucial pour que les arbres résistent aux sécheresses les plus sévères.

### 1.3.3.2 Plan de travail

Les projets GITAW et TAW-Tree consisteront à quantifier la TAW selon quatre grandes approches complémentaires donnant chacune lieu à un WP (*workpackage*) comme illustré sur la figure 24. Les WP1 et WP2 permettront de quantifier la réserve de TAW dans les parcelles forestières représentatives des forêts tempérées (Barbeau et Hesse) et méditerranéennes (Puéchabon et Font-Blanche). Le WP1 consistera à travailler sur des approches basées sur le sol avec de la géophysique, des suivis isotopiques, des fosses pédologiques et des suivis d'humidité du sol. Le WP2 consistera travailler sur des approches basées sur les arbres avec des suivis de flux de sève et de micro-météorologie observés sur les tours à flux. Le WP3 consistera à étendre les estimations des TAW à l'échelle du territoire à travers la modélisation de l'évapotranspiration basée sur la télédétection. Le WP4 consistera à quantifier l'influence de la TAW sur le fonctionnement, la croissance et la vulnérabilité des forêts tempérées et méditerranéennes confrontées au changement climatique via des approches de modélisation.

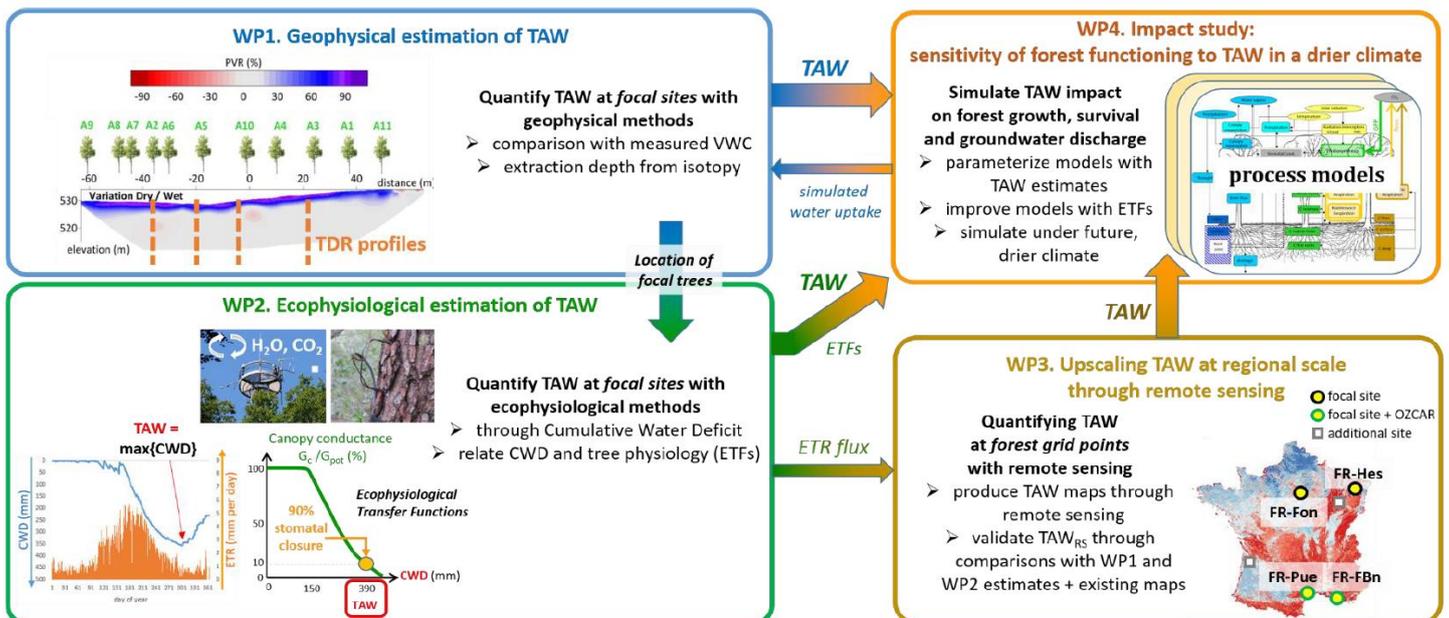


Figure 24 : Organisation du projet TAW-Tree (*Total Available Water to Tree*). Illustration de chaque WP (*workpackage*) et de leurs interactions.

## I.4 Importance des eaux souterraines pour les sociétés humaines en état de stress hydrique

Cette deuxième section du résumé des activités de recherche est dédiée à présenter des travaux d'hydrogéologie en contexte humanitaire menés dans le Sud-Ouest de Madagascar. Dans cette zone semi-aride où les eaux de surface sont quasi-absentes, les eaux souterraines ont une importance critique pour les populations. Pourtant, l'hydrogéologie est très peu documentée dans cette zone aussi vaste qu'un cinquième de la France métropolitaine. Ce manque de connaissances et de données a fortement orienté les travaux réalisés. Cette présentation s'articule en trois grandes parties.

La première partie traite l'exploration hydrogéologique de deux communes pour l'amélioration durable de l'accès à l'eau dans le cadre d'un projet humanitaire. Cette partie fait appel à différentes approches (i.e. hydrochimie, géophysique, isotopie, piézométrie) qui sont combinées de manière à proposer une méthodologie adaptée au contexte humanitaire.

La deuxième partie présente la production de données nécessaires à la gestion durable des eaux souterraines à l'échelle régionale (i.e. piézométrie, précipitation, évapotranspiration). Cette partie débute avec la présentation des défis liés à la mise en place d'un observatoire hydroclimatique sur le long terme. Il s'agit ensuite d'estimer les précipitations et l'évapotranspiration de façon spatialisée à l'échelle régionale sur la base de produits maillés issus de la télédétection et de la modélisation.

La troisième partie expose les perspectives de travaux pour les années à venir. Il s'agit de l'étude des effets en cascade des sécheresses sur la végétation, les eaux souterraines et la santé humaine. Ce nouveau projet à l'interface entre sciences hydrologiques et sciences humaines ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

### I.4.1 Exploration hydrogéologique d'une zone peu documentée en contexte humanitaire

#### I.4.1.1 Contexte

La cuvette d'Ankazomanga est située à 55 km au sud-est de la ville de Tuléar et au sud de la rivière Onilahy, entre 160 et 230 m d'altitude (Fig. 25A). Ankazomanga est assez isolé (7 à 10 heures de route de Tuléar et 2 à 3 heures de Betioky). La zone d'étude n'a pas d'électricité et toutes les fournitures matérielles proviennent de Tuléar. Dans ce contexte, les contraintes logistiques sont fortes pour mener une prospection hydrogéologique.

La population de la cuvette d'Ankazomanga s'élevait à environ 14000 habitants en 2014. Les habitants subissent un stress hydrique quasi permanent et les eaux souterraines ont un rôle crucial car elles constituent la seule ressource accessible tout à long de l'année. Une enquête de l'organisation non gouvernementale (ONG) Action Contre la Faim (ACF) de 2013 (Lazzarini et Ratsimbazafy 2013) a rapporté que 66 % des ménages utilisent moins de 15 L/habitant/jour, la quantité minimale requise étant de 15 L/habitant/jour pour assurer une hygiène personnelle et une utilisation alimentaire de base (Sphere 2015), tandis que 92 % utilisent moins de 30 L/habitant/jour. 74 % de la population s'est déclarée insatisfaite de son accès à l'eau (Lazzarini et Ratsimbazafy 2013). 28 % de la population interrogée manque d'eau, 26 % souffre d'une mauvaise qualité (Fig. 26 a et b), et 14 % rapporte une trop grande distance aux points de collecte de l'eau.

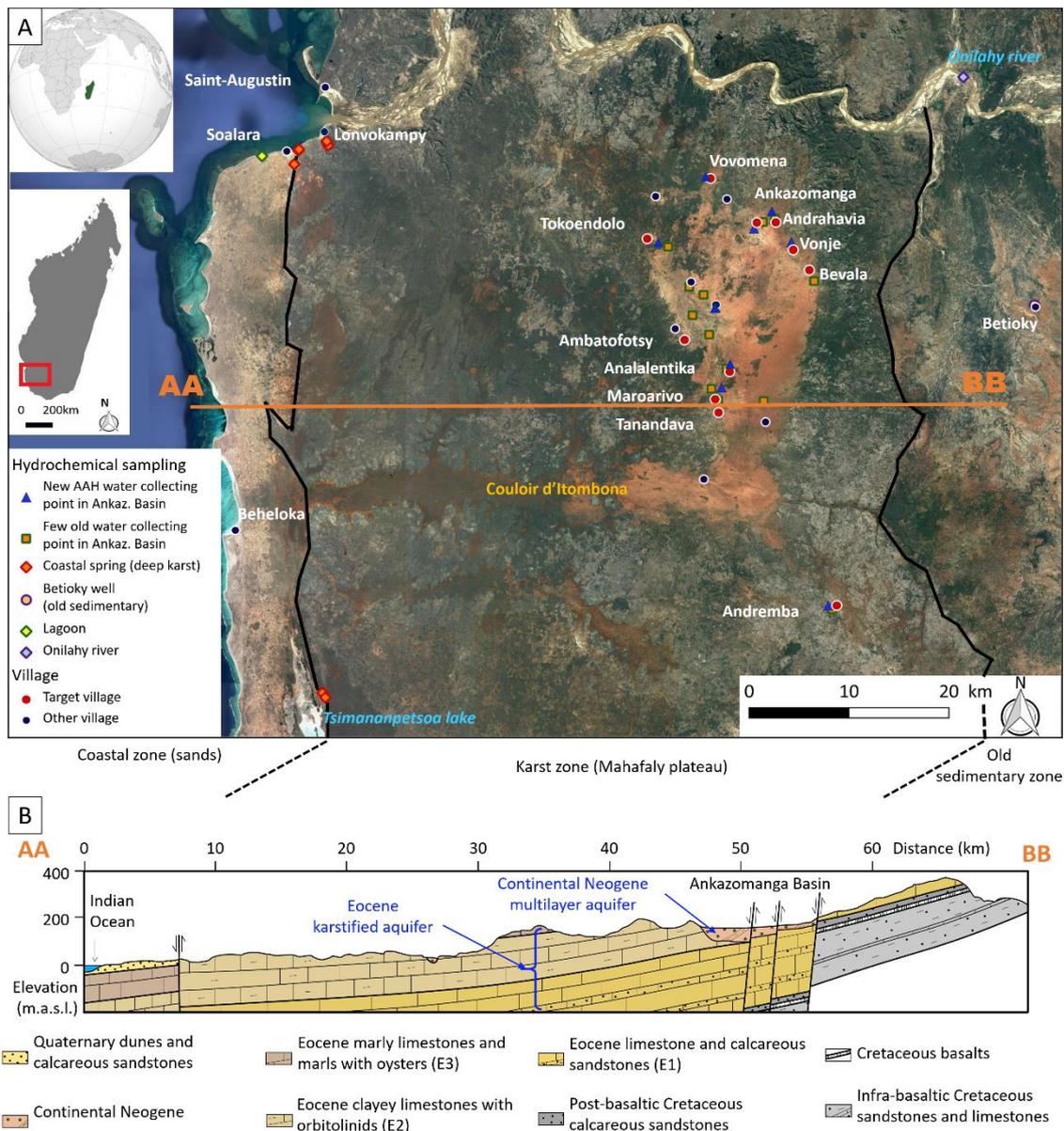


Figure 25 : A) Carte de localisation de la zone d'étude sur le plateau Mahafaly, incluant les points d'échantillonnage hydrochimique et isotopique. B) Coupe géologique simplifiée de la zone d'étude (à la latitude 23°47'00'') d'après Aurouze (1957) modifié par Carrière et al. (2018).

Pendant la saison de la sécheresse les mares s'assèchent et certains puits tarissent, la situation humanitaire devient critique et l'accès limité à l'eau entraîne des pratiques d'hygiène extrêmement médiocres. Les femmes de certains villages, comme Vovomena, doivent marcher 10 km par jour pour aller chercher de l'eau. La pression augmente sur les points d'eau restant en fonctionnement. Un grand nombre d'habitants doivent faire la queue pendant des heures pour remplir leurs bidons (Fig. 26c). En conséquence, un marché de l'eau se développe dans lequel les transporteurs d'eau vendent de l'eau chère et des conflits liés à l'eau apparaissent.



Figure 26 : Illustrations des trois types de puits dans le bassin d'Ankazomanga (district Betioky-Atsimo). a) puits traditionnel ; b) puits cimenté ; c) forage moderne créé avec Action Contre la Faim (Carrière et al. 2023).

Cette recherche d'eau s'est déroulée en 2014 dans le cadre d'un projet humanitaire avec l'ONG ACF. Les recherches d'eau s'annonçaient complexe du fait du contexte géologique (karst sous une couverture non caractérisée). La zone était assez peu documentée et les sources d'information disponibles étaient très anciennes (e.g. Aurouze 1957 ; Karche 1961). De plus, la quasi omniprésence de sable roux empêchait d'observer les roches en place, pour mesurer des pendages par exemple. Il a donc été nécessaire d'avoir une approche hydrogéologique intégrée (i.e. géologie structurale, topographie, piézométrie, sondages mécaniques, hydrochimie, géophysique). Les recherches se sont orientées assez rapidement vers deux ressources souterraines potentielles : i) le karst profond du plateau Mahafaly (Eocène) ; ii) les formations superficielles qui recouvrent la cuvette d'Ankazomanga et n'étaient pas caractérisées au début de l'étude (Fig. 25B). La section suivante présente les principaux résultats obtenus en hydrochimie, géophysique et isotopie.

#### 1.4.1.2 Travaux

##### 1.4.1.2.1 Hydrochimie

Huit campagnes de suivi hydrochimique ont été réalisées entre 2013 et 2016, afin d'explorer les différentes masses d'eau et leur possibles connexions. Les eaux ont été prélevées dans des contextes très différents : la cuvette d'Ankazomanga (ouvrages superficiels de la zone d'intervention), le fleuve Onilahy, le lagon, les sources côtières (karst profond), une source thermique (à 70°) et le socle sédimentaire (forage de la ville de Betioky). Les objectifs étaient de savoir : i) si les eaux de la cuvette d'Ankazomanga pouvaient être considérées de façon homogène ou s'il y avait différents groupes d'eaux ; ii) si le karst profond était contaminé par de l'eau de mer ou des eaux thermales salées.

Les résultats hydrochimiques (Fig. 27) indiquent une certaine homogénéité des eaux de la cuvette d'Ankazomanga. Ce sont des eaux peu minéralisées, mis à part deux échantillons affectés par une pollution anthropique avec près de 3 g/L de nitrate. Les eaux du karst profond sont contaminées par l'eau de mer car tous les échantillons sont alignés vers le point du lagon (Fig. 27A). Aucun traceur ne permet d'identifier une pollution par les évaporites (eaux thermales) pour ces eaux karstiques (e.g.  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Br}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ). Les traceurs utilisés ne permettent pas de mettre en évidence un lien entre les eaux karstiques profondes et les eaux du socle sédimentaire (méthamorphisé) ou de la rivière Onilahy. Il a donc été choisi de ne pas exploiter la ressource karstique profonde car les intrusions salines peuvent avancer profondément dans les terres. Guyot (2002) a montré que plus au sud, les marées ont un effet sur la piézométrie et la salinité jusqu'à 20 km de la côte. Ainsi, l'eau karstique profonde peut potentiellement être contaminée sous le bassin d'Ankazomanga. En outre, deux autres questions doivent être prises en compte : i) l'exploitation de

cette ressource nécessiterait probablement des forages à des profondeurs de plus de 150 m et l'exploitation manuelle de la ressource en eau ne serait pas possible ; ii) bien que le karst Mahafaly soit très développé (André et al. 2005), le risque d'échec d'implantation d'un tel forage reste élevé car il n'y a aucun moyen de guider un forage vers une cavité à une telle profondeur. Par conséquent, il a été décidé de concentrer l'exploration à l'échelle locale dans le bassin d'Ankazomanga sur l'aquifère proche de la surface dans les formations néogènes.

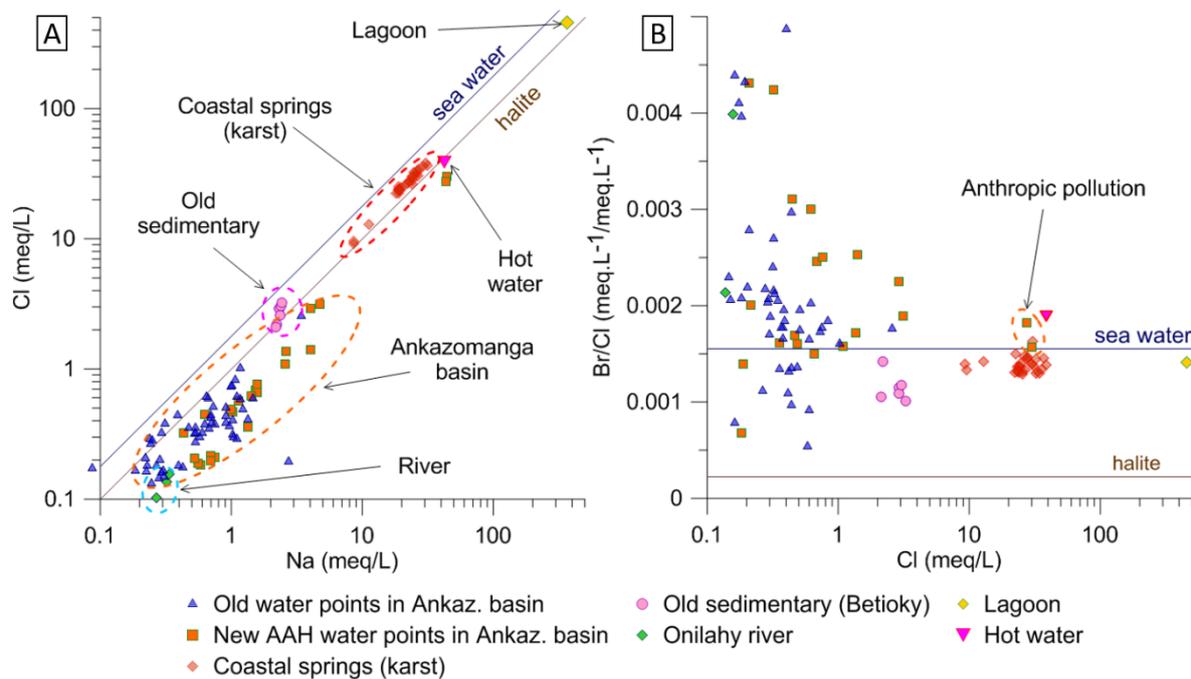


Figure 27 : Résultats hydrochimiques pour les 120 eaux échantillonnées entre 2013 et 2018. A) Relation Na vs Cl avec identification des masses d'eau. B) Relation Cl vs Br / Cl. Rapport des lignes d'eau de mer et d'halite d'après Fontes et Matray (1993).

#### 1.4.1.2.2 Géophysique

Carrière et al. (2018) ont exploré la cuvette d'Ankazomanga par une combinaison de techniques géophysiques déployées dans l'ordre suivant. Premièrement, l'EMI (*electromagnetic induction*) a été appliquée avec l'appareil EM-34. Cette technique est assez rapide à mettre en œuvre et permet de couvrir des espaces assez vastes pour produire des cartes de conductivité électrique du sous-sol. Deuxièmement, le TDEM (*time domain electromagnetic*) a été appliqué avec l'appareil TEM-Fast sous forme de transects pour recouper les structures géologiques identifiées par EMI. Cette technique permet de faire des sondages afin de caractériser la distribution verticale des conductivités électriques. Troisièmement, le sondage électrique (SE) a été utilisé pour confirmer ou soulever les limites d'interprétation des sondages TDEM. Cette dernière technique est nettement plus longue à mettre en œuvre que le sondage TDEM mais elle présente l'avantage d'être basée sur un principe physique différent. Les deux techniques de sondage, TDEM et SE, sont donc complémentaires. Les prospections géophysiques ont été menées à deux échelles spatiales. Premièrement à l'échelle régionale à travers la cuvette d'Ankazomanga (15\*20 km) pour cerner les structures géologiques générales et estimer l'épaisseur du Néogène Continental. Deuxièmement à l'échelle des villages pour préciser le lieu d'implantation des points d'eau.

A l'échelle régionale, les résultats EMI ont permis de montrer que la résistivité électrique de la cuvette d'Ankazomanga n'est pas homogène (Fig. 28a). Une zone plus résistante se démarque vers le centre de la cuvette et on distingue des structures géologiques plutôt orientées Nord/Sud. Les six profils TDEM (Fig. 28b) montrent une structuration en 3 couches : i) vers la surface une couche de résistivité variable dont les transitions sont cohérentes avec les résultats EMI. Les sondages à la tarière ont permis de montrer que les zones les plus résistantes correspondent à des sables plus grossiers ; ii) au milieu une couche très conductrice (souvent  $< 10 \Omega.m$ ) que l'on ne retrouve pas à l'affleurement et qui est resté difficile à interpréter jusqu'à la campagne de forage ; iii) en profondeur des formations plus résistantes qui ont été interprétées comme les roches carbonatées éocènes. Les sondages TDEM ont également permis d'identifier deux failles majeures F1 et F2 dont le rejet est de plusieurs dizaines de mètres.

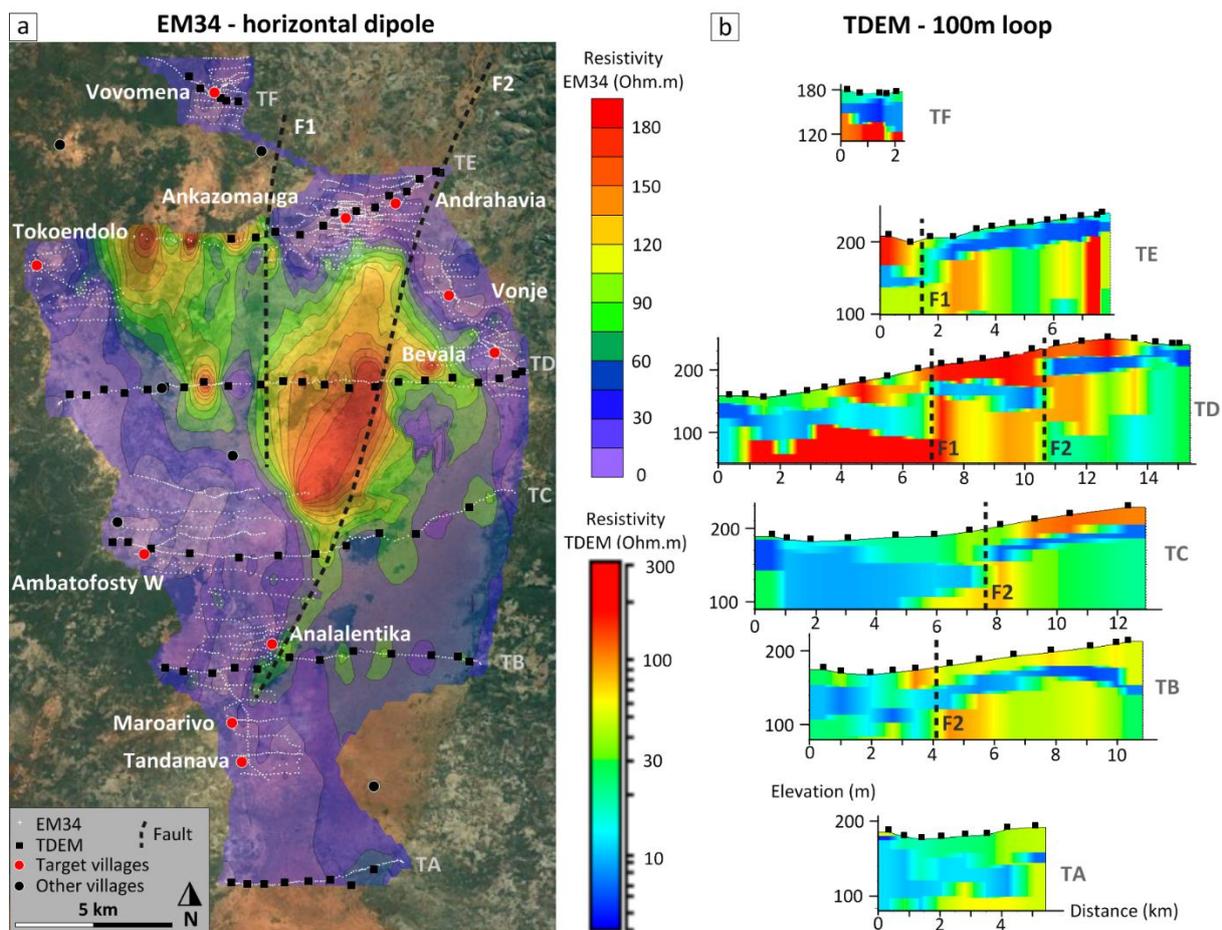


Figure 28 : Résultats géophysiques à l'échelle régionale (Carrière et al. 2018). a) Carte d'EMI (*electromagnetic induction*) obtenue avec l'appareil EM-34 et un espacement de bobines de 20 m. (b) Section inversées en 1D de sondages TDEM (*time domain electromagnetic*) obtenus avec une boucle carré de 100\*100 m.

A l'échelle des villages, les prospections ont été réalisées avec la même stratégie combinant EMI, TDEM et SE. Ces techniques ont été déployées avec des pas de mesures plus fins afin d'améliorer la résolution de l'imagerie géophysique.

Les résultats EMI dévoilent l'hétérogénéité du site avec des structures géologiques globalement orientées Nord/Sud (Fig. 29a). Le transect TDEM recoupe ces structures perpendiculairement (Fig. 29c). On retrouve toujours une structuration verticale en 3 niveaux, comme à l'échelle régionale. Les résultats TDEM mettent

en évidence que les formations de Néogène Continental sont hétérogènes, discontinues et non tabulaires. Vers la droite de la coupe, on remarque des couches conductrices qui se terminent en biseau vers l'Ouest. N'ayant pas plus d'informations sur la nature de la formation très conductrice ( $< 10 \Omega.m$ ), deux hypothèses persistaient : i) soit la forte conductivité de cette formation était liée à une forte teneur en eau. Dans ce cas elle était la cible hydrogéologique à exploiter ; ii) soit la formation conductrice était constituée de marnes ou d'argiles conductrices et l'eau se retrouverait piégée au-dessus. Le premier trou de la campagne de forage a permis de répondre à cette interrogation. La formation très conductrice est constituée d'alternances de marnes et d'argiles (Fig. 29d). Le second trou a permis de faire un forage très productif qui capte l'eau piégée à 45 m de profondeur, au-dessus des marnes et argiles. Ce forage a été le plus profond de la campagne et a révélé le caractère multicouche des formations du Néogène avec plusieurs niveaux d'arrivée d'eau. Au total, 6 forages et 3 puits ont été créés dans le cadre de ce projet humanitaire, sur 11 points d'eau initialement prévus. Ce résultat a été un succès au regard de la complexité du contexte hydrogéologique.

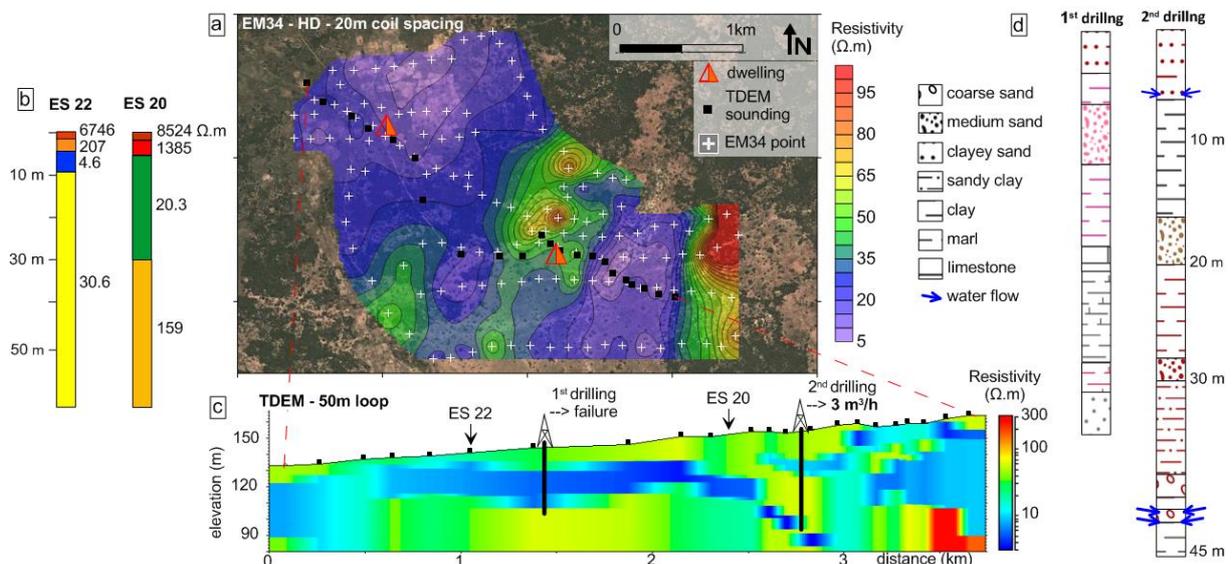


Figure 29 : Investigation géophysique et forage autour du village de Tokoendolo (Carrière et al. 2018). a) Carte d'EMI (*electromagnetic induction*) avec un espacement de 20 m entre les bobines et positionnement du transect TDEM (*time domain electromagnetic*). b) Résultats des sondages électriques. c) Coupe géophysique obtenue grâce aux sondages TDEM avec une boucle de 50\*50 m. d) Coupe de forage dans les formations du Néogène continental avec une représentation simplifiée des couleurs observées sur les *cuttings*.

-----  
**Box 2 : L'accès à l'eau, un bouleversement**

*Le cas du village de Tokoendolo est particulièrement éloquent car les habitants devaient marcher 10 km pendant une grande partie de l'année pour aller chercher de l'eau. Les habitants profitent désormais d'un forage pérenne et très productif pour la région, qui attire les habitants des localités alentours en période de sécheresse. Cette création de point d'eau nous mène tout de même à avoir une réflexion sur les impacts socio-économiques d'un tel évènement. Les équilibres ancestraux se voient bouleversés. Par exemple, les charretiers transporteurs d'eau ne livreront plus d'eau vers Tokoendolo. Les activités de maraîchage vont pouvoir se développer dans ce village qui était plutôt tourné vers le travail du bois du fait de sa proximité avec la forêt de xérophytes.*

-----

### 1.4.1.2.3 Isotopie et piézométrie

Les points d'eau créés dans la cuvette d'Ankazomanga exploitent des eaux souterraines dans les formations de Néogène Continental qui sont perchées sur un karst. Il est donc naturel de se poser des questions sur la pérennité de cette ressource peu profonde. Il a-t-il un risque de surexploitation ? Est-ce que ces aquifères se rechargent plutôt par des infiltrations préférentielles ou diffuses ?

Des suivis piézométriques ont été lancés dans les ouvrages exploités dès 2014 afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Carrière et al. (2023) ont combiné des données piézométriques à des données isotopiques ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) issues de 10 campagnes d'échantillonnage menées entre 2013 et 2022.

Les résultats piézométriques de l'année hydrologique 2016/2017 montrent une évidente recharge liée à la saison des pluies (Fig. 30A). On remarque que plus les arrivées d'eaux sont profondes, plus le pic de recharge est lissé. Le traçage isotopique met en évidence un lissage de la variabilité du signal avec la profondeur (Fig. 30B). Cette observation isotopique révèle un effet de mélange d'eau avec la profondeur. Dans les ouvrages les moins profonds, le signal isotopique est très variable dans l'espace (entre les ouvrages) et dans le temps (entre les campagnes) du fait de la forte variabilité du signal isotopique des pluies. Le signal  $\delta^{18}\text{O}$  varie entre -6.8 à -2.5 ‰. En allant vers la profondeur, le signal isotopique est moins variable et se centre sur la moyenne des eaux plus superficielles, autour de -4.7 ‰  $\delta^{18}\text{O}$ . Les eaux du karst profond ont aussi un signal isotopique assez stable et centré sur la moyenne des eaux les plus superficielles. Cet effet de lissage du signal isotopique avec la profondeur a rarement été aussi clairement caractérisé. Cette caractéristique est typique des zones où les flux verticaux sont dominants (Clark 2015). Dans d'autres études, la présence d'écoulements latéraux ou d'une alimentation préférentielle des aquifères viennent perturber l'effet d'homogénéisation des signaux isotopiques (Cartwright et Weaver 2005 ; Pilla et al. 2006 ; Filippini et al. 2015).

Le processus de mélange clair avec la profondeur s'explique par la configuration topographique et géologique du plateau Mahafaly. L'absence de topographie irrégulière favorise une infiltration homogène de l'eau vers les aquifères plus profonds. Le plateau Mahafaly est une zone plate où le gradient isotopique altitudinal est négligeable. Il n'y a donc pas de perturbation liée aux différences d'altitude des précipitations. Les formations du Néogène Continental jouent un rôle tampon et homogénéisant pour les eaux infiltrées. Il reste néanmoins nécessaire de continuer les suivis piézométriques pour s'assurer que la recharge continuera à être suffisante dans le contexte de changement climatique et avec l'évolution des usages de l'eau (i.e. développement du maraîchage, augmentation de la population). Les suivis piézométriques réalisés dans la cuvette d'Ankazomanga sont représentatifs d'un seul type de formations géologiques. Il est nécessaire d'étendre ces suivis à d'autres contextes hydrogéologiques dans le Sud de Madagascar pour avoir une vision représentative de l'ensemble de la région semi-aride.

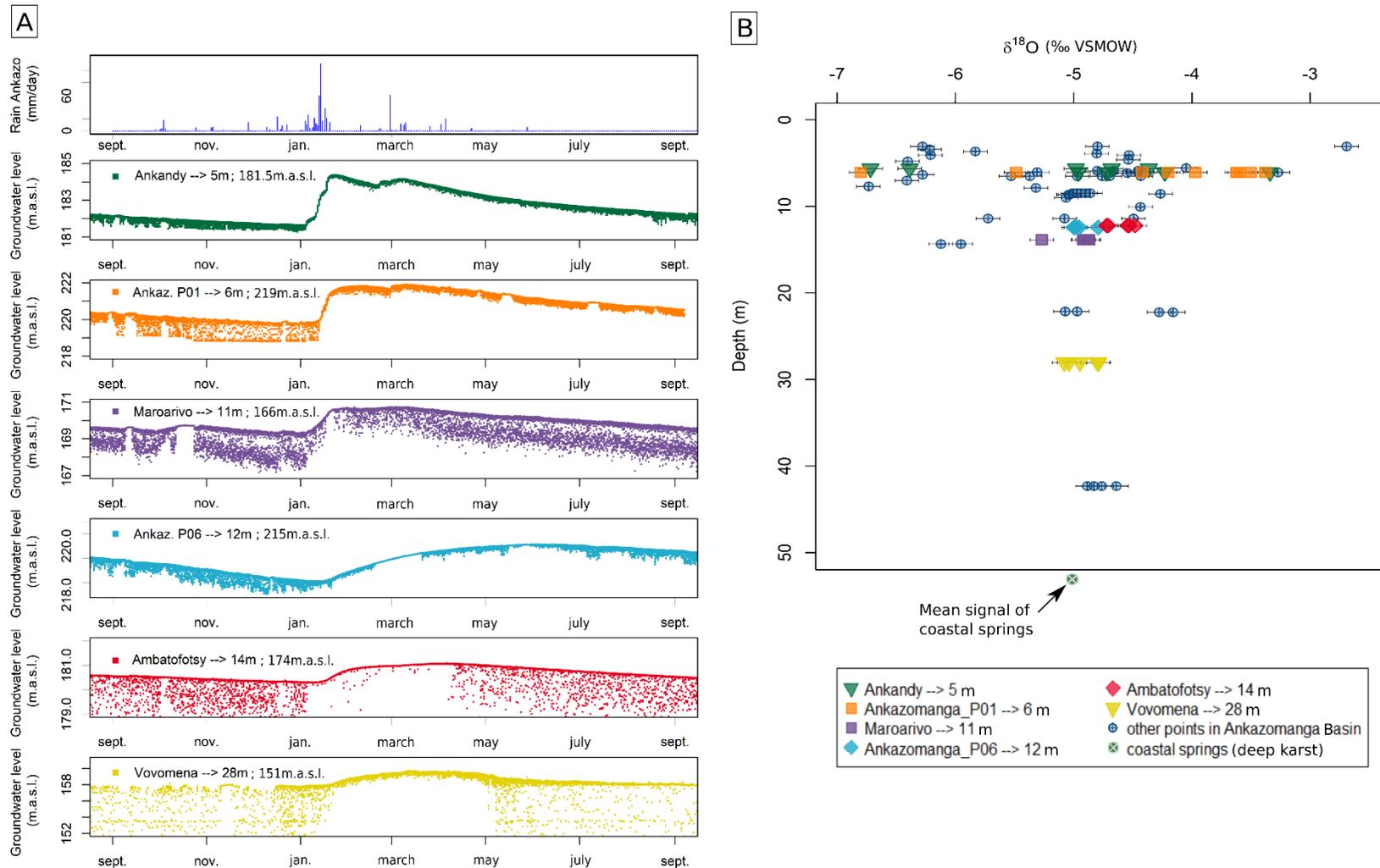


Figure 30 : A) Variabilité des signatures isotopiques ( $\delta^{18}\text{O}$ ) des eaux souterraines en fonction de la profondeur. Les eaux souterraines ont été échantillonnées dans le bassin d'Ankazomanga et les sources côtières à la sortie du système karstique. Les signaux de 6 puits dans le bassin d'Ankazomanga sont présentés individuellement pour apprécier la variabilité temporelle des signaux. Les données résultent de 10 campagnes d'échantillonnage menées entre 2013 et 2022. B) Chronique de précipitations (quotidien) et de piézométrie (horaire) sur la période 2016/2017. Les données piézométriques sont données pour six piézomètres dans le bassin d'Ankazomanga et organisés par profondeur croissante. Les profondeurs d'arrivée d'eau et altitudes sont indiquées en haut à gauche de chaque graphique (e.g. la profondeur à Ankandy est de 5m). Les baisses de la piézométrie au cours de la journée sont liées aux prélèvements d'eau (m.a.s.l. signifie mètres au-dessus du niveau de la mer).

## 1.4.2 Production des données nécessaires à la gestion durable des eaux souterraines

### 1.4.2.1 Mise en place de l'observatoire GROSoM pour suivre la dynamique des eaux souterraines

#### 1.4.2.1.1 Contexte

De nombreuses actions humanitaires et de développement sont menées dans le Sud de Madagascar depuis des dizaines d'années. Ces actions ont mené à la création de centaines voire de milliers de puits et forages dans la région semi-aride de Madagascar. Cependant, aucun suivi de l'exploitation des ouvrages et de la recharge des nappes n'a été mis en œuvre. Dans certaines régions du monde, l'exploitation désordonnée et excessive des ressources en eaux souterraines a conduit vers des situations critiques écologiques, humanitaires et économiques (e.g. Leduc et al. 2007 ; Dangar et al. 2021). Dans le Sud de Madagascar, le manque de suivi hydrologique et hydrogéologique limite fortement le développement de plan de gestion durable des eaux souterraines.

#### 1.4.2.1.2 Travaux

Un suivi hydro-climatique, principalement orienté sur le suivi des nappes, a progressivement été mis en place depuis 2014. Cet observatoire prendra quelques années plus tard le nom de GROSoM pour « *groundwater resource observatory for southwestern Madagascar* » (Carrière et al. 2021c). Le suivi des eaux souterraines s'inscrit nécessairement dans un temps long du fait de la lenteur de circulation des eaux souterraines. Conscient du défi de durabilité, le suivi hydro-climatique a commencé modestement. Avec le soutien de l'ONG ACF, les 3 premiers ouvrages ont été équipés en 2014 puis 6 ouvrages et une station météo en 2016 dans la cuvette d'Ankazomanga (district Betioky). Ces suivis, réalisés dans la zone étudiée par Carrière et al. (2018), se veulent représentatifs des aquifères sédimentaires néogènes du plateau Mahafaly. En 2018, 3 forages et une station météo ont été installés dans la plaine alluviale du Mandrare (district Amboasary). En 2019 et 2020, l'UNICEF (*United Nations International Children's Emergency Fund*) a lancé le suivi d'une vingtaine d'ouvrages répartis plus aléatoirement dans le Sud. En 2021, ACF a financé l'équipement de 3 ouvrages dans la plaine sédimentaire côtière de Tuléar. En 2023, Sorbonne Université a financé l'équipement de 4 ouvrages dans le district d'Ampanihy. Ces 4 derniers ouvrages se veulent représentatifs des formations métamorphiques. En 2024, l'observatoire GROSoM compte une trentaine d'ouvrages opérationnels (Fig. 31B).

Les résultats montrent une forte variabilité interannuelle des précipitations, ce qui induit une forte variabilité de la recharge. L'une des années les plus sèches, 2016, semble correspondre aux importants effets d'El Niño observés à l'échelle mondiale, tandis que les années où la recharge est plus importante sont systématiquement liées à des cyclones (e.g. Fundi en 2015 ; l'Eketsang en 2019).

Afin assurer la pérennité du suivi, il a été nécessaire de développer un partenariat entre : i) des universitaires (Université d'Antananarivo, Sorbonne Université, Université d'Avignon, Université de Tuléar), ii) des acteurs humanitaires (ACF, UNICEF) et iii) les institutions locales (service météorologique régional (SMR), direction régionale de l'eau, assainissement et hygiène (DREAH) et autorité nationale de l'eau et de l'assainissement (ANDEA). Ce partenariat varié a permis d'assurer une cohérence scientifique des actions, un support logistique et opérationnel et une reconnaissance auprès des institutions officielles de l'état malgache. Chaque type d'acteurs trouve des intérêts différents à maintenir ce suivi : i) les humanitaires utilisent les données pour faire du plaidoyer et renforcer le système d'alerte précoce des crises humanitaires à Madagascar, ii) les institutions locales pour développer des plans de gestion durable des

ressources en eau, iii) les universitaires pour produire les données indispensables à la réalisation de recherches ancrées sur le terrain et contribuer à une meilleure compréhension des effets du changement climatique sur les ressources en eau souterraine dans cette région semi-aride.

Avec bientôt 10 ans de suivi hydro-climatique, le consortium a désormais l'ambition de faire perdurer GROSoM sur le long terme (au moins 20 ans). Dans ce délai, il sera nécessaire de transférer progressivement l'observatoire aux institutions malgaches dédiées (ANDEA, DREAH). Cependant, ces dernières n'ont actuellement pas les capacités humaines d'entretenir et valoriser ces observations pour faire perdurer le suivi. L'implication des universitaires malgaches reste donc indispensable à ce jour. Pour atteindre ces objectifs à long terme, il est nécessaire de construire ou renforcer la chaîne de compétences nécessaire à l'entretien et à la valorisation de GROSoM. C'est l'un des objectifs du projet SAFE-M qui vise à *Soutenir l'Apprentissage et les Formations sur l'Eau à Madagascar* (Métivier et al. 2022). Ce projet de renforcement de l'enseignement dans le domaine de l'eau est interdisciplinaire. Il a débuté par le volet hydrologie/hydrogéologie en 2022 et s'appuie en partie sur l'observatoire GROSoM pour les travaux menés dans le Sud avec l'Université de Tuléar.

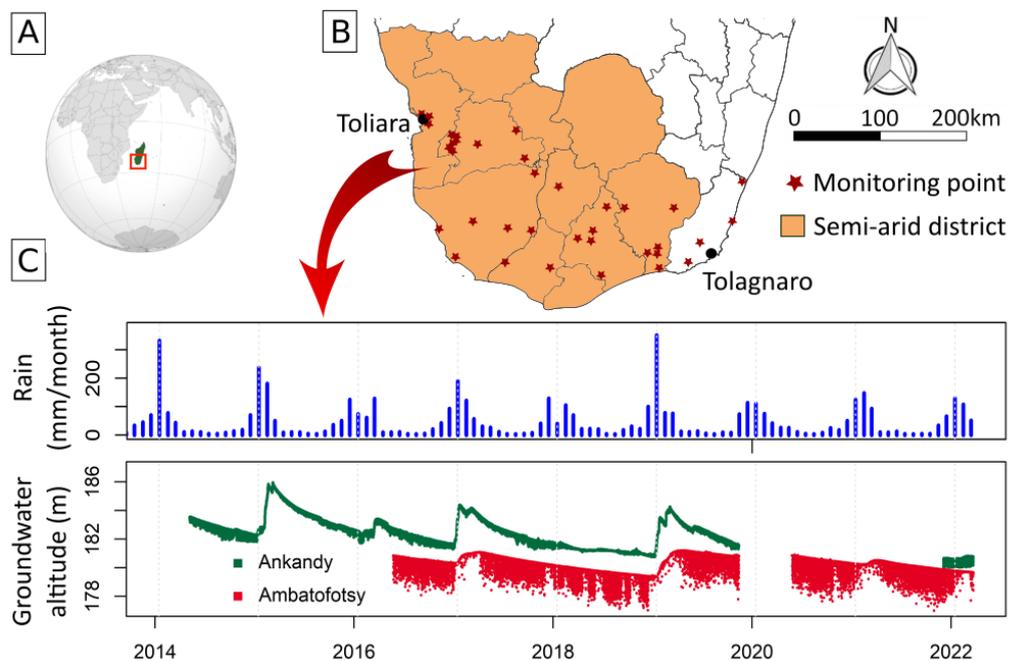


Figure 31 : Présentation de l'observatoire des ressources en eaux souterraines du sud-ouest de Madagascar (GROSoM). A/ Localisation de Madagascar. B/ Localisation de l'observatoire à Madagascar. C/ Exemple de deux suivis piézométriques dans le district de Betioky-Atssimo mis en comparaison avec les précipitations du produit MSWEP (Beck et al. 2017).

## 1.4.2.2 Estimation spatialisée des précipitations à l'aide de produits maillés

### 1.4.2.2.1 Contexte

Les précipitations constituent la donnée de base nécessaire à la réalisation de tous travaux d'hydrologie ou d'hydrogéologie. Malgré les données météorologiques acquises par le SMR, l'observatoire GROSoM et d'autres organismes, la densité de stations météorologiques est bien trop faible pour caractériser les précipitations de façon spatialisée sur la zone d'étude (Fig. 7). Les données de seulement 32 stations météorologiques sont disponibles sur l'ensemble du pays. Il est donc nécessaire de recourir à des produits

maillés pour estimer les précipitations de façon spatialisée sur l'ensemble du territoire malgache. Une vingtaine de produits sont disponibles à Madagascar mais les prédictions de précipitations sont très contrastées entre les produits (Fig. 32). Par exemple, le produit MERRA2-FLX annonce environ 2500 mm/an de précipitations à Antananarivo alors que le produit ARC-2 en annonce seulement 1200 mm/an. Il est difficile de faire un choix éclairé entre ces produits, d'autant plus que de nombreuses études montrent que les meilleurs produits ne sont pas toujours les mêmes en fonction des régions du monde (e.g. Gehne et al. 2016 ; Sun et al. 2018 ; Stagé et al. 2021).

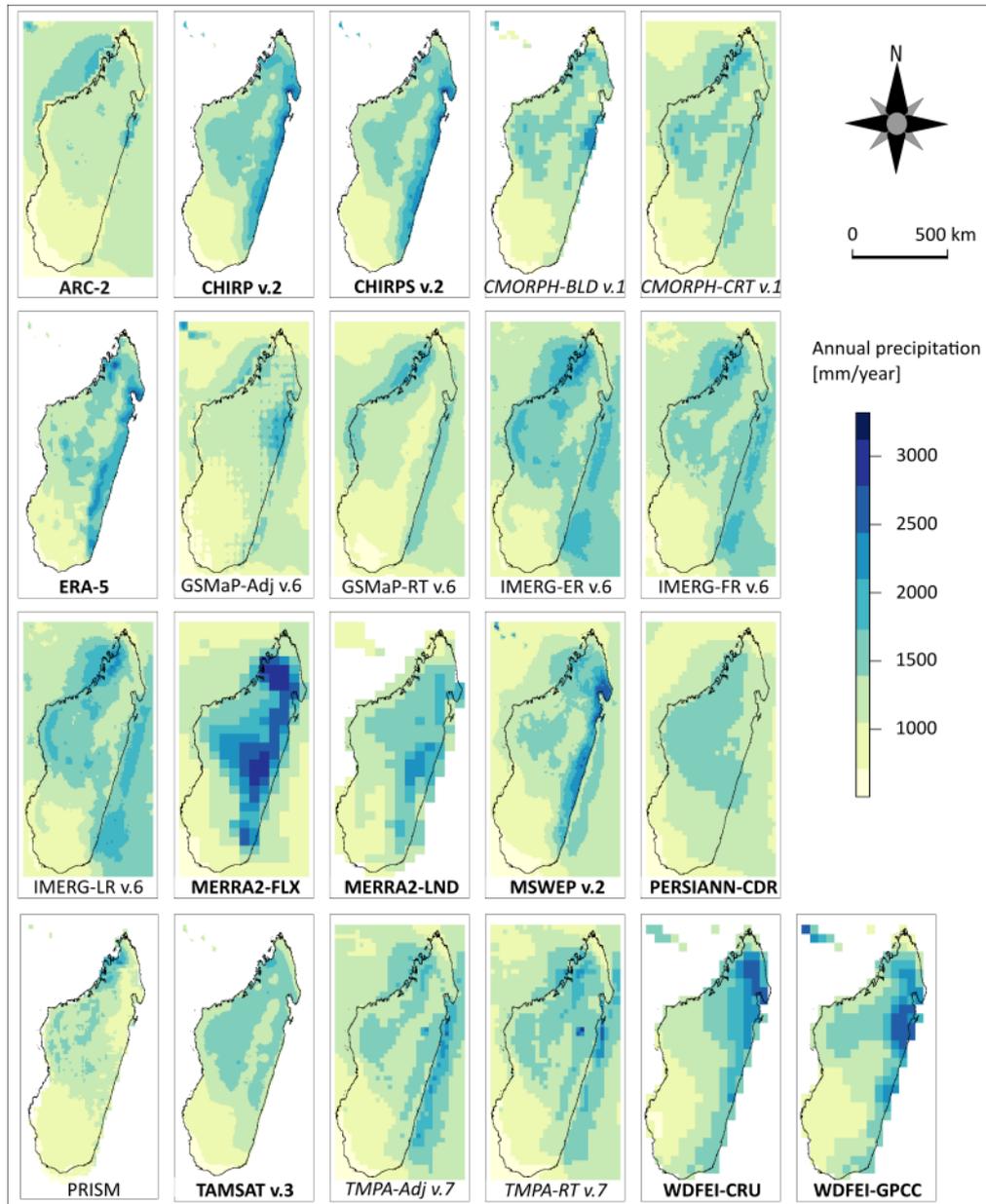


Figure 32 : Cumuls annuels de précipitations à Madagascar selon les estimations de 21 jeux de données maillées de précipitations (valeurs moyennes en mm/an pour la période 2007-2016, et pour la période 2011-2016 pour le produit PRISM), (Ollivier et al. 2023).

### 1.4.2.2 Travaux

Le travail d'Ollivier et al. (2023) a consisté à évaluer les performances de 21 produits maillés de précipitation au pas de temps mensuel à l'aide de données météorologiques de 24 stations. Pour ce faire, quatre indicateurs ont été utilisés : le coefficient de corrélation (CC), l'indice d'efficacité Kling-Gupta (KGE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le biais. Les performances de KGE des 21 produits sont illustrées par région dans la figure 33.

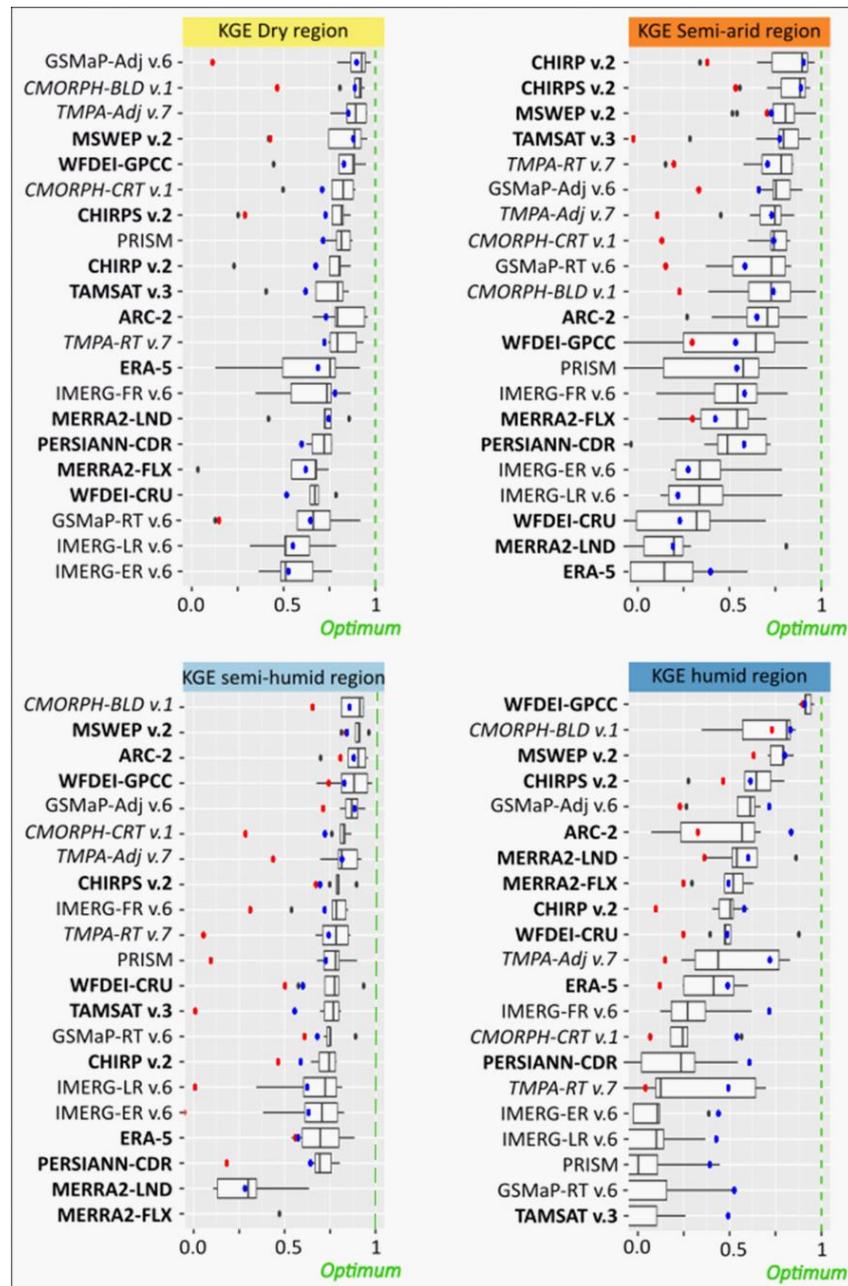


Figure 33 : Évaluation de la fiabilité de 21 produits de précipitation au niveau régional à l'aide de l'indice d'efficacité Kling-Gupta (KGE). Evaluation faite au pas de temps mensuel avec 24 stations météorologiques (période 2011-2016). La ligne verte en pointillés représente l'optimum pour chaque indicateur. Les bords droit et gauche des boîtes à moustaches représentent respectivement les valeurs du 25<sup>ème</sup> et du 75<sup>ème</sup> percentile. Le point bleu est la valeur médiane pour la saison des pluies, et le point rouge est la valeur médiane pour la saison sèche, (Ollivier et al. 2023).

On remarque que les produits les plus performants ne sont pas toujours les mêmes selon les régions bioclimatiques. Par exemple, le produit CHIRP est le meilleur en région semi-aride alors qu'il est en 15<sup>ème</sup> position en région semi-humide. A l'inverse, le produit MSWEP se positionne toujours dans les 4 meilleurs produits quelle que soit la région. Ces résultats contrastés ont motivé la poursuite du travail vers la construction d'un produit moyen selon une approche d'ensemble. Ce produit d'ensemble a été calculé selon une moyenne pondérée en fonction des performances de KGE de chaque produit dans les différentes régions. Une partie du jeu de données, non utilisée dans la première phase d'apprentissage du produit d'ensemble, a permis montrer que ce produit d'ensemble présente des performances surpassant les meilleurs produits des quatre régions bioclimatiques. C'est donc ce produit d'ensemble qui sera utilisé dans la suite des travaux menés dans le Sud-Ouest de Madagascar.

### 1.4.2.3 Estimation spatialisée de l'évapotranspiration

#### 1.4.2.3.1 Contexte

L'évapotranspiration (ET) est une composante cruciale du cycle de l'eau car elle représente environ 70 % de l'eau précipitée à l'échelle des continents (Oki et Kanae, 2006 ; Fisher et al. 2017). Plusieurs approches existent pour estimer l'ET (e.g. eddy-covariance, scintillométrie, lysimétrie), mais ces approches sont lourdes à mettre en œuvre et coûteuses (Verstraeten et al. 2008 ; Müller et Bolte 2009 ; Baldocchi et Ryu 2011). En pratique, elles ne peuvent pas être mises en œuvre en permettant une représentativité de l'ensemble des agroécosystèmes à l'échelle régionale. De plus, les approches citées précédemment sont difficilement envisageables dans des zones telles que le Sud de Madagascar pour des raisons logistiques (difficulté d'accès, insécurité, manque de personnel qualifié pour réaliser les entretiens).

Il est donc nécessaire de développer des modèles ou d'exploiter des produits maillés d'ET. Dans un premier temps nous verrons comment modéliser l'ET de façon simplifiée et spatialisée puis dans un second temps nous verrons des travaux en cours sur l'exploitation des produits maillés d'ET.

#### 1.4.2.3.2 Travaux

- Le modèle SimpKcET a été développé par Ollivier et al. (2021). C'est un modèle simple basé sur le calcul de l'ET<sub>0</sub> (ET de référence) selon l'équation de Penmann-Monteith (Jesen et al. 1990 ; Allen et al. 1998) :

$$ET_0 = \frac{\Delta * (R_n - G) + \rho_a * c_p * \frac{VPD}{r_a}}{L \left[ \Delta + \gamma * \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$$

où  $\Delta$  est la pente de la courbe de saturation de la pression de vapeur,  $\rho_a$  la densité de l'air,  $c_p$  la chaleur spécifique de l'air à pression constante,  $\gamma$  la constante psychrométrique et  $L$  la chaleur latente de vaporisation. Le terme  $r_a$  représente la résistance aérodynamique tandis que le terme  $r_s$  est la résistance de surface qui correspond à l'intégration de la résistance stomatique et de la résistance de surface du sol.  $R_n$  et  $G$  sont le rayonnement net et le flux de chaleur du sol. Leur différence représente l'énergie disponible pour l'ET.  $VPD$  est le déficit de pression de vapeur dans l'air au-dessus de la surface.

L'ET est obtenue en modulant l'ET<sub>0</sub> par le coefficient cultural ( $k_c$ ) qui est lui-même la somme du coefficient de transpiration de la canopée ( $k_T$ ) et le coefficient d'évaporation du sol ( $k_E$ ).

$$ET = ET_0 * k_c$$

$$\text{Où } k_c = k_T + k_E$$

Une des spécificités du modèle SimpKcET consiste à utiliser des données de télédétection (fCover) pour contraindre l'évolution spatiale et temporelle du coefficient  $k_T$ .

$$k_C = fCover * k_S * k_{Tx}$$

où  $k_{Tx}$  est la valeur maximale du coefficient de transpiration de la canopée et  $k_S$  un coefficient de stress hydrique dépendant de l'humidité du sol. L'humidité du sol est déterminée en calculant un bilan hydrique simplifié de la zone jour après jour (précipitation moins évapotranspiration).

Le modèle SimpKcET sera utilisé en appui du calcul du produit d'ET résultant du futur satellite TRISHNA à l'horizon 2026 (Roujean et al. 2021). Les premiers tests d'Ollivier et al. (2021) ont été mis en œuvre sur le système karstique de la Fontaine-de-Vaucluse (1200 km<sup>2</sup>). SimpKcET a été couplé au modèle de simulation des écoulements karstiques KARAMEL (Ollivier et al. 2020) afin de calibrer les simulations d'ET sur les débits de la Fontaine-de-Vaucluse.

C'est en 2023 que des simulations ont été réalisées dans le Sud de Madagascar dans le cadre du stage de Soimadou Nayel (M2, Univ. Réunion). Les premiers résultats exposés en figure 34 montrent une cohérence entre les ET simulées et les précipitations (Fig. 32). C'est dans la zone bioclimatique humide (Est) que l'ET est la plus élevée. A l'inverse, vers l'Ouest les précipitations plus faibles et la végétation de xérophytes produisent des ET beaucoup plus faibles autour de 200 à 600 mm/an (Fig. 34a et b). On remarque une forte variabilité entre les années dans la région semi-aride. L'année 2020, plus sèche, présente des ET plus faibles (Fig. 34c). Dans la zone humide cette variabilité inter-annuelle d'ET n'est pas aussi clairement marquée. Ces variations d'ET sont directement reliées aux variations de pluviométrie et dans une moindre mesure à des variations de taux de couverture végétale et d'ensoleillement.

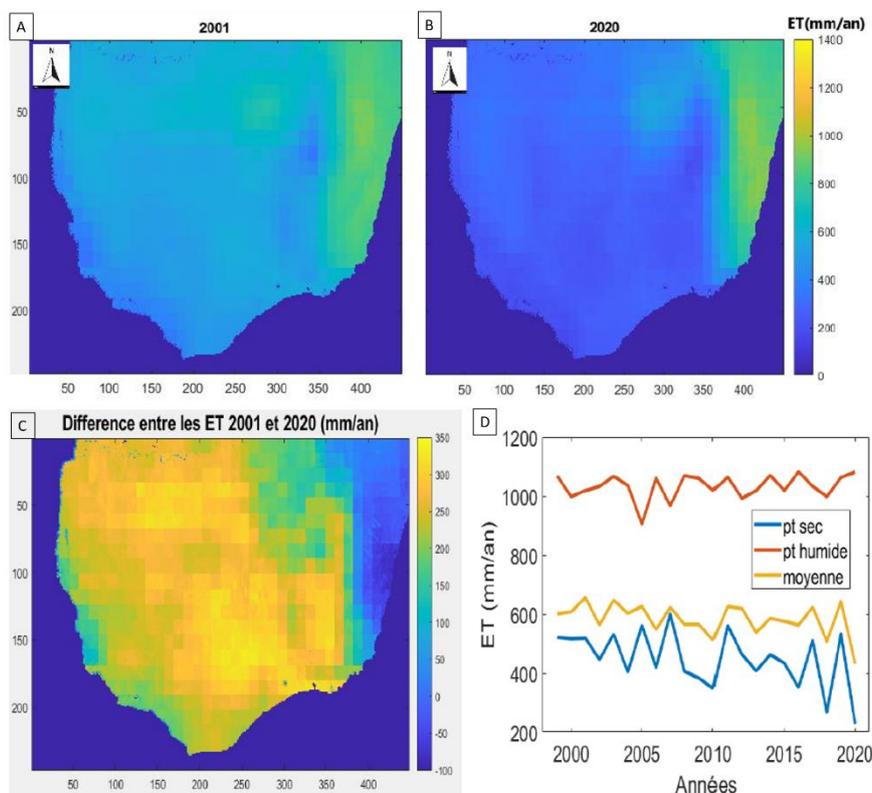


Figure 34: (a) Cartographie de l'évapotranspiration (ET) annuelle simulée par SimpKcET en 2001, (b) Cartographie de l'évapotranspiration annuelle simulée par SimpKcET en 2020, (c) différence entre les simulations 2001 et 2020, (d) Evolution de l'ET pour un point en zone sèche, un point en zone humide et la moyenne de l'ensemble de la zone étudiée entre 1999 et 2020.

- Le travail de thèse de Rojin Ali Mohammad Nejad (2022-2026) a permis d'exploiter et comparer 8 produits d'ET disponibles à l'échelle du globe ou de l'Afrique. Lorsque l'on analyse les cartes de cumuls annuels d'ET (Fig. 35) on constate une forte variabilité entre les produits. Par exemple, les produits GLDAS\_CLSM et MERRA2 présentent de fortes ET (> 2000 mm/an) dans le Nord-Est alors que les autres produits dépassent difficilement 1500 mm/an dans la zone humide. Pour la plupart des produits, on trouve des patrons d'ET cohérents avec les zones bioclimatiques de Madagascar. En effet, c'est dans la zone côtière de l'Est (zone humide) que l'ET est la plus élevée et à l'inverse l'ET est la plus faible dans le Sud-Ouest (zone semi-aride). Ces observations sont cohérentes avec les résultats de travail de modélisation (Fig. 34).

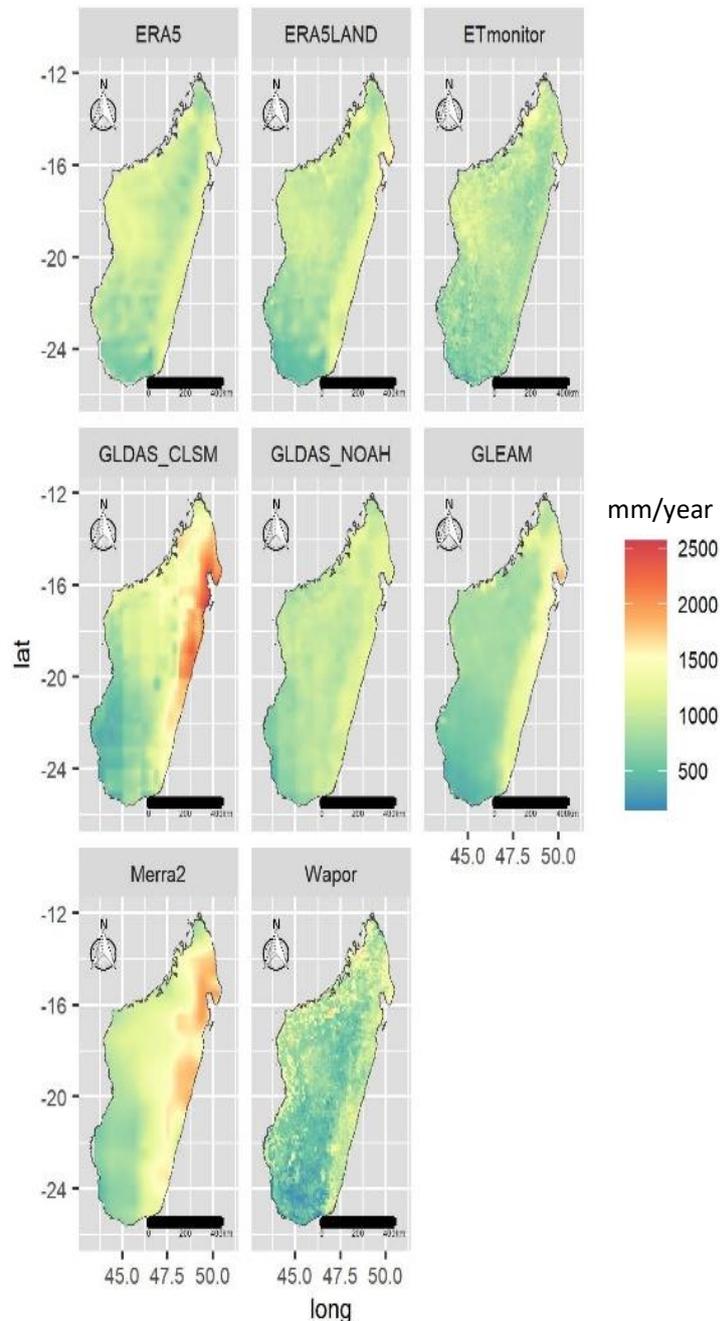


Figure 35 : Cumuls annuels d'évapotranspiration moyennés sur la période 2009-2021 pour 8 produits maillés.

L'analyse de la dynamique temporelle des différents produits d'ET souligne une forte variabilité de la cohérence entre les produits selon la zone bioclimatique (Fig. 36). En zone semi-aride la dispersion des produits est assez limitée et l'ensemble des produits reproduisent clairement la saisonnalité (saison des pluies / saison sèche). En zone humide les estimations des produits sont beaucoup plus dispersées. On suppose que les pluies prises en compte dans le calcul de l'ET jouent un rôle important dans cette dispersion. Par exemple, on sait que MERRA2 surestime les précipitations à Madagascar (Fig. 32 et 33), ce qui se traduit par des ET parmi les plus fortes. De manière générale, il semblerait que les produits soient plus cohérents entre eux lorsqu'il s'agit de prédire de faibles ET.

Les travaux en cours permettront de mieux comprendre les différences entre les produits. Il est envisagé de travailler selon une approche d'ensemble afin de calculer un produit moyen qui sera plus satisfaisant que l'ensemble des produits. Les performances des produits ne pourront pas être évaluées avec des données au sol dans le cas de Madagascar. Ils seront donc évalués en fonction de la cohérence avec les pluies et l'évapotranspiration potentielle (ETP) puis en fonction de leur capacité à prédire la recharge des aquifères suivis dans l'observatoire GROSoM. Des évaluations par rapport à des mesures in situ dans des contextes climatiques relativement proches en Afrique, en particulier en Afrique du Sud, seront également effectuées.

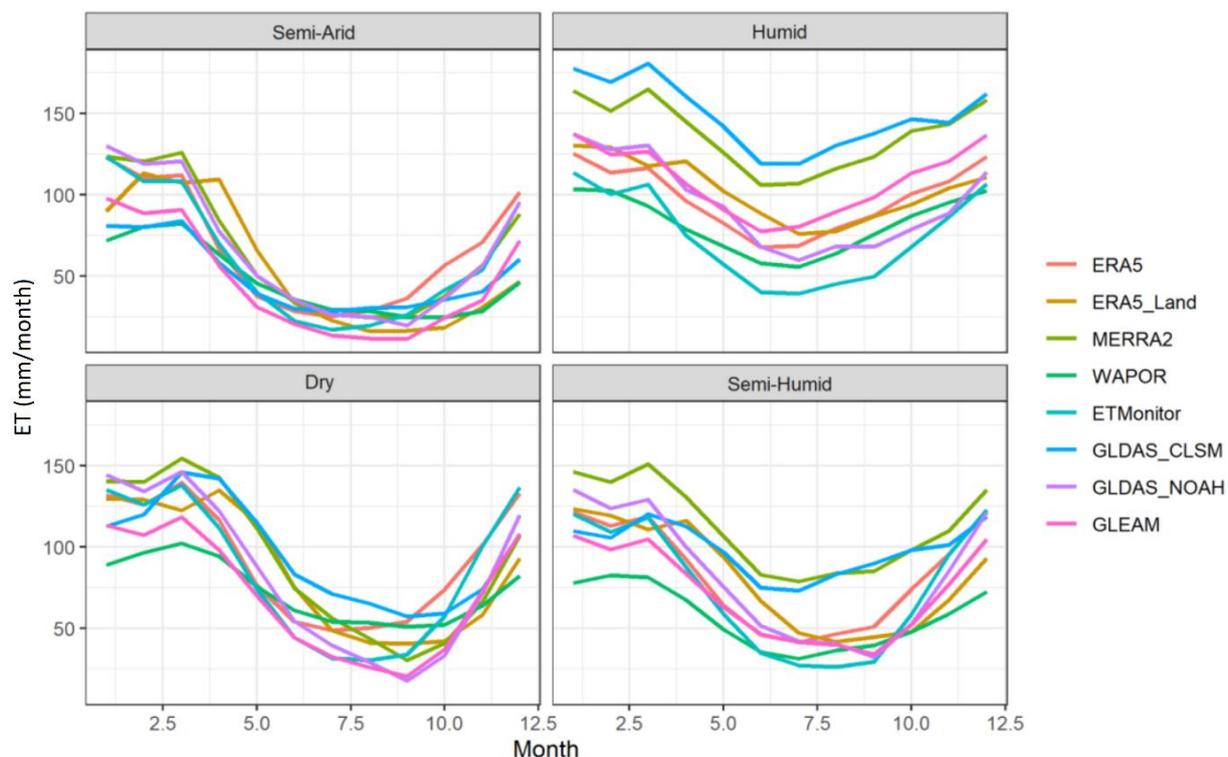


Figure 36 : Evolution saisonnière de l'évapotranspiration par mois et moyennée sur la période 2009-2021. Répartition selon les quatre zones bioclimatiques de Madagascar (Fig. 7).

## I.4.3 Perspectives : Effet en cascade des sécheresses sur la végétation, les eaux souterraines et la santé humaine – Projets SuFECiS et DIGAP

### I.4.3.1 Contexte

Au cours des deux dernières décennies, les crises humanitaires sont devenues progressivement plus complexes, imprévisibles et exacerbées par des facteurs tels que le changement climatique ou la pression anthropique (ECHO 2021). L'augmentation de l'intensité et de la fréquence des sécheresses attendue dans les prochaines décennies pour certaines régions du monde rend cette situation préoccupante (Dai 2013).

Anticiper l'intensité de ces sécheresses, leur variabilité interannuelle et les impacts en cascade sur le développement de la végétation, le renouvellement des ressources en eau, la sécurité alimentaire et la santé des populations constitue un défi scientifique majeur (Semenza 2020). Les mécanismes qui conduisent d'une sécheresse vers une crise humanitaire sont complexes et encore mal compris. Par conséquent, les crises humanitaires liées aux sécheresses sont trop souvent mal anticipées. Les systèmes opérationnels d'alerte précoce sont trop souvent basés sur des indicateurs qui s'activent lorsque les conséquences des sécheresses sont déjà présentes (e.g. baisse de la production agricole), (Nakalembe et al. 2021). Ces indicateurs tiennent peu ou pas compte de l'état des ressources en eau. Cela est particulièrement vrai pour les eaux souterraines, qui sont difficiles à caractériser, surtout dans les pays en développement où les informations sont limitées. Or, pour un nombre important de ces pays, les eaux souterraines sont souvent critiques car elles constituent la seule ressource disponible pendant une longue période de l'année et leur disponibilité peut être un facteur déterminant pour la situation humanitaire.

Les projets SuFECiS (Suivi des facteurs environnementaux pour la prévision des crises humanitaires liées aux sécheresses) et DIGAP (*Drought impact on groundwater and population health in Madagascar*) sont deux projets ayant pour objectif commun d'aller vers une amélioration de la prise en compte de l'état des ressources en eau dans l'anticipation des crises humanitaires. Le projet SuFECiS est financé par le Centre Nationale d'Etudes Spatiales (CNES) sur la période 2022-2025 et le projet DIGAP est financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour la période 2024-2028.

### I.4.3.2 Plan de travail

Les projets seront appliqués au sud-ouest de Madagascar qui est une région semi-aride couvrant dix districts (~80 000 km<sup>2</sup>) pour environ 2 000 000 personnes affectées par l'un des taux de pauvreté les plus élevés au monde (World Bank 2023). La malnutrition chronique et les problèmes de santé mettent régulièrement le Sud-Ouest de Madagascar en état de crise humanitaire (FEWS NET 2023). Les fortes sécheresses successives de 2019, 2020 et 2021 ont engendré de graves crises humanitaires. L'intérêt du sud-ouest de Madagascar n'est pas seulement de travailler dans une zone à forte préoccupation humanitaire. C'est aussi un site expérimental unique pour mener des études scientifiques à l'interface entre les sciences de l'eau et les sciences de la santé car i) le taux de pauvreté rend ces populations, essentiellement rurales, très vulnérables aux aléas climatiques et ii) le très faible niveau de développement fait qu'il n'y a pas d'infrastructure de transport d'eau, ni d'irrigation significative pour interférer avec nos analyses.

Premièrement, les travaux consisteront à mieux comprendre et caractériser les sécheresses météorologiques, agronomiques et hydrologiques dans le Sud-Ouest de Madagascar qui est une zone peu

documentée. Ce caractère peu documenté représente un réel défi qui mènera notamment à explorer des approches issues de l'hydrologie spatiale. Une partie de ces travaux ont déjà commencé dans le cadre du projet SuFECIS avec l'analyse des produits de précipitation (Ollivier et al. 2023) et sont en cours avec l'analyse des produits d'évapotranspiration dans le cadre de la thèse de Rojin Ali Mohammad Nejad. Différents indices de végétation (e.g. LAI (*leaf area index*), fCOVER (*fraction cover*)) et de sécheresse (e.g. SPEI (*standardized precipitation evaporation index*), PDSI (*Palmer drought severity index*)) seront analysés pour évaluer la dynamique inter-annuelle de la production agricole observée sur le terrain. Pour la suite, il s'agira de développer des approches originales pour quantifier la recharge et la dynamique des eaux souterraines à l'échelle régionale (Fig. 37). Cette première partie du travail mènera à produire des données et séries temporelles qui seront nécessaires pour la suite du travail dans le WP2 (Fig. 38).

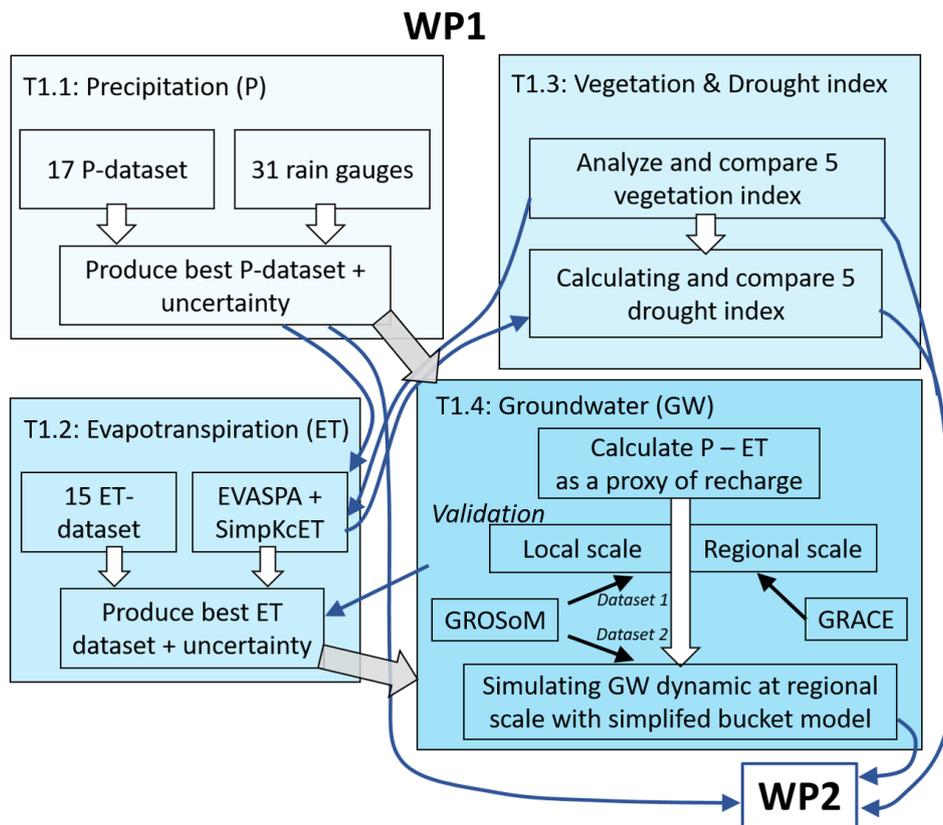


Figure 37 : Organisation du WP1 (*workpackage*) du projet DIGAP (*Drought impact on groundwater and population health in Madagascar*).

Deuxièmement, l'analyse se concentrera sur l'association entre les facteurs environnementaux (WP1), la sécurité alimentaire et la santé humaine (Fig. 38). Un travail considérable permettra de collecter, centraliser et analyser les données pour s'assurer de leur validité. Il s'agira ensuite d'étudier les corrélations et les éventuels décalages temporels entre les facteurs environnementaux et la sécurité alimentaire ou la santé. Cette analyse nécessitera de nouveaux développements méthodologiques dans l'analyse des données de santé étant donné la qualité attendue des données et la durée limitée des séries temporelles. Toutefois, le manque de puissance supposé sera partiellement compensé par la répétition de l'observation dans de nombreuses entités administratives. Enfin, les résultats du projet seront intégrés dans le système d'alerte précoce de Madagascar afin d'améliorer la prévision des crises humanitaires.

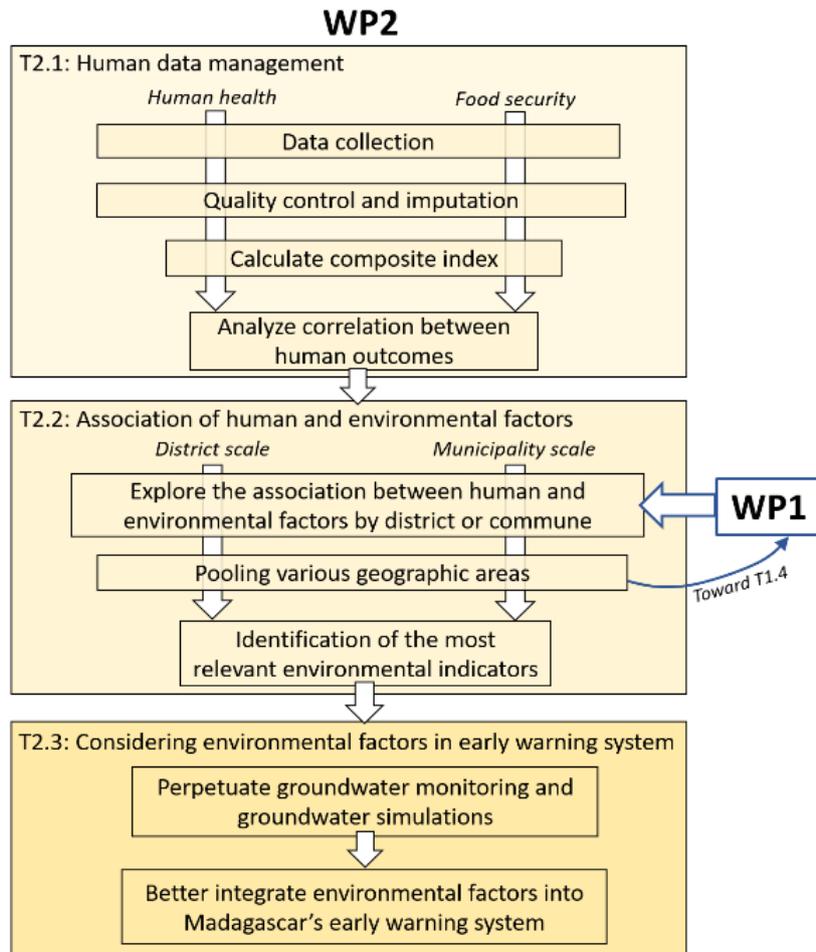


Figure 38 : Organisation du WP2 (workpackage) du projet DIGAP (Drought impact on groundwater and population health in Madagascar).

## I.5 Bibliographie

- al Hagrey SA (2007) Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Journal of experimental botany* 58:839–854
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, et al (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management* 259:660–684
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, et al (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300:
- Anderegg WR, Flint A, Huang C, et al (2015) Tree mortality predicted from drought-induced vascular damage. *Nature Geoscience* 8:367–371
- André G, Bergeron G, Guyot L (2005) Contrôle structural et tectonique sur l'hydrogéologie karstique du plateau Mahafaly (domaine littoral semi-aride, sud-ouest de Madagascar). *Karstologia* 45–46:29–40
- Auken E, Guérin R, de Marsily G, Silliac P (2009) Hydrogeophysics. *Comptes Rendus Geoscience* 341:795–799. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.09.003>
- Aurouze J (1957) Carte et notice hydrogéologique du Sud de Madagascar
- Bailey SW, Horsley SB, Long RP (2005) Thirty years of change in forest soils of the Allegheny Plateau, Pennsylvania. *Soil science society of America journal* 69:681–690
- Baize D, Jabiol B (eds) (2011) Guide pour la description des sols. 2ème édition revue et corrigée [Guide for the description of soils. 2nd edition revised and corrected]. Editions INRA, Paris
- Bakalowicz M, Dörfliger N (2005) Ressources en eau du karst : un enjeu pour le bassin méditerranéen. Géosciences - l'eau souterraine [Karst water resources: an issue for the Mediterranean basin. Geosciences - groundwater]. *Géosciences - l'eau souterraine BRGM* 2:26–31
- Baldocchi DD, Ryu Y (2011) A synthesis of forest evaporation fluxes—from days to years—as measured with eddy covariance. In: *Forest Hydrology and Biogeochemistry*. Springer, pp 101–116
- Barbel-Perineau A (2013) Caractérisation du fonctionnement de la zone non saturée des aquifères karstiques - Approche directe par études hydrodynamiques et hydrochimiques sur le bassin de recherche, d'expérimentation et d'observation de fontaine de Vaucluse - Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel - Pays d'Apt. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
- Barbeta A, Burlett R, Martín-Gómez P, et al (2022) Evidence for distinct isotopic compositions of sap and tissue water in tree stems: consequences for plant water source identification. *New Phytologist* 233:1121–1132
- Barbeta A, Mejía-Chang M, Ogaya R, et al (2015) The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest. *Global Change Biology* 21:1213–1225. <https://doi.org/10.1111/gcb.12785>

- Beck HE, van Dijk AIJM, Levizzani V, et al (2017) MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences* 21:589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>
- Besson A, Cousin I, Bourennane H, et al (2010) The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements. *European Journal of Soil Science* 61:120–132
- Binley A, Hubbard SS, Huisman JA, et al (2015) The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water resources research* 51:3837–3866
- Bonan GB (2008) Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320:1444–1449
- Brum M, Vadeboncoeur MA, Ivanov V, et al (2019) Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. *Journal of Ecology* 107:318–333
- Cailleret M, Nourtier M, Amm A, et al (2014) Drought-induced decline and mortality of silver fir differ among three sites in Southern France. *Annals of Forest Science* 71:643–657. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0265-0>
- Carrière SD, Rakotomandrindra PFM, Heath T, et al (2023) Water mixing process in a complex multi-layer hydrosystem in southwestern Madagascar - a combined isotopic and piezometry approach. *Hydrogeology Journal* 2337–2346
- Carrière SD, Chalikakis K (2022) Hydrogeophysical monitoring of intense rainfall infiltration in the karst critical zone; a unique electrical resistivity tomography data set. *Data in Brief* 107762
- Carrière SD, Martin-StPaul N, Doussan C, et al (2021a) Electromagnetic induction is a fast and non-destructive approach to estimate the influence of underground heterogeneity on forest canopy structure. *Water*
- Carrière SD, Loiseau B, Champollion C, et al (2021b) First evidence of correlation between evapotranspiration and gravity at a daily time scale from two vertically spaced superconducting gravimeters. *Geophysical Research Letters* 48:e2021GL096579
- Carrière SD, Heath T, Rakotomandrindra PF, et al (2021c) Long-term Groundwater Resource Observatory for Southwestern Madagascar (GROSoM). *Hydrological Processes* e14108. <https://doi.org/10.1002/hyp.14108>
- Carrière SD, Martin-StPaul NK, Cakpo CB, et al (2020a) Tree xylem water isotope analysis by Isotope Ratio Mass Spectrometry and Laser Spectrometry: a dataset to explore tree response to drought. *Data in Brief* 105349
- Carrière SD, Martin-StPaul NK, Cakpo CB, et al (2020b) The role of deep vadose zone water in tree transpiration during drought periods in karst settings—Insights from isotopic tracing and leaf water potential. *Science of the Total Environment* 699:134332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134332>

- Carrière SD, Ruffault J, Pimont F, et al (2020c) Impact of local soil and subsoil conditions on inter-individual variations in tree responses to drought: insights from Electrical Resistivity Tomography. *Science of the Total Environment* 698:134247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134247>
- Carrière SD, Ruffault J, Cakpo CB, et al (2020d) Intra-specific variability in deep water extraction between trees growing on a Mediterranean karst. *Journal of Hydrology* 125428. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125428>
- Carrière SD, Chalikakis K, Ollivier C, et al (2018) Sustainable groundwater resources exploration and management in a complex geological setting as part of a humanitarian project (Mahafaly Plateau, Madagascar). *Environmental earth sciences* 77:734. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7909-1>
- Carrière SD, Danquigny C, Davi H, et al (2017) Process-Based Vegetation Models Improve Karst Recharge Simulation Under Mediterranean Forest. In: *EuroKarst 2016*, Neuchâtel. Springer, pp 109–116
- Carrière SD, Chalikakis K, Danquigny C, et al (2016) The role of porous matrix in water flow regulation within a karst unsaturated zone: an integrated hydrogeophysical approach. *Hydrogeology Journal* 24:1905–1918
- Carrière SD, Chalikakis K, Danquigny C, et al (2015) Feasibility and Limits of Electrical Resistivity Tomography to Monitor Water Infiltration Through Karst Medium During a Rainy Event. In: Andreo B, Carrasco F, Durán JJ, et al. (eds) *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Springer Berlin Heidelberg, pp 45–55
- Carrière SD (2014) Etude hydrogéophysique de la structure et du fonctionnement de la zone non saturée du karst. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
- Carrière SD, Chalikakis K, Sénéchal G, et al (2013) Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. *Journal of Applied Geophysics* 94:31–41. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.014>
- Cartwright I, Weaver TR (2005) Hydrogeochemistry of the Goulburn Valley region of the Murray Basin, Australia: implications for flow paths and resource vulnerability. *Hydrogeology Journal* 13:752–770. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0318-9>
- Chalikakis K, Mazzilli N, Carrière S, et al (2021) Groundwater Dynamics in Karst Hydrosystem Unsaturated Zone; Evidences from a 2-years SNMR Monitoring. *European Association of Geoscientists & Engineers*, pp 1–5
- Chalikakis K, Plagnes V, Guerin R, et al (2011) Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeol J* 19:1169–1180. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>
- Clark I (2015) *Groundwater geochemistry and isotopes*. CRC press Taylor & Francis Group
- Clément R, Desclotres M, Günther T, et al (2010) Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring. *Waste Management* 30:452–464. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.002>

- Clément R, Descloitres M, Günther T, et al (2009) Influence of shallow infiltration on time-lapse ERT: Experience of advanced interpretation. *Comptes Rendus Geoscience* 341:886–898. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.005>
- Clément R, Oxarango L, Descloitres M (2011) Contribution of 3-D time-lapse ERT to the study of leachate recirculation in a landfill. *Waste Management* 31:457–467. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.005>
- Cornet A (1974) *Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar*. ORSTOM, Antananarivo, Madagascar
- Courbet F, Martin N, Simioni G, et al (2019) Agir sur la sensibilité à la sécheresse par la sylviculture. *Forêt Entreprise* 249:46–48
- Dahlin T (2001) The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences* 27:1019–1029. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(00\)00160-6](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(00)00160-6)
- Dai A (2013) Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3:52–58. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1633>
- Dangar S, Asoka A, Mishra V (2021) Causes and implications of groundwater depletion in India: A review. *Journal of Hydrology* 596:126103
- Darling W, Bath A (1988) A stable isotope study of recharge processes in the English Chalk. *Journal of Hydrology* 101:31–46. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90026-1)
- Dawson TE (1993) Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia* 95:565–574
- de Vries JJ, Simmers I (2002) Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* 10:5–17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>
- Ding Y, Nie Y, Schwinning S, et al (2018) A novel approach for estimating groundwater use by plants in rock-dominated habitats. *Journal of hydrology* 565:760–769
- Diochon A, Kellman L, Beltrami H (2009) Looking deeper: An investigation of soil carbon losses following harvesting from a managed northeastern red spruce (*Picea rubens* Sarg.) forest chronosequence. *Forest Ecology and Management* 257:413–420
- Dobrin MB, Van Nostrand RG (1956) Review of current developments in exploration geophysics. *Geophysics* 21:142–155
- Döll P, Fiedler K (2008) Global-scale modeling of groundwater recharge
- Doolittle J, Sudduth K, Kitchen N, Indorante S (1994) Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. *Journal of Soil and Water Conservation* 49:572–575
- Doussan C, Ruy S (2009) Prediction of unsaturated soil hydraulic conductivity with electrical conductivity. *Water Resources Research* 45:. <https://doi.org/10.1029/2008wr007309>

- Dufrène E, Davi H, François C, et al (2005) Modelling carbon and water cycles in a beech forest: Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. *Ecological Modelling* 185:407–436. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.004>
- Eagleson PS (1982) Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems: 1. Theory and hypothesis. *Water Resources Research* 18:325–340. <https://doi.org/doi.org/10.1029/WR018i002p00325>
- Eagleson PS, Tellers TE (1982) Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems: 2. Tests and applications. *Water Resources Research* 18:341–354
- ECHO D (2021) Note d'orientation - Préparation aux catastrophes
- Ehleringer J, Dawson T (1992) Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment* 15:1073–1082
- Ehleringer J, Osmond C (1989) Stable isotopes. In: *Plant physiological ecology: field techniques and instrumentation*, Chapman&Hall. Pearcy RW, Ehleringer JR, Mooney HA, Rundel PW, London, UK, pp 281–300
- Fan J, Scheuermann A, Guyot A, et al (2015) Quantifying spatiotemporal dynamics of root-zone soil water in a mixed forest on subtropical coastal sand dune using surface ERT and spatial TDR. *Journal of Hydrology* 523:475–488
- FEWS NET (2023) Famine Early Warning System Network - Madagascar. In: FEWS NET. <https://fews.net/fr/southern-africa/madagascar>. Accessed 12 Oct 2023
- Filippini M, Stumpp C, Nijenhuis I, et al (2015) Evaluation of aquifer recharge and vulnerability in an alluvial lowland using environmental tracers. *Journal of Hydrology* 529:1657–1668. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.055>
- Fisher JB, Melton F, Middleton E, et al (2017) The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research* 53:2618–2626
- Fontes JC, Matray J-M (1993) Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts. *Chemical Geology* 109:149–175
- Garré S, Hyndman D, Mary B, Werban U (2021) Geophysics conquering new territories: The rise of “agrogeophysics.” *Vadose Zone Journal* e20115
- Garry B, Blondel T, Emblanch C, et al (2008) Contribution of artificial galleries to the knowledge of karstic system behaviour in addition to natural cavern data. *Int J Speleol* 37:75–82
- Gehne M, Hamill TM, Kiladis GN, Trenberth KE (2016) Comparison of Global Precipitation Estimates across a Range of Temporal and Spatial Scales. *Journal of Climate* 29:7773–7795. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0618.1>
- George R, Nulsen R, Ferdowsian R, Raper G (1999) Interactions between trees and groundwaters in recharge and discharge areas—A survey of Western Australian sites. *Agricultural water management* 39:91–113

- Granier A, Bréda N, Biron P, Villette S (1999) A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological modelling* 116:269–283. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00205-1)
- Guérin R (2005) Borehole and surface-based hydrogeophysics. *Hydrogeology Journal* 13:251–254. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0415-4>
- Guillemot J, Francois C, Hmimina G, et al (2017) Environmental control of carbon allocation matters for modelling forest growth. *New Phytologist* 214:180–193. <https://doi.org/10.1111/nph.14320>
- Guyot L (2002) Reconnaissance hydrogéologique pour l'alimentation en eau d'une plaine littorale en milieu semi-aride : Sud-Ouest de Madagascar. Université de Nantes
- Hatherly P (2013) Overview on the application of geophysics in coal mining. *International Journal of Coal Geology* 114:74–84
- Henderson R (1992) Urban geophysics? a review. *Exploration Geophysics* 23:531–542
- Howard G, Bartram J, Pedley S, et al (2006) Groundwater and public health. Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking-water sources IWA Publishing, London, United Kingdom 3–19
- Hubbard S, Linde N (2011) Hydrogeophysics. p 34
- IAEA (2014) IAEA/GNIP precipitation sampling guide. [http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip\\_manual\\_v2.02\\_en\\_hq.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_en_hq.pdf). Accessed 23 Jan 2019
- Jayawickreme DH, Jobbágy EG, Jackson RB (2014) Geophysical subsurface imaging for ecological applications. *New Phytologist* 201:1170–1175
- Jayawickreme DH, Van Dam RL, Hyndman DW (2010) Hydrological consequences of land-cover change: Quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity. *Geophysics* 75:WA43–WA50
- Jensen ME, Burman RD, Allen RG (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE
- Jongmans D, Garambois S (2007) Geophysical investigation of landslides: a review. *Bulletin de la Société géologique de France* 178:101–112
- Jougnot D, Roubinet D, Guarracino L, Mainault A (2020) Modeling streaming potential in porous and fractured media, description and benefits of the effective excess charge density approach. *Advances in modeling and interpretation in near surface geophysics* 61–96
- Karche J-P (1961) Contribution a l'étude géologique et hydrogéologique du plateau calcaire Mahafaly et aperçu sur l'hydrogéologie de Madagascar. Université de Paris
- Kirilenko AP, Sedjo RA (2007) Climate change impacts on forestry. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104:19697–19702
- Kneisel C, Hauck C, Fortier R, Moorman B (2008) Advances in geophysical methods for permafrost investigations. *Permafrost and periglacial processes* 19:157–178

- Lazzarini A, Ratsimbazafy S (2013) Programme de prévention de la malnutrition dans cinq communes du district de Betioky Atsimo, Région Atsimo Andrefana - Volet "Eau, Assainissement et Hygiène" - Rapport d'enquête CAP initiale. ACF Madagascar, Antananarivo
- Leduc C, Ben Ammar S, Favreau G, et al (2007) Impacts of hydrological changes in the Mediterranean zone: environmental modifications and rural development in the Merguellil catchment, central Tunisia. *Hydrological Sciences Journal* 52:1162–1178
- Léonide P, Fournier F, Reijmer JGG, et al (2014) Diagenetic patterns and pore space distribution along a platform to outer-shelf transect (Urgonian limestone, Barremian–Aptian, SE France). *Sedimentary Geology* 306:1–23. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.03.001>
- Loiseau B, Carrière SD, Jougnot D, et al (2023) The geophysical toolbox applied to forest ecosystems—A review. *Science of the Total Environment* 165503. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165503>
- Losso A, Sailer J, Bär A, et al (2020) Insights into trunks of *Pinus cembra* L.: analyses of hydraulics via electrical resistivity tomography. *Trees* 34:999–1008
- Mares R, Barnard HR, Mao D, et al (2016) Examining diel patterns of soil and xylem moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology* 536:327–338
- Martín-Gómez P, Barbeta A, Voltas J, et al (2015) Isotope-ratio infrared spectroscopy: a reliable tool for the investigation of plant-water sources? *New Phytologist* 207:914–927
- Mary B (2015) Développement de l'imagerie des systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques en remblai par tomographie électrique et acoustique. Université d'Aix-Marseille
- Masse J-P, Fenerci-Masse M (2013) Stratigraphic updating and correlation of Late Barremian–Early Aptian Urgonian successions and their marly cover, in their type region (Orgon-Apt, SE France). *Cretaceous Research* 39:17–28. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2012.05.001>
- Métivier F, Rakoto N, Carrière SD, et al (2022) Soutenir l'apprentissage et les formations sur l'eau à Madagascar (SAFE-M). Paris
- Meyer MD, North MP, Gray AN, Zald HS (2007) Influence of soil thickness on stand characteristics in a Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Plant and Soil* 294:113–123
- Michot D, Benderitter Y, Dorigny A, et al (2003) Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research* 39:. <https://doi.org/10.1029/2002wr001581>
- Müller J, Bolte A (2009) The use of lysimeters in forest hydrology research in north-east Germany. *Landbauforschung (vTI Agric For Res)* 59:1–10
- Nakalembe C, Becker-Reshef I, Bonifacio R, et al (2021) A review of satellite-based global agricultural monitoring systems available for Africa. *Global Food Security* 29:100543. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100543>

- Nie Y, Chen H, Wang K, Yang J (2012) Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in karst region of Southwest China. *Journal of Hydrology* 420:264–274
- Nosetto MD, Jobbágy E, Brizuela AB, Jackson R (2012) The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154:2–11
- Nourtier M, Chanzy A, Cailleret M, et al (2014) Transpiration of silver Fir (*Abies alba* mill.) during and after drought in relation to soil properties in a Mediterranean mountain area. *Annals of forest science* 71:683–695
- Nowreen S, Taylor R, Shamsudduha M, et al (2020) Groundwater recharge processes in an Asian mega-delta: hydrometric evidence from Bangladesh. *Hydrogeology Journal* 28:2917–2932
- Oki T, Kanae S (2006) Global hydrological cycles and world water resources. *science* 313:1068–1072
- Ollivier C (2019) Caractérisation et spatialisation de la recharge des hydrosystèmes karstiques : Application à l'aquifère de Fontaine de Vaucluse, France. Avignon Université
- Ollivier C, Mazzilli N, Oliosio A, et al (2020) Karst recharge-discharge semi distributed model to assess spatial variability of flows. *Science of the Total Environment* 703:134368
- Ollivier C, Oliosio A, Carrière SD, et al (2021) An evapotranspiration model driven by remote sensing data for assessing groundwater resource in karst watershed. *Science of the Total Environment* 781:146706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146706>
- Ollivier CC, Carrière SD, Heath T, et al (2023) Ensemble precipitation estimates based on an assessment of 21 gridded precipitation datasets to improve precipitation estimations across Madagascar. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 47:101400. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101400>
- Phillips SL, Ehleringer JR (1995) Limited uptake of summer precipitation by bigtooth maple (*Acer grandidentatum* Nutt) and Gambel's oak (*Quereus gambelii* Nutt). *Trees* 9:214–219
- Pilla G, Sacchi E, Zuppi G, et al (2006) Hydrochemistry and isotope geochemistry as tools for groundwater hydrodynamic investigation in multilayer aquifers: a case study from Lomellina, Po plain, South-Western Lombardy, Italy. *Hydrogeol J* 14:795–808. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0465-2>
- Pivovarov AL, Pasquini SC, De Guzman ME, et al (2016) Multiple strategies for drought survival among woody plant species. *Functional Ecology* 30:517–526
- Preisler Y, Tatarinov F, Grünzweig JM, et al (2019) Mortality versus survival in drought-affected Aleppo pine forest depends on the extent of rock cover and soil stoniness. *Functional Ecology* 33:901–912. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13302>
- Puig JM (1989) Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
- Querejeta JI, Estrada-Medina H, Allen MF, Jiménez-Osornio JJ (2007) Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate. *Oecologia* 152:26–36

- Revil A, Jardani A (2013) *The self-potential method: Theory and applications in environmental geosciences*. Cambridge University Press
- Robinson DA, Binley A, Crook N, et al (2008) Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods. *Hydrological Processes* 22:3604–3635. <https://doi.org/10.1002/hyp.6963>
- Rodríguez-Robles U, Arredondo T, Huber-Sannwald E, et al (2017) Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. *Biogeosciences* 14:5343
- Romero-Ruiz A, Linde N, Keller T, Or D (2018) A review of geophysical methods for soil structure characterization. *Reviews of Geophysics* 56:672–697
- Roujean J-L, Bhattacharya B, Gamet P, et al (2021) TRISHNA: an Indo-French space mission to study the thermography of the earth at fine spatio-temporal resolution. *IEEE*, pp 49–52
- Ruffault J, Pimont F, Cochard H, et al (2022) SurEau-Ecos v2. 0: a trait-based plant hydraulics model for simulations of plant water status and drought-induced mortality at the ecosystem level. *Geoscientific Model Development* 15:5593–5626. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5593-2022>
- Rutter A, Fourt D (1965) Studies in the Water Relations of *Pinus sylvestris* in Plantation Conditions. III. A Comparison of Soil Water Changes and Estimates of Total Evaporation on Four Afforested Sites and One Grass-Covered Site. *Journal of Applied Ecology* 197–209
- Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, et al (2005) Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research* 83:173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Satgé F, Pillot B, Roig H, Bonnet M-P (2021) Are gridded precipitation datasets a good option for streamflow simulation across the Juruá river basin, Amazon? *Journal of Hydrology* 602:126773
- Scanlon BR, Reedy RC, Stonestrom DA, et al (2005) Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology* 11:1577–1593. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01026.x>
- Segeer M, Guérin R, Frison A, et al (2014) A 3D electrical resistivity tomography survey to characterise the structure of a albeluvic tonguing horizon composed of distinct elementary pedological volumes. *Geoderma* 219:168–176
- Semenza JC (2020) Cascading risks of waterborne diseases from climate change. *Nature immunology* 21:484–487. <https://doi.org/10.1038/s41590-020-0631-7>
- Serele C, Pérez-Hoyos A, Kayitakire F (2020) Mapping of groundwater potential zones in the drought-prone areas of south Madagascar using geospatial techniques. *Geoscience Frontiers* 11:1403–1413
- Sphere (2015) *The Sphere Project : Humanitarian charter and minimum standards in disaster response*. Oxfam, Geneva, Switzerland
- Srayeddin I, Doussan C (2009) Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. *Plant and Soil* 319:185–207. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9860-5>

- Sun Q, Miao C, Duan Q, et al (2018) A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Reviews of Geophysics* 56:79–107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
- Taylor RG, Scanlon B, Doll P, et al (2013) Ground water and climate change. *Nature Clim Change* 3:322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Verstraeten WW, Veroustraete F, Feyen J (2008) Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation. *Sensors* 8:70–117
- Vouillamoz JM, Sokheng S, Bruyere O, et al (2012) Towards a better estimate of storage properties of aquifer with magnetic resonance sounding. *Journal of Hydrology* 458–459:51–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.044>
- West AG, Patrickson SJ, Ehleringer JR (2006) Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20:1317–1321. <https://doi.org/10.1002/rcm.2456>
- World Bank (2023) Poverty headcount ratio at national poverty lines. In: Data World Bank. <https://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.NAHC?end=2019&start=1985>. Accessed 12 Oct 2023
- Wynn JC (1986) Archaeological prospection: an introduction to the special issue. *Geophysics* 51:533–537
- Zomlot Z, Verbeiren B, Huysmans M, Batelaan O (2017) Trajectory analysis of land use and land cover maps to improve spatial–temporal patterns, and impact assessment on groundwater recharge. *Journal of Hydrology* 554:558–569. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.032>

## Chapitre II : Synthèse des valorisations scientifiques

Articles de rang A (ACL) : (chercheur encadré souligné)

Loiseau B., **Carrière S.D.**, Jougnot D., Singha K., Mary B., Delpierre N., Guérin R., Martin-StPaul N. 2023. The geophysical toolbox applied to forest ecosystems—A review. *Science of the Total Environment*, 165503. doi: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165503

**Carrière S.D.**, Rakotomandrindra P.F.M., Heath T., Chalikakis K., Gillon M., Leblanc M., Tweed S. 2023. Water Mixing Process in a Complex Multi-Layer Hydrosystem in Southwestern Madagascar - a Combined Isotopic and Piezometry Approach. *Hydrogeology Journal*, 31, 2337–2346. doi: 10.1007/s10040-023-02731-5.

Ollivier C.C., **Carrière S. D.**, Heath T., Olioso, A., Rabefitia, Z., Rakoto, H., Oudin, L., Satgé, F. 2023 Ensemble precipitation estimates based on an assessment of 21 gridded precipitation datasets to improve precipitation estimations across Madagascar. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 47:101400. doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101400

**Carrière, S. D.**, & Chalikakis, K. 2022. Hydrogeophysical monitoring of intense rainfall infiltration in the karst critical zone; a unique electrical resistivity tomography data set. *Data in Brief*, 107762. doi: 10.1016/j.dib.2021.107762.

**Carrière S.D.**, Martin-StPaul N. K., Doussan C., Courbet F., Davi H., Simioni G. 2021. Electromagnetic Induction Is a Fast and Non-Destructive Approach to Estimate the Influence of Subsurface Heterogeneity on Forest Canopy Structure. *Water* 13 (22), 3218. doi: 10.3390/w13223218.

**Carrière S. D.**, Loiseau B., Champollion C., Ollivier C., Martin-StPaul N. K., Lesparre N., Olioso A., Hinderer J., Jougnot D. 2021. First evidence of correlation between Evapotranspiration and Gravity at a daily time scale from two vertically spaced superconducting gravimeters, *Geophysical Research Letters*, e2021GL096579, doi: 10.1029/2021GL096579.

Moreno M., Simioni G., Cailleret M., Ruffault J., Badel E., **Carrière S. D.**, Davi H., Gavinet J., Huc R., Limousin J.M., Marloie O., Martin L., Rodríguez-Calcerrada J., Vennetier M., Martin-StPaul N. 2021. Consistently lower sap velocity and growth over nine years of rainfall exclusion in a Mediterranean mixed pine-oak forest. *Agricultural Forest Meteorology*. 308-309, 108472. doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108472

**Carrière S. D.**, Heath T., Rakotomandrindra P. F. M., Ollivier C., Rajaomahefasoa R. E., Chalikakis K., Razakamanana T., Mangin M., Olioso A., Kempf J., Rakoto H. A., Lapègue J. 2021. Long-term groundwater resource observatory for Southwestern Madagascar. *Hydrological Processes*. doi: 10.1002/hyp.14108.

Ollivier, C., Olioso, A., **Carrière, S. D.**, Boulet, G., Chalikakis, K., Chanzy, A., Charlier J.-B., Combemale D., Davi H., Emblanch C., Marloie O., Martin-StPaul N., Mazzilli N., Simioni G., Weiss M. 2021. An evapotranspiration model driven by remote sensing data for assessing groundwater resource in karst watershed. *Science of the Total Environment*, 781, 146706. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146706.

Mazzilli N., Chalikakis K., **Carrière S. D.**, Legchenko A. 2020. Surface Nuclear Magnetic Resonance monitoring reveals karst unsaturated zone recharge dynamics during a rain event. *Water*, 12 (11), 3183. doi: 10.3390/w12113183

**Carrière, S.D.**, Ruffault, J., Cakpo, C.B., Olioso, A., Doussan, C., Simioni, G., Chalikakis, K., Patris, N., Davi, H., Martin-St-Paul, N.K., 2020. Intra-specific variability in deep water extraction between trees growing on a Mediterranean karst. *Journal of Hydrology* 125428. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125428.

- Carrière, S. D.**, Martin St-Paul, N. K., Cakpo B.C., Patris N., Gillon M., Chalikakis K., Doussan C., Oliosio A., Babic M., Jouineau A., Simioni G., Davi H. 2020. Tree xylem water isotope analysis by Isotope Ratio Mass Spectrometry and Laser Spectroscopy: a dataset to explore drought response. *Data in Brief*, 105349, doi: 10.1016/j.dib.2020.105349.
- Carrière, S. D.**, Martin St-Paul, N. K., Cakpo B.C., Patris N., Gillon M., Chalikakis K., Doussan C., Oliosio A., Babic M., Jouineau A., Simioni G., Davi H. 2020. The role of deep vadose zone water in tree transpiration during drought periods in karst settings—Insights from isotopic tracing and leaf water potential. *Science of the Total Environment*, 699, 134332, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134332.
- Carrière S. D.**, Martin-StPaul N. K., Ruffault J., Pimont F., Simioni G., Doussan C., Chalikakis K., Limousin J.-M., Scotti I., Courdier F., Cakpo C.B., Davi H. 2020. Impact of local soil and subsoil conditions on inter-individual variations in tree responses to drought: insights from Electrical Resistivity Tomography. *Science of the Total Environment* 698, 134247, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134247.
- Ollivier C., Mazzilli N., Oliosio A., Chalikakis K., **Carrière S.D.**, Danquigny C., Emblanch C. 2020 Karst recharge-discharge semi distributed model to assess spatial variability of flows. *Science of the Total Environment* 773, 134368, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134368.
- Carrière S. D.**, Chalikakis K., Heath T., Mangin M., Kempf J., Ollivier C., Bablon J., Gillon M., Razakamanana T., Lapègue J. 2018. Groundwater resources exploration and sustainable management in Continental Neogene aquifers covered by sand (karst Mahafaly plateau, Madagascar). *Environmental Earth Sciences* 77, 734. doi: 10.1007/s12665-018-7909-1.
- Jourde H., Massei N., Mazzilli N., Binet S., Batiot-Guilhe C., Labat D., Steinmann M., Bailly-Comte V., Seidel J. L., Arfib B., Charlier J.B., Jardani A., Fournier M., Babic M., Bertrand C., Brunet P., Boyer J.F., Bricquet J.P., Camboulive T., **Carriere S.D.**, Celle-Jeanton H., Chalikakis K., Chen N., Cholet C., Dal Soglio L., Danquigny C., Defargue C., Denimal S., Emblanch C., Hernandez F., Gillon M., Guinot V., Gutierrez A., Hery M., Houillon N., Johannet A., Jozja N., Ladouche B., Leonardi V., Lorette G., Loup C., Marchand P., Montety de V., Ollivier C., Sivelles V., Lastennet R., Marechal J.C., Plagnes V., Peyraube N., Pistre S., Perrin J., Probst A., Probst J.L., Simler R., Stefani V., Valdes-Lao D., Viseur S., Wang X. 2018. SNO KARST: a French network of observatories for the multidisciplinary study of critical zone processes in karst watersheds and aquifers. *Vadose Zone J.* 17. doi: 10.2136/vzj2018.04.0094.
- Mallet F., **Carrière S. D.**, Marc V., Chalikakis K. 2018. Mapping the soil water content variations in a torrential environment using Slingram electromagnetic method (Draix field observatory, south Alps, France). *Environmental Earth Sciences*, 77, 507. doi: 10.1007/s12665-018-7687-9.
- Carrière S. D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Torrès-Rondon L. 2017a. Using resistivity and logarithm of resistivity to calculate depth of investigation index to assess reliability of electrical resistivity tomography. *Geophysics*, 82 (5), EN93-EN98. doi: 10.1190/GEO2016-0244.1.
- Carrière S. D.**, Danquigny C., Davi H., Chalikakis K., Ollivier C., Martin-StPaul N. K., Emblanch C. 2017b. Process based vegetation models improve karst recharge simulation under Mediterranean forest. *EuroKarst 2016*, Neuchâtel, Springer: 109-116. doi: 10.1007/978-3-319-45465-8\_12.
- Carrière S. D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Davi H., Ollivier C., Mazzilli N., Emblanch C. 2016. The role of porous matrix in water flow regulation within a karst unsaturated zone: an integrated hydrogeophysical approach. *Hydrogeology J.*, 24(7), 1905. doi: 10.1007/s10040-016-1425-8.
- Carrière S. D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Clément R., Emblanch C., 2015. Feasibility and limits of electrical resistivity tomography to monitor water infiltration through karst medium during a rainy event. In *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. B. Andreo, F. Carrasco, J. J. Durán,

P. Jiménez and J. W. LaMoreaux, Springer Berlin Heidelberg. 1: 45-55. doi: 10.1007/978-3-642-17435-3\_6.

César, E., Wildemeersch S., Orban P., **Carrière S.**, Brouyère S., Dassargues A., 2014. Simulation of spatial and temporal trends in nitrate concentrations at the regional scale in the Upper Dyle basin, Belgium, *Hydrogeol. J.*, 22(5), 1087-1100, doi: 10.1007/s10040-014-1124-2.

**Carrière S. D.**, Chalikakis K., Sénéchal G., Danquigny C., Emblanch C., 2013. Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. *Journal of Applied Geophysics*, 94, 31-41, doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.03.014.

Torrès-Rondon L., **Carrière S. D.**, Chalikakis K., Vallès V., 2013. An integrative geological and geophysical approach to characterize a superficial deltaic aquifer in the Camargue Plain, France. *Comptes Rendus Geoscience*, 345 (5-6), 251-250, doi: 10.1016/j.crte.2013.07.002.

#### Articles de vulgarisation scientifique :

**Carrière S. D.**, Danquigny C., Courdier F., Mariotte N., Chalikakis K., Davi H., Ollivier C., Martin-StPaul N. K., Boyer D., Emblanch C., 2015. Étude de la recharge des hydrosystèmes karstiques à l'échelle de la parcelle: modélisation et analyse de corrélation-Site du Laboratoire souterrain à bas bruit de Rustrel. *Carnet scientifique du Parc Naturel Régional du Luberon*, n°13, p. 72-82.

**Carrière S. D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Emblanch C., Chapelet A., 2012. Caractérisation hydrogéophysique de la zone non saturée du karst. Application de la tomographie électrique au droit du LSBB. *Etudes Vauclusiennes*, n° 79. ISSN 0153-9221, p. 28-33.

#### Conférences internationales (ACT):

Decarsin R., Guillemot J., Le Maire G., Scherer-Lorenzen M., Hajek P., Bauhus J., Serrano-León H., Rewald B., Werner R., Ponette Q., Bonal D., Grossiord C., Delzon S., Corso D., Meredieu C., Jacte H., Cochard H., Torres-Ruiz J., Mereu S., **Carrière S.D.**, Loiseau B., Martin-StPaul N. 2024. Assessing tree diversity effect on tree resistance to drought through hydraulic safety margins. International Union of Forest Research Organizations 23-29 June, Stockholm, Sweden.

Loiseau B., **Carrière S.D.**, Jougnot D., Singha K., Mary B., Delpierre D., Guérin R., Martin-StPaul N.K. 2023. Utilisation de la géophysique de proche-surface pour étudier les écosystèmes forestiers. 13<sup>ème</sup> Colloque GEOFCAN, 7 et 8 novembre 2023, Strasbourg, France.

Lesparre N., Hernandez A., Bonal D., **Carrière S.D.**, Koffi H., Ackerer P., Marquis G., Jouniaux L., Jougnot D., Belfort B., Matthey P-D. 2023. Measuring electrical potential in a spruce forest to observe the water exchanges in the subsurface-vegetation-atmosphere continuum. 2<sup>nd</sup> OZCAR-TERENO Conference, 25-28 September, Bonn, Germany.

Pasquet S., Ayrat P-A., Bodet L., Bouchez J., **Carrière S.D.**, Champollion C., Delarue F., Durand L., Druhan J., Gayer E., Guérin R., Guertin A., Jougnot D., Laden A., Lucas A., Quénéa K., Reina C., Thiesson J., Vasconez M., Wendling V. 2023. Using light-weight and autonomous nodal arrays to improve seismic data collection capabilities in steep and rugged-terrain critical zone observatories. 2<sup>nd</sup> OZCAR-TERENO Conference, 25-28 September, Bonn, Germany.

Oliosio A., Desrutins H., **Carrière S.D.**, Sobrino J.A., Skoković D., Allies A., Demarty J., Etchanchu J., Buis S., Weiss M., Boulet G. 2023. Uncertainty in evapotranspiration mapping from thermal infrared remote sensing data. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 16-21 July, Pasadena, California.

- Loiseau B., **Carrière S.D.**, Champollion C., Ollivier C., Lesparre N., Martin-StPaul N., Oliosio A., Hinderer J., Jougnot D. 2022. Monitoring the water stock in karst vadose zone using two vertically distributed superconducting gravimeters help to quantify evapotranspiration at daily time scale. Eurokarst, 22-25 June, Malaga, Spain.
- Oliosio A., **Carrière S.D.**, Allies A., Desrutin H., Sobrino J.A., Skoković D., Demarty J., Boulet G., Weiss M., Buis S., 2022. Evapotranspiration mapping from remote sensing data: uncertainties and ensemble estimates based on multimodel – multidata simulations. 6th International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. 19 – 23 September, Valencia, Spain.
- Ollivier C.C., **Carrière S.D.**, Heath T., Oliosio A., Oudin L., Satgé F. 2022. Assessment of 21 gridded precipitation datasets quality in estimating rainfall in Madagascar. IAHS-AISH Scientific Assembly 2022, 30 May – 03 June, Montpellier, France. (*poster*)
- Loiseau B., **Carrière S.D.**, Champollion C., Ollivier C., Martin-StPaul N., Lesparre N., Oliosio A., Hinderer J., Jougnot D. 2022. Analysis influence of evapotranspiration on superconducting gravity signal at daily time step. IAHS-AISH Scientific Assembly 2022, 30 May – 03 June, Montpellier, France. (*poster*)
- Oliosio A., **Carrière S.D.**, Gamet P., Delogu E., Weiss M., Guillevic P., Boulet G. 2022. Improving continuous monitoring of evapotranspiration with future thermal infrared missions. IAHS-AISH Scientific Assembly 2022, 30 May – 03 June, Montpellier, France.
- Carrière S.D.**, Rakotomandrindra P.F.M., Health T., Rakotondrabe F., Rajaomahefasoa R.E., Rakoto H.A., Rakotojoelimaria R.H., Mangin M., Ollivier C., Kempf J., Razakamanana T., Chalikakis K., Koslengar M., Riems B. 2022. Groundwater Resource Observatory for Southwestern Madagascar (GROSoM): a tool for research. International Conference “Groundwater, key to the Sustainable Development Goals”. May 18-20th, 2022. Paris, France.
- Métivier F., Rakoto N., **Carrière S.D.**, Rahobisoa J.J., Rakoto H., Rasolofonaina J.D., Ralijanona T., Manamiaro M.J., Randriamaherisoa A., Cannou Specht M., Sarazin G., Plagnes V., Jost A., Quiblier C., Humbert J.F., Van Hullebusch E., Richard D., Renaud B., Taddei F. 2022. Soutenir l’apprentissage et les formations sur l’eau à Madagascar (SAFE-M) International Conference “Groundwater, key to the Sustainable Development Goals”. May 18-20th, 2022. Paris, France.
- Jougnot D., Loiseau B., **Carrière S.D.**, Champollion C., Voytek E., Lesparre N. 2022. In situ monitoring of rain infiltration and evapotranspiration in the critical zone using self-potentials. EGU22, 23–27 May 2022, Vienna, Austria.
- Patlan-Hernandez A. R., **Carrière S.D.**, Ngabirano L., Nassur A. M., Heath T., Lapègue J., N’Diaye D. 2021. Linking hydro-climatic and health indicators to improve the early warning system (EWS) in Southern Madagascar. Conference: Emergency Environmental Health Forum, May 24-28, Online Conference.
- Chalikakis, K., Mazzilli, N., **Carrière, S.D.**, Massonnat, G., Danquigny, C., & Legchenko, A. 2021. Groundwater Dynamics in Karst Hydrosystem Unsaturated Zone; Evidences from a 2-years SNMR Monitoring (Vol. 2021, pp. 1–5). Presented at the NSG2021 1st Conference on Hydrogeophysics, European Association of Geoscientists & Engineers. doi: 10.3997/2214-4609.20212009.
- Loiseau, B., **Carrière, S.D.**, Champollion, C., Ollivier, C., Lesparre, N., Martin-StPaul, N., Oliosio, A., Hinderer, J., Jougnot, D. 2021. Linking evapotranspiration from gravity variations using two vertically distributed superconducting gravimeters at daily time scale, 1st OZCAR-TERENO Conference, October 5-7 2021, Strasbourg, France.
- Jougnot, D., Voytek, E., Loiseau, B., **Carrière, S.D.**, Champollion, C., Lesparre, N., Mainault, A. 2021. Monitoring water flow in the critical zone using self-potentials: toward the quantification of rain

- infiltration and evapotranspiration, 1st OZCAR-TERENO Conference, October 5-7 2021, Strasbourg, France.
- Carrière S.D.**, Ruffault J., Cakpo C.B., Doussan C., Simioni G., Oliosio A., Chalikakis K., Patris N., Davi H., Martin-StPaul N.K. 2021. Utilisation de la géophysique pour explorer les mécanismes de résilience des arbres à la sécheresse. 12ème Colloque GEOFCAN - 9 et 10 mars 2021, Grenoble, France.
- Carrière, S.D.**, Ruffault, J., Cakpo, C.B., Oliosio, A., Doussan, C., Simioni, G., Chalikakis, K., Patris, N., Courdier F., Jouineau A., Mariotte N., Brunetto W., Ambrosio O., Davi, H., MartinSt-Paul, N.K., 2020. Tree drought resilience through groundwater use. AGU 2020. Virtual conference (**Invited speaker**).
- Oliosio A., **Carrière S.D.**, Weiss M., Guillevic P. (2020). Improving Evapotranspiration Continuous Monitoring with a Future Thermal Infrared Mission. Earth Observation for Water Cycle Science Conference 2020. Virtual conference.
- Patlan-Hernandez A. R., Heath T., Nassur A. M., Lapègue J., **Carrière S.D.**, N’Diaye D. 2020. Linking hydro-climatic data and nutritional status to improve the early warning system (EWS) in Southern Madagascar. MSF Operational Research day 2020 (5 June), Brussels, Belgium.
- Oliosio A., **Carrière S.D.**, Weiss M., Guillevic P., 2020. A preliminary assessment of the sensitivity of evapotranspiration estimation to the revisit of a future thermal infrared mission. IGARSS 2020 (19-24 July), Waikoloa, Hawaiï, USA.
- Carrière S.D.**, Heath T., Chalikakis K., N’diaye D., Rajaomahefasoa R. E., Riems B., Razakamanana T., Rakotomandrindra P. F. M., Mangin M., Ollivier C., Oliosio A., Kempf J., Rakoto H. A., Lapègue J. 2019. Hydroclimatic monitoring in chronic humanitarian crisis area - southwestern Madagascar. UNC Water and Health 2019 (7-11 October), Chapel Hill, North Carolina, USA. (*poster*)
- Oliosio A., Ollivier C., Martin-StPaul N. K., Simioni S., Weiss M., Guillevic P. C., Marloie O., **Carriere S.D.**, Davi H., Huard F. (2019). Monitoring vegetation fraction cover of french mediterranean forests for evapotranspiration and water stress mapping. ESA Living Planet Symposium 2019 (13-17 May), Milan, Italy.
- Carrière S.D.**, Capko C. B., Martin-StPaul N., Patris N., Babic M., Chalikakis K., Oliosio A., Doussan C., Jouineau A., Simioni G., Davi H. 2019. Water isotope monitoring to study transpiration and tree drought responses on Mediterranean karst. 46th IAH international congress (22-27 September), Malaga, Spain.
- Mazzilli N., Chalikakis K., Emblanch C., **Carrière S.D.**, Ollivier C., Berthelin R., Danquigny C., Babic M., Simler R., Leblanc M., Blanc M., Massonat G. 2019. Hydrogeological and hydrogeophysical insights into karst aquifer unsaturated zone. Challenges and limits. 46th IAH international congress (22-27 September), Malaga, Spain.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Heath T., Mangin M., Kempf J., Ollivier C., Bablon J., Gillon M., Razakamanana T., Lapègue J. 2018. New hydro-climatic observatory in a hotspot of global change – Mahafaly plateau southwestern of Madagascar. Observatories of the critical zone in Africa: current issues and findings, Niamey, Niger.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Heath T., Mangin M., Kempf J., Ollivier C., Bablon J., Gillon M., Razakamanana T., Lapègue J. 2018. Groundwater resources exploration and sustainable management in discontinuous continental Neogene relying on a karst plateau (Mahafaly-SW Madagascar), Eurokarst 2018 (2-4 July), Besançon, France.
- Carrière S.D.**, Martin StPaul N.K., Limousin J.M., Doussan D., Marloie O., Ourcival J.M., Davi H., Gauquelin T., Reither I., Simioni G. 2017. Using electric resistivity tomography as a proxy for the total water

- ressource available to Mediterranean forests. Functional Ecology AnaEE France Conference (28-31 March), La Grande Motte, France.
- Davi H., **Carrière S.D.**, Martin-StPaul N. K., Ruffault J., Chalikakis K. 2017. Expliquer les variations de réponse inter-individuelles des arbres face à la sécheresse. 41ème Journées Scientifique du GFHN (23-25 January), St Michel l'Observatoire, France.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Guibert N., Lellouche K., Mangin M., Kempf J., Lapegue J., 2016. An integrated hydrogeophysical approach for karst water assessment and management in humanitarian context - Mahafaly Plateau in Madagascar. 43rd IAH international congress (25-29 September), Montpellier, France. (*poster*)
- Mallet F., **Carrière S.D.**, Marc V., Chalikakis K., 2016. Mapping the soil water content variations in a torrential environment using Slingram electromagnetic technique (EM31). 43rd IAH international congress (25-29 September), Montpellier, France. (*poster*)
- Carrière S.D.**, Danquigny C., Davi H., Chalikakis K., Ollivier C., Martin-StPaul N. K., Emblanch C. 2016. Process based vegetation models improve karst recharge simulation under Mediterranean forest. Eurokarst 2016 (5-7 September), Neuchâtel, Suisse.
- Sénéchal G., Rousset D., **Carrière S.D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Emblanch C., 2014. Imaging the LSBB environment from GPR data, along the tunnel and from the surface. In I-Dust 2014 - Inter-Disciplinary Underground Science & Technology, edited by P. Febvre, E. Pozzo di Borgo and K. Coulié-Castellani, 4, Apt, France.
- Sénéchal G., Chalikakis K., **Carrière S.D.**, Zeyen H., Danquigny C., Emblanch C., 2014. Geophysical investigations at the LSBB. In I-Dust 2014 - Inter-Disciplinary Underground Science & Technology, edited by P. Febvre, E. Pozzo di Borgo and K. Coulié-Castellani, 4, Apt, France.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Clément R., Emblanch C., 2014. Feasibility and limits of Electrical Resistivity Tomography (ERT) to monitor water infiltration through karst medium during rainy event. V International symposium on karst (13-16 October), Malaga, Espagne.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Torrès-Rondon L., 2014. How calculate DOI index to assess inverted ERT model? Near Surf. Geosc. (15-17 September), Athènes, Grèce.
- Chalikakis K., **Carrière S.D.**, Mazzilli N., Danquigny C., Legchenko A., Emblanch C., 2014. Water in karst hydrosystems unsaturated zone; MRS evidences within an integrated hydrogeophysical approach. Near Surf. Geosc. (15-17 September), Athènes, Grèce.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Emblanch C., 2014. Hydrogeophysical study of structure and functioning of the karst unsaturated zone, I-DUST Conference (5-7 May), Apt, France.
- Ollivier C., **Carrière S.D.**, Danquigny C., Chalikakis K., 2013. Improving a 3D geological model using multiple geophysical methods. GOCAD Meeting (17-20 September), Nancy, France.
- Sénéchal G., **Carrière S.D.**, Chalikakis, K., 2012. Deep GPR investigations on a karstic zone. AGU Fall Meeting (3-7 December), San Francisco, USA.
- Mazzilli N., Boucher M., Chalikakis K., Legchenko A., Jourde H., **Carrière S.D.**, Guyard H., Chevallier A., 2012. Field evidence of water storage changes in the unsaturated zone of karst using MRS. 5th Conference on Magnetic Resonance in the subsurface (25-27 September), Hannover, Allemagne.

**Carrière S.D.**, Chalikakis K., Sénéchal G., Danquigny C., Emblanch C., 2012. Coupling Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to image karst near surface features. What contribution to hydrogeological studies? LSBB, Rustrel, France. Near Surf. Geosc. (3-5 September), Paris, France.

Mazzilli N., Chalikakis K., Boucher M., Legchenko A., Jourde H., Guyard H., Chevallier A., **Carrière S.D.**, 2012. MRS applicability for the characterisation of the unsaturated zone of karst hydrosystems. Near Surf. Geosc. (3-5 September), Paris, France.

Mazzilli N., **Carrière S.D.**, Chalikakis K., Legchenko A., Jourde H., 2012. MRS applicability for the characterisation of the unsaturated zone of karst hydrosystems. First results from the LSBB site (Rustrel, France), I-DUST Conference (9-11 May), Apt, France.

**Carrière S.D.**, Sénéchal G., Chalikakis K., Danquigny C., Emblanch C., 2012. Coupling Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study karst Unsaturated Zone – First results. LSBB Rustrel, France, I-DUST Conference (9-11 May), Apt, France.

Workshop et autres conférences:

Rakotomandrindra P.F.M., Ramonjison T., Heath T., **Carrière S.D.** 2023. Observatoire GROSoM - Groundwater Resource Observatory for Southwestern Madagascar. Workshop RANOMANGA (feb. 2023), Antananarivo, Madagascar.

**Carrière S.D.**, Ruffault J., Cakpo C.B., Olioso A., Doussan C., Simioni G., Chalikakis K., Patris N., Courdier F., Jouineau A., Mariotte N., Brunetto W., Ambrosio A., Davi H., Martin-StPaul N.K. 2023. Caractérisation isotopique et géophysique de l'utilisation de l'eau profonde par les arbres. Colloque forêt méditerranéenne, Marseille, France.

Olioso A., **Carrière S.D.**, Gamet P., Delogu E., Weiss M., Guillevic P., Demarty J., Etchanchu J., Boulet G. 2023. Improving continuous monitoring of evapotranspiration by combining data from future thermal infrared missions. International Workshop on High-Resolution Thermal EO, 10-12 May, Rome, Italy.

Olioso A., Allies A., Desrutins H., **Carrière S.D.**, Farhani N., Sobrino J., Skoković D., Demarty J., Etchanchu J., Boulet G., Buis S., Weiss M., 2023. Evapotranspiration mapping from remote sensing data: uncertainties and ensemble estimates based on multimodel – multidata simulations. International Workshop on High-Resolution Thermal EO, 10-12 May, Rome, Italy.

Olioso A., **Carrière S.D.**, Allies A., Sobrino J.A., Skoković D., Demarty J., Boulet G., Buis S., Weiss M. 2022. Uncertainty in evapotranspiration mapping from thermal infrared remote sensing data with EVASPA. TRISHNA Days, 22-24 March, Toulouse, France.

Olioso A., **Carrière S.D.**, Gamet P., Delogu E., Weiss M., Guillevic P., Boulet G. 2022. Improving continuous monitoring of evapotranspiration with future thermal infrared missions. TRISHNA Days, 22-24 March, Toulouse, France.

Olioso A., **Carrière S.D.**, Weiss M., Guillevic P., 2020. Improving Evapotranspiration Continuous Monitoring with a future thermal infrared mission. European Spatial Agency workshop: EO for Agriculture under Pressure, 25-29 May, Rome, Italy.

Patlan-Hernandez A. R., N'Diaye D., Heath T., Lapègue J., **Carrière S.D.**, 2019. Investigation the relationship between hydro-climatic data and nutritional status to improve the early warning system (EWS) in Southern Madagascar. R4NUT Conference, 20 November, Nanterre, France.

- Carrière S.D.**, Martin-StPaul N. K., Cakpo C.B., Ruffault J., Oliosio A., Gillon M., Chalikakis K., Simioni G., Doussan C., Patris N., Babic M., Davi H. 2019. La résilience de la végétation face à la sécheresse et son impact la recharge du karst. Workshop SNO Karst, Orléans, France.
- Carrière S.D.**, Martin-StPaul N. K., Ruffault J., Chalikakis K., Davi H. 2016. Tomographie des résistivités électriques du sous-sol: un outil d'évaluation du rôle de l'environnement dans la variabilité interindividuelle (intra-parcelle) des traits de réponse à la sécheresse. Séminaire URFM, INRA, Avignon, France.
- Carrière S.D.**, Martin-StPaul N. K., Babic M., Chalikakis K., Davi H., 2015. Bilan hydrique en contexte forestier méditerranéen, approche par géophysique, traçage isotopique et écophysologie. Conférence EMMAHNIME, Avignon, France.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Clément R., Danquigny C., 2013. Suivi temporel ERT lors d'un épisode pluvieux en milieu karstique. Workshop Equipex CRITEX (9 au 11 juillet), Antony, France.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Sénéchal G., Danquigny C., Emblanch C., 2013. Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone. Hydrogeophysics Workshop, Hornberg, Allemagne.
- Torrès L., **Carrière S.D.**, Chalikakis K., Vallès V., 2013. Application of geophysical methods to identify complex geometry of aquifers in a deltaic context – Camargue Plain, France. Hydrogeophysics Workshop, Hornberg, Allemagne.
- Ollivier C., **Carrière S.D.**, Danquigny C., Chalikakis, 2013. Summarising knowledge on karst unsaturated zone using geomodeling. Hydrogeophysics Workshop, Hornberg, Allemagne.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Emblanch C., 2013. Etude de l'infiltration de l'eau dans la ZNS du karst par monitoring ERT au cours d'un épisode pluvieux. Conférence EMMAHNIME, Avignon, France.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Emblanch C., 2012. Caractérisation hydro-géophysique de la ZNS du karst - Application au bassin versant de Fontaine de Vaucluse – LSBB, Workshop ANR MAXWELL, Saignon, France.
- Carrière S.D.**, Chalikakis K., Danquigny C., Emblanch C., 2012. Apports et limites de plusieurs techniques géophysiques pour la compréhension hydrogéologique de la Zone Non Saturée (Z.N.S.) du karst. Conférence EMMAHNIME, Avignon, France.