

# Influence des propriétés hydrodynamiques du sol sur la sensibilité au dépérissement du cèdre dans le causse moyen-atlasique central marocain

M. AOUBOUAZZA<sup>1</sup>

(Reçu le 16/02/2017; Accepté le 27/02/2017)

## Résumé

Au Maroc, la cédraie connaît un problème de dépérissement parfois généralisé dans certaines régions à cause du déficit hydrique croissant qui y sévit d'année en année. Pour approcher cette question, l'étude s'est basée sur un échantillon restreint de 15 placettes représentatives d'un ensemble de 54 profils de sol. Douze d'entre elles appartenant à la forêt d'Azrou "à faible dépérissement", et les trois autres à la forêt d'Aït Youssi de l'Amekla "à fort dépérissement", ont fait l'objet de suivi et d'analyses de leurs propriétés physiques et hydrodynamiques. Dans les paramètres étudiés, la perméabilité du sol représente l'effet le plus déterminant sur le dépérissement du cèdre, car elle contribue d'une façon significative dans le bilan hydrique du sol. La perméabilité est importante au niveau des sols "bruns" sableux et sableux-limoneux meubles et profonds sur substrats calcaires dolomitiques et basaltiques fissurés, ou alluvionnaires formant d'excellents réservoirs et où le taux de dépérissement du cèdre est faible (5 à 15 %). Elle baisse fortement pour les sols "fersiallitiques" limono-argileux tassés peu à moyennement profonds, sur dalles rocheuses peu fissurées, et le taux de dépérissement du cèdre y est élevée (20 à 50 %). Elle s'annule dans le cas des sols "hydromorphes" argileux compacts superficiels sur calcaires massifs, et le taux de dépérissement du cèdre y est extrême. Dans cette étude, nous mettons en évidence une relation linéaire entre le taux de dépérissement du cèdre et la teneur en argiles des sols.

**Mots clés:** Dépérissement, cèdre, déficit hydrique, perméabilité sol, Maroc.

## Abstract

In Morocco, the cedar forest knows dieback problem sometimes generalized in some areas because of the increasing water deficit that prevails there year after year. To approach this question, the study was based on a small sample of 15 representative plots of 54 soil profiles. Twelve of them belonging to the Azrou forest where dieback is low, and the other three to the Aït Youssi forest of Amekla, with a high cedar dieback, have been subjected to monitoring and analysis of their physical properties and hydrodynamics. In the studied parameters, permeability was the most decisive soil property on dieback of the cedar, as it contributes to significantly to soil water balance. Permeability is high in brown sandy deep soils on calcareous substrate or alluvial soils forming excellent reservoirs where the cedar dieback rate is low (5 -15 %). It decreases sharply through in loamy-clay fersiallitic soil with less cracks, where the cedar dieback rate is high (20-50 %). Permeability is very low in superficial compact hydromorphic clay soil, where no cedar forest is reported. In these topographic depressions, the thick clay is characterized by waterproof hydraulic barriers. In this study, we highlight a significant and positive correlation between the dieback rate of the cedar and clay content of soil. Clay reduces infiltration and generates runoff, which increases the water deficit.

**Key words:** Dieback, cedar, water deficit, soil permeability, soil, Morocco.

## INTRODUCTION

Les forêts jouent un rôle socio-économique et écologique inestimable au niveau mondial (Eastaugh, 2008). Or, une augmentation des symptômes de dépérissement forestier a été constatée depuis un demi-siècle (Allen, 2009). Dans le même temps, le climat est en proie à des changements majeurs (Moisselin *et al.*, 2002; IPCC, 2013).

Au XX<sup>e</sup> siècle, la température moyenne globale à la surface de la terre s'est accrue d'environ 0,6 °C (GIEC, 2001). La poursuite des émissions de gaz à effet de serre au rythme actuel ou à un rythme supérieur provoquerait un réchauffement supplémentaire et entraînerait de nombreuses modifications du système climatique mondial au cours du XXI<sup>e</sup> siècle qui seraient très probablement plus importantes que celles observées au cours du XX<sup>e</sup> siècle (GIEC, 2007).

Les modèles d'évolution du climat, établies par le GIEC (2013), prévoient outre une élévation de la température

moyenne au niveau mondial comprise entre 1,8 et 4,0 °C d'ici la fin du siècle, une plus grande fréquence d'événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les tempêtes. Il en résulte des stress et des dépérissements des forêts liés à la sécheresse et à de fortes températures, comme on l'a observé en Europe depuis la sécheresse et la vague de chaleur de 2003 (Breda *et al.*, 2006) et à l'échelle mondiale par Allen *et al.*, (2010).

Les stress répétés et durables qui en résultent, réduisent le fonctionnement physiologique de l'arbre sur plusieurs mois et années successifs, conduisant graduellement à l'affaiblissement irréversible de l'arbre et finalement à sa mort (Ducrey, 1994). Ils affaiblissent également la résistance des arbres aux agressions d'insectes et d'agents pathogènes (Allen, 2007) et déclenchent de nombreuses grandes attaques d'insectes et de maladies (Raffa *et al.*, 2008).

Ces sécheresses sont d'autant plus graves qu'elles coïncident avec la période la plus active du cèdre (Aussenac, 1981; Aussenac et Finkelstein, 1983). Son adaptation à la

<sup>1</sup> Centre de Recherche Forestière, Service d'Écologie, de Biodiversité et de la Conservation des Sols, Avenue Omar Ibn Khattab, B.P. 763, Rabat-Agdal, 10050. Maroc, E-mail : abouazzayna@gmail.com

sécheresse réside dans sa bonne croissance radiaire et sa capacité à prospecter le sol en profondeur (Breda *et al.*, 1992; Ducrey, 1994).

Dans une étude sur la relation entre la réserve hydrique relative du sol et l'accroissement de chênes sessiles en forêt de champenoux (Meurthe et Moselle), Granier *et al.*, (1995) ont mis en évidence un synchronisme étroit entre l'arrêt de la croissance et la diminution de la réserve en eau du sol en dessous d'un seuil qui correspond à un état de stress hydrique. Les réductions de croissance et d'échanges gazeux dans les peuplements forestiers, observés lorsque les réserves en eau du sol sont utilisables par les arbres, sont atteintes à moins de 40 % de la réserve utile maximale (soit  $RUM < 0,4$ ).

Ce manque d'eau dans le sol ou sécheresse édaphique peut être aggravé par l'existence d'une évapotranspiration potentielle élevée. La question des dépérissements du cèdre peut être due aussi à des excès d'eau sur les sols engorgés à nappe permanente ou temporaire. Le système racinaire pivotant du cèdre est puissant et peut atteindre de grandes profondeurs pourvu que le type de sol et de substrat le permettent (Toth et Turrel, 1981).

Ducrey *et al.*, (2008) ont mis en évidence sur des plants de 3 ans de cèdre du Liban (9 provenances) des ratios des biomasses (racines/partie aérienne et racines fines/aiguilles) plus élevés en situation de stress hydrique modéré qu'en situation de bonne alimentation en eau.

Dans l'Atlas, les dépérissements des cèdres se produisent plus fréquemment sur des sols à hydromorphie temporaire (ou des sols contenant des quantités importantes d'argiles) que sur d'autres sols. Une étude des relations entre les propriétés du sol et l'état sanitaire du cèdre (Chouraichi, 2008) a montré l'influence prépondérante de la réserve utile du sol dans ce phénomène de dépérissement.

Une enquête nationale et d'analyse des causes possibles des échecs et des réussites des peuplements de cèdre en France (Courbet *et al.*, 2013), ont permis de confirmer

l'influence prépondérante de l'engorgement temporaire et des traces d'hydromorphie dans les phénomènes de dépérissement. Pour des peuplements en Charente et en Loiret, les racines du cèdre n'ont jamais franchi le plancher argileux à 30 cm et à 60 cm de profondeur.

L'étude bibliographique fait ainsi apparaître une hétérogénéité voire une contradiction dans les travaux réalisés. Ainsi, il est difficile de savoir si ce phénomène de dépérissement du cèdre est lié au seul régime hydrique et au stock d'eau du sol ou à l'interaction des paramètres climatiques, édaphiques et à ceux propres à l'arbre (capacité d'enracinement dans les horizons profonds du sol). L'étude présentée ici vise à répondre à ces questions.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Sites d'étude

La zone d'étude est située dans le Causse moyen-atlasique. Elle est constituée de deux massifs forestiers naturels (Figure 1): la forêt d'Azrou qui s'étend sur une superficie de 13.765 ha et la forêt Aït Youssi de l'Amekla sur une superficie de 5.740 ha.

Les précipitations moyennes annuelles sont respectivement de 1.100 mm par an et 763 mm par an; les moyennes des températures moyennes s'établissent à 10,9 et 12 °C, l'évapotranspiration réelle, d'après Turc et Thorntwaite, représentent entre 44,8 % à 58,4 % et 73,4 % à 84,6 % de la pluviométrie totale.

Cette zone est constituée essentiellement de formation calcaire d'âges Liasiques, voilés par endroits, par des épanchements volcaniques récents (Martin, 1981). Sur le plan géologique, le bassin est considéré comme un vaste synclinal à remplissage tertiaire, s'enfonçant du Sud vers le Nord et se réduisant au contact des rides péri-rifaines. Les systèmes de failles créent des cuvettes et des horsts et les phénomènes karstiques sont mal développés.

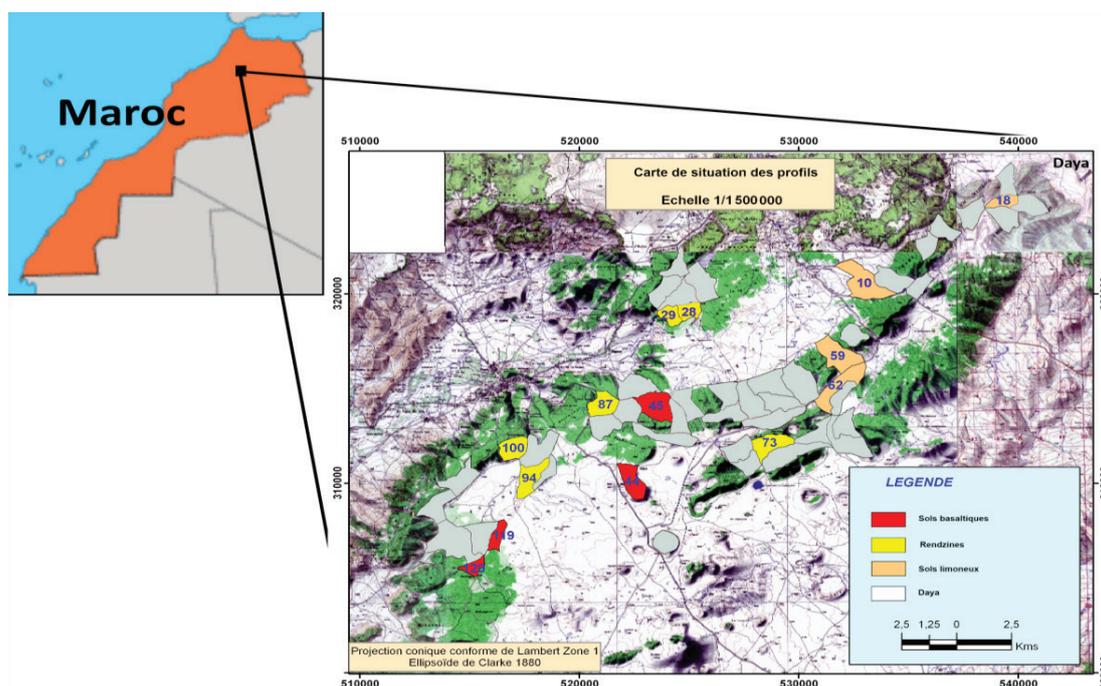


Figure 1: Carte de situation des placettes

Du point de vue hydrogéologique, il constitue le secteur de recharge du système karstique. Par leur microporosité, leur faible transmissivité ( $1 \times 10^{-4}$  et  $1 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) et leur faible perméabilité ( $1 \times 10^{-6}$  et  $1 \times 10^{-4}$  m/s), les sols confèrent à l'aquifère sa fonction capacitive. Les débits (< 10 l/s) y sont faibles et la qualité de l'eau est bonne. En général, l'écoulement des eaux de la nappe se fait préférentiellement dans les grosses fissures et les chenaux, du Sud-Est vers le Nord-Ouest, avec un gradient hydraulique proche de 3 %.

Les sols y sont très hétérogènes et leurs épaisseurs sont variables (0,5 à 2 m): bruns sur basaltes, calcaires fissurés et rendzines dolomitiques, dans la forêt d'Azrou, et fersiallitiques sur calcaires massifs, dans la forêt Aït Youssi de l'Amekla. Les premiers sont profonds (0,5 à 2 m) et ont une texture fine et une structure grumeleuse et sont caractérisés par des propriétés de rétention favorables. Par contre, les seconds, moins profonds (< 0,5 m), ont une texture très fine et une structure massive et sont caractérisés par un bilan hydrique défavorable.

Dans ces forêts, touchées différemment dans le taux de dépérissement, où un réseau de 54 placettes a déjà été installé par la FAO (2007), un échantillon restreint de 12 placettes sur 32, dans la première forêt où le cèdre est faiblement dépéri, ont été choisies, soit environ 3 échantillons par type de substrat. Dans la seconde forêt où le cèdre est fortement dépéri, seulement 3 placettes sur 23 ont été choisies, dont une Daya (Tableau 1). D'autres paramètres, autres que la nature des substrats n'ont pas été considérés, car ils n'ont pas d'effet direct sur l'hydrodynamique.

19 campagnes de terrain y ont été menées, entre mai 2009 et juin 2013, en vue de suivre l'évolution des propriétés hydrodynamiques du sol et de son substrat et les corrélés

aux taux de dépérissement du cèdre. Quatre placettes (119, 120, 44 et 45) sont situées sur substrat basaltique, d'autres sur calcaires dolomitique (59, 62), dolomie (73, 87, 94), rendzines (28, 100), sols fersiallitiques (10 m, 18, 29) et vertiques (93).

Les 4 premières placettes représentent les peuplements purs de cèdre alors que les autres sont des forêts mixtes de cèdre et de chêne vert. Ces placettes représentent la diversité écologique des peuplements de cèdre de ces forêts. Toutes les placettes se trouvent à des altitudes variant entre 1 800 m et 2 050 m.

La distinction entre arbre sain et arbre dépérissant a été faite sur la base de la vigueur des arbres, la densité des aiguilles, leur couleur et le dessèchement des branches. Les arbres visiblement dépérissant se caractérisent par des aiguilles moins denses, présentant une perte foliaire variant entre 25 à 75 %, une couleur verte jaunâtre et un dessèchement partiel, notamment celui du tiers supérieur de la cime.

Outre l'analyse des aiguilles du cèdre, qui ont fait l'objet de prélèvement saisonnier, les autres activités conduites ont été réalisées selon deux principales phases:

### 1<sup>e</sup> phase: travaux de terrains

La description des profils des sols a été faite sur la base des profondeurs de prélèvements, leur couleur (définie à l'aide du code de Munsell à l'état humide), la structure et la texture. Les prélèvements des sols ont ainsi été effectués tous les 30 cm, à raison de trois échantillons par profil, soit un total de 39 échantillons.

La densité apparente, qui dépend surtout de la structure du sol, a été réalisée par la méthode du cylindre de 5 cm

**Tableau 1: Nombre et répartition des placettes selon le taux de dépérissement et le groupe de sol**

Classes de dépérissement	Groupe de sols							Total
	A	B	C	D	E	F	G	
	Unité pédologique							
	1-2	3-4	5	6-7-8	9	10	11-12-13-14	
Placette à dépérissement < 12 %	106,110, 95,53,87	18m,16m	38, 40, 55, 56, 73, 94	36, 44, 45, 81, 118, 119, 120	-	6, 28, 61, 6, 68, 100	3, 117, 12, 51, 54	
S/total	5	2	6	7	0	5	5	30
Placette à dépérissement > 12 %	20m	50, 59, 62, 69, 74, 76, 77	4m, 9m, 11m, 57	-	71, 93	-	29, 3m, 6m, 10m, 23m, 18, 37, 48	
S/total	1	7	4	1	2	0	8	23
Total	6	9	10	8	2	5	13	53

- 1-2 : Alluvions  
 3-4 : Sols sur blocs de dolomie  
 5 : Sols sur sables dolomitiques  
 6-7-8 : Sols sur basalte  
 10 : Rendzines dolomitiques  
 11-12-13-14 : Sols fersiallitiques

de diamètre. Le sol est prélevé en enfonçant le cylindre dans les différents horizons du sol de façon à remplir le vide de celui-ci par le sol. Son poids sec est déterminé au laboratoire après séchage à l'étuve à 105 °C. La densité réelle, dépendante de la nature minéralogique, est généralement prise égale à 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

La perméabilité verticale, a été mesurée pour chaque profil de sol en surface (0-30 cm) et à 60 cm de profondeur pour les plus profonds d'entre eux. La méthode du perméamètre de Guelph, mise au point par Reynolds et Elrich (1985) et décrite par Mathieu (1998), a été utilisée. 24 mesures de perméabilité ont été réalisées: 19 pour la forêt d'Azrou et 5 pour la forêt Aït Youssi de l'Amekla.

## 2<sup>e</sup> phase: analyses de laboratoire

### Préparation de la terre fine

Les échantillons de sols des 15 profils sont d'abord séchés à l'air libre. Ils sont ensuite broyés au mortier et réduits en poudre homogène. En cas de présence d'agrégats, leur dislocation nécessite l'utilisation de l'eau oxygénée et de l'acide chlorhydrique pour détruire les ciments organiques et minéraux.

### Détermination du taux d'éléments grossiers

Les échantillons de sols ainsi broyés et disloqués, on procède ensuite à un tamisage avec un tamis de 2 mm. Ainsi, on sépare la terre fine des cailloux et des graviers. Le protocole détaillé de la préparation a été décrite par Baise (2000).

### Analyse granulométrique et de matière organique

L'analyse granulométrique à 5 fractions des échantillons de sols prélevés a été réalisée après attaque de la matière organique à l'eau oxygénée. La séparation des particules supérieures à 0,05 mm, s'effectue par tamisage. Pour séparer et classer les particules plus fines, la méthode utilisée est celle de la pipette Robinson, qui est basée sur la loi de Stokes (Bruand et Chenu, 1994). La matière organique est déterminée par la méthode de Walkley et Black (1934). Son taux est estimé en multipliant le % de carbone organique par 1.724.

### Mesure de l'humidité des sols

L'humidité des sols est mesurée directement à l'aide de la méthode gravimétrique. Elle est exprimée comme le rapport sans dimension de la masse d'eau à la masse de sol sec ou de volume d'eau au volume total de sol. Ce rapport est habituellement multiplié par 100 et présenté en pourcentage massique ou volumique. L'humidité pondérale a été calculée par la formule :

$$\text{Humidité} = 100 \times [\text{Ps}/\text{PH}-1]$$

H<sub>p</sub>: Humidité pondérale,

P<sub>H</sub>: Poids humide

P<sub>s</sub>: Poids sec.

### Réserve utile des sols

La réserve utile en eau des sols à différentes profondeurs (exprimée en mm d'eau par cm de sol), est la quantité d'eau entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. Elle correspond à la quantité d'eau maximale que le sol peut absorber et restituer à la plante. Le calcul de la réserve utile prend en compte l'épaisseur totale de sol exploitable par les racines fines, la texture et la présence d'éléments grossiers rocheux ou de forte proportion de cailloux. Il existe différentes méthodes pour calculer la réserve utile:

- à partir de la formule empirique établie par le GEPPA (1981) en l'adaptant au contexte marocain:

$$\text{RU} = 0,45 \times \text{HE} \times \text{TF} \times \text{da} \times \text{P}$$

avec RU: réserve utile en mm,

HE: taux d'humidité équivalente (teneur en eau du sol après ressuyage),

TF: taux de terre fine,

Da: densité apparente et ,

P: profondeur utile du sol en mm.

- en utilisant le triangle textural élaboré par Jamagne et Bretemieux (source voir l'article sur l'eau dans le sol-AFIDOL <http://afidol.org/oleiculteur/leau-dans-le-sol/>).

Le calcul du bilan hydrique du sol a été effectué par la formule empirique de Thornthwaite.

### Analyses foliaires

L'analyse foliaire des aiguilles du cèdre a été réalisée sur les différentes placettes. Les échantillons sont préparés comme suit:

- Le prélèvement est effectué sur 2 à 3 arbres;
- Les arbres choisis appartiennent à la même placette où des prélèvements d'échantillons de sols ont été réalisés;
- Les arbres sont représentatifs de l'état de santé du peuplement de la placette;
- La hauteur de prélèvements des aiguilles du cèdre (10 à 12 m), est la même quel que soit l'arbre;
- Les aiguilles choisies datent de l'année en cours et aussi de celle écoulée;
- Les aiguilles de couleur vert clair et vert foncé ont été mélangées;
- Les aiguilles prélevées sont exposées à la lumière;
- Le prélèvement des échantillons d'aiguilles du cèdre sont réalisés selon deux expositions: est et ouest.

De plus, l'estimation du taux de dépérissement du cèdre se fait sur la base de la transparence du haut du houppier de l'arbre par rapport à un arbre forestier référence (sain) et ce sur 2 à 3 arbres.

## RÉSULTATS

Les résultats des essais de terrains et des analyses au laboratoire sont présentés dans le tableau 2.

### Caractéristiques du sol

#### Texture et taux de matière organique

On distingue (Figure 2) différents types de texture: sableuse et sableuse à sablo-limoneuse respectivement pour les sols dolomitiques, les rendzines (parcelles 28, 100) et les andosols, sablo-limono-argileuse pour les sols vertiques (parcelles 93), limono-argileuse dans le cas des sols fersiallitiques (29, 59 et 62). La texture argileuse, est rare (2 %) et est cantonnée aux sols hydromorphes des Daya.

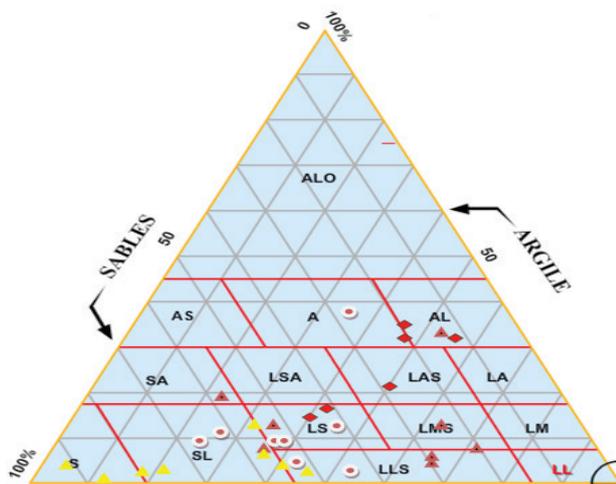


Figure 2: Texture des différents profils du sol aux différentes profondeurs

Ainsi, les sols dolomitiques, rendzines et andosols, sont essentiellement sableux, leurs taux de sable augmentent en profondeur. Par contre, les sols fersiallitiques, renferment un taux élevé d'éléments fins. Les premiers, sont meubles, riches en sables et sont dotés d'un bon drainage, tandis que les derniers, sont tassés, renferment des teneurs élevées en éléments fins, et sont caractérisés par une capacité élevée de rétention en eau.

La matière organique se présente sous forme d'humus; sa teneur varie selon le type de sol et sa profondeur. Elle est élevée pour les sols dolomitiques, les rendzines et les andosols, faible dans le cas des sols fersiallitiques.

Pour un même type de sol, sa teneur en matière organique est élevée dans l'horizon de surface (3,3 à 9,4 %), moyenne dans l'horizon de mi-profondeur (1,2 à 3,6 %) et faible dans l'horizon de profondeur (0,2 à 2,6 %), avec des valeurs maximales respectives, de 15,5 %, 4,9 % et 2,9 %.

#### Densité apparente, porosité et perméabilité

La densité apparente des sols est comprise entre 0,66 et 1,17 g/cm<sup>3</sup> avec un maximum de 1,62 g/cm<sup>3</sup>. Les valeurs les plus grandes (1,17 à 1,62 g/cm<sup>3</sup>), et donc les porosités les plus faibles (34,5 à 44,6 %), sont mesurées dans les sols dolomitiques et les rendzines, tassés et pauvres en matière organique.

Les densités apparentes les plus faibles (0,66 à 0,99 g/cm<sup>3</sup>), correspondant aux porosités les plus élevées (56,8 à 70,6 %), sont observées dans les sols vertiques et les andosols, meubles, riches en matière organique, alors que les valeurs moyennes (1,10 à 1,14 g/cm<sup>3</sup>), à porosités intermédiaires (45,3 à 46,5 %), se trouvent dans les sols fersiallitiques.

La présence de matière organique dans ces sols leur confère des propriétés de porosité et de structure différentes de celles des sols qui en sont dépourvues. Ainsi, on retrouve un fait bien connu, les sédiments se tassent d'autant plus facilement que les minéraux constitutifs sont plus fins.

La perméabilité des sols, est variable: elle oscille entre 3,6×10<sup>-2</sup> et 4,0 cm/h avec un maximum de 22,0 cm/h. Les valeurs les plus élevées (1,4 à 22,0 cm/h), sont mesurées pour les sols "uniformes" dolomitiques et les andosols, ayant les fortes porosités de fissures (macroporosité). Des perméabilités moindres (0,2 à 3,1 cm/h), ont été mesurées pour les rendzines, caractérisés par une porosité d'interstice (microporosité).

Les plus faibles perméabilités (6,5×10<sup>-2</sup> à 0,4 cm/h) se rencontrent pour les sols fersiallitiques. Les perméabilités extrêmement faibles (6.8×10<sup>-4</sup> cm/h) sont mesurées au niveau des sols hydromorphes. Les perméabilités des sols, en fonction de leurs teneurs en argiles, ont été reportées sur la figure 3.

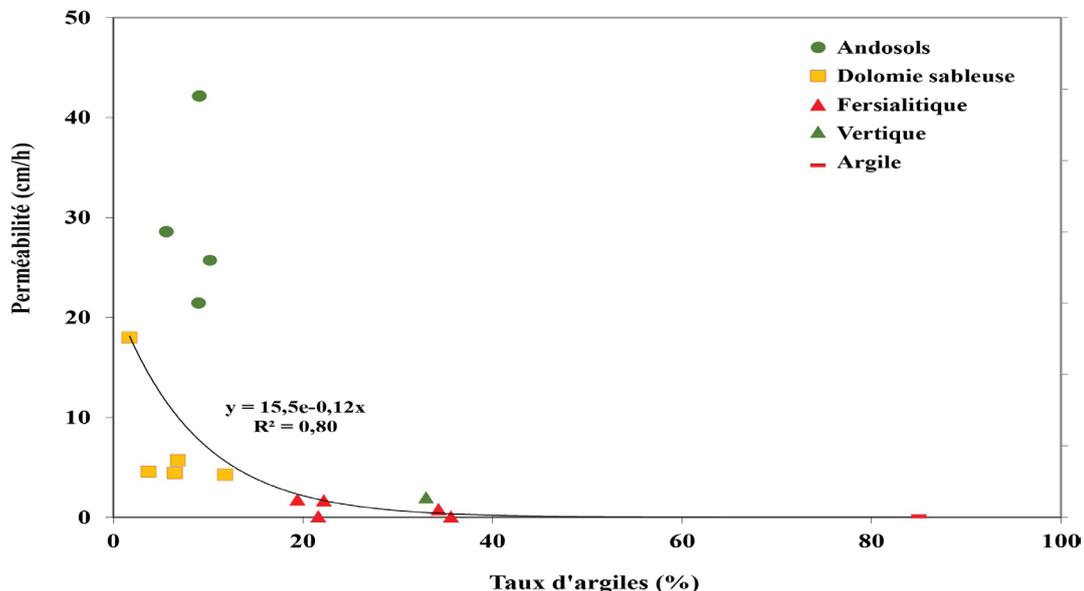


Figure 3: Variations de la perméabilité des différents faciès en fonction du taux d'argiles (profondeur: 30-60)

On constate une décroissance rapide de la perméabilité lorsque la teneur en argiles augmente: pour 10 % d'argiles, la perméabilité chute rapidement, au contraire, pour 20 à 30 % d'argiles, la perméabilité est presque nulle.

Ainsi, une relation directe entre la perméabilité et le pourcentage d'argile est mise en évidence. Celle-ci est d'autant plus faible que les sols sont plus fins. La présence d'argiles en quantité dans ces sols, non seulement réduit la perméabilité et empêche l'eau de s'infiltrer et de s'évacuer et, retient énergiquement l'eau. En contre partie, elle ne la restitue que difficilement aux racines des arbres.

### Réserve utile

La réserve utile en eau des sols varie d'une parcelle à l'autre. Les valeurs élevées (110 à 240 mm) concernent les sols vertiques et les andosols, meubles, riches en matière organique et très profonds et, dans une moindre mesure, les rendzines et les sols dolomitiques (90 à 100 mm), renfermant une teneur moyenne en matière organique et de profondeur moyenne. Les plus faibles, les sols "stratifiés" fersiallitiques (54 à 65 mm) et hydromorphes ( $\approx 0$  mm), pauvres en matière organique et peu profonds à superficiels.

**Tableau 2: Analyses des essais de terrain et des analyses au laboratoire des différents profils de sol aux différentes profondeurs**

Placette	Sols	Prof. de prélév.	SG (%)	SF (%)	LG (%)	LF (%)	A (%)	Mat. Org. (%)	Densité app.	K (cm/h)	RU (mm)
Daya	Hydromorphes	0-30	1,0	2,0	5,0	17,0	75,0	-	0,73	$6,8 \times 10^{-4}$	0,0
10m		0-30	2,5	12,0	46,6	26,6	10,0	3,31	1,30	6,1	113,8
		30-60	1,9	17,9	16,3	31,7	32,2	1,49	1,26	$5,8 \times 10^{-2}$	
18		0-30	2,5	17,0	17,6	27,3	35,6	4,95	1,13	0,4	134,0
		30-60	31,9	11,3	21,4	16,8	18,5	1,44	1,17	$6,5 \times 10^{-2}$	
29	Fersiallitique	0-30	2,5	17,0	17,6	27,3	35,6	4,95	1,13		
		30-60	31,9	11,3	21,4	16,8	18,5	1,44	1,17		
59		0-30	6,9	21,9	28,7	20,9	21,6	4,50	1,29	1,8	59,0
		30-60	34,3	12,0	22,1	17,7	13,9	3,1	1,37	$7,9 \times 10^{-2}$	
		60-90	8,1	46,5	17,0	19,3	9,0	7,17	0,73		
28	Rendzine	0-30	14,1	73,5	2,5	9,4	0,5	12,99	1,40	0,3	100,0
		30-60	14,6	64,7	16,4	2,6	1,7	-	1,39	4,0	
100		0-30	4,3	47,1	36,5	9,2	2,9	15,74	1,33	0,4	100,0
		30-60	4,8	50,6	39,4	1,6	3,7	-	1,35	9,6	
62	Vertique	0-30	4,2	25,5	50,9	14,4	5,0	11,47	0,73		110,0
		30-60	7,8	48,6	11,2	13,0	19,4	4,77	0,83	1,2	
		60-90	8,2	48,2	10,8	12,8	20,0	-	0,83		
93		0-30	3,5	21,1	23,7	37,8	14,0	13,68	0,73		143,1
		30-60	1,6	12,0	15,5	37,8	33,0	3,68	0,83	1,4	
		60-90	1,3	12,4	13,2	38,0	35,1	2,92	0,88		
44		0-30	11,0	40,1	23,1	20,7	5,0	11,0	0,74		240,0
		30-60	11,1	39,9	21,8	21,5	5,6	1,18	0,82	0,4	
		60-90	9,8	40,2	21,5	22,2	6,6	1,18	0,83		
45	Andosol	0-30	16,5	37,9	21,2	15,3	9,1	6,09	0,74		181,0
		30-60	22,6	38,5	13,2	14,5	11,3	1,64	0,82	29,5	
		60-90	24,2	38,9	12,1	14,1	10,7	-	0,68		
119		0-30	8,0	25,7	20,0	36,1	10,2	5,86	0,62		176,0
		30-60	6,6	35,4	20,8	25,2	12,1	3,32	0,93	18,0	
		60-90	5,8	34,6	21,6	24,2	13,8	-	0,90		
120		0-30	9,8	33,7	19,3	34,2	3,1	5,26	0,64		132,0
		30-60	19,0	31,7	18,4	21,9	9,0	-	0,78	22,0	
73		0-30	7,5	48,6	11,9	20,1	11,8	9,43	1,30		
		30-60	11,2	80,5	1,0	3,6	3,6	2,03	1,41		
		60-90	19,4	70,1	5,1	2,5	2,9	0,23	1,50		
87	Dolomie sableuse	0-30	3,7	27,5	41,8	23,1	4,0		1,13	0,3	-
		30-60	3,2	17,1	46,9	25,9	6,8				
94		0-30	6,8	49,7	33,1	4,0	6,5	15,54	1,43		
		30-60	23,2	53,2	18,5	2,1	3,0	3,13	1,49		
		60-90	11,6	63,9	22,3	0,5	1,7	0,59	1,55		
100		0-30	4,3	47,1	36,5	9,2	2,9	15,74	1,33	0,4	100,0
		30-60	4,8	50,6	39,4	1,6	3,7	-	1,35	9,6	

SG: Sables grossiers, SF: Sables fins, LG: Limons grossiers, LF: Limons fins, A: Argile

Les premiers, du fait de la texture, la structure et la densité de fissuration du sol, l'enracinement du cèdre est très profond (1,40 m, selon Breda *et al.*, 1992) et la sensibilité du cèdre au dépérissement est faible. Par contre, les seconds, en raison de la texture et de la faible profondeur du sol humectée, ils présentent une faible capacité de rétention en eau, et donc une réserve en eau utile peu élevée ou nulle. Le volume du sol prospecté par les racines est donc faible, ce qui rend les arbres plus sensibles à la sécheresse et donc au dépérissement.

### Humidité et régime hydrique du sol

Parmi les sols étudiés, les andosols et les sols fersiallitiques ont fait l'objet du suivi de l'évolution mensuelle de leur humidité volumique. Les 1<sup>er</sup> ont été choisis pour représenter les sols "bruns", sableux à sablo-limoneux, très profonds, meubles et riches en matière organique.

Leur taux d'humidité est élevée: près de 40 %, pour l'horizon de surface, contre 56 %, pour l'horizon de mi-profondeur (Figure 4). Ce taux élevé de l'humidité est due au caractère andosolique du sol de tourbe, et aussi à l'apport d'eau provenant soit de l'infiltration superficielle des eaux de pluie ( $k=22,0$  cm/h), soit du drainage d'eaux souterraines à partir de l'aquifère karstique sous-jacent.

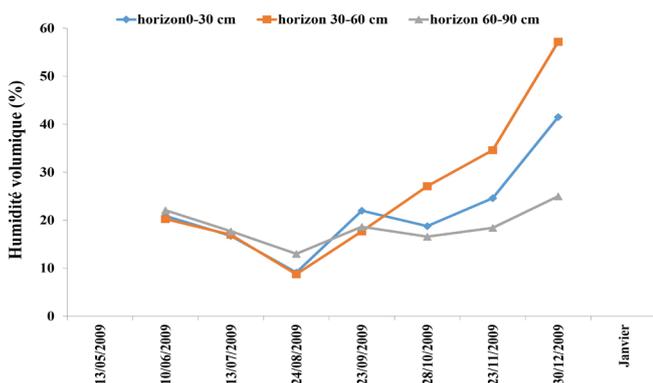


Figure 4: Taux d'humidité volumique d'un andosol à Ras El Ma (profondeur : 0-90cm)

Un comportement similaire est observé pour les rendzines. Les seconds, ont été choisis pour représenter les sols "fersiallitiques", limoneux-argileux, peu profonds et pauvres en matière organique (Figure 5). Contrairement au cas précédent, le taux d'humidité volumique est faible et diminue en bas du profil: près de 24 % en surface du profil du sol, contre 15 % seulement en profondeur.

Le fait que l'humidité est plus faible en profondeur, peut traduire le faible taux d'infiltration superficielle des eaux de pluie ( $k=6,5 \times 10^{-2}$  cm/h), et aussi à l'absence de communication directe -à travers les jeux de fractures, diaclases superficielles et trous absorbants- avec l'aquifère karstique sous-jacent.

Idem pour les sols argileux superficiels des daya. Ainsi, une différence du fonctionnement hydrodynamique, des sols selon qu'il s'agit de sols sableux ou sablo-limoneux sur calcaire dolomitique fissuré, meubles et profonds, et formant de vrais roches réservoirs aquifères, ou sols fersiallitiques, et ceux argileux peu profonds et tassés et ne constituant pas de réservoir aquifère.

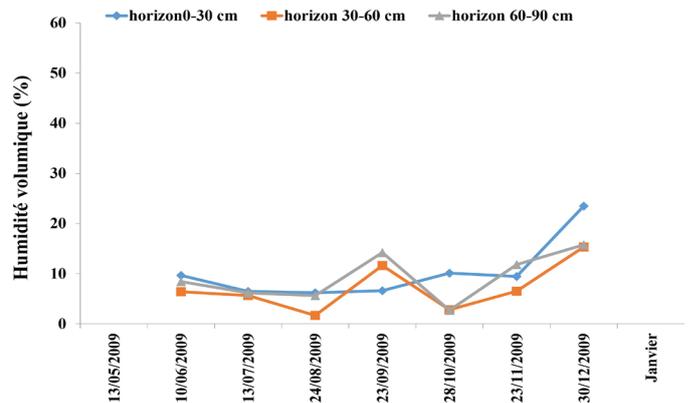


Figure 5: Variations, en fonction de la profondeur, de la teneur en eau d'un sol dolomitique (rendzine)

### Bilan hydrique du sol

Dans ces régions du Moyen Atlas, M'Hirit (1982) a observé que le cèdre montrait deux périodes de croissance par an: la première, qui s'étend de la mi-avril au début juillet, correspond aux mois pour lesquels la valeur des précipitations est supérieure à celle des températures. La seconde période de croissance, qui s'étend de fin septembre à fin octobre, est caractérisée par des précipitations cinq fois supérieures à la valeur moyenne des températures.

On conçoit facilement que si le sol n'est pas en mesure de répondre aux besoins de l'arbre, la croissance de celui-ci en sera affectée. Nous avons vu par exemple, que les aiguilles du cèdre développées pendant le printemps 2007, semblent avoir eu une elongation plus faible. Le cumul de pluie pendant les deux périodes de croissance (240 mm) est nettement inférieur à celui des autres années et est insuffisant pour assurer une alimentation correcte du cèdre, contre un maximum d'environ 340 mm en 2010.

Grâce aux profils hydriques de 2009, et avec l'aide des relevés pluviométriques disponibles au niveau de la station météorologique Ras el Ma (Tableau 3), nous avons tenté une évaluation des besoins en eau du cèdre en s'appuyant sur le calcul du bilan hydrique d'un sol de dolomie sableuse (Tableau 4).

En décembre 2010, si on considère le profil hydrique du sol dolomitique (Figure 5), on constate qu'à cette date, celui-ci a atteint une humidité proche de la capacité de rétention sur une profondeur d'au moins 30 cm, le reste du profil étant toujours à une humidité inférieure à 4 % du fait de la faible teneur en argiles.

Or, à cette même date, le cumul d'eau de pluie est de 680 mm, depuis la fin de la saison sèche. Comme 70 mm d'eau suffisent théoriquement pour amener 1 m de sable à la capacité de rétention (Sauvageot, 1973), 680 mm de pluie auraient dû amener environ 9 à 10 m de sable à ce même taux d'humidité, soit l'ensemble des horizons aquifères. La différence, entre les profondeurs d'humectation théoriques et réelles, traduit la consommation en eau du cèdre.

On peut donc admettre qu'environ 660 mm d'eau ont été consommées par l'évapotranspiration, dont éventuellement une fraction d'eau drainée. Si on admet que la pluie efficace moyenne à Ras El Ma est estimée à un taux de 540 mm, soit environ 330 mm d'eau sont infiltrées, la quantité d'eau correspondant à l'évapotranspiration réelle est donc de 330 mm.

Considérons maintenant le profil hydrique de fin décembre 2008, nous voyons que l'ensemble du profil a atteint la capacité de rétention (mais il n'y a pas accumulation d'eau à la surface). Les relevés pluviométriques donnent un total de 650 mm de pluies tombées depuis le mois de septembre 2008. En appliquant le même raisonnement que précédemment, on déduit qu'il faut environ 300 mm de pluie pour amener l'ensemble des horizons du sol dolomitique, à la capacité de rétention de 3 %.

On peut donc dire qu'environ 350 mm d'eau, ont été utilisés par l'évapotranspiration. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle calculée précédemment. On peut néanmoins en déduire que c'est surtout pendant la période qui suit la fin de la saison sèche que la consommation en eau est importante. En hiver, les besoins en eau du cèdre diminuent et parallèlement le sol dolomitique peut s'humidifier en profondeur du fait du taux élevé de drainage.

### Taux de dépérissement du cèdre en fonction de la teneur du sol en argile

Alors que la texture et la surface spécifique sont plus ou moins importantes pour un sol donné, la structure est dynamique et peut évoluer au cours du temps sous l'effet de l'activité biologique et des pratiques culturales.

La structure du sol influence aussi ses propriétés mécaniques qui, à leur tour affectent la germination des semences, la levée et la croissance racinaire (Hillel, 1974). Les sols sableux sur calcaire ou dolomie, sont caractérisés par une texture fine et une structure en agrégats, ce qui leur confère un bon drainage et parfois des remontées d'eau

depuis les horizons aquifères en période de sécheresse.

Ces agrégats sont influencés par l'effet de l'eau par les phénomènes de gonflement et de retrait, de gelée, d'impact des gouttes de pluie et d'action décapante de l'érosion. C'est l'horizon de surface du sol qui est particulièrement vulnérable à la détérioration de la structure, notamment des agrégats.

Par contre, les sols rouges limoneux-argileux fins, sont caractérisés par une texture très fine et une structure massive en profondeur, ce qui leur confère un faible drainage et un engorgement en période de pluie. Pour mieux comprendre le phénomène de dépérissement du cèdre, nous avons analysé son taux en fonction de la teneur en argiles des sols, cette relation est représentée sur la figure 5.

On constate que la sensibilité au dépérissement du cèdre la plus faible (5 à 15 %) est enregistrée pour les sols andosols, les sols dolomitiques et les rendzines, très profonds, meubles et renfermant une faible teneur d'argiles (< 10 %). Le taux du dépérissement du cèdre le plus élevé (20 à 50 %), est observé pour les sols fersiallitiques et ceux hydromorphes, peu profonds, tassés, et renfermant respectivement des teneurs élevées d'argiles (10 à 35 % et > 70 %). Ainsi, une forte relation linéaire positive et significative entre la sensibilité au dépérissement du cèdre et la teneur d'argiles des sols est montrée ici:

$$\text{Dépérissement (\%)} = 1,15 \times \text{Argiles (\%)} - 1,39 \quad (r^2 = 0,92)$$

Autrement dit, plus la teneur d'argiles des sols est élevée, plus fort est le taux de dépérissement du cèdre.

**Tableau 3: Pluviométrie (mm) station de Ras El ma**

	2002-2003		2003-2004		2004-2005		2005-2006		2006-2007		2007-2008		2008-2009		2009-2010	
	p. mois	cuml	p. mois	cuml												
<b>Sept</b>	4,0		0,0		0,0		10,0		4,0		31,3		49,3		123,2	
<b>Oct</b>	77,0	81,0	25,0	25,0	57,5	57,5	98,0	108,0	17,0	21,0	64,7	96,0	141,6	190,9	71,0	194,2
<b>Nov</b>	227,0	308,0	136,5	161,5	88,6	146,1	154,0	262,0	46,0	67,0	101,5	197,5	253,0	443,9	74,0	268,2
<b>Déc</b>	77,1	385,1	228,7	390,2	114,5	260,6	73,0	335,0	48,5	115,5	32,8	230,3	214,0	657,9	416,5	684,7
<b>Jan</b>	115,0	500,1	90,5	480,7	22,5	283,1	115,0	450,0	33,5	149,0	79,1	309,4	361,0	988,9	291,0	975,7
<b>Fév</b>	48,0	548,1	182,0	662,7	132,0	415,1	125,0	575,0	94,3	243,3	124,1	433,5	137,7	1126,6	407,5	1383,2
<b>Mars</b>	85,0	633,1	52,5	715,2	22,0	437,1	119,2	694,2	55,8	299,1	28,0	461,5	194,2	1320,8	214,5	1597,7
<b>Avril</b>	103,0	736,1	75,0	790,2	76,7	513,8	60,0	754,0	83,0	382,1	75,4	536,9	20,5	1341,3	1 20,0	1717,7
<b>Mai</b>	22,0	758,1	102,5	892,7	84,7	598,4	100,0	854,0	84,7	466,7	74,0	610,9	94,9	1406,2	34,0	1751,7
<b>Juin</b>	33,4	791,5	14,0	906,7	37,2	635,6	30,0	884,0	30,6	497,3	30,6	641,5	41,4	1447,6	27,5	1779,2
<b>Juil</b>	46,9	838,4	47,1	953,8	45,0	680,6	25,0	909,0	47,1	544,4	86,1	727,6	10,7	1458,3	69,0	1848,2
<b>Août</b>	18,0	856,4	22,9	976,7	3,5	684,2	5,0	914,0	20,9	565,3	47,5	775,1	5,5	1463,8	46,0	1894,2

**Tableau 4: Bilan hydrique d'un sol dolomitique (rendzine) en 2009-2010 (Station Ras el Ma)**

Mois	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Total
<b>Pluie mm</b>	417	123	408	215	120	34	28	39	46	49	177	239	1895
<b>ETP mm</b>	9	6	10	26	40	59	94	127	117	78	46	26	638
<b>P-ETP</b>	408	117	398	189	80	-25	-66	-88	-71	-29	131	213	-
<b>Saturation</b>	100	100	100	100	100	75	9	0	0	0	100	100	-
<b>ETR</b>	9	6	10	26	40	59	28	69	46	78	46	26	443
<b>P - ETR</b>	408	117	398	189	80	0	0	0	0	0	131	213	1189
<b>Recharge</b>	269	120	322	198	98	10	0	0	0	0	65	107	1189

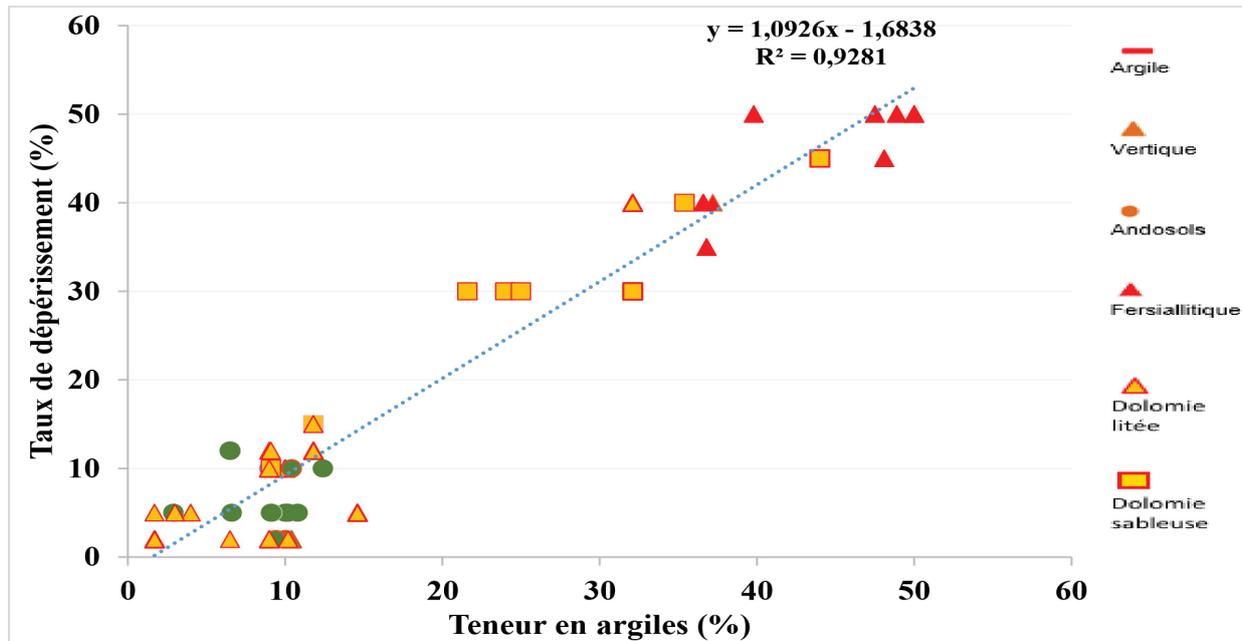


Figure 6: Variations, en fonction de la teneur en argiles, du taux de dépérissement du cèdre des différents types de sols étudiés (profondeur: 30-60 cm)

## DISCUSSION

On ne peut comprendre la sensibilité au dépérissement du cèdre dans le Causse moyen atlasique que si l'on fait intervenir les caractéristiques du sol (profondeur, structure, texture, réserve utile) des principaux aquifères (réserve utile, fracturation, fissuration, porosité et capacité à emmagasiner l'eau) et ceux propres à l'arbre, d'origine écophysologique.

Le réseau de failles et fractures, favorisant la circulation d'importantes quantités d'eau au sein des roches-réservoirs, peuvent constituer des réserves d'eau potentielles accessibles aux racines profondes du cèdre, notamment en période de sécheresse.

Pour les sols sur calcaires et dolomies, plus ou moins fissurés et fracturés, qui sont de vrais réservoirs, la présence de dolomies sableuses à leurs base traduit l'existence d'un aquifère très capacitif et à écoulement relativement lent (Amraoui, 2005).

Les eaux de ruissellement stagnent dans les régions plates du bassin et communiquent avec l'aquifère à travers un réseau de fractures, de diaclases superficielles ou de trous absorbants (Bentayeb et Leclerc, 1977).

Les racines du cèdre peuvent s'insérer entre les blocs et dans les fractures et fissures où elles sont en prise directe avec l'eau du réservoir aquifère. Les andosols sur basaltes altérés jouent aussi un rôle perméable grâce à l'importante porosité de fissures de certaines coulées: ils peuvent aussi contenir des niveaux aquifères dont les caractères hydrogéologiques s'apparentent à ceux des calcaires-dolomitiques.

La présence des fissures met en charge les eaux de l'aquifère Liasique sous-jacent. L'importante réserve d'eau, qui y est emmagasinée, est en prise directe avec les racines "pivotantes" du cèdre. En été, lorsque la surface du sol sèche, l'eau emmagasinée dans les horizons profonds du sol (basaltes altérés, calcaire-dolomitique), constitue une réserve potentielle. Cette eau contenue dans les fissures du sol, qui est une partie intégrante de la réserve utile, constitue un apport d'eau important et précieux en période de sécheresse.

Cet apport d'eau sous-jacent, assure un complément à celui des horizons de surface. Il parvient ainsi à pallier, au moins en partie, le manque d'eau du sol et à satisfaire les besoins en eau du cèdre, d'où la faible sensibilité au dépérissement du cèdre enregistré en leur présence.

Dans ces situations, le déficit hydrique du sol y est faible et le cèdre, qui représente l'essence principale, n'enregistre qu'un faible taux de dépérissement (5 à 15 %), confirmant ainsi, les conclusions de Chouraichi (2007). Par contre, dans le cas des sols sur calcaire massifs, leurs altérations libèrent des minéraux argileux qui forment un résidu (argile rouge de décalcification) peu perméable ( $K = 1,8 \times 10^{-7}$  m/s).

Ce résidu s'agrège et forme des agrégats comblant ainsi les points topographiquement bas (dépressions karstiques, dolines...). Les eaux chargées d'argiles colmatent les entonnoirs de diamètres variables (grottes, avens, trous...) et l'échange direct avec l'aquifère, à travers un jeu de fractures de diaclases superficielles ou de trous absorbants, est bloqué engendrant ainsi un régime de ruissellement important.

Ces agrégats, non seulement réduisent l'infiltration superficielle des eaux, mais colmatent les fissures, les pores voire les fractures des roches, empêchant l'enracinement du cèdre d'atteindre les horizons aquifères et l'accessibilité aux réserves d'eau profondes, avec en conséquence une sensibilité au dépérissement élevée en leur présence (20 à 50 %).

Le même problème se pose au niveau des Daya, mais à un degré encore supérieur. Les sols hydromorphes qui les caractérisent forment des barrières hydrauliques quasiment imperméables ( $2,0 \times 10^{-9}$  m/s). La sensibilité au dépérissement du cèdre y est extrême, en accord avec les constatations faites par Courbet et al., (2013), qui ont confirmé l'influence prépondérante de l'engorgement temporaire et des traces d'hydromorphie dans les phénomènes de dépérissements.

L'influence de la teneur en argile sur la qualité des sols, notamment de son aptitude au drainage/engorgement et de la sensibilité du cèdre au dépérissement est déterminante. En d'autre terme, plus le régime hydrique du sol est défavorable au drainage, plus l'effet négatif des argiles se fera sentir sur le sol et le dépérissement du cèdre.

Il en résulte que la sensibilité du cèdre au dépérissement est faible pour les sols bruns, développés sur roches calcaires-dolomitiques et basaltes altérés fissurés et fracturés, ne montrant aucune trace d'engorgement, moyenne à élevée, pour les sols fersiallitiques, plus ou moins engorgés, et très élevée pour les sols hydromorphes engorgés.

## CONCLUSION

Sur un réseau de 54 placettes du cèdre réparties dans les forêts d'Azrou et d'Aït Youssi de l'Amekla, un échantillon restreint de 15 placettes représentatives de différences situations de dépérissement, ont fait l'objet de l'étude de leurs propriétés physiques et hydriques en vue de corrélérer ces propriétés avec le dépérissement. Dans les paramètres étudiés, la perméabilité est celle qui présente l'effet le plus déterminant sur le dépérissement du cèdre, car elle intervient directement dans le bilan hydrique du sol.

Elle est importante pour les andosols, les rendzines, et les dolomies, formant de vraies roches réservoirs aquifères et la sensibilité au dépérissement du cèdre y est faible. Elle baisse fortement pour les sols limono-argileux, peu profonds, tassés, et la sensibilité au dépérissement du cèdre y augmente. Elle s'annule pour les sols hydromorphes compacts ayant un taux de dépérissement du cèdre très important.

Dans cette étude, nous mettons en évidence une relation linéaire entre le taux de dépérissement du cèdre et la teneur en argiles des sols [Dépérissement (%) = 1,15 Argiles (%) - 1,39;  $r^2 = 0,93$ ]. La présence des argiles en quantité importante, non seulement réduit les infiltrations et engendre le ruissellement, mais aussi entrave l'enracinement du cèdre dans les horizons profonds du sol et l'accès à la réserve d'eau du réservoir karstique, favorisant ainsi le phénomène de dépérissement.

Ainsi, le phénomène de dépérissement du cèdre n'est pas uniquement régi par la rétention en eau des sols, mais dépend du fonctionnement hydrodynamique du sol (régime d'écoulement) et du transfert de l'humidité à travers le sol, qui elle-même dépend de la texture et de la structure, de la porosité et de la perméabilité du sol. Il résulte de ces faits que la cédraie est toujours plus dense et dans un bon état sanitaire sur les sols calcaires-dolomitiques, formant de vrais réservoirs aquifères ayant de forte réserves utile en eau et souvent clairs ou absente sur les sols fersiallitiques, limoneux-argileux tassés, ou argileux marneux compacts.

Ces milieux peu profonds, donc de faible réserve utile, sont le siège de l'engorgement du sol, et le taux de dépérissement du cèdre y est élevé. C'est certainement un facteur qui s'ajoute à la faible réserve utile de ces sols. Ainsi, afin de réussir le reboisement dans la zone d'étude, les plantations du cèdre doivent être orientées en se basant sur la dynamique de l'eau entre le sol et le sous-sol notamment au niveau des fissures, diaclases et fractures.

Les cuvettes ou les grabens comblés par des formations essentiellement argileuse ou marneuses sont à éviter; leur présence perturbe le fonctionnement hydrodynamique et bloque les échanges possibles entre ces roches réservoir et les horizons superficiels du sol. Il en résulte une réduction drastique de l'infiltration et la remontée capillaire de l'eau dans le sol et une modification du bilan hydrique et de ses composantes, d'où l'intérêt des techniques de préparation du sol (sous-solage) pour briser cette croûte calcaire massive et maximiser l'infiltration.

## BIBLIOGRAPHIE

- AFIDOL (consulté en sept 2017). L'eau dans le sol, <http://afidol.org/oleiculteur/leau-dans-le-sol/>.
- Allen C. D. (2007). Le dépérissement des forêts dû au climat: un phénomène planétaire croissant? Archives document FAO. Adaptation au changement climatique, Département des Forêts.
- Allen C. D. (2009). Le dépérissement des forêts dû au climat: un phénomène planétaire croissant? *Unasylva* 60:231-232.
- Allen C. D., Macalady A.K., Bachelet D., McDowell N., Venetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., R. Fensham, Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. (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.
- Amraoui F. (2005). Contribution à la connaissance des aquifères karstiques: cas du lias de la plaine du Saïss et du cause moyen atlasique tabulaire (Maroc). Doctorat d'Atat, Université Hassan II, Casablanca.
- Aussenac G., (1981). L'interception des précipitations par les peuplements forestiers. *La Houille Blanche* 7/8: 531-536.
- Aussenac G., Finkelstein D. (1983). Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du Cèdre. *Annales des Sciences Forestières* 40: 67-77.
- Baise D. (2000). Guide des analyses en pédologie. 2<sup>e</sup> édition revue et augmentée. INRA Éditions. 257 p.
- Bréda N., Cochard H., Dreyer E., Granier A. (1992). Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Can. J. For. Res.* 23: 1136-1143.
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63: 625-644.
- Bruand A., Chenu C. (1994). Constitution physique du sol. *Techniques agricoles*, n° 1130, 12 p.
- Chevalier M., Cheddadi R., Chase B.M. (2014). CREST (Climate REconstruction SofTware): a probability density function (PDF)-based quantitative climate reconstruction method, *Clim. Past*, 10: 2081-2098.
- Chouraichi M. (2008). Évaluation de la relation entre les paramètres physiques, chimiques et hydriques du sol et le dépérissement du cèdre dans la région du Moyen Atlas et élaboration de l'indice de sensibilité (IS) du cèdre au dépérissement. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, 41: 78-94.
- Courbet F., Lagacherie M., Marty P., Ladier J., Ripert C., Riou-Nivert P., Huard F., Amandier L., Paillassa E. (2013). Le cèdre en France face aux changements climatiques bilan et recommandations. infodoc. agro-paristech.fr.
- Ducrey M., (1994). Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen: Aspects écophysologiques de sa réaction à la sécheresse. Actes du Séminaire International sur le cèdre de l'Atlas, Ifran e (Maroc); 7 -11 juin 1993: 140 -150.

- Ducrey M., Huc R., Ladjal M., Guehl J.M. (2008). Variability in growth, carbon isotope composition, leaf gas exchange and hydraulic traits in the eastern Mediterranean cedars *Cedrus libani* and *C. brevifolia*. *Tree Physiology* 28: 689–701.
- Eastaugh C. (2008). Adaptations of forests to climate change: a multidisciplinary review. IUFRO Occasional Paper 21. International Union of Forest Research Organizations (Vienna, Austria), 89 p.
- Ekern O.C. (1950). Raindrop impacts as the force initiating soil corrosion. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 15: 7-10.
- Finkelstein D. (1981). Influence des conditions d'alimentation hydrique sur le débourrement et la croissance des jeunes plants de cèdres (*Cedrus atlantica* Manetti) cultivés en serre. *Ann. Sci. For.*, 38: 109-126.
- GEPPA (1981). Synthèse des travaux de la commission de cartographie 1970-1981, Doc. multicopié, 20 p.
- GIEC (2001). Bilan 2001 des changements climatiques: Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. PNUE, OMM; 101 pages.
- GIEC (2007a). Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Résumé à l'intention des décideurs. 20 pages.
- GIEC (2007b). Bilan 2007 des changements climatiques: les bases scientifiques physiques (Résumé à l'intention des décideurs, 2 février 2007). Contribution du Groupe de Travail I au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Ministère des Affaires Étrangères, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, Ministère Délégué à l'Enseignement Supérieure et à la Recherche (France); 25 pages.
- GIEC, (2013). 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC sur les changements climatiques et leurs évolutions futures. Rapport de synthèse. Volume 1. Les éléments scientifiques.
- Granier A., Colin F. (1990). Effets d'une sécheresse édaphique sur le fonctionnement hydrique d'*Abies bornmulleriana* en conditions naturelles. *Ann. Sci. For.* 47: 189-200.
- Granier A., Badeau V., Bréda N. (1995). Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. Revue forestière française, vol. XLVII, n° spécial «Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois», p: 59-68.
- 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.
- Hainry D. et Colombet M. (2009). Bilan des introductions et perspectives d'utilisation du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) en Bretagne. Centre Régional de la Propriété Forestière de Bretagne, 10p
- Groupe d'Étude des Problèmes en Pédologie Appliquée (GEPPA), 1981. Synthèse des travaux de la commission de cartographie 1971- 1981, doc, multicopié 20 p.
- Hillel, D. (1960). Crust formation in loessial soils. *Trans. Int. Soil Sci. Cong. Madison 7<sup>th</sup> I*, 330-339.
- Hillel D. (1974). L'eau et le sol: principes et processus physiques. Department of Soil Sciences. The Hebrew University of Jerusalem, 288 p.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In Climate Change 2013. The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds)]. Cambridge University Press (Cambridge, UK and New York, USA).
- Lepoutre B. (1963 b). Recherche sur les conditions édaphiques de régénération des cédraies marocaines. *Ann. Rech. For. Maroc*. Rapport 1957-1961 6 (2) 211p.
- Lepoutre B., Martin J., Chamayou J. (1966). Le Causse moyen-atlasique. Congrès de pédologie méditerranéenne, Madrid : excursion au Maroc. T.I, 2<sup>ème</sup> partie: Description des régions traversées, chap. IV, pp. 207-226. *Les Cahiers de la Recherche agronomique*, 24: ORSTOM Collection de Référence. N°13706.
- Mathieu C. et Fieltain F. (1998). Analyses physiques des sols. Méthodes choisies, Édition Tec et Doc. 275p.
- Martin J. (1981). Le Moyen Atlas central : étude géomorphologique. Notes et mémoires du service géologique N° 258 bis. 445 p.
- M'Hirit O. (1982). Étude écologique et forestière des cédraies du Rif Marocain: Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la production du cèdre de l'Atlas, *Ann. Rech. For. Maroc* 2: 499.
- Moisselin J.M, Schneider M., Canellas C., Mestre O., (2002). Changements climatiques en France au 20<sup>ème</sup> siècle. Étude de longues séries de données homogénéisées françaises de précipitations et températures. *La météorologie* 38: 45-56.
- McIntyre D.S. (1958). Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Sci.* 85: 261-266.
- Raffa, K. F., Aukema, B. H., Bentz, B. J., Carroll, A. L., Hicke, J. A., Turner, M. G., Romme, W. H. (2008). Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions, *Bioscience* 58:501-517.
- Reynolds W.D., Elrich D.E. (1985). Measurement of field saturated hydraulic conductivity, sortivity, and the conductivity-pressure head relationship using "Guelph permeameter". In proceedings, National Water Well Association Conference on Characterization and monitoring of the vadose zone. Denver CO. 25p.
- Tackett J.L., and Pearson R.W., (1965). Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci.* 99: 407-413.
- Thorntwaite, C.W., Mather, J.R. (1955). The water balance. Laboratory of Climatology, Publication in Climatology, n°8.
- Toth J., and Turrel M., (1981). Croissance radiale et longitudinale de quelques résineux en fonction de l'alimentation en eau. INRA. Mitteilungen des forstlichen Bundesversuchsanstalt in Wien. Symposium IUFRO La croissance des arbres en diamètre. Innsbruck 9-12/09/1980 177-192.
- Turc, L. (1955). Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques* 6: 1-131.
- Walkey A. Black I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 34: 29-38.