

Projet ANR-06-VULN-004 6

DRYADE

Programme Vulnérabilité : Milieux et Climat 2006

A	MEMOIRE SCIENTIFIQUE	2
A.1	Enjeux et problématique, état de l'art	2
A.2	Approche scientifique et technique	4
A.3	Résultats obtenus	6
A.3.1	Interactions sol/arbres (operation 2.6.3)	6
A.3.2	spatialisation des proprietes de sols.	14
A.3.3	Modélisation (Opération 2.6.3)	19
A.4	Conclusions.....	20
A.5	Références.....	20

A MEMOIRE SCIENTIFIQUE

A.1 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Nous ne reviendrons pas sur la question des dépérissements de sapin en zone méditerranéenne largement évoquée dans le rapport du partenaire 5. Notre contribution porte sur les facteurs liés à l'alimentation hydrique des sapinières et en particulier comment cette alimentation peut être affectée par les propriétés hydriques du sol. Mc Dowell, Pockman et al., (2008) identifient deux mécanismes conduisant à la mortalité des arbres qui sont la rupture hydraulique par cavitation et la privation de carbone du fait de la fermeture des stomates. Ces deux mécanismes sont liés au stress hydrique et peuvent conduire à la mort de l'arbre soit directement, soit par l'action de bio-agresseurs sur des arbres affaiblis (cycle de Manion (Manion, 1991)). La mortalité peut intervenir par petites zones (cas du Ventoux) ou sur des versants entiers (cas de la Vésubie). Un des enjeux est donc de comprendre comment les propriétés du sol conditionnent la vulnérabilité des arbres aux stress hydriques et comment les arbres s'adaptent à des situations de sécheresse. De nombreux travaux portent sur la ressource hydrique. Celle-ci est difficile à caractériser car de fortes incertitudes existent sur la profondeur d'enracinement et la réserve hydrique unitaire du fait de l'hétérogénéité de la structure du sol (cailloux, porosité structurale). Ces incertitudes sont particulièrement importantes en zone de montagne méditerranéenne où la caractérisation des sols est rendue difficile par la teneur en cailloux élevée et la faible accessibilité des sites aux moyens de prospection lourds.

Il est connu que les arbres mettent en place des mécanismes d'adaptation à la sécheresse avec des systèmes racinaires qui vont varier en fonction des conditions hydriques rencontrées. Certains auteurs (Sperry, Adler et al., 1998; Hacke, Sperry et al., 2000; West, Hultine et al., 2008) montrent que le rapport « surface des racines/indice foliaire » est un élément clé de l'adaptation et que la réponse au stress peut être modélisée par une approche purement hydraulique. Le rapport « indice foliaire/surface d'aubier » est un autre indicateur révélant le comportement des arbres face au stress hydrique (Withehead, Edwards et al., 1984; Margolis, Gagnon et al., 1988; Mencuccini and Grace, 1995; White, Beadle et al., 1998; Bréda, Huc et al., 2006), ce rapport étant plus élevé si les conditions sont humides. La surface d'aubier peut être réduite à l'issue d'une période de sécheresse, la mortalité de certaines branches induisant une réduction de la surface conductrice de l'arbre (Margolis, Gagnon et al., 1988; Langström and Hellqvist, 1991; Nadezhdina, 2010).

Martinez-Vilalta, Piñol et al., (2002) identifient la profondeur des racines, la vulnérabilité à l'embolie et la conductance minimale du couvert comme les principaux processus à modéliser pour caractériser la vulnérabilité des arbres à la sécheresse. Parmi ces facteurs, la profondeur d'enracinement est de loin le facteur le plus complexe à caractériser. Le rôle des racines profondes dans l'alimentation hydrique en conditions sèches a été mis en évidence (Rambal, 1984; Nadezhdina, Cermak et al., 2007; Querejeta J.I., 2007). Ces résultats restent cependant qualitatifs et il manque toujours des connaissances sur la dynamique de l'enracinement permettant d'évaluer les volumes de sols sollicités pour l'alimentation hydrique des arbres.

Concernant le sapin pectiné, on montre que l'espèce adopte très rapidement une stratégie d'évitement de la sécheresse avec une fermeture précoce des stomates (Aussenac G., 2002; Peguero-Pina, Camarero et al., 2007). Cela se retrouve sur la dynamique de croissance,

Battipaglia, Saurer et al., (2009) montrant, par une analyse dendro-chronologique, la forte sensibilité de la croissance au climat, en particulier en période printanière.

Pour appréhender la vulnérabilité du sapin à la sécheresse nous nous sommes focalisés sur la régulation des flux hydriques en relation avec les propriétés du sol. Pour cela nous nous intéressons au contrôle stomatique et à la répartition entre parties aériennes et souterraines résultant de l'histoire hydrique de l'arbre. Trois sous objectifs importants ont structuré notre travail : 1) **la caractérisation du fonctionnement hydrique de l'arbre en lien avec les propriétés du sol pour identifier les facteurs de vulnérabilité liés aux sols**, 2) **la mise au point d'outils de spatialisation de ces facteurs en s'appuyant sur la télédétection et la modélisation** et 3) **la modélisation du fonctionnement hydrique à l'échelle de l'arbre pour caractériser sa vulnérabilité**.

En ce qui concerne le premier objectif, l'innovation principale a été d'utiliser la tomographie électrique pour appréhender les caractéristiques du sol sur les premiers mètres. Cette technique largement utilisée en géophysique bénéficie d'un « background » important avec le développement d'un environnement matériel et logiciel facilitant sa mise en œuvre. La technique permet de cartographier sur un plan vertical ou en 3D la résistivité électrique qui varie en fonction de la teneur en éléments grossiers et la teneur en eau (Ruffet, Darot et al., 1995; Samouelian, Tabbagh et al., 2005; Rey, Jongmans et al., 2006). La tomographie a été utilisée avec succès pour caractériser des discontinuités telle que la roche mère (Zhou, Beck et al., 2002; Hauck, Vonder Muhll et al., 2003; Sass, 2007) mais peu pour étudier la capacité de rétention hydrique des sols forestiers. L'enjeu du travail réalisé a été de confronter les cartes de résistivité hydriques au fonctionnement hydrique de l'arbre appréhendé par des variables écophysologiques et l'état sanitaire des arbres.

Pour le second objectif, deux clés de spatialisation ont été étudiées : la caractérisation des arbres morts à partir des données de télédétection optique et la cartographie de l'ETR en utilisant les mesures dans l'infrarouge thermique. Ces dernières années, plusieurs études ont été menées sur la détection et la cartographie des changements relatifs à différentes espèces d'arbres, causés soit par des insectes (Wulder, Dymond et al., 2006), soit par des facteurs climatiques telle que la sécheresse (McVicar and Jupp, 1998) ou encore les dégâts liés à la tempête de décembre 1999 (Stach, 2000), ou par des feux de forêts (Wang, Qu et al., 2008). Ainsi, l'imagerie satellite a prouvée son efficacité dans le cas de phénomènes de dépérissements à caractère massif ou plus précisément de défoliations. Morin, Jolly et al., (2007) montrent qu'il est possible de d'observer des dépérissements par télédétection différentielle, mais cela nécessite d'étayer les observations par des observations au sol. Dans le présent travail nous avons recherché si la mortalité des arbres était détectable en utilisant une série d'images SPOT dont la couverture spatiale est adaptée au suivi de massifs forestiers de taille importante (ce qui est plus difficile avec la très haute résolution spatiale ne couvrant que des surfaces de petite taille). La télédétection dans l'infrarouge thermique est largement employée pour évaluer les stress des couverts végétaux. Toutefois dans le cas des couverts forestiers, des difficultés spécifiques ont été identifiées tels que la faiblesse du signal de température induit par la forte rugosité aérodynamique (Pierce, Running et al., 1990), des confusions avec sous bois (Duchemin, Guyon et al., 1999) ou des effets angulaires (Lagouarde, Ballans et al., 2000). Notre objectif était donc d'analyser l'amplitude du signal de température dans le cas des sapins et d'évaluer si des signatures spatiales de température de surface pouvaient être décelables sur un versant et reliées aux propriétés des sols.

Concernant la modélisation du fonctionnement hydrique de l'arbre, il est rapidement apparu qu'un modèle représentant à la fois le fonctionnement hydraulique de l'arbre et carboné était nécessaire pour appréhender la vulnérabilité du sapin à la sécheresse. Les bases de cette

modélisation seront orientées selon les résultats obtenus sur le terrain en privilégiant le modèle CASTANEA (Dufrêne, Davi et al., 2005) utilisé par l'URFM (partenaire 05) pour représenter le fonctionnement carboné et un modèle inspiré de celui de Sperry (Sperry, Adler et al., 1998) pour le fonctionnement hydrique.

Concernant la cartographie des dépérissements avérés par télédétection, nos objectifs sont restés conformes à ceux annoncés dans l'opération 2.6.2. Par contre, les objectifs présentés ci-dessus ont été beaucoup plus ambitieux que ceux affichés dans l'opération 2.6.3 qui visait une représentation assez descriptive de la disponibilité en eau. Ce changement de cap a été induit par la possibilité d'utiliser la tomographie électrique (non prévue dans le projet initial) qui a remis en question le schéma trop simpliste d'interaction entre ressources hydriques et vulnérabilité à la sécheresse que nous avons envisagé au départ. Notre action s'est donc réorientée sur la compréhension des relations entre les caractéristiques du sol, du climat et des arbres et le comportement des arbres sur la régulation des flux hydriques et son développement.

A.2 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

L'approche scientifique a avant tout été expérimentale pour essayer de comprendre les principales interactions arbre-milieu et développer des méthodes d'observation pour caractériser les sols sur des milieux complexes en zone méditerranéenne. Les mesures ont été réalisées à différentes échelles spatiales et des suivis temporels ont été menés en 2008, 2009 et 2010. Cette période a permis d'avoir à la fois une année humide (2008) et une année sèche (2009). Le site du Ventoux a été privilégié avec toutefois quelques mesures réalisées en forêt de l'Issole. Les sites et leur identification sont les mêmes que ceux de l'URFM avec qui le travail a été fait en étroite collaboration.

Caractérisation du sol : Devant l'hétérogénéité du sol, en particulier celle liée aux fragments grossiers, et la difficulté d'ouvrir des fosses nous avons très rapidement opté pour l'utilisation de la tomographie électrique. Cette technique permet de reconstituer des cartes de résistivité électriques en combinant différemment des électrodes placées à la surface, ce qui en fait une technique non invasive particulièrement appréciable dans le contexte de l'étude. Un compromis doit être trouvé entre profondeur de prospection et la résolution spatiale en jouant sur l'écartement des électrodes. Plus l'écartement est important, plus la zone prospectée est vaste (en surface et en profondeur) et moins la résolution spatiale est fine. Les mesures ont été déployées de la manière suivante

- Des transects basse résolution sur les sites DVX2, DVX4 et DVX5 et sur DISOL3 et DISOL4
- Un long transect (~800 m) basse résolution a été réalisé sur les sites disposés en courbe de niveau (TC3 à TC16)
- Des transects haute résolution sur les sites DVX2, DVX5 et quelques placettes du transect
- Des cartographies 3D autour d'une quinzaine d'arbres présentant des niveaux de dépérissement variable.

Ces mesures ont été complétées par des mesures en laboratoire des propriétés élémentaires des éléments constitutifs du sol (terre fine, cailloux), des propriétés physiques du sol (granulométrie, humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent) et sur sites (teneur en cailloux).

Suivi à l'échelle locale des arbres : Un suivi de la transpiration a été réalisé sur une période de 3 ans sur les placettes DVX2 et DVX5. Initialement prévu en 2008 et 2009, le dispositif a

été maintenu en 2010 pour analyser le comportement des arbres après les stress hydriques sévères constatés en 2009. Ce suivi a été accompagné par une mesure des variables climatiques (précipitations, Rayonnement global incident, humidité et température de l'air, Vent), de la température de surface du sommet de la couronne et de profils d'humidité par des mesures capacitatives. Du fait des difficultés d'installer des tours sur le Ventoux et de la volonté de suivre plusieurs sites, les mesures climatiques et de températures ont été placés au dessus de la cime des arbres (Figure 1) et ont donné des résultats très satisfaisants malgré un support souple. On notera qu'un développement spécifique a été réalisé sur l'utilisation de capteurs de flux de sève à dissipation thermique utilisé en mode de chauffage cyclique pour minimiser le coût énergétique (Nourtier, Chanzy et al. 2011). En 2009, deux nouveaux sites ont été instrumentés sur le transect en courbe de niveau pour disposer de mesures sur les différents types de sols identifiés avec la tomographie électrique.



Figure 1 : installation de la plateforme de mesure climatique à la cime des arbres

Suivi à l'échelle du versant avec la thermographie infra-rouge : Nous avons réalisé des images avec la caméra thermique FLIR en faisant des visées depuis des versants en vis-à-vis en choisissant des point de vue permettant une vus aussi plongeante que possible. Ainsi une série de mesure a pu être réalisée sur le transect en courbe de niveau et sur la forêt d'Issole. Cette configuration d'observation présente l'avantage de la souplesse dans la mise en œuvre des mesures. Par contre les angles de visée ne sont pas forcément optimaux.

Suivi à l'échelle du massif avec les images SPOT : Nous avons rassemblé les images SPOT acquises entre 1988 et 2010. Un travail d'homogénéisation de la série a été réalisé puis les variations de réflectance ont été reliées aux dépérissements.

A.3 RESULTATS OBTENUS

A.3.1 INTERACTIONS SOL/ARBRES (OPERATION 2.6.3)

A.3.1.1 Les apports de la tomographie électrique pour caractériser les sols.

Les profils de tomographie ont révélé des structures très nettes de la résistivité (Figure 2) avec des structures résistives proches de la surface couvrant quelques m². De telles structures s'observent sur une coupe de sol visible à proximité du site DVX5 qui fait apparaître des affleurements rocheux de taille similaire (Figure 3). Ce type de formation est typique de l'épikarst, où l'on a au voisinage de la surface une fragmentation de la couche calcaire reposant sur des matériaux plus meubles d'altération. Afin de conforter l'interprétation des mesures de résistivité, nous avons réalisé des mesures sur de la résistivité des différentes composantes du sol (terre fines, roches). Nous trouvons sur le mont Ventoux que la résistivité de la terre fine varie entre 50 et 600 Ωm^{-1} tandis que celle de la roche est de 3000 Ωm^{-1} . Des mesures de résistivité sur les affleurements rocheux conduisent à des mesures assez variables entre 1200 Ωm^{-1} et 3000 Ωm^{-1} . Cette variabilité vient de la fracturation des massifs rocheux pouvant être remplis de matériaux conducteurs. L'ouverture de fosses réalisées au même endroit que les mesures de tomographie électrique, montre que des résistivités supérieures à 1200/1600 Ωm^{-1} correspondent à des matériaux qu'un observateur qualifierait de roche mère. Ces différentes observations mettent en évidence l'intérêt de la tomographie pour appréhender les structures grossières des profils de sol. Toutefois on attire l'attention que ces résultats sont spécifiques au Ventoux et ne peuvent pas être généralisés sans précautions. Les profils réalisés dans la forêt de l'Issole ont montré que les structures rocheuses ne sont pas identifiables (Figure 4) du fait du faible contraste de résistivité entre la terre fine (20-500 Ωm^{-1}) et la roche (650 Ωm^{-1}).

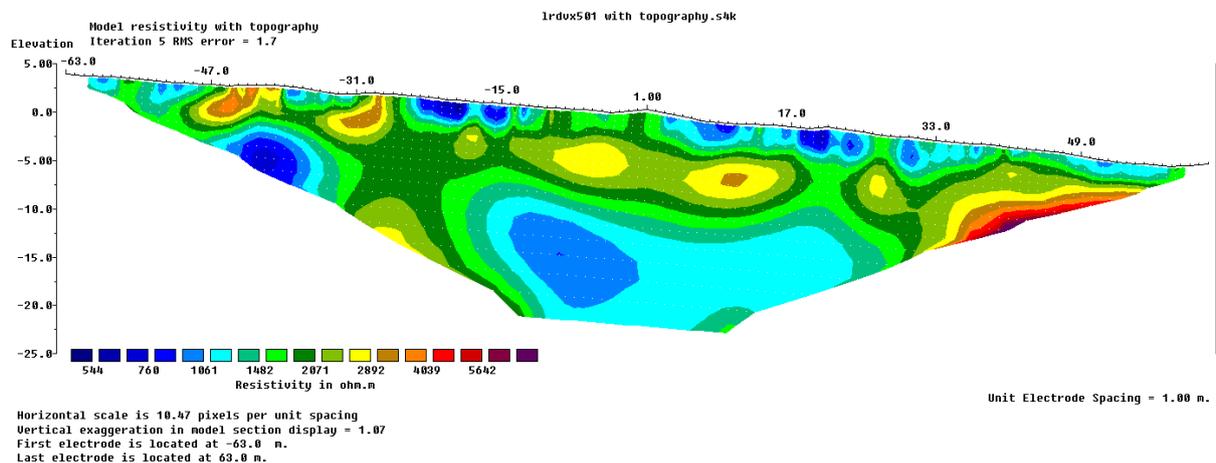


Figure 2 : reconstitution de la résistivité électrique par tomographie sur un plan vertical (Ventoux, placette DVX5)



Figure 3 : Coupe de sol à proximité de la placette DVX5 .

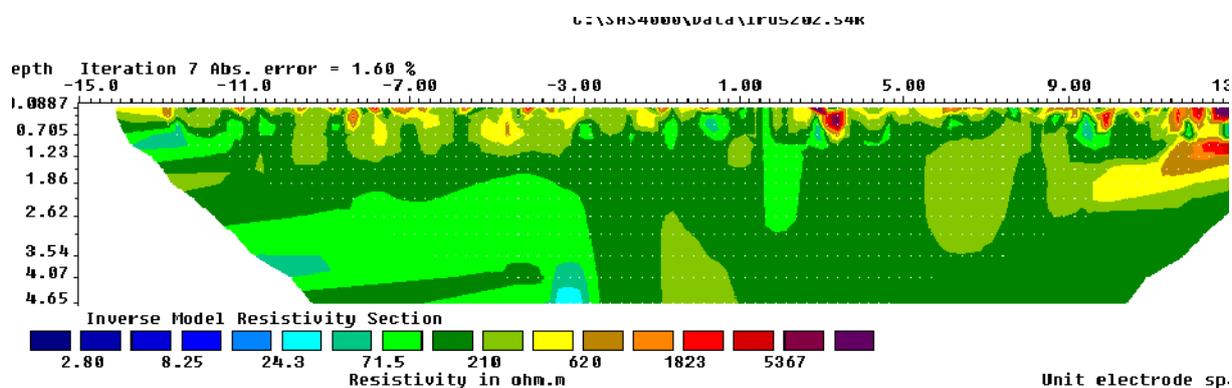


Figure 4 : reconstitution de la résistivité électrique par tomographie sur un plan vertical (Forêt de l'Issole). Le calcaire marneux se trouvant de manière relativement continue à une profondeur comprise entre 0.5 et 1 m n'est pas visible avec les mesures de résistivité électrique.

La réserve utile d'un sol étant fortement conditionnée par sa charge en éléments grossiers, nous avons développé une méthode d'estimation de celles-ci en essayant de relier la fraction volumique de cailloux (RFC) à la conductivité apparente. Nous nous sommes appuyés pour cela à un modèle de mélange (que nous avons validé sur des simulations numériques) en considérant le sol comme un milieu biphasique avec une phase de cailloux et une phase de terre fine. Une telle méthode suppose que les conductivités de chacune des phases soient connues. L'étude montre que l'estimation de la teneur en cailloux est possible (RMSE de 0.22 m^3m^{-3}), que la connaissance de l'humidité est nécessaire et que les conditions sèches sont préférables pour caractériser la teneur en cailloux (Figure 5). En combinant ces estimations avec la profondeur d'apparition de la roche mère et les caractéristiques de rétention d'eau de la terre fine, on peut estimer la réserve utile et la cartographier le long des transects de résistivité électriques (Figure 6 et 7). Même si ces estimations restent frustrées, elles permettent d'avoir une caractérisation de la variabilité au sein d'un site et une comparaison entre les sites. Ces résultats sont rassemblés dans un article en préparation (Xie and Chanzy, 2011).

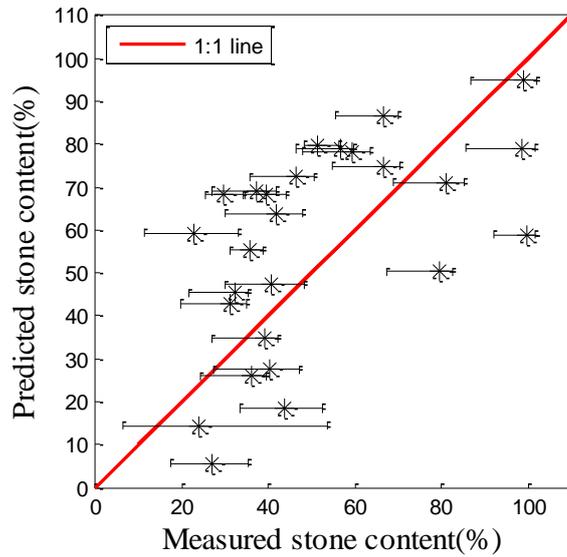


Figure 5 : Prédiction de la teneur volumique en cailloux à partir de la résistivité apparente du mélange sol/cailloux. Comparaison avec des mesures réalisées in situ.

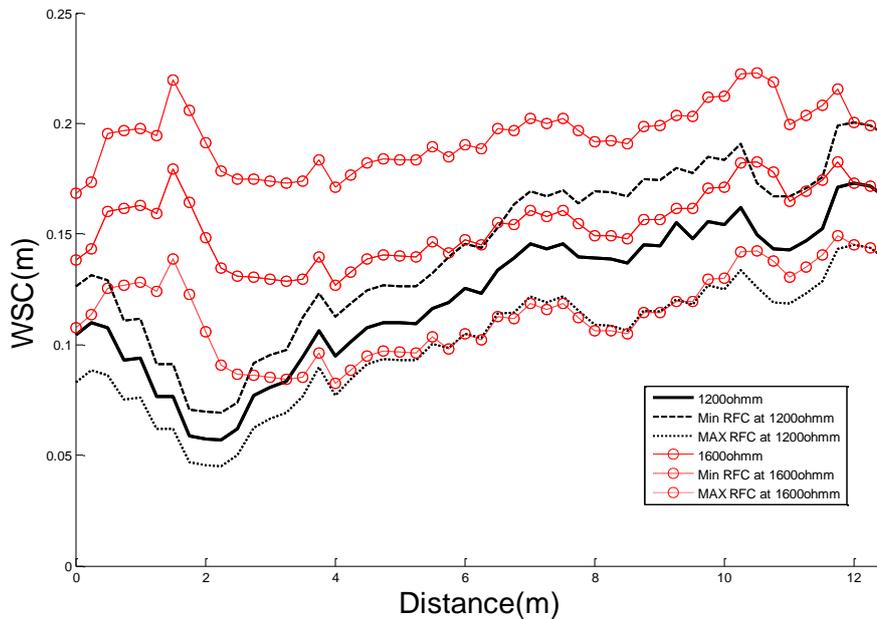


Figure 6 : Estimation de la Reserve utile en considérant l'erreur sur l'estimation de la teneur en cailloux (pointillés) et le seuil utilisé pour localiser la roche mère.

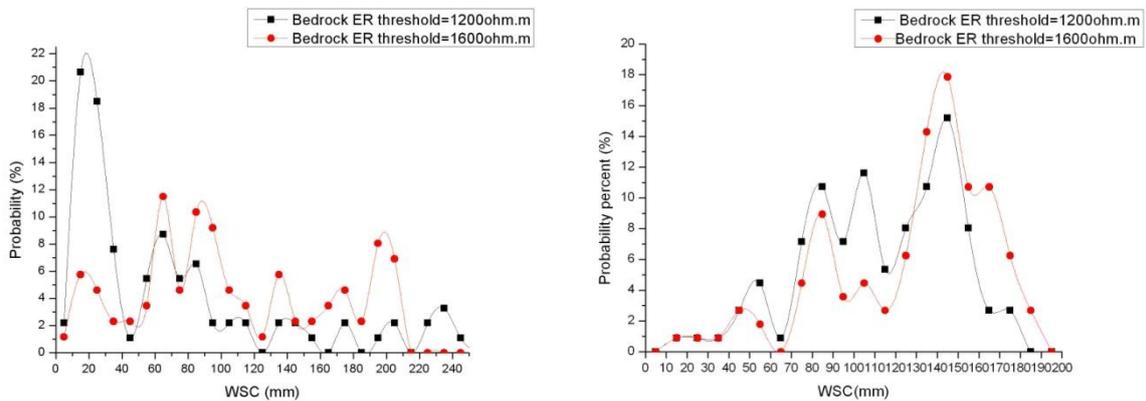


Figure 7 Loi de distribution des valeurs de réserve utiles pour les sites DVX2 (gauche) et DVX5 (à droite)

A.3.1.2 Les relations entre les propriétés du sol révélées par la tomographie et l'état sanitaire des arbres.

Un profil de grande longueur a été réalisé sur le transect en courbe de niveau. Celui-ci a permis d'échantillonner un grand nombre de situations de sol et d'arbres localisés à proximité de la ligne de mesure. Tous les arbres le long de celle-ci ont été répertoriés, leurs caractéristiques mesurées (hauteur, diamètre, surface d'aubier, analyse dendrochronologiques documentés dans le rapport de l'URFM) et leur état sanitaire noté. Les résultats sont montrés sur la Figure 8. Celle-ci fait apparaître des faciès de sol présentant des conductivités électriques contrastées que l'on peut regrouper en 4 classes :

- 1) Les sols conducteurs (sur une grande profondeur (>5 m) (sol présentant des matériaux meubles avec une bonne réserve hydrique)
- 2) Les sols conducteurs (1-5 m) en surface sur un substrat résistif
- 3) Les sols moyennement conducteurs
- 4) Les sols très résistifs sur au moins 5 m (sol fortement rocheux ayant une faible réserve hydrique)

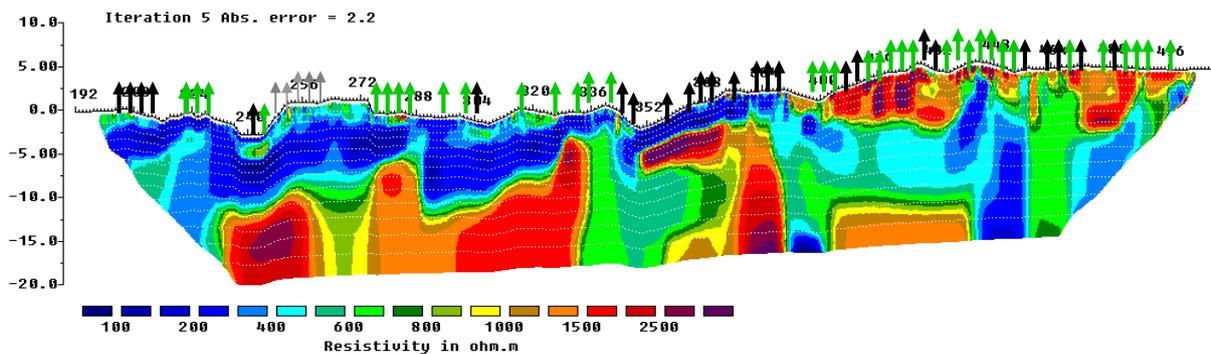


Figure 8 : portion du profil de résistivité électrique réalisé sur le transect en courbe de niveau. Les flèche correspondent à la position des arbres avec en vert les arbres sains, en gris les arbres déprimés et en noir les arbres morts. Les chiffres sur le transect correspondent à la position donnée en mètres.

On voit qu'en reliant les propriétés des sols avec l'état sanitaire des arbres, les zones à plus forte mortalité se retrouvent sur les terrains les plus conducteurs, qui sont ceux disposant d'une plus forte réserve en eau (Figure 9). Ce résultat peut paraître surprenant au premier abord mais il reste cohérent avec les observations de croissance réalisées par l'URFM qui montrent que les arbres morts sont en général ceux ayant eu au départ une meilleure croissance. Ceci suggère que la vulnérabilité des sapins au stress hydrique est très largement conditionnée par son histoire hydrique. Le rapport entre développement foliaire et enracinement serait alors une clé importante pour apprécier le comportement des sapins subissant des sécheresses.

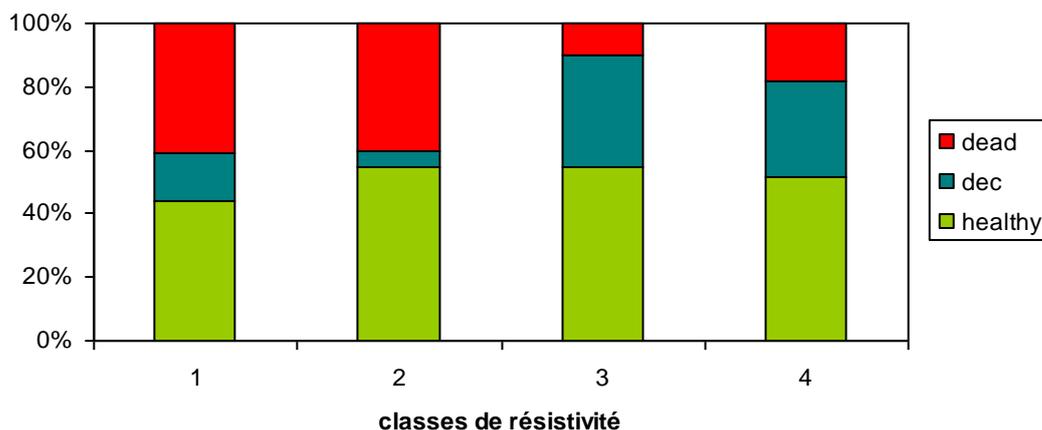


Figure 9 : proportion d'arbres selon leur état sanitaire en fonction de la classe de sols définie par sa résistivité électrique. Les classes de 1 à 4 correspondent respectivement aux sol conducteurs (bleu sur la Figure 8), aux sols conducteurs sur un substrat résistif (bleu sur rouge sur la Figure 8), aux sols à conductivité moyenne (vert sur la Figure 8) et aux sols à conductivité très faibles (rouge sur la Figure 8)

A.3.1.3 Régulation de la transpiration à l'échelle de l'arbre.

Les mesures ont été réalisées sur 4 sites DVX2, DVX5, TC9, TC11. Initialement prévu pour couvrir les extrêmes altitudinaux, l'acquisition du profil de tomographie électrique sur le transect en courbe de niveaux nous a amené à considérer deux sites additionnels pour couvrir d'une part un site sur sol très conducteurs (TC9) et un site sur sol très résistif. Les caractéristiques des sols sont montrées sur la Figure 10. Parmi les arbres suivis, nous avons pu suivre un arbre dépérissant qui est mort en 2008. Nous avons également porté sur la Figure 10 le sol correspondant à cet arbre.

Les résultats principaux sont les suivants :

- Les sapins réduisent très fortement leur transpiration notamment sur les sols des classes 1 et 4 (sols très conducteurs ou très résistifs) (Figure 11). Ceci est confirmé par les valeurs de potentiel de base minimums relevé en 2009.
- La reprise de transpiration avec les premières pluies après un stress sévère est faible. Ce phénomène est mal simulé par les modèles tels que CASTANEA (Figure 11).
- Les sapins sur les sols de classes 3 ont une transpiration qui diminue moins en période de sécheresse, même si leur niveau de transpiration n'est pas toujours très élevé (DVX5) (Figure 11).
- La reprise de la transpiration après la sécheresse de 2009 pour les arbres ayant très fortement réduit leur transpiration est difficile (Figure 11). Cette réduction est liée à une réduction forte de la conduction de sève dans les tissus profonds (Figure 12).
- Dans tous les cas, la sécheresse de 2009 s'accompagne d'une forte réduction des flux dans la partie interne du bois d'aubier. Les flux de cette partie ne redémarrent pas avec des conditions hydriques favorables, à l'exception de l'arbre en TC11 qui est sur le sol le plus caillouteux (Figure 12). Il semblerait que le stress engendre une rupture hydraulique conduisant à une réduction brutale de la surface conductrice des troncs. Ceci doit être confirmé par la mesure du bois d'aubier sur des carottes à prélever en 2010/2011.
- Le VPD et l'humidité du sol sont des facteurs importants de la régulation de la transpiration (Figure 13). La régulation par le sol est d'autant plus nette que les

conditions hydriques sont limitantes (DVX2 sur sol de classe 4 vs DVX5 sur sols de classe 3)

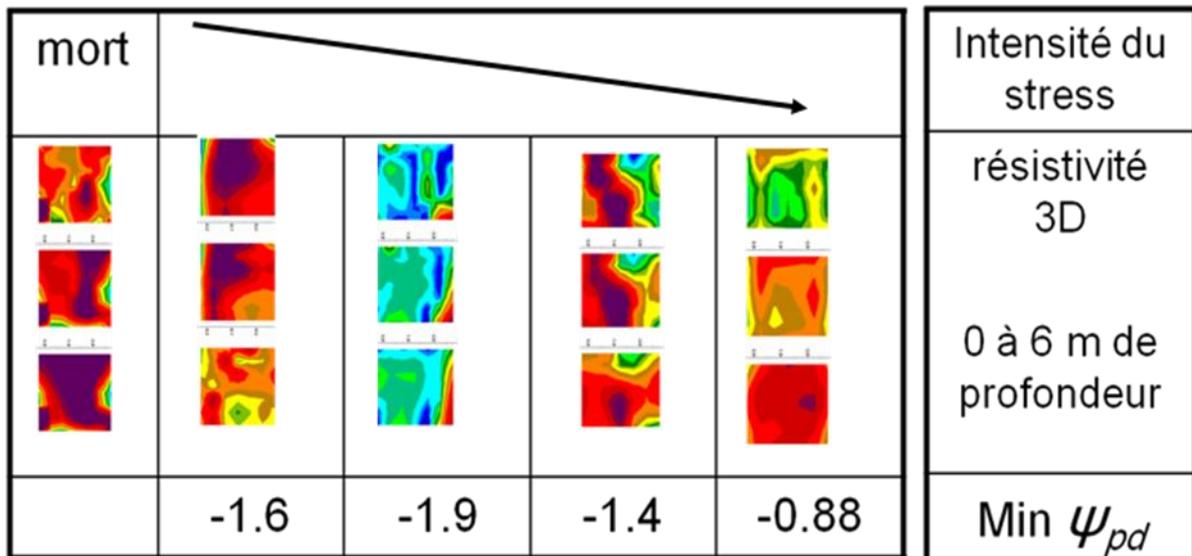
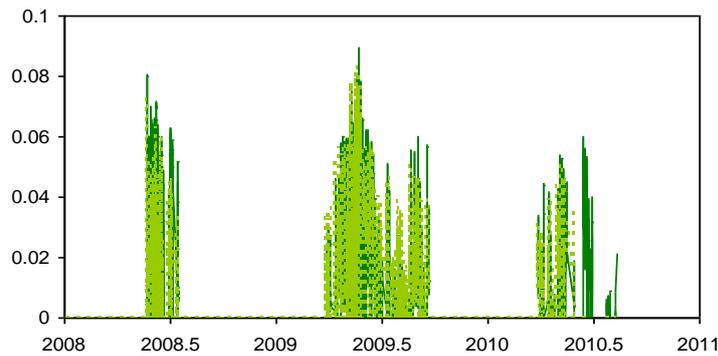
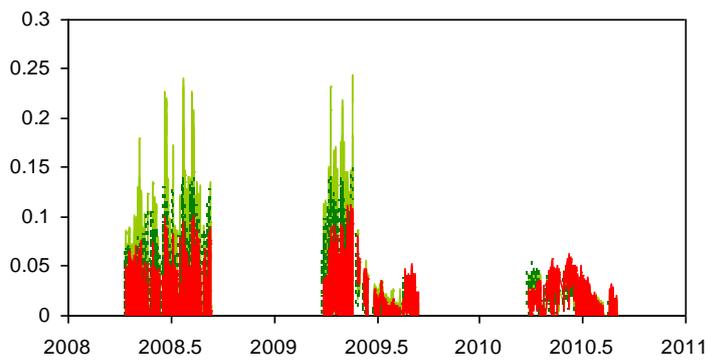
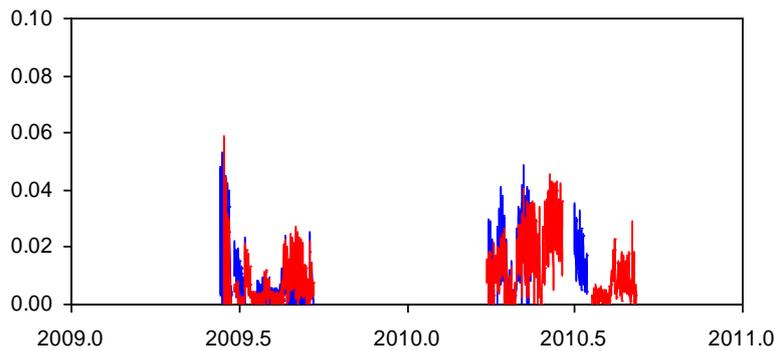


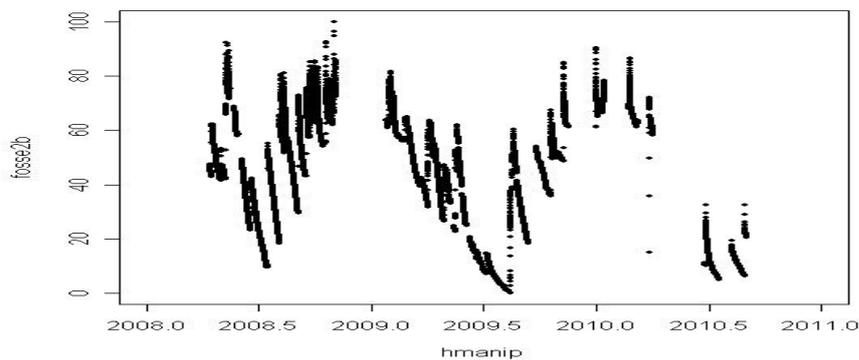
Figure 10 : sols des différents arbres instrumentés caractérisés par les plans horizontaux, répartis sur les 6 premiers mètres, d'une reconstitution 3D de la résistivité électrique. A gauche nous avons le cas d'un arbre qui est mort au cours de l'expérience 2008, puis de gauche à droite les arbres sur les sites TC11, TC9, DVX2 et DVX5.



DVX5



Transect : TC9
et TC11



Humidité sol
DVX2

Figure 11 : Flux de transpiration (mm/h) sur les différents sites en fonction du temps (donné en année). Les couleurs correspondent aux classes de sol (rouge = Classe 4, vert = classe 3 et Bleu = Classe 1. La figure du bas représente l'évolution de l'humidité du sol normalisée entre les valeurs min et max.

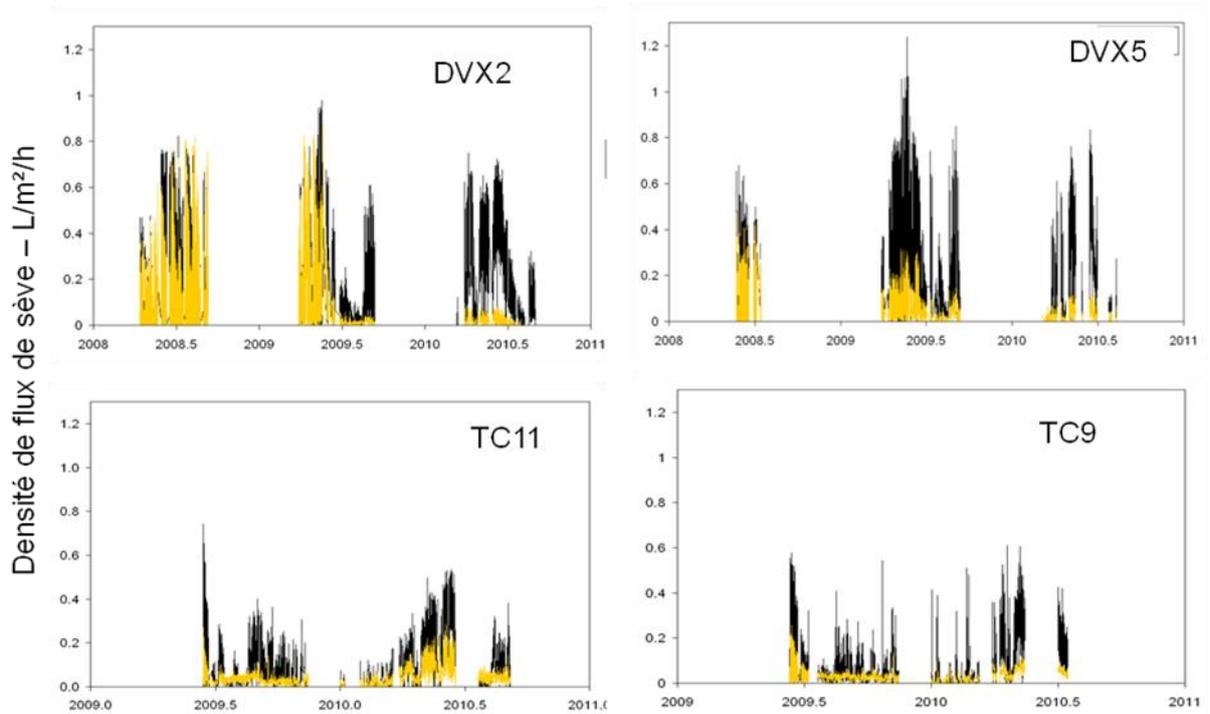


Figure 12 : densité de flux de seve au cours du temps (donné en année). En noir est donnée la densité de flux mesurée sur la partie externe (0-2 cm) du tronc. En jaune est donné le flux de la partie interne (2-4 cm).

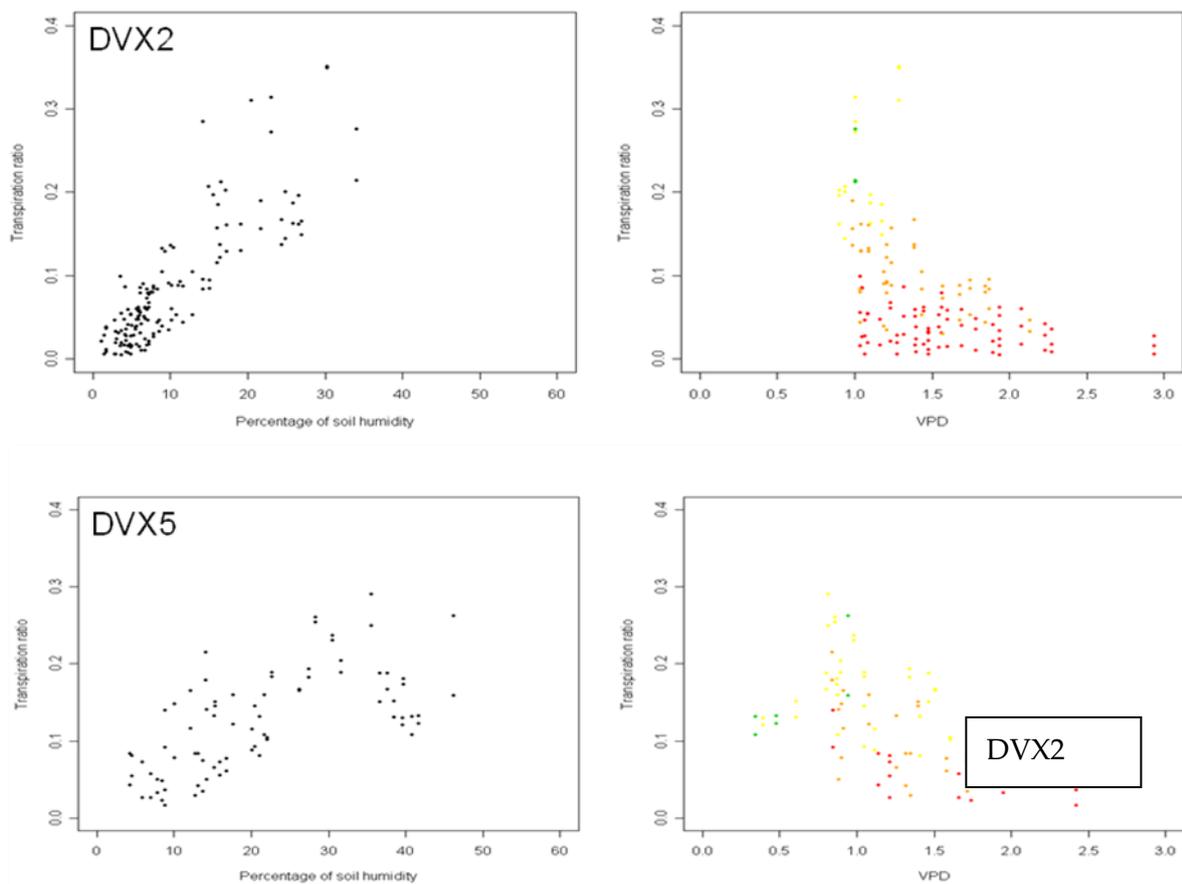


Figure 13 : Rapport de la transpiration et de la transpiration potentielle en fonction de l'humidité du sol (donnée en valeur normalisée entre le min et le max) et le VPD.

A.3.1.4 Synthèse

La tomographie électrique permet une caractérisation pertinente des sols dans le cas du mont Ventoux qui permet de révéler des comportements hydriques différents. Les arbres qui survivent le mieux sont ceux se trouvant sur des sols intermédiaires du point de vue de leur réserve hydrique. La régulation de la transpiration peut être très forte. Elle est toutefois moins marquée sur les arbres en DVX5 se trouvant sur des sols de la classe 3 (réserve hydrique intermédiaire) et soumis à une demande évaporative plus faible (effet altitude). La reprise de transpiration après un stress sévère est fortement réduite à court terme avec une faible sensibilité aux premiers apports de pluie et à plus long terme avec notamment un arrêt définitif des flux dans la partie profonde du bois d'aubier. L'arbre localisé sur un sol de la classe 1 présente un flux de transpiration très faible malgré des conditions de sol favorables. Ces points seront repris dans la modélisation dans laquelle il nous paraît important de prendre en compte la dynamique d'enracinement en relation avec les conditions hydriques, le ratio surface racine/ indice foliaire et la régulation par une réduction de la capacité de conduction de la sève après un stress sévère. L'enjeu sera de pouvoir reproduire les interactions transpiration/propriétés du sol qui montrent qu'un simple raisonnement fondé sur la demande évaporative et la réserve utile n'est pas suffisant.

A.3.2 SPATIALISATION DES PROPRIETES DE SOLS.

La tomographie électrique bien que non invasive reste une méthode lourde qui ne peut pas être envisagée pour réaliser une carte. D'autres techniques de géophysiques plus portables telles que celles basées sur l'induction électromagnétique vont être testées. Celles-ci offrent une résolution verticale moins bonne mais qui pourrait être adaptée pour faire ressortir les 4 classes de sol en choisissant bien les configurations de mesure (fréquence). Au stade actuel, la télédétection nous paraît être l'approche la plus pertinente.

A.3.2.1 Cartographie des arbres morts à partir de l'imagerie optique (visible/proche infra-rouge) (Opération 2.6.2)

Une première action sur l'analyse d'image à haute résolution spatiale a donné quelques résultats sur l'identification de la couronne des arbres (Figure 14). L'image de la segmentation finale montre des performances raisonnables avec assez peu de sur-segmentation. Il reste néanmoins encore des progrès importants à réaliser. En particulier, Les couronnes adjacentes sont assez difficiles à séparer à partir de ces critères. Pour cela nous envisageons d'inclure la forme des objets à segmenter et travailler dans des conditions d'éclairage plus adaptées. Puis nous comptons travailler sur le contenu spectral des images en utilisant une caméra XYBION pour identifier l'état sanitaire. Malheureusement, la difficulté pour trouver un stagiaire et les difficultés techniques rencontrées avec la caméra XYBION nous ont conduit à renoncer à cet axe et à privilégier l'analyse des séries de données SPOT et TM que nous avons obtenues correspondant à un lot de 130 images acquises entre 1986 et 2009.

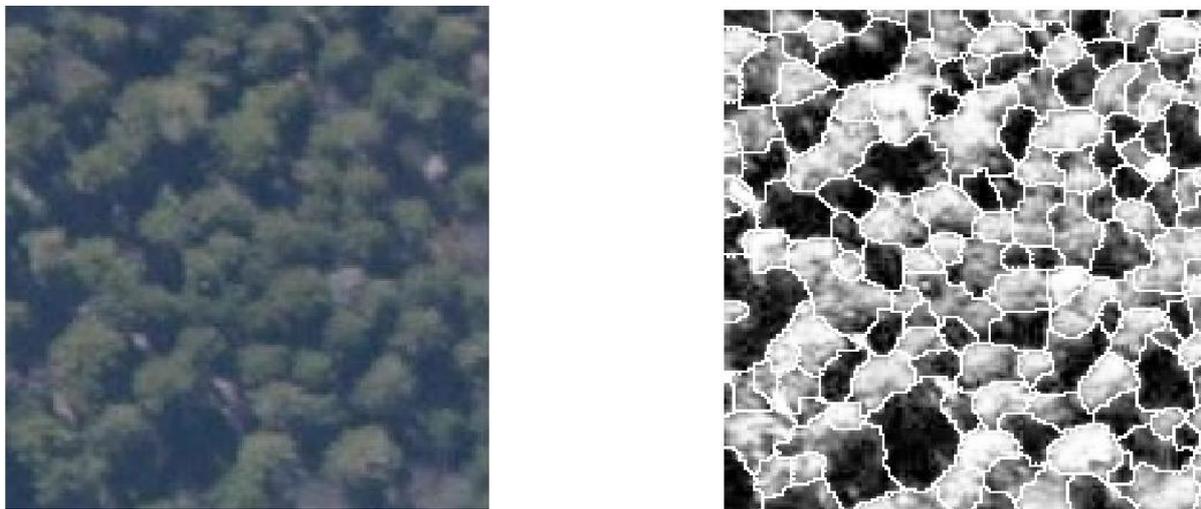


Figure 14 Image initiale de la caméra numérique (à gauche), et sa segmentation finale après adaptation de la méthode de la ligne de partage des eaux (à droite).

Dans cette série, nous avons sélectionné les images sans ombre (mars à Octobre), les avons homogénéisées en prenant en compte les corrections atmosphériques, les conditions d'éclairage et en terminant par une normalisation sur les cibles jugées stables. Cette procédure permet de réduire considérablement les variations entre images, mais un bruit résiduel subsiste malgré le soin apporté à cette phase de normalisation (Figure 15). L'interprétation des résultats conduit à un signal relativement faible (Figure 16) qui pourrait être difficile à séparer d'autres sources de variations. Sur les placettes connues il est difficile de relier le taux de mortalité avec l'indice de végétation RVI (Figure 17). Les problèmes viennent d'une part de la non adéquation de la résolution spatiale. Les dépérissements se manifestent par îlots d'arbres trop petits au regard de la taille des pixels à laquelle il faut rajouter une dégradation du fait de la co-registation nécessaire pour avoir des couples d'images. D'autre part, les conditions climatiques et la date d'acquisition peuvent jouer sur l'indice foliaire et le développement du sous bois peut rapidement masquer les zones à forte mortalité.

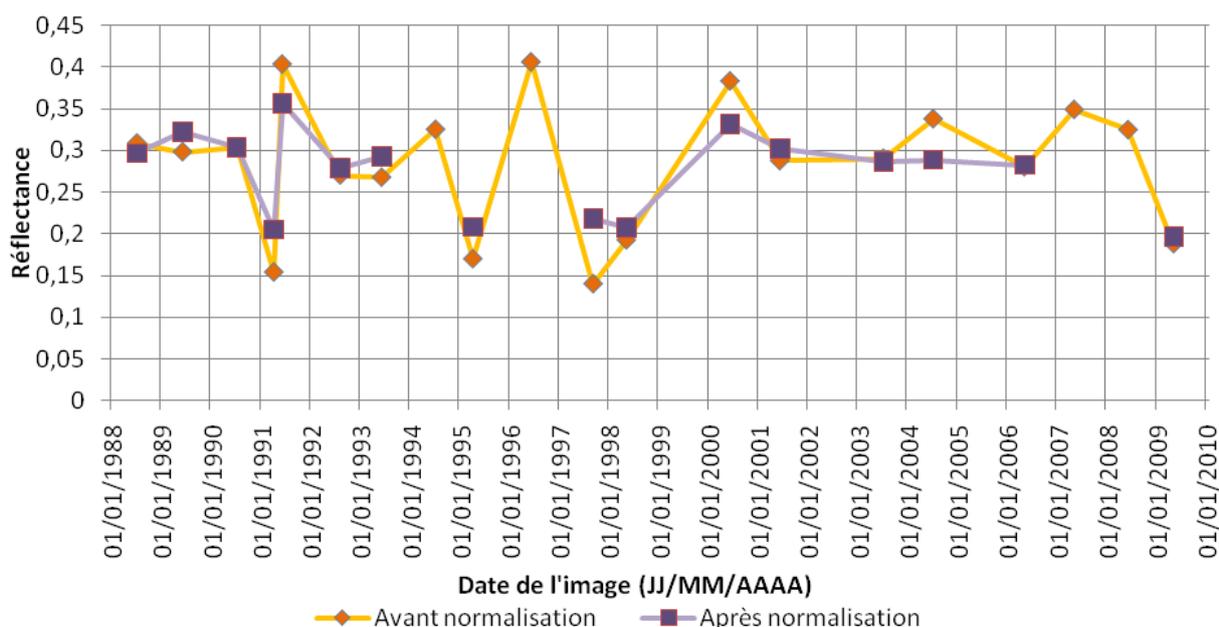


Figure 15 : Courbes des moyennes de réflectance de la végétation sur la bande spectrale B3 de la zone "Sapins en bonne santé", avant et après normalisation, en fonction de la date des images

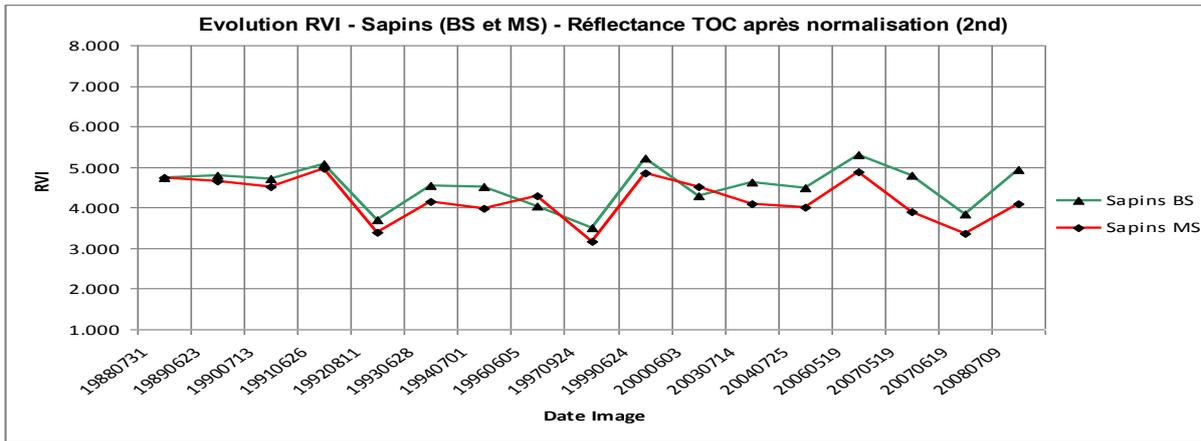


Figure 16 Evolution temporelle du RVI (dates données en aaaammjj) en fonction de l'état sanitaire des sapins (rouge = zone à fort dépérissement, vert = zone avec des sapins sains).

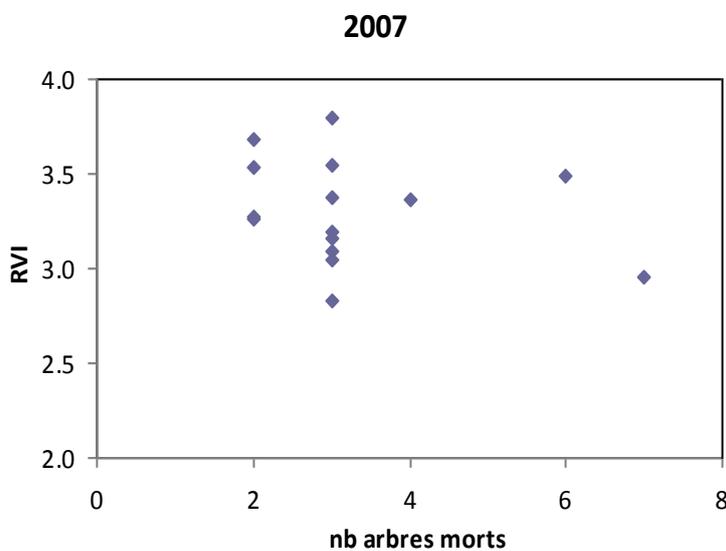


Figure 17 : Nombre de sapins morts par pixel en fonction du RVI en 2007.

A.3.2.2 Cartographies du stress hydrique par thermographie infrarouge (Opération 2.6.3)

Les mesures réalisées à l'échelle de la couronne de l'arbre ont été réalisées à la verticale avec le capteur placé au sud. Pour interpréter les images nous avons développé un indicateur $T_s - T_{s0}$ (T_s étant la température de surface et T_{s0} la température qu'aurait eue la surface en condition de transpiration potentielle) qui est un indicateur moins dépendant des conditions climatiques que $T_s - T_a$ (T_a étant la température de l'air). Pour tenir compte de la présence de branches dans le champ de visée, nous avons éliminé leur contribution au rayonnement mesuré. Les résultats montrent qu'il existe un signal de température fort lié au niveau de stress hydrique (estimé par le rapport T/T_0 ou T est la transpiration mesurée, et T_0 la transpiration potentielle calculée par le modèle ISBA) comme le montrent les Figures 18 et 19. En effet, cet indice peut varier sur une gamme de presque 10°K . Toutefois la variabilité reste importante. Elle peut être engendrée par plusieurs facteurs. La contribution de la couronne sommitale dans la transpiration totale pourrait être variable selon les conditions physiologiques de l'arbre. On remarquera sur la Figure 18, que la reprise de transpiration

après la sécheresse est faible alors que le niveau de l'indice $T_s - T_{s0}$ laisserait à penser que la reprise de la transpiration est beaucoup plus élevée. Ceci rejoint les observations faites sur les flux avec une reprise des flux après sécheresse limitée à la partie externe de la surface conductrice du tronc. D'autres sources, telles que la mauvaise prise en compte de la température des branches, les effets d'ombrage ou encore le calcul des variables climatique T_{s0} et T_0 peuvent également expliquer ces écarts.

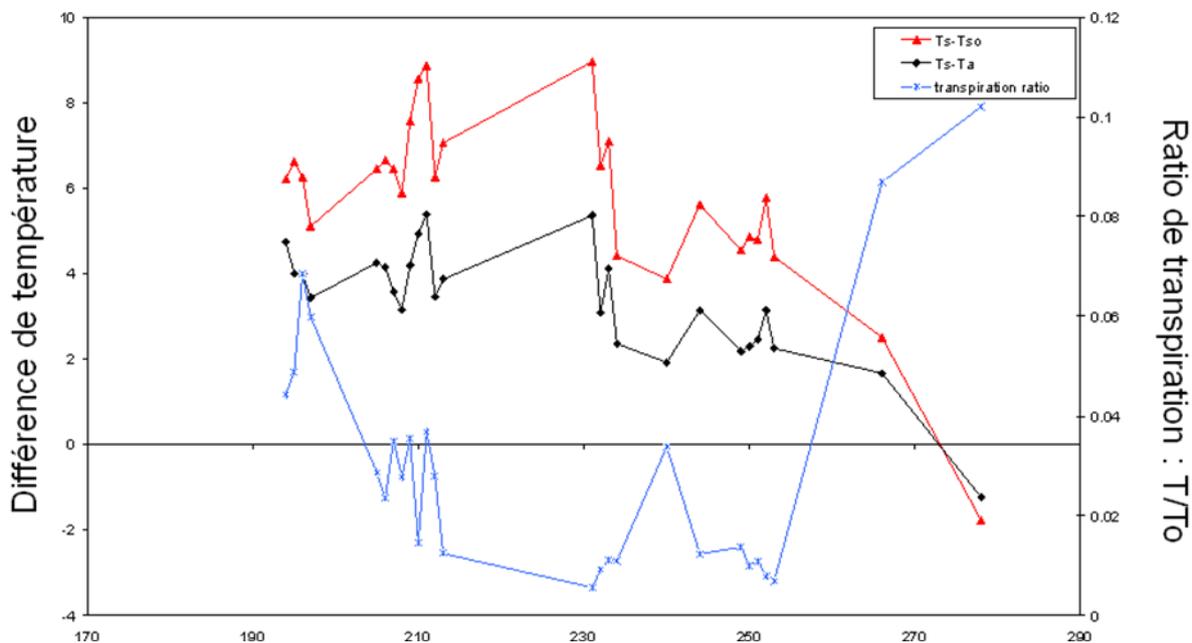


Figure 18 : Evolution des indices basés sur la température de surface en fonction du rapport T/T_0 sur la parcelle TC9.

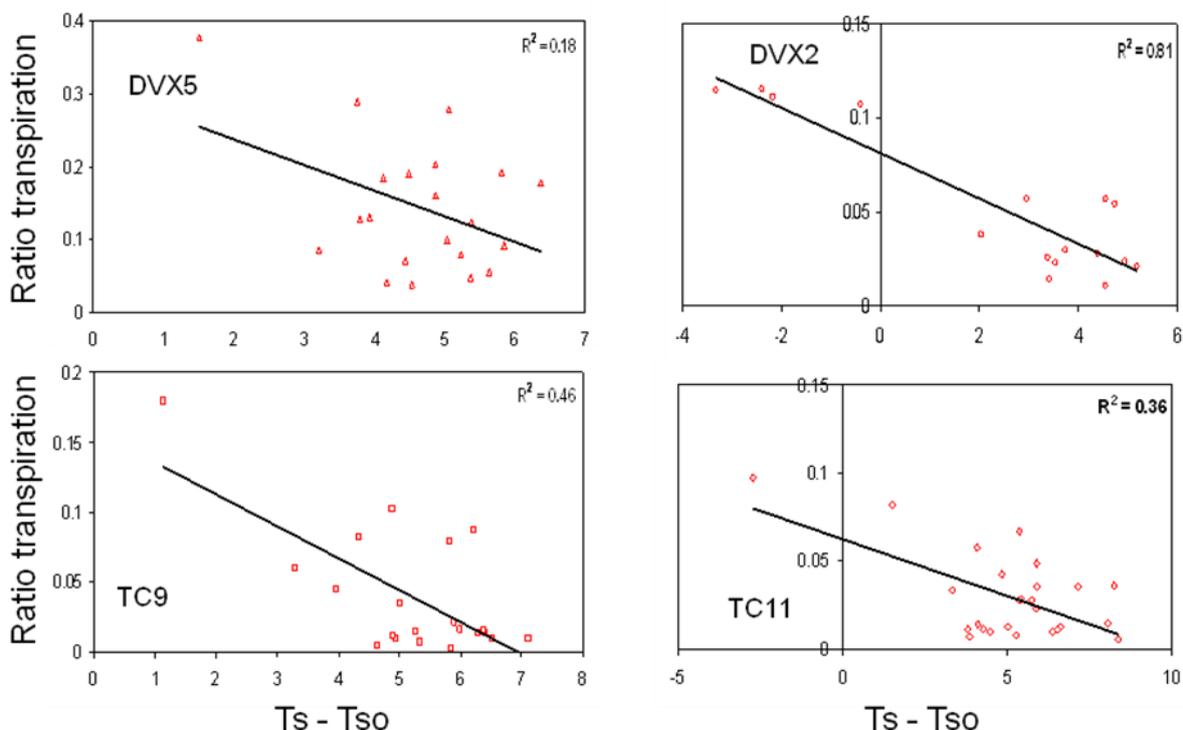


Figure 19 : Relation entre l'indice $T_s - T_{s0}$ et le rapport T/T_0 pour les différents sites et les mesures réalisées en 2009.

Les mesures menées à l'échelle du versant n'ont été actuellement interprétées que dans le cas du Ventoux sur le transect en courbe de niveaux. En 2009 trois acquisitions ont été faites à trois dates présentant des stress hydriques variables. Les conditions d'éclairciment (condition

de ciel clair et mesures prises au midi solaire) et de vent étaient similaires pour les trois dates. Les résultats sont donnés sur les Figures 20 et 21. Les cartes confirment le signal important sur $T_s - T_{s0}$ lié au stress hydrique, qui est de plusieurs degrés, et montrent une relative homogénéité à l'échelle du versant. Toutefois, on constatera sur la première image que la zone entourée sur la Figure 20 est à une température plus élevée le premier jour de mesure alors que pour les autres journées cette différence n'apparaît plus. Sur la partie correspondant au transect (Figure 21), on voit que cette zone correspond clairement aux sols de la classe 1 (sol à forte réserve hydrique). La carte des différences montrées sur la Figure 22 correspond à toute une zone du versant qui pourrait refléter l'extension des sols à forte réserve hydrique. Nous n'avons pas pu identifier aussi nettement cet échauffement précoce sur les 5 dates d'acquisition en 2010. Cela pourrait s'expliquer par le côté relativement éphémère de cette différenciation sur la température. On voit par là que l'interprétation des mesures de température de surface pour caractériser les sols est loin d'être triviale, le niveau stress hydrique constaté à une date ne pouvant pas être relié de manière simple à la réserve en eau des sols. Les clés d'interprétation de ce type de mesure ne peuvent être qu'établies en association avec un modèle de fonctionnement du sapin prenant en compte les régulations hydriques à court terme (à par les stomates) et à long terme (système racinaire, indice foliaire).

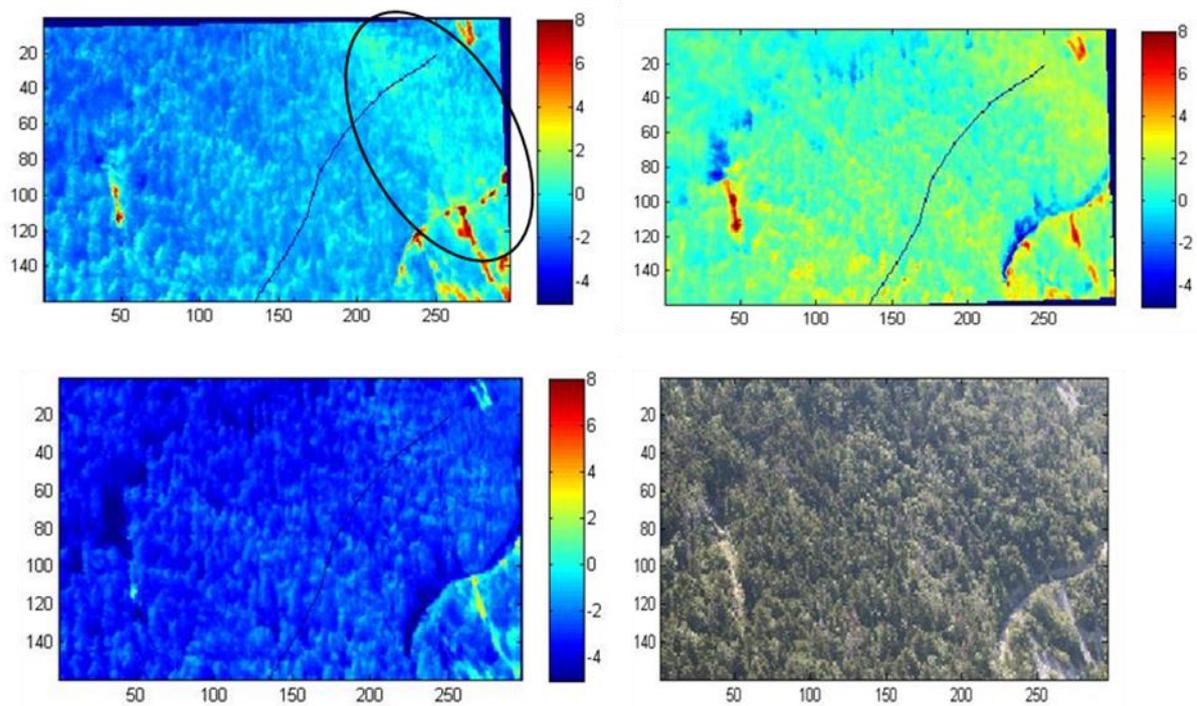


Figure 20 : cartes de température acquises en 2009 au cours d'un dessèchement (image du haut) et après une pluie (image du bas).

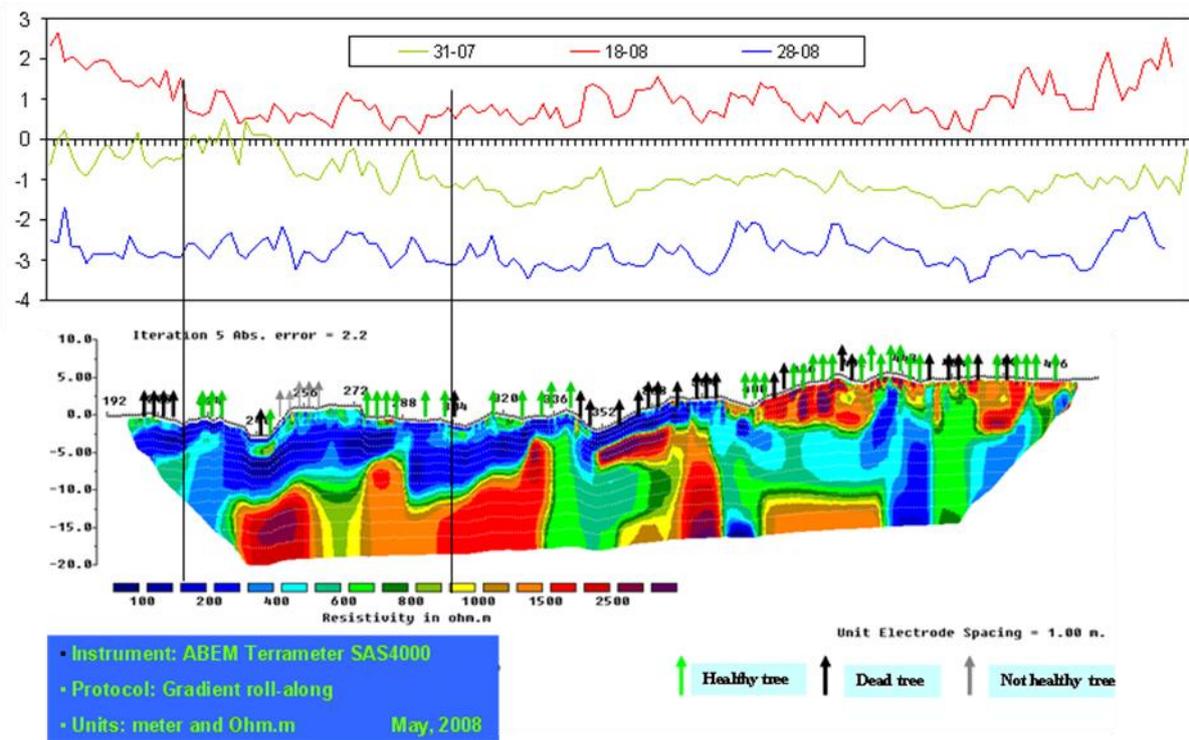


Figure 21 : cartographie de l'indice Ts-Ts0 le long du transect en courbe de niveau. La partie entre les barres verticales correspond à la zone encadrée sur la Figure 20.

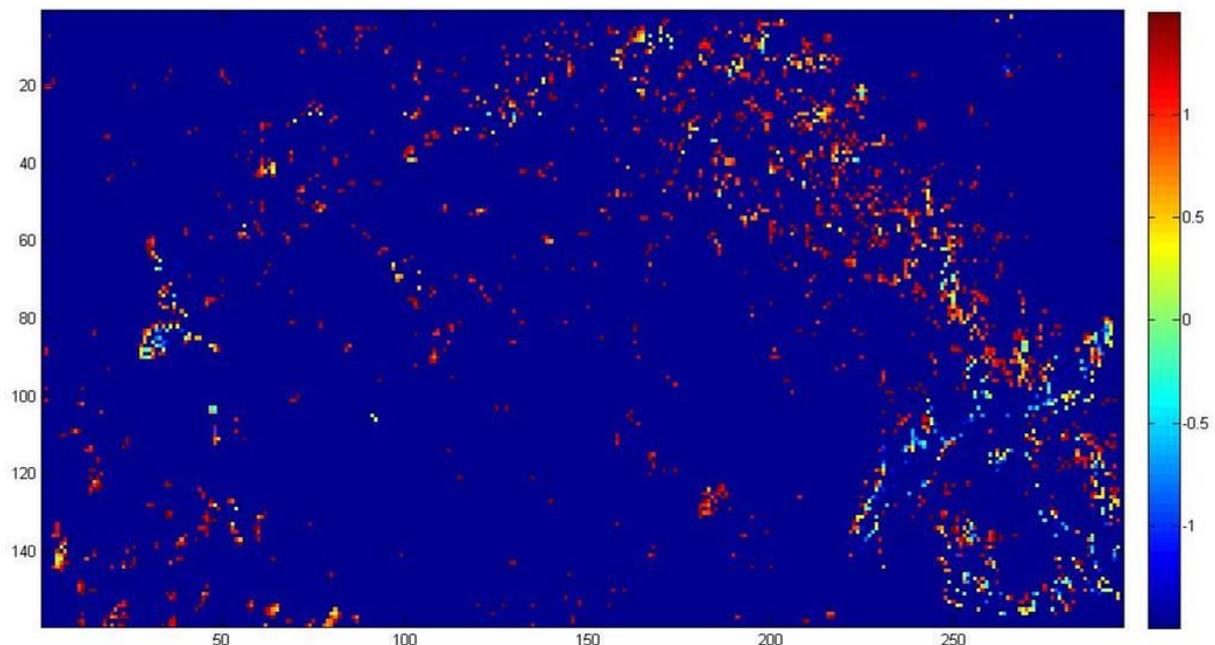


Figure 22 : différence de température entre les 31/07 et le 18/08 2009, après application d'un masque sélectionnant les sapinières.

A.3.3 MODELISATION (OPERATION 2.6.3)

Cette partie n'a pas été abordée au stade actuel et devrait faire l'objet du cœur du travail de Marie Nourtier qui termine sa thèse en 2011 (ceci grâce à un co-financement de l'ONF). Les raisons de ce retard s'expliquent d'une part par les résultats plutôt inattendus obtenus sur les interactions entre fonctionnement hydrique de l'arbre et les propriétés du sol et d'autre part le démarrage tardif de la thèse induit par la recherche d'un co-financement. Nous comptons

partir de la base de modélisation offerte par CASTANEA pour profiter de la collaboration avec l'URFM qui a développé sa stratégie de modélisation sur ce modèle. Nous chercherons à adapter le fonctionnement hydrique (régulation stomatique, réduction des surfaces conductrices) et l'allocation du carbone entre parties aériennes et souterraines permettant de reproduire les mesures expérimentales très riches réalisées et synthétisée dans la partie C.4.1.4. Si nous arrivons à réaliser une telle simulation, il est probable que les conclusions des simulations sur la vulnérabilité des sapins présentées par le partenaire 5 (URFM) soient partiellement remises en cause.

A.4 CONCLUSIONS

Ce travail a conduit à des avancées méthodologiques intéressantes permettant de revisiter la compréhension des relations entre le fonctionnement hydrique et les propriétés du sol. La tomographie a permis de d'échantillonner un grand nombre de situations de sol qui, combiné avec la caractérisation relativement exhaustive des caractéristiques des arbres par l'URFM, permet de disposer d'une base de travail extrêmement riche. Devant le foisonnement des résultats, il a été difficile de tirer des règles d'interprétation simple et de ce fait le travail de modélisation n'est pas complètement achevé. Toutefois on voit émerger quelques lignes directrices sur le rôle joué par le sol dans la vulnérabilité. Sur les sols favorables à forte réserve hydrique, le système racinaire ne se développe pas de manière suffisante (en profondeur, ou extension latérale). Les accidents climatiques altérant les capacités de production, l'arbre affaibli ne peut mobiliser des ressources pour étendre son système racinaire et rentrer ainsi dans un cercle plus vertueux lui permettant d'être moins vulnérable au stress hydrique. Par contre, les arbres se développant sur des sols à réserve hydrique unitaires plus faibles vont développer, dès le départ, des systèmes racinaires plus importants qui vont permettre d'exploiter des réserves hydriques plus abondantes et ceci avec plus de parcimonie lorsque les réserves profondes sont mobilisées. On rejoint finalement une des conclusions de Martinez-Vilalta, Piñol et al., (2002) qui mettait en avant la profondeur d'enracinement comme une des variables clé de la vulnérabilité. Le travail ici montre que pour une espèce donnée la dynamique de l'enracinement et son déterminisme en fonction du climat, du sol et de la compétition avec les autres plantes est une des clés pour comprendre la vulnérabilité. Ce point ne pourra être que partiellement traité avec les données recueillies pendant le projet, les profils racinaires n'ayant pas pu être observés. Toutefois on peut d'ores et déjà conseiller de privilégier des arbres développant rapidement des systèmes racinaires important pour s'adapter aux conditions climatiques futures.

A.5 REFERENCES

- Aussenac G., 2002. *Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change. Annales des sciences forestières* 59: 823-832.
- Battipaglia G., M. Saurer, et al., 2009. *Tree rings indicate different drought resistance of a native (Abies alba Mill.) and nonnative (Picea abies (L.) Karst.) species co-occurring at a dry site in Southern Italy. Forest ecology and management* 257: 820-828.
- Bréda N., R. Huc, et al., 2006. *Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. annales of forest science* 63: 625-644.
- Duchemin B., D. Guyon, et al., 1999. *Potential and limits of NOAA-AVHRR temporal composite data for phenology and water stress monitoring of temperate forest ecosystems. Int. J. Remote Sens.* 20(5): 895-917.
- Dufrêne E., H. Davi, 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.
- Hacke U.G., J.S. Sperry, et al., 2000. *Influence of soil porosity on water use in Pinus taeda. Oecologia* 124: 495-505.

- Hauck C., D. Vonder Muhll, et al., 2003. Using DC resistivity tomography to detect and characterize mountain permafrost. *Geophys. Prospect.* 51(4): 273-284.
- Lagouarde J.P., H. Ballans, et al., 2000. Experimental study of brightness surface temperature angular variations of maritime pine (*Pinus pinaster*) stands. *Remote sensing of environment* 72(1): 17-34.
- Langström B. and C. Hellqvist, 1991. Effects of different pruning regimes on growth and sapwood area of Scots pine. *Forest ecology and management* 44: 239-254.
- Manion P.D., 1991. *Tree disease concepts.*, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, NJ (USA), 402 p.
- Margolis H.A., R.R. Gagnon, et al., 1988. The adjustment of growth, sapwood area, heartwood area, and sapwood permeability of balsam fir after different intensities of pruning. *Canadian journal of forest research* 18(6): 723-727.
- Martinez-Vilalta J., J. Piñol, et al., 2002. A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean. *Ecological modelling* 155: 127-147.
- Mc Dowell N., W.P. Pockman, et al., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New physiologist* 178: 719-739.
- McVicar T.R. and D.L.B. Jupp, 1998. The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review. *Agric. Syst.* 57(3): 399-468.
- Mencuccini M. and J. Grace, 1995. Climate influences the leaf area/sapwood area ratio in Scots pine. *Tree physiology* 15: 1-10.
- Morin N., A. Jolly, et al., 2007. Operational prospects in the use of remote sensing for the monitoring of forest decline potentially related to climate change forestsat, Montpellier, pp. 7p.
- Nadezhdina N., 2010. Integration of water transport pathways in a maple tree: responses of sap flow to branch severing. *Annals of forest sciences* 67(107).
- Nadezhdina N., J. Cermak, et al., 2007. Transpiration of Scots pine in Flanders growing on soil with irregular substratum. *Forest ecology and management* 243: 1-9.
- Peguero-Pina J.J., J.J. Camarero, et al., 2007. Physiological performance of silver-fir (*Abies alba* Mill.) populations under contrasting climates near the south-western distribution limit of the species. *Flora* 202: 226-236.
- Pierce L.L., S.W. Running, et al., 1990. REMOTE DETECTION OF CANOPY WATER-STRESS IN CONIFEROUS FORESTS USING THE NS001 THEMATIC MAPPER SIMULATOR AND THE THERMAL INFRARED MULTISPECTRAL SCANNER. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 56(5): 579-586.
- Querejeta J.I. E.-M.H., Allen M.F., Jiménez-Osornio J.J., 2007. Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate. *Oecologia* 152: 26-36.
- Rambal S., 1984. Water balance and pattern of root water uptake by *Quercus coccifera* L. evergreen scrub. *Oecologia* 62: 18-25.
- Rey E., D. Jongmans, et al., 2006. Characterization of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements. *Journal of applied geophysics* 58(1): 188-201.
- Ruffet C., M. Darot, et al., 1995. Surface conductivity in rocks : a review. *Surveys in geophysics* 16(1): 84-105.
- Samouelian A., A. Tabbagh, et al., 2005. Electrical resistivity survey in soil science : a review. *Soil and Tillage research* 83: 173-193.
- Sass O., 2007. Bedrock detection and talus thickness assessment in the European Alps using geophysical methods. *Journal of applied geophysics* 62(3): 254-269.
- Sperry J.S., F.R. Adler, et al., 1998. Limitation of plant water use by rhizosphere and xylem conductance: results from a model. *Plant, cell and environment* 21: 347-359.
- Stach N., 2000. L'IFN cartographie les dégâts de la tempête sur le massif aquitain de pin maritime. *Géomatique Expert* 5: 15-17.
- Wang L.L., J.J. Qu, et al., 2008. Forest fire detection using the normalized multi-band drought index (NMDI) with satellite measurements. *Agricultural and forest meteorology* 148(11): 1767-1776.
- West A.G., K.R. Hultine, et al., 2008. Transpiration and hydraulic strategies in a Piñon-Juniper woodland. *Ecological applications* 18(4): 991-927.
- White D., C. Beadle, et al., 1998. The influence of drought on the relationship between leaf and conducting sapwood area in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *Trees* 12: 406-414.
- Withehead D., W.R.N. Edwards, et al., 1984. Conducting sapwood area, foliage area, and permeability in mature trees of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. *Canadian journal of forest research* 14(6): 3-31.
- Wulder M.A., C.C. Dymond, et al., 2006. Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities. *Forest ecology and management* 221(1-3): 27-41.

Zhou W.F., B.F. Beck, et al., 2002. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. Environ. Geol. 42(8): 922-928.