

**Recherche d'essences forestières potentiellement utilisables pour le renouvellement des boisements de la zone rouge de Verdun dans le contexte du changement climatique**



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier Myriam LEGAY pour m'avoir encadré tout au long de mon stage ainsi que pour avoir partagé avec moi ses connaissances et fait découvrir l'univers de la recherche. Un grand merci également à Stéphane DUMAS qui m'a aidé à trouver ce stage. Merci à toute l'équipe du pôle recherche de Nancy pour sa bonne humeur communicative et les bons moments passés tous ensemble. Et je tiens à remercier également tout particulièrement Mehdi, Nicolas, Alexandre et Myriam de m'avoir entraîné pour l'oral du concours de technicien opérationnel de l'ONF ; c'est en parti grâce à eux que je serais peut-être en poste à l'Office l'année prochaine.

Merci à Hervé le BOULER pour son aide précieuse en ce qui concerne le modèle bioclimatique IKS, il a répondu avec patience et enthousiasme à toutes mes interrogations, tout en se creusant la tête pour améliorer ledit modèle.

Merci aux documentalistes de la bibliothèque d'Agroparistech qui m'ont apporté chaque jour avec le sourire les documents dont j'avais besoin et qui m'ont guidé pour en trouver d'autres auxquels je n'avais pas pensé. Je remercie également Charlotte CHARMETANT de m'avoir accompagné sur le terrain et de m'avoir guidé dans la rédaction de la proposition de protocole de boisement test.

Je garderais de mon stage un excellent souvenir et une foule de nouvelles connaissances. Les thèmes du réchauffement climatique, de ses conséquences sur l'écosystème forestier et des solutions à apporter sont particulièrement intéressants à étudier et extrêmement enrichissants.

## **Résumé :**

Dans un contexte de changement climatique mondial et de conservation patrimoniale locale, les gestionnaires de la forêt domaniale de Verdun cherchent des essences adaptées pour remplacer les principales essences résineuses introduites pour reboiser la zone rouge : l'épicéa commun et le pin noir d'Autriche qui présentent des signes plus ou moins marqués de dépérissement.

Les différents modèles climatiques conçus par les climatologues pour tenter de simuler l'évolution du climat permettent aujourd'hui d'obtenir des scénarios assez précis pour être couplés avec des modèles de niches climatiques d'essences forestières et ce afin de déterminer la probabilité d'adaptation de ces essences au climat à venir. C'est ce que fait le modèle IKS utilisé dans cette étude. Grâce à ce modèle, à un cahier des charges détaillé établi par les gestionnaires et à une évaluation bibliographique de chaque essence, ce stage a permis d'établir une liste d'essences potentiellement adaptées au contexte climatique (actuel et futur), au contexte pédologique, au contexte patrimonial, au contexte économique etc. de la forêt de Verdun.

Ce travail est une approche intéressante de stratégie d'anticipation de la menace des écosystèmes forestiers par le bouleversement des variables météorologiques, dans le cas d'un écosystème marqué par une histoire humaine singulière. Cette stratégie présente des atouts comme des inconvénients, mais permet de préfigurer une approche et des outils utilisables par les gestionnaires de forêts particulièrement touchées par cette problématique (les forêts méditerranéennes par exemple) afin qu'ils puissent, si le choix d'une substitution d'essences est fait, guider leur prise de décision.

## **SOMMAIRE :**

### **I-Contexte et démarche**

- 1) Structure, participants et programme de travail** p.3
- 2) Présentation de la station et des préconisations actuelles** p.5
- 3) Une démarche de travail participative** p.10
  - a) Guide d'entretien pour la détermination des besoins des gestionnaires
  - b) Cahier des charges
  - c) Insertion du projet dans une démarche de développement local

### **II-Outil climatique et méthode suivie**

- 1) Le modèle IKS** p.17
- 2) Détermination d'une liste d'essences adaptées climatiquement à partir du modèle IKS** p.25
- 3) Confrontation de cette liste d'essences potentielles au cahier des charges** p.26

### **III-Résultats et discussion**

- 1) Présentation des résultats** p.28
- 2) Discussion des résultats obtenus** p.29
  - a) Limites du modèle IKS
  - b) Cohérence et limites de la liste définitive obtenue
- 3) Protocole d'installation d'un test de comparaison d'essences** p.32

## Introduction

Un premier stage à l'Office National des Forêts de Bourg en Bresse en 2011-2012, en fin de Diplôme Universitaire Technologique, m'a déjà permis de découvrir le milieu forestier et de réaliser un travail opérationnel de terrain très instructif.

Cette année, dans le cadre de ma licence professionnelle « Espaces naturels option gestion durable des espaces forestiers et développement local », je travaille au pôle recherche et développement de l'ONF de Nancy. Ce stage présentait l'avantage de me faire découvrir le milieu de la recherche forestière, de m'apporter de nombreuses connaissances théoriques, ainsi que des bases sur l'aménagement forestier, et de favoriser mon projet professionnel en tant qu'expérience valorisable auprès de mes futurs employeurs. Je l'ai trouvé grâce à mon ancien maître de stage ; Stéphane DUMAS.

A partir de 1990, l'analyse de nombreux indicateurs a mis en évidence une évolution incontestable et rapide du climat mondial : augmentation des températures, du niveau de la mer, diminution de la couche neigeuse, de la banquise et des calottes glaciaires...attribuée principalement à l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, générée par les activités humaines. En France, la température moyenne a augmenté d'environ 1°C depuis un siècle, les 12 années les plus chaudes jamais observées appartenant toutes aux deux dernières décennies. Dans le même temps, le régime des précipitations évolue, mais il pleut plus en hiver et moins en été, ce qui n'est pas en faveur de la forêt. Les simulations d'évolution du climat mondial montrent qu'il connaîtra très vraisemblablement un changement rapide et important au cours du siècle prochain. Compte tenu de l'inertie des phénomènes enclenchés, il est impossible de revenir en arrière à une échelle de temps humaine, l'ampleur du changement pouvant au mieux être atténuée par une réduction des rejets de gaz à effet de serre.

Le milieu et plus particulièrement ses caractéristiques limitantes : température, pluviosité, réserve utile...conditionne la présence des espèces forestières. Si ce milieu évolue trop rapidement pour que les espèces aient le temps de migrer vers le Nord ou en altitude ou de s'adapter localement par sélection naturelle, il faut s'attendre à une augmentation des problèmes sanitaires, un déclin, voire à terme une disparition des essences en place.

Le changement climatique en cours révèle donc les limites d'essences jusqu'ici adaptées à leur environnement. Les sécheresses, les attaques de parasites, les gelées tardives, les variations de températures et de précipitations sont tant d'événements qui bouleversent l'équilibre des forêts et obligent les sylviculteurs à envisager une gestion plus adaptée à ce nouveau climat.

Dans ce contexte de changement climatique, le sujet qui m'a été proposé est la recherche d'essences potentielles de reboisement pour le renouvellement des peuplements de la zone

rouge de Verdun. Ce travail a fait suite à un premier stage réalisé en 2011-2012, où l'analyse stationnelle a été réalisée.

Pendant ces quatre mois j'ai donc mobilisé des notions de sylviculture, de pédologie, d'écologie et d'autécologie, de climatologie, de botanique, d'informatique etc., afin de répondre à la problématique suivante : « Dans un contexte d'adaptation des plantations au changement climatique, aux contraintes stationnelles mais également aux impératifs de conservation du patrimoine historique, quelles essences potentielles pourraient être proposées pour renouveler les peuplements résineux de la zone rouge de Verdun ? ».

Pour y répondre, j'ai réalisé mon étude en quatre phases : tout d'abord la formulation d'un « cahier des charges » explicitant les critères auxquels doivent répondre les essences sélectionnées en s'appuyant sur les besoins du gestionnaire et le contexte stationnel ; puis la recherche d'essences adaptées climatiquement, en utilisant des scénarios d'évolution climatique et le modèle d'impact IKS, cette liste d'essences étant ensuite croisée avec les exigences du « cahier des charges » afin d'obtenir une liste finale d'essences susceptibles d'être utilisée pour le reboisement de la « zone rouge ». Enfin une dernière partie de mon stage a consisté à établir un protocole de test de comparaison d'essences en s'appuyant sur des études et des plantations existantes.

## **I-Contexte**

### **1) Structure, participants et programme de travail**

L'organisme d'accueil est l'Office National des Forêts (ONF) et plus précisément le Pôle Recherche et Développement de Nancy. L'ONF est un établissement public à caractère industriel et commercial créé en 1964. Il assure la gestion durable des forêts publiques françaises et mène son action dans le cadre d'un contrat pluriannuel d'objectifs et de performance avec l'Etat et la Fédération nationale des communes forestières. L'ONF est le premier gestionnaire d'espaces naturels en France. Ses missions consistent à mobiliser du bois pour la filière (environ 40% du bois d'œuvre mis sur le marché en France) en assurant le renouvellement des forêts publiques et le bon entretien de leurs peuplements ; à préserver et augmenter la biodiversité dans la gestion courante des forêts grâce, entre autre, à l'importance du réseau Natura 2000 en forêt publique; à offrir des forêts accueillantes au plus grand nombre, en s'adaptant aux attentes diversifiées du public et aux différents contextes (forêts périurbaines, zones touristiques, zones historiques), tout en sensibilisant le public aux missions d'entretien et de renouvellement des forêts ainsi qu'à la préservation de la biodiversité ; à effectuer des prestations de service pour les collectivités et des clients privés en s'appuyant sur une organisation territoriale déconcentrée, des agences travaux, des bureaux d'études et des réseaux de compétences spécialisés ; à assurer des missions de service public pour la prévention et la gestion des risques naturels etc...

Pour assurer l'ensemble de ces missions l'ONF comprend différents corps de métiers, aussi divers que complémentaires. Certains sont spécifiques aux missions de l'Office alors que d'autres relèvent d'activités plus transverses, comme la recherche par exemple.

La R&D à l'ONF dépasse le cadre de la sylviculture afin de répondre aux nouveaux enjeux de la gestion durable des écosystèmes forestiers. De nombreux partenariats scientifiques couvrent des domaines variés sans perdre de vue l'importance de la transmission des connaissances au terrain. En effet, la gestion forestière profite de l'expérience acquise au fil du temps, mais elle doit aussi s'appuyer sur des connaissances scientifiques actualisées pour répondre au mieux aux attentes des gestionnaires et faire face aux aléas environnementaux et sociaux du XXIe siècle. La R&D menée par l'ONF doit d'abord apporter des réponses aux interrogations des forestiers. Les questions liées à la gestion des peuplements (comparaison d'essences, choix du matériel de reboisement, conduite des régénérations, sylviculture juvénile ou adulte...) dans différents contextes sont les plus évidentes.

Mon encadrant principal est Myriam LEGAY ; responsable du pôle R&D de Nancy, mais je travaille également avec l'appui d'Hervé le BOULER ; chargé de mission « nouvelles essences pour l'adaptation au changement climatique » auprès du Chef de Département R&D, ainsi qu'avec Charlotte Charmetant ; responsable Sylviculture à l'agence ONF de Verdun, André Hopfner ; Chef de l'agence de Verdun, René-Marc Pineau ; responsable de l'Unité Territoriale Verdun-Danvillers et Emilie Couty ; responsable Aménagement à l'agence de Verdun.

#### Programme de travail détaillé :

L'importance historique et mémorielle et l'attrait touristique de la forêt de Verdun nécessite de fournir une réponse rapide aux interrogations des gestionnaires. Le travail a été commandé par le gestionnaire de la forêt domaniale. L'étude se déroule dans le cadre du pôle recherche et développement de l'ONF de Nancy et je la réalise en tant que stagiaire de la structure. Mon objectif est de fournir aux gestionnaires de la FD de Verdun une liste potentielle d'essences forestières climatiquement et stationnellement adaptées pour le siècle à venir. Il se pose donc la problématique suivante : « Dans un contexte d'adaptation des plantations au changement climatique, aux contraintes stationnelles mais également aux impératifs de conservation du patrimoine historique, quelles essences potentielles pourraient être proposées pour renouveler les peuplements résineux de la zone rouge de Verdun ? ». Lors de ma première journée de stage, j'ai établi avec Myriam LEGAY une liste des différentes tâches à réaliser, que j'ai réparties dans un calendrier opérationnel présenté en annexe.

*(Voir le calendrier prévisionnel de travail en annexe 1 page G)*

Les moyens mis à ma disposition sont les suivants : le modèle IKS (développé sous Visual Basic), un bureau avec accès Internet, une ligne téléphonique, une imprimante, une voiture, un grand nombre de documents, livres, études rassemblés par Myriam LEGAY, l'accès à bibliothèque d'Agroparistech et à une salle de restauration. Enfin mon encadrante est disponible pour répondre à toutes mes questions et m'aider si je rencontre un problème. Mon travail sera évalué du point de vue scolaire par mes professeurs et du point de vue professionnel car il doit correspondre aux attentes des gestionnaires de Verdun et des chercheurs du pôle R&D.

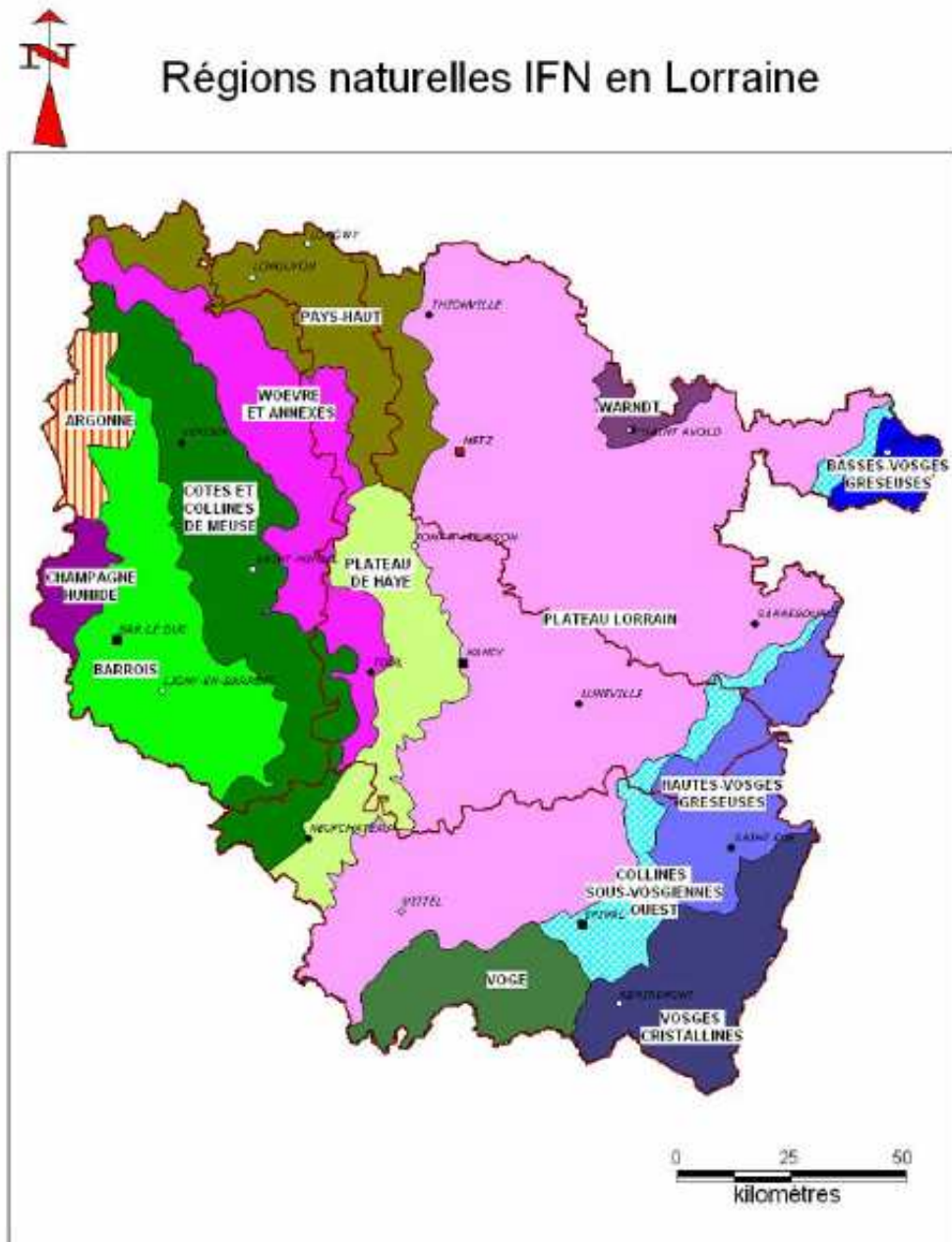


## 2) présentation de la station et des préconisations actuelles

### LOCALISATION

Située au Nord de la sylvo-écorégion des Plateaux calcaires de l'Est, dans le département de la Meuse en région Lorraine, la forêt de Verdun se trouve sur la région naturelle IFN des côtes et collines de Meuse.

Image 1 : Carte des régions naturelles IFN de Lorraine

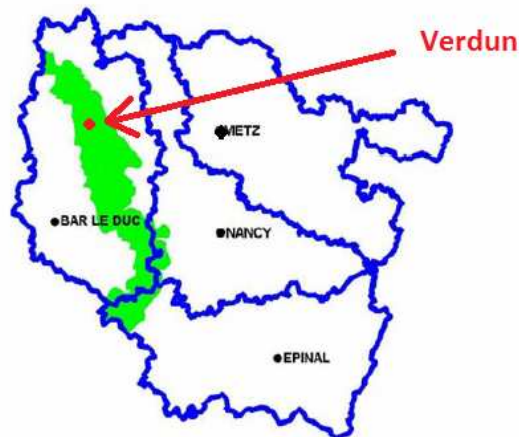


Source IFN 2005

Nancy le 21.07.2006

Image 2 : Localisation de Verdun

Côtes et collines de Meuse



Source : Inventaire Forestier National 2005

## **HISTORIQUE**

La forêt domaniale de Verdun a été constituée en 1919, lors de l'acquisition par l'Etat de la zone des combats. Le territoire correspondant, d'une surface de 10000 ha environ, regroupe d'anciens boisements feuillus, des villages détruits, et des zones dévastées par les combats, dont la remise en état était économiquement inenvisageable. Le reboisement de ces zones en résineux a été décidé lors d'un débat à l'Assemblée Nationale, dans l'intention de préserver sous un couvert dense les marques laissées dans le sol par les combats. Ces reboisements ont été réalisés entre 1927 et 1933, principalement en épicéa commun (*Picea abies*) pour les zones marneuses, et en pin noir d'Autriche (*Pinus nigra spp. nigra*) sur les plateaux calcaires, sur une surface d'environ 6000 ha. Un effort de renouvellement de ces boisements a été engagé dans les années 70, principalement par plantation de hêtres. La forêt fait aujourd'hui partie du réseau des forêts d'exception, en tant que patrimoine historique. Dans le cadre de cette réflexion sur la mémoire, l'orientation vers un retour aux feuillus est aujourd'hui remise en cause pour des raisons de préservation du paysage créé par l'Histoire.

## **TOPOGRAPHIE**

Dans ce territoire, l'altitude varie de 200 à 400 mètres. Le relief des Côtes de Meuse est sur la forêt domaniale de Verdun assez mou sans grand versant de forte pente. Il est grossièrement organisé sur un axe Nord-Sud où sont les points les plus hauts, avec des versants descendant vers la vallée de la Meuse à l'Ouest et vers la plaine de la Woëvre à l'Est. Ce relief mou et ces versants sont très découpés et les zones planes sont relativement rares. Les vallons de tailles très variables sont en effet très nombreux, mais rarement très encaissés.

## CLIMAT

Le climat meusien est de type océanique à influence continentale. La saison de végétation est limitée à 7 mois maximum avec des températures moyennes annuelles variant entre 9 et 11°C. Un nombre de jours de gelée important est relevé avec des gelées tardives encore fréquentes en mai et des gelées précoces dès fin septembre. Les précipitations moyennes sont comprises entre 900 et 1000 mm par an. Enfin les brouillards et les épisodes de neige lourde sont peu fréquents (*station météo de Metz-indication météo France*).

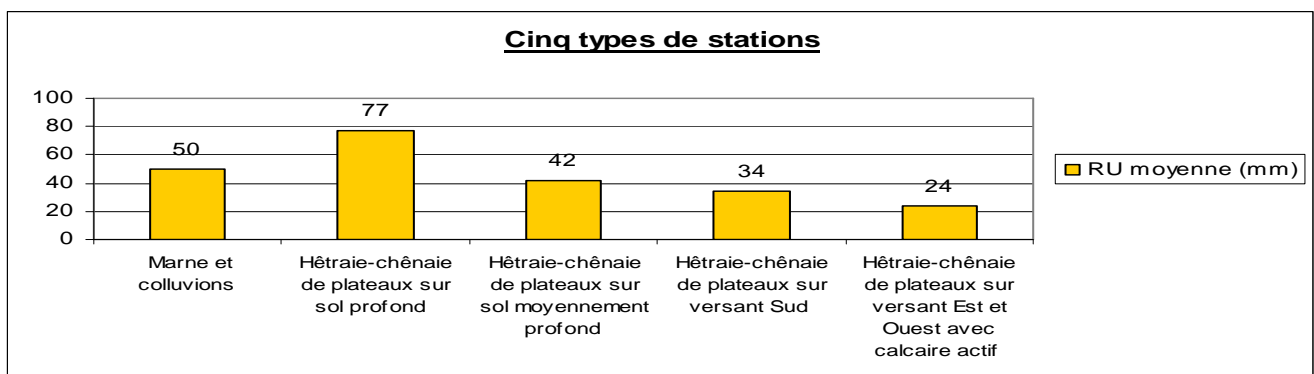
(Voir l'annexe 2 : Verdun-les normales climatiques (1971 à 2000) page H)

## GEOLOGIE ET PEDOLOGIE

Les formations géologiques caractéristiques des Côtes et Collines de Meuse sont les calcaires du Jurassique moyen et supérieur. Sur les plateaux, les calcaires peuvent être recouverts de limons éoliens datant du quaternaire. Les sols développés sur les calcaires contiennent souvent du calcaire actif (sols carbonatés). Toutefois, les phénomènes de décarbonatation (dissolution du calcaire actif) et la présence de placages limoneux conduisent à la formation de sols brunifiés plus ou moins lessivés. On a affaire à un type de sol argileux et calcaire (marne) et les humus sont, « *d'après les données de l'inventaire forestier national de 1998* », pour la plupart de type mull.

Dans le cas de la forêt de Verdun, on observe cinq types de stations. Le stage précédent a montré qu'il y a des différences significatives de réserve utile entre stations.

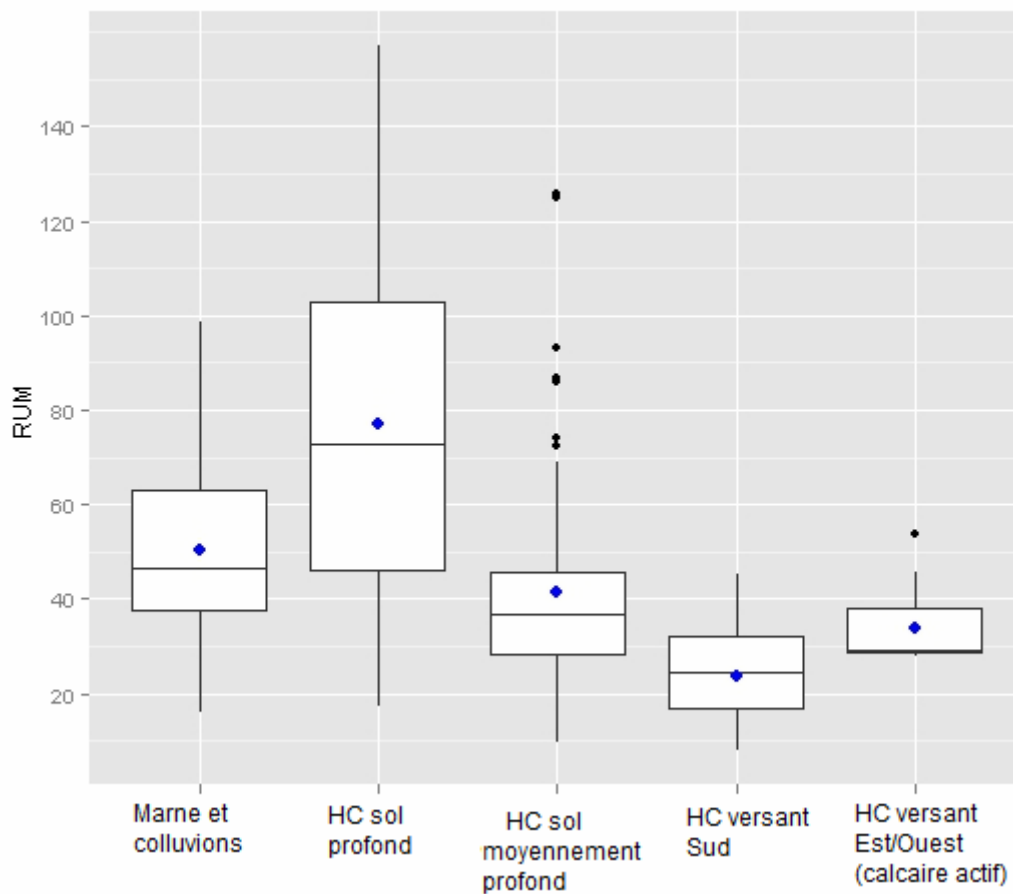
Image 3 : Réserve utile moyenne pour les principaux types de station à Verdun



Référentiel : « *Guide pour l'identification des stations sur les Plateaux calcaires de Lorraine* » (CRPF et ENGREF), « *Les stations forestières sur marnes dans le département de la Meuse* » (PH. Millarakis de l'ONF), « *Les stations forestières de la Woèvre* » (D. Girault de l'INRA).  
Source : D'après Ventillard, rapport de BTS, 2012.

Ce qui nous donne une réserve utile moyenne de 44 mm, avec une dispersion importante, y compris au sein de chaque type stationnel, et une grande variabilité locale, imputable aux perturbations laissées par la guerre, comme le montre le graphique ci-dessous.

Image 4 : Répartition des mesures de R.U selon les stations



Source : Synthèse des données du stage de Charlie Vantillard par Nicolas GOMEZ

### **TYPE DE PEUPEMENT ET ETAT SANITAIRE**

Il ne reste plus que 2500 ha des reboisements résineux d'après-guerre, composés d'environ 2/3 d'épicéas, soumis à de fréquentes attaques de scolytes, et d'1/3 de pins noirs.

La croissance de l'Épicéa, nettement en-dehors de son aire naturelle, est rendue possible par la pluviométrie locale. Il connaît une gêne due à la présence de calcaire actif dans le sol, surtout dans le premier horizon, mais elle est atténuée par une alimentation en eau optimale. D'après les résultats du premier stage de BTS, l'état des épicéas est très dégradé de façon générale (étude des couronnes selon le protocole européen).

Le Pin noir d'Autriche, également nettement en-dehors de son aire naturelle (*voir les cartes EUFORGEN des aires naturelles en annexe 3 page 1*), tolère très bien le calcaire actif dans le sol, ce qui explique sa forte introduction dans les boisements d'après-guerre et son maintien jusqu'à aujourd'hui. L'état des peuplements de pins noirs a été jugé médiocre par les stagiaires de BTS, cependant le niveau de dépérissement reflété par ces résultats est jugé pessimistes par le personnel de l'agence, qui estime que: « les pins noirs ont certes un feuillage clair, mais ils n'évoluent pas défavorablement ».

La dynamique naturelle sous pin noir et le dépérissement des épicéas vont dans le sens d'une reconquête des feuillus : hêtre, érable, frêne. Cependant, une volonté de maintien des résineux afin de garder la lisibilité des reliefs laissés par la guerre et de conserver le paysage mémoriel a été clairement exprimée par le gestionnaire, en accord avec les partenaires associés à la réflexion dans le cadre du programme forêt d'exception. Sur ce sujet, l'enquête menée auprès du public local a montré que si la transformation de la futaie résineuse transitoire en une futaie feuillue mieux adaptée était largement approuvée, la disparition de la totalité de ces peuplements n'était pas souhaitée (2/ 3 des personnes interrogées). C'est pourquoi il est prévu de revenir au résineux pour les renouvellements futurs. Cependant, l'évolution du climat nécessite de réviser les choix d'essences : l'épicéa semble exclu, l'avenir du pin noir est à préciser.

Enfin, la préservation de la biodiversité et du patrimoine historique dans la forêt domaniale de Verdun est au cœur des préoccupations et fait l'objet de protections adaptées.

(Voir annexe 4 : Réglementations en forêt de Verdun, page J)

## PRECONISATIONS ACTUELLES

En fonction des sources bibliographiques consultées, on retrouve différents conseils ou préconisations en matière d'essences pour notre zone d'étude.

-Messieurs BECKER, le TACON et TIMBAL ont écrit en 1980, dans l'ouvrage « Les plateaux calcaires de Lorraine-Types de stations et potentialités forestières » que pour les types de stations de Verdun (Hêtraie-chênaies de plateaux et de versant) les résineux conseillés sont les pins noirs et le pin laricio de Corse ainsi que l'épicéa, et le douglas mais avec prudence et si la profondeur de décarbonatation est au moins supérieure à 20 cm.

-Le « guide pour l'identification des stations » rédigé par le Centre Régional de la Propriété Forestière de Lorraine Alsace (2006) propose le choix suivant :

Tableau 1 : Listes d'essences de reboisement sur les plateaux calcaires de Lorraine

| Types de station   | Essences résineuses conseillées | Essences résineuses possibles      | Résineux à éviter |
|--|---------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| Hêtraie-chênaie de plateaux à sol moyennement profond    | Mélèze d'Europe                 | Pin laricio de Calabre             |                   |
| Hêtraie-chênaie de plateaux à sol profond                |                                 | Mélèze d'Europe, douglas et épicéa |                   |
| Hêtraie-chênaie de versant Est-Ouest avec calcaire actif |                                 | (*)                                | Douglas et épicéa |
| Hêtraie-chênaie de versant Sud                           |                                 | Pin laricio de Calabre             |                   |

(\*) Pour ce type de station, le Schéma Régional de Gestion Sylvicole de Lorraine dans les cotes et collines de Meuse propose le Pin laricio de Calabre et le Mélèze comme essences possibles

Source : D'après le guide pour l'identification des stations rédigé par le CRPF de Lorraine Alsace, et le Schéma Régional de Gestion Sylvicole de Lorraine dans les cotes et collines de Meuse

-L'aménagement forestier de la forêt domaniale ne conseille aucune essence résineuse la règle globale, aujourd'hui remise en cause, étant la transformation des plantations résineuses en forêt feuillue.

-Le tableau maître du choix des essences du Schéma Régional d'Aménagement de Lorraine et la Directive Régionale d'Aménagement de Lorraine indique pour les Hêtraies-chênaies calcicoles le mélèze comme essence principale possible, avec le pin noir en essence d'accompagnement.

Il ressort de ces différentes sources, que *Larix (europea)* entre autre) et *Pinus nigra (spp. laricio et spp.nigra)* apparaissent souvent parmi les essences conseillés. Il faudra donc creuser cette piste lors de la recherche des nouvelles essences de reboisement.

### **3) Une démarche de travail participative**

#### **a) Guide d'entretien pour la détermination des besoins des gestionnaires**

Les besoins des gestionnaires de la forêt domaniale de Verdun ont été évalués à travers les réponses apportées au guide d'entretien, créé à cet effet, lors de la réunion du 25/03/2013 avec lesdits gestionnaires :

##### Contraintes d'ordre administratif :

##### ***-Echéances des besoins (plantation) ?***

La première échéance est en automne 2013, en effet des zones à fort enjeu touristique devront alors être reboisées.

##### ***-Contraintes d'accessibilité des plants (prix en fonction de la rareté des essences trouvées...)***

Il n'y a pas de forte contrainte de prix puisque la forêt est classée en forêt d'exception et bénéficie donc d'aides. La seule contrainte pour le gestionnaire sera de trouver un pépiniériste qui lui fournisse une « petite » production.

##### ***-Comment est envisagé le rendu du travail : liste d'essences à planter sur le court terme sans test et/ou mise en place d'un test d'essences à plus ou moins long terme (avec des essences plantées initialement et des essences plus atypiques, moins courantes) ?***

Les deux rendus sont souhaités avec une précision pour la liste d'essences à planter sur le court terme : Elle doit comporter des essences plus courantes pour lesquelles il est possible de se procurer facilement des plants et des données autoécologiques.

Il y a deux zones concernées par le reboisement : une zone touristique (alentour des monuments et bord de route) que l'on appellera zone 1 et une zone moins touristique que l'on appellera zone 2.

Stations :

***-Sol : calcaire partout ? Calcaire actif ?***

Sur la zone 1, orientée plutôt au Sud il y a présence de calcaire actif, même sur les sols sensés être décarbonatés, à cause du remaniement du sol par les explosions. Sur la zone 2, le calcaire est présent en moins grande quantité mais la consigne du gestionnaire est de ne pas prendre de risque et de considérer que la contrainte « présence de calcaire » concerne tous les sites.

***-Texture et tassement observés ?***

Les parcelles sont principalement sur marne (argile + calcaire). Il n'y a pas de parcelles sur limons. Les gestionnaires n'ont pas observés de problèmes de tassement particuliers.

***-Ressource en eau (R.U.) ?***

La ressource en eau est variable à cause du bouleversement du sol. Il faudra donc faire varier ce critère sur le modèle IKS afin de bien prendre en compte toutes les options possibles. Par ailleurs, cette RU étant localement très variables, du fait des remaniements du sol, il n'est pas possible d'envisager sa cartographie.

***-Traces d'hydromorphie ? Certaines stations combinent-elles les contraintes (hydromorphie, calcaire...)?***

La partie Est de la forêt de Verdun faisant partie de la Woëvre (région naturelle située sur d'anciens marécages, présentant un réseau hydrographique important et un sol particulièrement humide) et les fonds de vallon sont les parties les plus sensibles à l'hydromorphie. Mais ce n'est pas une contrainte à retenir parmi les critères de sélection des essences de reboisement.

***-Eclaircissement au niveau des zones à reboiser ?***

Sur les peuplements d'épicéas scolytés un peu de couvert peut être conservé, mais certaines zones sont déjà complètement à nu. Cependant, les gestionnaires rappellent que l'abri offert par les épicéas aux plantations reste toujours très aléatoire.

***-Les essences doivent-elles posséder une aptitude à la régénération naturelle ?***

Ce n'est pas une obligation puisque, au moins pour les zones touristiques le reboisement s'effectuera par plantation.

***-Quels sont les autres résineux présents à Verdun à part épicéas et pins noir ? Quel est leur état sanitaire ?***

On trouve aussi des mélèzes qui se portent bien, de beaux pins laricio, des douglas qui se sclérosent dès qu'ils rencontrent la présence de calcaire, des sapins pectinés, également quelques pins Sylvestre mais peu sont jugés beaux par le gestionnaire et ils présentent quelques problèmes de nécroses. Enfin on retrouve aussi des pins Weymouth mais ils ne se portent pas bien.

#### Climat :

##### ***-Dégâts observés sur les essences en place à cause du gel tardif, des gelées précoces, de la sécheresse ?***

Il ya régulièrement des gelées à Verdun; surtout des gelées tardives. Mais elles n'ont pas d'impact sur les épicéas, les mélèzes et les sapins pectinés.

Il y a eu une sécheresse printanière il y a deux ans et l'été on observe régulièrement des périodes sèches mais elles n'entraînent pas de dépérissement.

##### ***-Episodes de neige lourde ? Dégâts constatés ?***

Les épisodes de neige lourde sont rares et, comme les sécheresses printanières, ce sont des événements climatiques exceptionnels.

##### ***-Brouillard ? Problèmes liés ?***

Il y a peu de brouillard sur Verdun.

##### ***-Possession de données de poste météorologique autre que Bar le Duc ?***

Non.

#### Pathologie :

##### ***-Problèmes sanitaires sur les essences en place (épicéas, pins noir)?***

Les principaux problèmes sanitaires sont dus aux scolytes et au Fomès. La résistance aux scolytes est un des critères primordiaux pour le choix des essences de reboisement.

##### ***-Problèmes relevés à cause du gibier ?***

Les cerfs causent beaucoup de dégâts par endroit, il faut donc choisir une essence peu sensible à ces animaux.

#### Fonctionnalité de la forêt :

##### ***-Place sur le marché du bois produit sur la zone rouge de Verdun (catégories, usages et qualité des produits) ?***

Les épicéas fournissent des produits très demandés sur le marché, le bois peut être utilisé pour faire du sciage, des poteaux, des lisses, mais aussi des palettes ou du bois de trituration.



Le bois du pin noir sert lui à la fabrication de poteaux, à la production de bois de sciage, de lisses et de bois d'industrie. Il est globalement moins bien valorisé que l'épicéa.

***-Un remplacement à l'identique des essences (épicéa et pin noir) au niveau des caractéristiques économiques est-il souhaité ?***

Le souhait du gestionnaire est que l'essence de substitution aux épicéas puisse produire du bois d'œuvre avec une place similaire sur le marché. Cependant en ce qui concerne la zone 1 (zone touristique) seulement 100 à 20 ha seront plantés, ce critère n'est donc pas le premier à prendre en compte. Pour le pin noir, le remplacement à l'identique de l'essence du point de vue des caractéristiques économiques a moins d'importance.

***-Rapidité de croissance souhaitée ? Âge d'exploitabilité requis ?***

Les gestionnaires considèrent ce critère comme secondaire.

***-Critères paysagers exacts : hauteurs des arbres adultes ? Houppiers hauts ? Houppiers fournis ? Ombre fournie importante ? Faut-il des essences visuellement semblables aux précédentes ? Mélèze envisageable ?***

Pour remplacer l'épicéa il faut une essence visuellement semblable qui présente un couvert suffisant. Le pin noir lui étant peu couvrant, l'aspect préservation des vestiges de la guerre ne le concerne pas. Cependant, le gestionnaire ne souhaite pas qu'il soit remplacé par du mélèze en bord de route (aspect esthétique l'hiver).

En ce qui concerne la hauteur des arbres adultes, elle doit être supérieure à 20 mètres.

***-Y a-t-il des contraintes en rapport avec la chasse ?*** Non

***-Hiérarchisation des usages souhaitée ?***

Il semble, pour l'instant, que le plus urgent soit de se cibler sur le remplacement des épicéas en zone touristique. Dans ce cadre, les critères prioritaires sont la résistance des essences au calcaire et aux scolytes. Les essences doivent également ne pas être trop sensibles aux gelées tardives. Les critères secondaires sont la couverture du sol et l'aspect visuellement semblable de l'essence ainsi que la sensibilité moindre aux gibiers. Enfin un critère moins important mais à prendre tout de même en compte est le désir du gestionnaire de remplacer l'épicéa par une essence présentant un intérêt économique similaire (pour les plantations en bord de route l'aspect économique peut supplanter l'aspect couverture du sol).

Dans un deuxième temps il faudra proposer une liste de reboisement pour les zones moins touristiques, les critères prioritaires seront alors les mêmes, les critères secondaires seront l'aspect économique et la sensibilité moindre au gibier. Enfin, un troisième critère sera la conservation de l'aspect visuel du paysage (vision lointaine), le critère couvrant étant moins important.

### Réglementation :

***-Y a-t-il des contraintes réglementaires (forêt d'exception, Zone Spéciale pour la Conservation etc.)?***

Non, il faudra toutefois vérifier la liste des essences invasives établies pour les zones NATURA 2000.

***-Faut-il associer à la réflexion sur le test de comparaison d'essences, toutes les parties prenantes (ONF, Conseil Général de la Meuse, Direction Régionale de l'Environnement, Service Régional d'Archéologie de la DRAC, Comité de l'Ossuaire, l'Association Nationale pour le Souvenir de la Bataille de Verdun et la sauvegarde de ses hauts lieux, associations naturalistes etc.) ? Si oui, lesquelles et dès maintenant ?***

Il faudra peut être prévenir et associer au projet les associations naturalistes mais les gestionnaires s'en chargeront en temps voulu.

### Enjeux et perspectives :

***-Déterminer le degré d'incertitude que l'on peut accepter quant au succès des essences envisagées : quelle préférence entre une liste large avec des appréciations d'incertitude (favorable, conseillé, possible...) et une liste ciblée de 3-4 essences ?***

Les gestionnaires ont marqué une préférence pour une liste large avec des appréciations d'incertitude. Le choix des essences utilisées pour le reboisement de la zone touristique dès l'automne prochain étant effectué parmi les essences très favorables. Ils souhaitent également qu'un coefficient soit associé à chacun des critères de sélection dans la grille dévaluation afin qu'ils puissent plus tard changer la hiérarchisation de ces critères et obtenir un autre choix d'essences.

### b) « Cahier des charges »

Ce cahier des charges expose les critères auxquels doivent répondre les essences sélectionnées climatiquement pour être susceptibles d'être utilisées lors du reboisement de la zone rouge de Verdun. Ces critères témoignent des exigences du gestionnaire et des contraintes apportées par le contexte stationnel.

On relève 5 grands groupes de critères :

- Le critère « sol » avec une contrainte majeure qui est la présence de calcaire qui élimine déjà tous les candidats calcifuges. Une autre contrainte que peut apporter le sol est la texture principalement argileuse.
- Le climat est un critère important. Les essences, pour appartenir à la liste finale, doivent être adaptées climatiquement (modèle IKS). Mais le modèle IKS ne prend pas

en compte tous les facteurs du climat. Il faut aussi que les essences résistent au gel tardif.

- La forêt assure différentes fonctions (économique, sociale et environnementale) qui induisent toutes des contraintes. Les essences de remplacement de l'épicéa doivent produire un bois de qualité identique (bois d'œuvre) avec une place sur le marché similaire (bois de sciage, poteaux, lisses...). Enfin, l'essence doit répondre aux critères paysagers suivants : une ressemblance visuelle avec l'épicéa et une bonne couverture du sol ou une ressemblance avec le pin noir et dans les deux cas une taille adulte supérieure à 20 mètres.
- Si les essences sont particulièrement sensibles à une ou plusieurs pathologies (champignons, parasites...), avec des épisodes récurrents d'attaques massives en France ayant entraînés une perte de production, il faudra reconsidérer leur place dans la liste finale d'essences adaptées. La sensibilité aux scolytes qui provoque des dégâts sur les peuplements actuels à Verdun est un facteur d'élimination de la liste. La sensibilité à l'abroutissement, les cerfs étant la principale cause de dommages à Verdun, doit également être prise en compte.
- Enfin un dernier critère « technique » impose de prendre en compte, dans le choix des essences :
  - le caractère héliophile ou non des jeunes plants en rapport avec l'éclaircement qui règnera au niveau des zones à reboiser, certaines parcelles étant à nu, ainsi que la sociabilité des essences, celles-ci étant destinées à être conduites en peuplement.
  - l'existence de plantations en bon état sanitaire, dans des conditions climatiques similaires aux prévisions, en France, Europe...
  - si en plus, pour les essences qui seront sélectionnés, des réussites ou écarts ont été constatés au cours de l'histoire de la forêt et peuvent confirmer ou infirmer la liste finale, il faut en tenir compte (mélèzes, pins laricio etc.).

### c) Insertion du projet dans une démarche de développement local

#### **L'insertion du projet dans le développement local :**

- La Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale parle du développement local comme d'un « processus concret d'organisation de l'avenir d'un territoire par les effets conjoints de la population concernée ».

Une démarche participative a bien été suivie au cours de ce projet ! En effet, dans le cadre de la démarche « forêt d'exception », les « habitants » ont été consultés sur la place des résineux et c'est en partie pour cela que les gestionnaires ont opté pour le maintien de peuplements résineux. La démarche de mon projet répond donc à une demande de la population locale.

- Le développement local, c'est également la « mobilisation des potentiels humains » (Bernard PECQUEUR, économiste de formation et professeur à l'université de Grenoble).

Ici, la Recherche a été mise à contribution afin de prendre en compte, à l'échelle d'une forêt, le contexte de réchauffement climatique et l'importance de l'utilisation d'une essence et d'une provenance adaptée à la région et à la station.

- Le développement local doit permettre la « mise en valeur d'un patrimoine qui est un bien à valoriser » A.CHAUVAT.

Or ce projet vise à la fois le maintien d'une production de bois de qualité, et la conservation d'un aspect historique et mémoriel dans une région marquée par la guerre, grâce au maintien des peuplements résineux qui rendent plus lisibles les vestiges et les impacts laissés au sol par les obus. Production de bois et attrait touristique du site sont deux valorisations importantes au plan régional du patrimoine forestier.

- Pour M.ROCARD, ancien premier ministre français, le développement local est une « démarche visant à créer une dynamique durable ».

Le fait d'éviter la perte et/ou la dépréciation de peuplements, de bois due à une inadaptation de l'essence s'inscrit bien dans la création d'une dynamique durable puisque cela permet de limiter l'impact économique, mais également environnemental et social d'un changement inéluctable. La mise en place d'un tel protocole de recherche réutilisable dans d'autres régions où l'évolution climatique pourrait être encore plus forte est un bon exemple de « démarche visant à créer une dynamique durable ». Ce travail permettra de trouver de nouvelles pistes de reboisement avec un panel d'essences, et une démarche qui pourra être reconduite dans d'autres contextes.

- Enfin dans une publication de la Fédération des Centres Socioculturels de France, il est dit que « le développement local désigne l'évolution qualitative d'un territoire ».

Alors que les essences en place présentent des signes avérés de souffrance, le choix de nouvelles essences, répondant tant aux critères économiques, que culturels et historiques tout en prenant en compte les enjeux écologiques que sont la bonne adaptation de chaque essence à sa station, assure effectivement au territoire une progression qualitative.

Finalement, on peut en conclure que mon projet s'inscrit bel et bien dans une démarche de développement local.

## **II-Outil climatique et méthode suivie**

### **1) Le modèle IKS**

#### **CONTEXTE CLIMATIQUE**

Depuis une vingtaine d'années, un changement climatique mondial rapide a été mis en évidence. Il modifie l'équilibre de nos écosystèmes forestiers.

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat qui synthétise les travaux de plus de 2000 chercheurs de 192 pays, a donc cherché à savoir si l'évolution du climat constatée allait perdurer. Pour cela, divers scénarios de développement de l'activité économique mondiale, dont découlent les rejets de gaz à effet de serre, ont été élaborés. Un scénario est une hypothèse plausible. Cette hypothèse peut être traduite en conséquences pratiques par le biais de modèles climatiques. Le forçage de ces modèles qui ne sont autres qu'un ensemble d'équations mathématiques tirées des lois de la physique, par un scénario, permet d'obtenir des simulations/projections climatiques et donc différents futurs potentiels avec les conséquences climatiques associées. . Trois principaux scénarios ont été retenus : un scénario B2, qualifié d'optimiste, qui propose une croissance linéaire de la concentration des gaz à effet de serre et donc un doublement de cette concentration d'ici 2100. Un scénario A2, « pessimiste », qui propose une croissance exponentielle de la concentration des gaz à effet de serre, celle-ci devant ainsi tripler d'ici 2100. Et enfin un scénario intermédiaire A1B. En utilisant ensuite des modèles climatiques, on peut simuler les conséquences de ces scénarios d'émissions sur le climat aux échelles mondiales, nationales, voire régionales. En tenant compte des incertitudes sur les scénarios et sur les modèles, les résultats des simulations montrent tout de même que le climat mondial connaîtra vraisemblablement un changement rapide et important au cours du siècle prochain. La synthèse des simulations produites par 21 modèles à partir du scénario « intermédiaire » A1B, prévoit pour 2100 en Europe, une augmentation de la température moyenne de + 2,3 à + 5,3 °C, une augmentation de la pluviosité hivernale en Europe du Nord jusqu'à + 16% et une diminution en Europe du Sud, une hausse des déficits hydriques estivaux Et enfin une augmentation de la fréquence des événements extrêmes (canicules, sécheresses, incendies, pluies torrentielles etc.). Ces conséquences du changement climatique sont déjà visibles actuellement en France, de manière plus ou moins marquée. Elles ont des impacts phénologiques constatés: avancement des stades de floraison et de débourrement (le débourrement pourrait être retardé ou perturbé si l'augmentation de température continue car il ne fera plus assez froid l'hiver pour lever la dormance), hausse de 30 à 40% de la productivité des forêts françaises due en partie à un

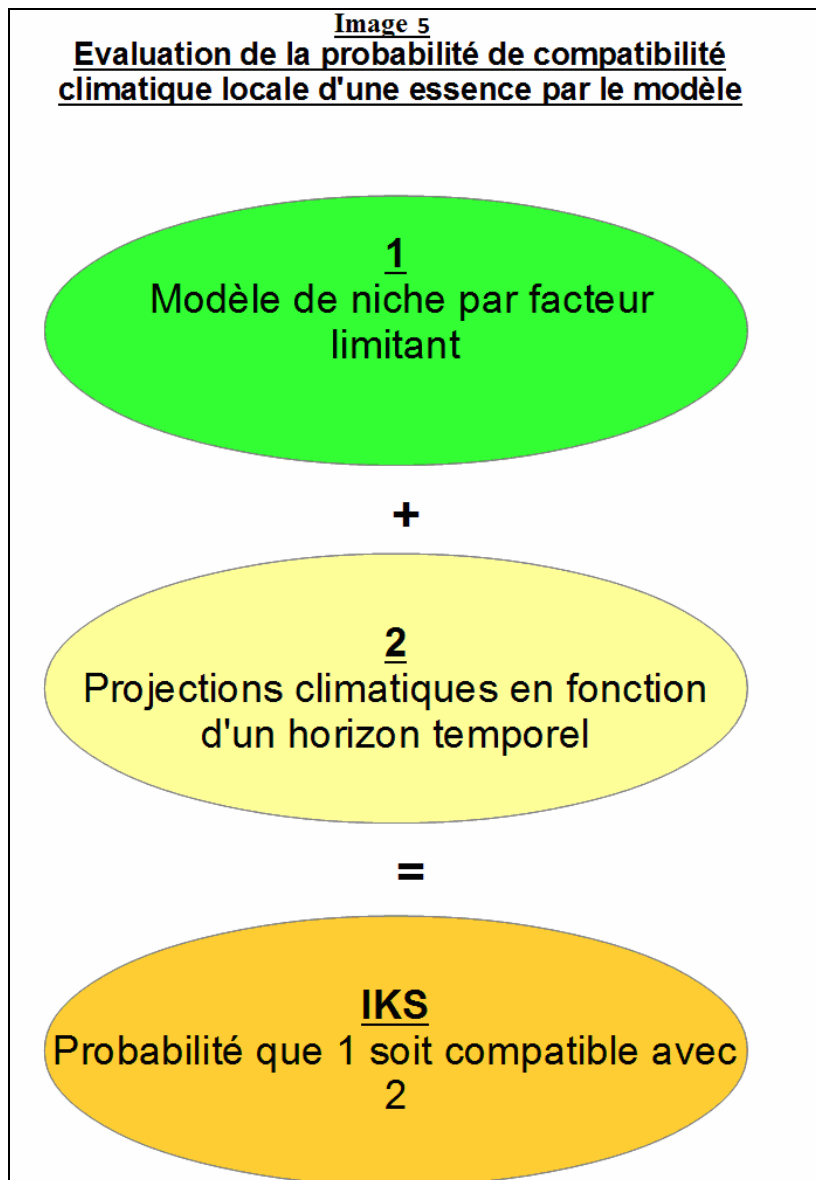
allongement de la saison de végétation, mais aussi aux dépôts atmosphériques azotés (cette hausse finira par laisser la place à une baisse de productivité si le déficit hydrique et les températures continuent d'augmenter). (*L-M.NAGELEISEN 2010*)

## **MODELE IKS**

Les changements climatiques modifient l'adaptation de l'espèce au climat local :

- L'évolution de la probabilité locale de compatibilité climatique pour toute essence, ce qui permet d'évaluer une vulnérabilité si l'essence voit sa probabilité climatique baisser.
- Le changement éventuel de type de bioclimat, entraînant divers effets potentiels :
  - o Augmentation de la productivité dans le cas général d'une augmentation des températures si le bilan hydrique n'est pas trop dégradé.
  - o Baisse de productivité générale et/ou disparition d'essences si à l'augmentation des températures s'ajoute au contraire une dégradation importante du bilan hydrique liée à la baisse ou au seul maintien des précipitations.
  - o Modification du contexte des relations interspécifiques affectant à la fois l'équilibre compétitif entre essences forestières et le développement d'un nouveau contexte parasitaire et sanitaire.

Dans le cadre de mon stage je me suis concentrée sur une méthode bioclimatique, de prise en compte forestière régionalisée des changements climatiques au XXIème siècle : **le modèle bioclimatique IKS**. Ce modèle a été développé par Hervé le BOULER ; chargé de mission nouvelles essences pour l'adaptation au changement climatique auprès du Chef de Département R&D, dans le cadre du projet Nomades. Il permet, d'ajuster une représentation mathématique de la niche climatique d'une essence à partir de données de répartition, et ensuite de simuler l'évolution de la répartition en fonction des futurs climatiques possibles pour les horizons 2030 et 2080, d'évaluer la probabilité de compatibilité de chaque essence pour les bioclimats futurs.



*Source : réalisation personnelle*

### **1-Niche climatique**

Ce concept suppose que chaque espèce ne peut se maintenir et se reproduire dans un lieu donné qu'à la condition, nécessaire mais non suffisante, que le climat qui y règne soit compatible avec les exigences de l'essence. Ces exigences définissent la niche climatique.

Dans IKS, trois grandeurs climatiques sont utilisées pour définir les limites de la niche de l'espèce :

- 1) La quantité de chaleur totale qui doit être suffisante. Elle est mesurée par la somme des moyennes mensuelles des températures maximas lorsqu'elles sont positives.
- 2) Le froid hivernal qui ne doit pas être trop intense ; il est mesuré par la moyenne des minimas du mois le plus froid.
- 3) Le bilan hydrique cumulé des 12 mois combinant la demande en eau (mesurées par l'ETP Penmann), et les précipitations. Ce bilan tient compte des reports éventuels liés

à la fonte des neiges stockées sur plus d'un mois et de la pondération liée à l'utilisation de la réserve en eau du sol. Il permet d'évaluer la sécheresse maximale que l'essence peut supporter (déficit hydrique).

**La valeur limitante pour chacun de ces facteurs pour une espèce donnée est calculée en comparant les données mondiales de présence absence de chaque espèce et les valeurs du climat de référence moyen (1950-2000).**

### Climat local

Pour décrire le climat local, présent, passé ou futur, on utilise les mêmes variables climatiques que celles utilisées pour la définition des niches par essence. En chaque point on obtient les trois valeurs que l'on propose d'appeler IKST, IKSF et IKSH (T= thermicité, F=froid, H =bilan hydrique).

Par hypothèse deux points ayant les mêmes valeurs IKS ont le même climat. Par construction les variables mesurées étant continues il existe une infinité de valeurs IKS possibles.

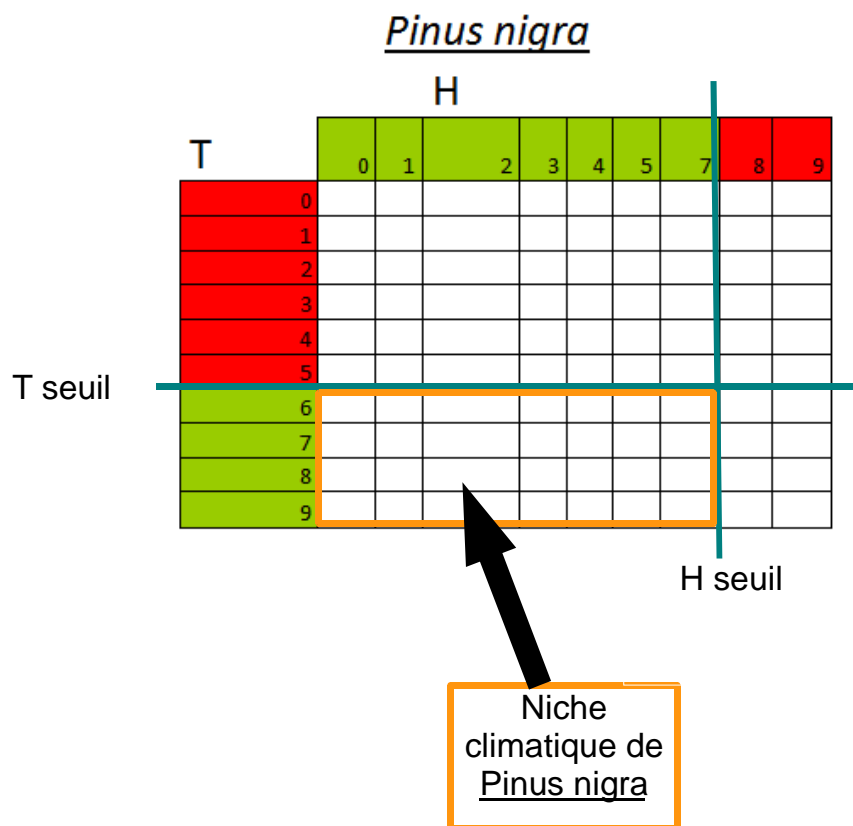
Cependant en effectuant des regroupements en classes, on peut réduire la description de la diversité des climats à un certain nombre de bioclimats, censés recouvrir les grands types de végétations. Dans la France actuelle (1950-2000), on a ainsi réduit la diversité climatique à 12 bioclimats.

### Repartitions des essences par bioclimats et enjeux

Une fois identifiées les valeurs du climat de référence (1950-2000), il faut les comparer à la répartition des essences dans les zones tempérées afin de pouvoir déterminer les valeurs limites des niches climatiques de chaque espèce. Pour évaluer, la présence absence de chaque espèce en fonction du climat de référence, on utilise différentes sources de données de présence. Pour la France, la référence est l'inventaire forestier de l'IGN-IFN, période 2005-2009. Ces points d'inventaire constituent un échantillonnage représentatif des forêts françaises. Ils indiquent les surfaces terrières de chaque essence forestière par hectare et donc le poids de cette essence par rapport aux autres sur le point étudié. Ces informations sont ensuite compilées et permettent d'évaluer les valeurs de thermicité, de froid et de bilan hydrique les plus contraignantes qui imposent la probabilité de présence de l'essence. Ces facteurs limitants donnent, pour chaque essence, un code à trois chiffres représentatif de sa niche climatique.



Image 6 : Détermination des valeurs seuil de la niche climatique d'une essence, représentation dans le plan thermicité - bilan hydrique



Source : réalisation personnelle

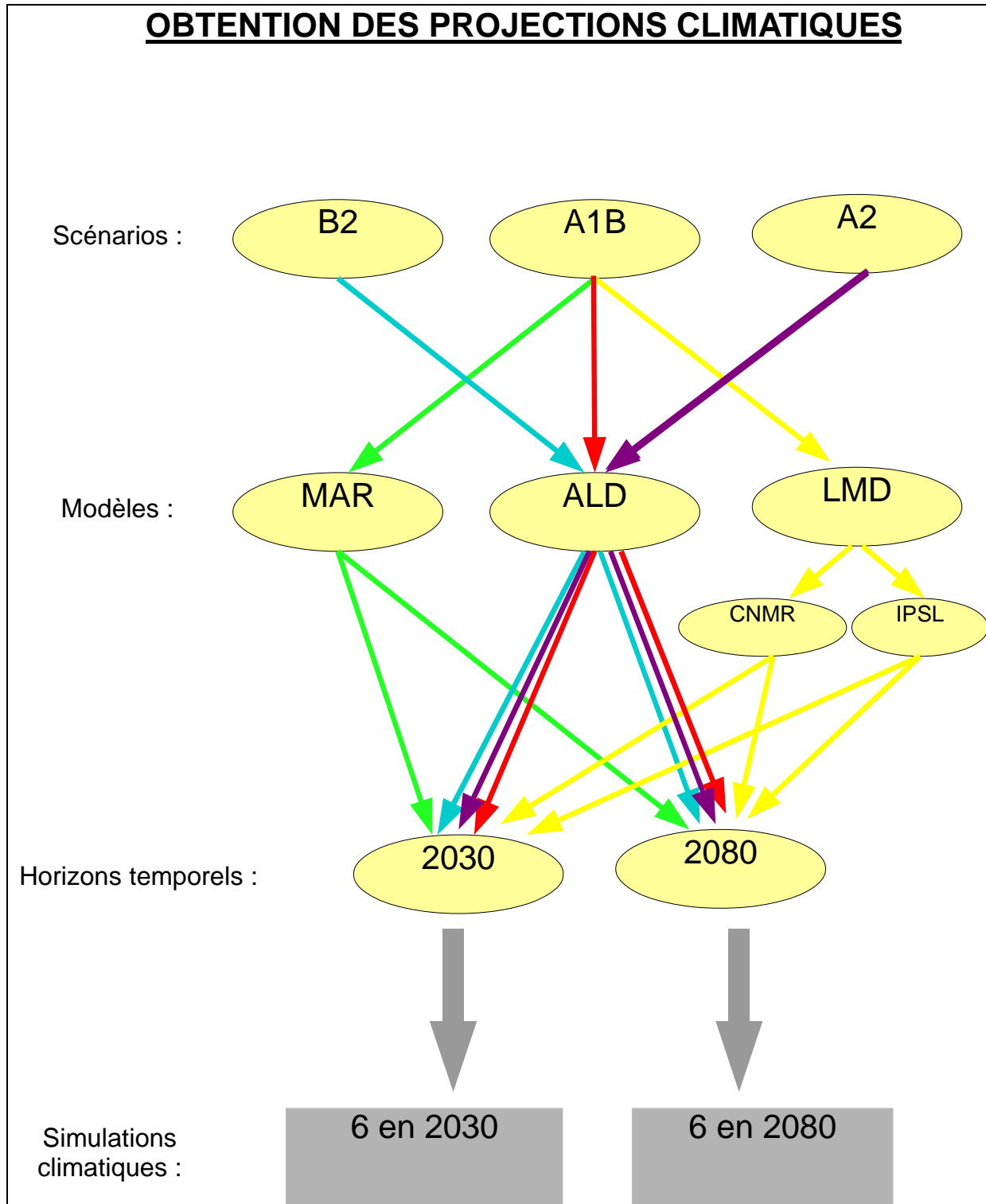
Mais le modèle IKS ne se contente pas d'évaluer la répartition des essences à l'échelle française ; il l'évalue à l'échelle internationale. Pour ceci il utilise les cartes de répartition internationales, comme celles produites sous l'égide d'EUFORGEN qui donnent des informations de présence/absence de l'essence sous formes d'enveloppes de répartition.

## 2- Futurs climatiques

Afin de pouvoir évaluer la probabilité de compatibilité de chaque essence pour les bioclimats futurs il faut ensuite posséder des simulations d'évolution climatique. Pour cela on utilise les trois scénarios d'évolution des rejets de gaz à effet de serre : A1B, B2 et A2 (présentés auparavant). Ces hypothèses sont croisées avec les modèles de climat ALD, LMD, MAR qui ont servi à produire les simulations de référence pour la France (*Voir annexe 5 : Explications complémentaires sur les modèles climatiques fournissant les simulations utilisées dans IKS, page M*), ce qui permet d'obtenir des projections climatiques et donc différents futurs climatiques potentiels. Les modèles de climat LMD et MAR sont généralement couplés avec un modèle océanique. Les trois modèles ALD, MAR et LMD permettent d'obtenir différentes

projections climatiques pour les horizons temporels 2030 et 2080 (Référence : Y.PEINGS 2011).

Image 7 : Représentation des lectures des différents scénarios considérés



Source : Réalisation personnelle

On obtient donc, pour chaque horizon temporel, 6 projections climatiques différentes, donc 6 futurs potentiels différents pour Verdun. On peut de surcroît faire différentes hypothèses de

RU, de 20 à 100 mm, et d'altitude, de 200 à 400 m. Ce qui conduit à autant d'analyses de vulnérabilités et de contexte de choix de décisions de sylviculture adaptative.

**Tableau 2 : Nomenclature des futurs climatiques**

| Projections climatiques | 2080 |
|-------------------------|------|
| ALD-A1B                 | FL1  |
| ALD-A2                  | FL2  |
| ALD-B1                  | FL3  |
| LMD1 (A1B)              | FL4  |
| LMD2 (A1B)              | FL5  |
| MAR (A1B)               | FL6  |

Source : Réalisation personnelle

**Tableau 3 : Comparaisons des simulations climatiques avec le climat actuel de Verdun**

|                                 | FL2 | FL1 | FL3 | FL6 | FL5 | FL4 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Températures moy. estivales     | A   | A   | A   | A   | A   | A   |
| Températures moy. hivernales    | A   | A   | A   | A   | A   | A   |
| Précipitations moy. annuelles   | D   | D   | D   | A   | A   | A   |
| Précipitations moy. estivales   | D   | D   | D   | D   | A   | A   |
| Humidité moy. de l'air annuelle | A   | A   | A   | A   | A   | A   |
| Humidité moy. de l'air estivale | D   | I   | A   | A   | A   | A   |
| ETP                             | A   | A   | A   | A   | A   | D   |
| Déficit hydrique moy. estival   | A   | A   | A   | A   | D   | D   |

A = augmente D = diminue I = Identique

Effet général sur les essences forestières :

 Impact négatif

 Impact positif

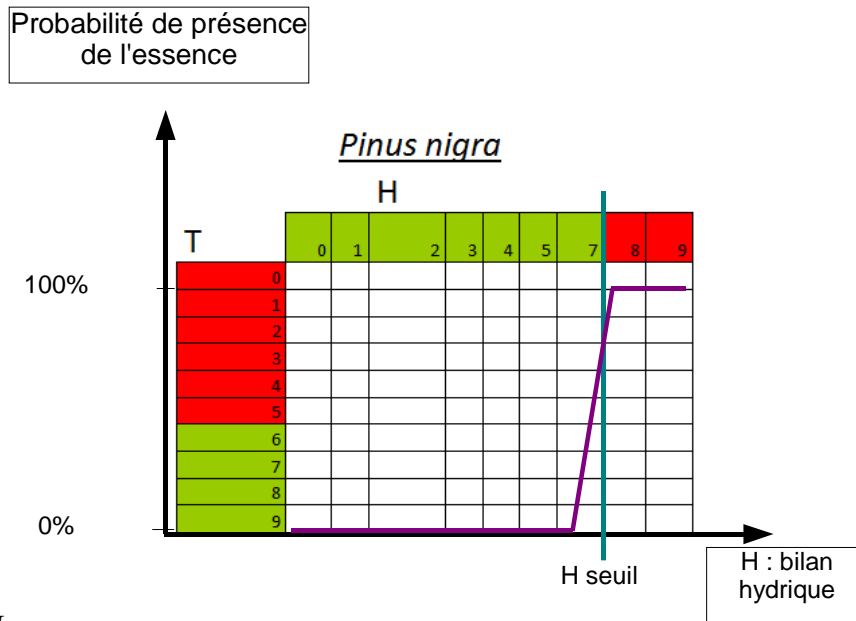
Source : réalisation personnelle

En étudiant les résultats de ces 6 projections (*Voir annexe 6 : Description et analyse des différents scénarios climatiques obtenus avec IKS, page N*), on constate que selon les régions les 6 diagnostics peuvent souvent être regroupés et réduits à trois tendances (simulations positives/intermédiaires/négatives) qui diffèrent entre elles par l'évolution du bilan hydrique dont la dégradation constitue le moteur principal de l'augmentation de la vulnérabilité forestière. Les évolutions des températures sont toutes orientées dans le sens convergent d'une augmentation.

### 3-Détermination de la probabilité de comptabilité climatique locale d'une essence

Une fois définies les limites par essence et les différents futurs climatiques possibles, on peut affecter une probabilité de comptabilité climatique locale à une essence. Dans le cadre du modèle IKS, une probabilité de compatibilité de l'essence de 100%, 80%, 30%, 10% ou 0% est affectée pour chaque variable (thermicité, froid, bilan hydrique) et pour chaque climat possible.

Image 8 : Graphique représentant l'évaluation de la probabilité de présence d'une essence

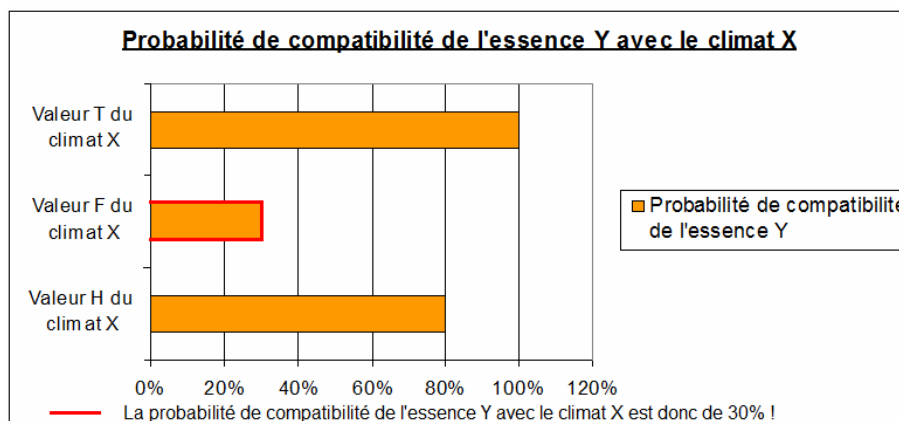


I

Source : réalisation personnelle

On utilise le principe de facteur limitant entre les trois variables, la probabilité liée à la moins favorable des variables étant retenue comme représentant la probabilité de compatibilité climatique de l'essence pour le climat étudié.

Image 9 : Evaluation de la probabilité de compatibilité climatique d'une essence



Source : réalisation personnelle

Le modèle IKS permet donc, en un lieu donné, et pour un scénario climatique donné, de produire une liste d'essences potentiellement adaptées du point de vue climatique. Il reste à filtrer cette liste en fonction de la tolérance des espèces par rapport aux contraintes liées au sol (à Verdun, la présence de calcaire actif principalement), ou de tout autre critère d'usage que l'on se fixe (aptitude à la production de bois d'œuvre, intérêt paysager etc.).

## 2) Détermination d'une liste d'essences adaptées climatiquement à partir du modèle IKS

Une fois que le modèle IKS a défini les différents bioclimats possibles à Verdun pour 2030 et 2080 dont voici la liste :

Tableau 4 : liste des climats possibles à Verdun pour les horizons temporels 2030 et 2080

|     |   |
|-----|---|
| 540 | Forêts feuillues <b>sub océaniques</b> axériques    |
| 541 | Forêts feuillues <b>sub océaniques</b> hyper humide |
| 542 | Forêts feuillues <b>sub océaniques</b> humide       |
| 543 | Forêts feuillues <b>sub océaniques</b> subhumide    |
| 544 | Forêts feuillues <b>sub océaniques</b> subsec       |
| 545 | Forêts feuillues <b>sub océaniques</b> sec          |
| 550 | Forêts feuillues <b>océaniques</b> axériques        |
| 551 | Forêts feuillues <b>océaniques</b> hyper humide     |
| 552 | Forêts feuillues <b>océaniques</b> humide           |
| 553 | Forêts feuillues <b>océaniques</b> subhumide        |
| 554 | Forêts feuillues <b>océaniques</b> subsec           |
| 555 | Forêts feuillues <b>océaniques</b> sec              |

Source : réalisation personnelle.

Le modèle calcule alors la probabilité de compatibilité de chaque essence avec chaque climat.

Voilà un aperçu de ce que l'on obtient :

Tableau 5 : Exemple d'une liste d'essences évaluées par le modèle IKS

|                          | 540 | 541 | 542 | 543 | 544 | 545 | 550 | 551 | 552 | 553 | 554 | 555 |                |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|
| <b>Larix lyallii</b>     | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |                |
| <b>Larix mastersiana</b> | 4   | 4   | 4   | 4   | 3   | 2   | 4   | 4   | 4   | 4   | 3   | 2   | => suppression |
| <b>Larix sibirica</b>    | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |                |
| <b>Picea abies</b>       | 4   | 4   | 4   | 3   | 2   | 1   | 4   | 4   | 4   | 3   | 2   | 1   | => suppression |
| <b>Picea chihuahuana</b> | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   | => suppression |
| <b>Picea glauca</b>      | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4   |                |
| <b>Picea jezoensis</b>   | 4   | 3   | 2   | 1   | 0   | 0   | 4   | 3   | 2   | 1   | 0   | 0   | => suppression |

**Légende :**

Proba. de compatibilité climatique

100%

80%

30%

10%

0%

Source : réalisation personnelle

L'objectif étant de limiter les risques quelque soit le futur climatique, on convient d'accepter au maximum deux climats à 80% de probabilité de compatibilité si tous les autres ont une probabilité de 100%. Dans ce cas virtuel présenté en tableau 5, on gardera ainsi le *Larix lyallii*, le *Larix sibirica*, le *Picea glauca* et le *Picea mariana*.

En appliquant cette démarche à Verdun, on obtient alors une liste de **154 résineux** potentiellement adaptés climatiquement à Verdun jusqu'à 2080, appartenant à 13 genres différents :

- |   |  |
|---|--|
| - <b>Abies</b> (28 espèces différentes),      | - <b>Calocedrus</b> (1 espèces différentes), |
| - <b>Cedrus</b> (2 espèces différentes),      | - <b>Cupressus</b> (9 espèces différentes),  |
| - <b>Juniperus</b> (30 espèces différentes),  | - <b>Larix</b> (7 espèces différentes),      |
| - <b>Picea</b> (20 espèces différentes),      | - <b>Pinus</b> (40 espèces différentes),     |
| - <b>Pseudotsuga</b> (4 espèces différentes), | - <b>Sequoiadendron</b> (1 espèce),          |
| - <b>Taxus</b> (5 espèces différentes),       | - <b>Thuja</b> (2 espèces différentes),      |
| - <b>Tsuga</b> (5 espèces différentes).       |  |

(Voir la liste complète des essences en annexe 7 p. AA)

### **3) Confrontation de cette liste d'essences potentielles au cahier des charges**

A partir du cahier des charges j'ai mis en place une base de données à compléter pour chaque essence potentiellement adaptée climatiquement. J'ai complété cette grille en réalisant des recherches bibliographique sur l'autécologie de chaque essence. Pour cela j'avais accès à la bibliothèque du pôle recherche, à la bibliothèque d'Agroparistech ainsi qu'à différents sites internet (bases de données étrangères...).

A chaque critère j'ai associé une note :

1=condition remplie

2=pas d'informations trouvées

3=condition non remplie

Par exemple si pour le critère « résistances édaphiques : calcaire » à *Abies cephalonica* correspond 1, alors cela signifie que cette essence est effectivement résistante au calcaire.

Tableau 6 : Exemple de l'évaluation de trois essences en fonction du cahier des charges

| Essences sélectionnées par IKS | Résistance édaphique |              | Résistance climatique | Résistances risques sanitaires |          |
|--------------------------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|----------|
|                                | Calcaire             | Sol argileux | Gel tardif            | Cerfs                          | Scolytes |
| <i>Abies amabilis</i>          | 2                    | 1            | 1                     | 1                              | 2        |
| <i>Abies cephalonica</i>       | 1                    | 1            | 3                     | 1                              | 3        |
| <i>Abies cilicica</i>          | 1                    | 2            | 3                     | 2                              | 2        |

Légende : 1 = positif 2 = non renseigné 3 = négatif

Source : réalisation personnelle

Au fur et à mesure que j'ai récolté des informations j'ai pu faire une liste des essences écartées définitivement : soit parce qu'elles étaient calcifuges, soit parce qu'elles étaient de taille inférieure à 20m ou bien qu'elles ne ressemblaient ni au pin noir ni à l'épicéa.

Une fois exploitées les sources bibliographiques disponibles, une concaténation des appréciations (1/2/3) obtenues par chaque essence pour les critères principaux (calcaire, argile, scolytes, gel, cerfs et enfin bois d'œuvre) a conduit à un code à 6 chiffres.

J'ai alors réduit la liste à 13 essences en appliquant les filtres suivants :

- Suppression des essences pour lesquelles le critère calcaire n'était pas renseigné ;
- Suppression des essences avec plus de trois critères principaux inconnus ou avec un (ou plus) critère principal négatif ont également été écartées.

Tableau 7 : Liste de la première sélection de 13 essences

|                                      | Calcaire | Argile | Scolytes | Gel tardif | Cerfs | BO |
|--------------------------------------|----------|--------|----------|------------|-------|----|
| <i>Abies nordmanniana</i>            | 1        | 1      | 1        | 1          | 1     | 1  |
| <i>Pinus nigra laricio calabrica</i> | 1        | 1      | 1        | 1          | 1     | 1  |
| <i>Pinus nigra nigricans</i>         | 1        | 1      | 1        | 1          | 1     | 1  |
| <i>Pinus nigra clusiana</i>          | 1        | 1      | 1        | 1          | 1     | 2  |
| <i>Abies marocana</i>                | 1        | 1      | 1        | 1          | 2     | 1  |
| <i>Picea engelmannii</i>             | 1        | 1      | 2        | 1          | 1     | 1  |
| <i>Abies numidica</i>                | 1        | 1      | 2        | 1          | 1     | 1  |
| <i>Abies procera</i>                 | 1        | 1      | 1        | 1          | 1     | 1  |
| <i>Pinus monticola</i>               | 1        | 1      | 2        | 1          | 2     | 1  |
| <i>Pinus heldreichii</i>             | 1        | 1      | 2        | 1          | 2     | 1  |
| <i>Pinus jeffreyi</i>                | 1        | 1      | 2        | 1          | 2     | 1  |
| <i>Abies concolor</i>                | 1        | 1      | 2        | 1          | 1     | 2  |
| <i>Picea glauca</i>                  | 1        | 1      | 2        | 1          | 1     | 2  |

Source : réalisation personnelle.

J'ai alors décidé de réduire encore cette liste en supprimant les essences possédant plus d'un critère principal non renseigné. Ce qui m'a permis d'obtenir une liste finale de 8 essences, en jaune dans le tableau ci-dessus. J'ai ensuite classé ces huit essences par appréciation d'incertitude en évaluant leur adaptation plus ou moins grande en fonction de l'ordre de priorité des critères établis par les gestionnaires.

(Voir le tableau récapitulatif des essences écartées et de la raison de leur élimination en annexe 8 page BB).

### III-Résultats et discussion

#### 1) Présentation des résultats

Voilà la liste d'essences potentielles de substitution que l'on obtient et qui pourra être proposée aux gestionnaires de Verdun :

Tableau 8 : Liste finale des essences de remplacement sélectionnées




|                       | <b>Remplacement épicéa commun</b>      | <b>Remplacement pin noir d'Autriche</b> |
|-----------------------|--|---|
| <b>Très favorable</b> | <i>Abies procera</i>                   | <i>Pinus nigra laricio calabrica</i>    |
| <b>Favorable</b>      | <i>Abies nordmanniana</i>              | Maintien même essence                   |
| <b>Possible</b>       | <i>A. marocana / Picea engelmannii</i> | <i>Pinus nigra clusiana</i>             |
| <b>Envisageable</b>   | <i>Abies numidica</i>                  |   |

Source : réalisation personnelle.

Pour chacune de ces essences j'ai rédigé une fiche de présentation, à l'attention des gestionnaires, dont voici un exemple :

**Sapin noble (*Abies procera*)**

Famille : *Pinaceae*  
Genre : *Abies*



Origine : nord-ouest de l'Amérique du Nord. Il est originaire des montagnes de la chaîne des Cascades et des chaînes côtières du Pacifique entre l'extrême nord-ouest de la Californie et l'ouest de l'Oregon et de l'État de Washington, aux États-Unis.





Utilisation : Le bois de l'arbre est utilisé en construction et en papeterie. Il présente un intérêt économique semblable à l'épicéa. On l'utilise aussi pour en faire des sapins de Noël.

Caractéristiques : Résistant au calcaire, au sol argileux, aux scolytes, aux dégâts des cerfs et au gel tardif.

Envisagé pour remplacer : l'épicéa avec un facteur d'incertitude « très favorable ».

Sources : -Formation en Biologie Végétale-[en ligne]-[consulté le 08/04/2013] disponible sur : <[http://www.afd-ld.org/~fdp\\_bio/content.php?page=espece&skin=modvi&espece=98](http://www.afd-ld.org/~fdp_bio/content.php?page=espece&skin=modvi&espece=98)>.

-« Les Essences de reboisement tome 3 » Synthèses bibliographiques réalisées par les élèves de l'ENGREF, (1986)-[livre]-[consulté le 22/05/2013].

(Voir les fiches descriptives des autres essences en annexe 9 page FF).

Le choix final des essences à utiliser pour les reboisements imminents (dès l'automne 2013 et au cours des cinq prochaines années) reste une décision du gestionnaire. Mon travail consistait à fournir un outil d'aide à la décision. Toutes les essences proposées seront par contre expérimentées à Verdun dans le cadre du test de comparaison d'essence (voir III-3), ce qui permettra de confirmer ou d'infirmer leur adaptabilité à la station et au climat. Ce boisement test sera un second outil de décision au profit des gestionnaires.

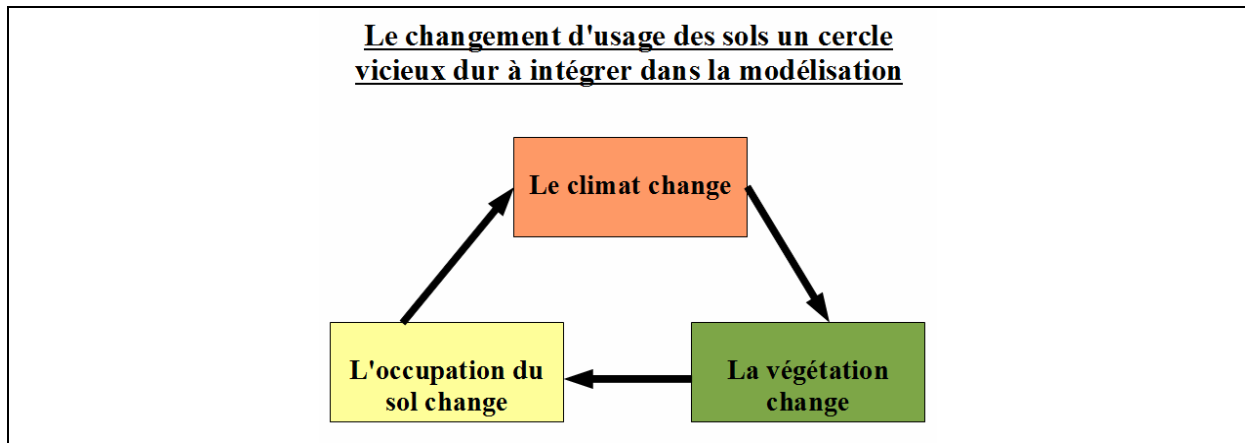
## **2) Discussion des résultats obtenus**

### **a) Limites de la démarche de modélisation**

☒ En amont du modèle IKS, les sources d'incertitude de la modélisation climatique (ALD, MAR et LMD) sont multiples. Elles peuvent être classées en trois catégories :

- des incertitudes liées à la conception même des modèles, qu'elles proviennent des équations utilisées ou du traitement numérique de ces équations ; il convient aussi d'y inclure l'absence de représentation de certains processus négligés ou mal connus ; Par exemple, aucun scénario climatique ne prend en compte le changement d'usage des sols qui a pourtant un impact visible à l'échelle régionale puisque il joue sur l'albédo, sur les turbulences atmosphériques, sur la formation de nuages et sur le taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Image 10 :



Source : réalisation personnelle.

-des incertitudes liées au caractère en partie chaotique du climat qui se traduit dans le fait qu'un même modèle partant de deux états climatiques très proches calcule deux évolutions climatiques qui peuvent être notablement différentes.

Le modèle IKS présente, comme tout modèle, ses faiblesses et ses limites :

☒ On utilise ici, comme représentation mathématique de l'évolution des forêts dans leur environnement climatique et édaphique, un modèle de niche. Or, lors de l'analyse de répartition des essences pour déterminer les niches climatiques, il n'est tenu compte d'aucune substitution d'essences par plantation ou du fait d'une sylviculture intensive visant au maintien d'une essence objectif aux dépens d'essences climatiques.

☒ On peut également noter que pour déterminer les valeurs limites qui bornent la niche climatique, on a considéré que pour chaque variable (thermicité, bilan hydrique et froid) la borne se trouve uniquement d'un seul côté :

→ Un hiver n'est jamais trop doux ; pourtant il est nécessaire d'avoir un minimum de températures basses pour lever la dormance, ainsi que pour favoriser la régénération de certaines essences (le hêtre par exemple) !

→ Les températures en saison de végétation ne sont jamais trop élevées hors stress hydrique, c'est-à-dire s'il y a une réserve en eau suffisante ; or on peut se demander si c'est vraiment le cas ;

→ le stress hydrique n'est jamais trop faible, ce à quoi on peut opposer les différents problèmes liés à un bilan hydrique trop élevé sur certains sols : hydromorphie, engorgement, voire développement de champignons etc...

☒ Enfin le pourcentage de compatibilité fourni par le modèle pour une essence, un horizon temporel et une localisation donnés ne prend pas en compte la provenance de cette essence

qui peut influencer sur son adaptation, ni le fait que la sylviculture peut, elle aussi, jouer sur l'adaptation de celle-ci.

## **b) Cohérence et limites de la liste définitive obtenue**

On peut ensuite tenter d'évaluer la cohérence et les limites de la liste d'essences obtenue.

Tout d'abord dans l'évaluation de l'état sanitaire des pins noirs, la pollution chimique et les bouleversements du sol dus à la guerre n'ont pas été pris en compte, ce qui peut expliquer pourquoi ils ressortent dans la liste finale d'essence malgré leur état constaté médiocre.

Deuxièmement, dans le cadre du changement climatique, il est recommandé de pratiquer une sylviculture économe en eau et donc de préférer les feuillus aux résineux (*Nadine BRISSON et Frédéric LEVRAULT 2007-2010*)! On peut donc remettre en question le bien fondé du projet qui cherche à remplacer les résineux pour satisfaire un critère paysager et historique alors que le critère adaptation climatique et stationnelle devrait peut-être prédominer. Cependant, dans le contexte de déficit chronique de la filière-bois française en résineux, la recherche de résineux adaptés à des climats plus secs est un enjeu qui dépasse largement le cas particulier de Verdun.

Troisièmement, dans la liste obtenue, on constate que le critère « résistance aux scolytes » a peu été renseigné, faute de documentations sur ce point. C'est dommage car c'était un des critères de choix des gestionnaires et cela ajoute donc une limite de fiabilité à l'outil fourni.

Enfin, en prenant du recul par rapport au travail que l'on m'a demandé, certaines interrogations peuvent également être soulevées :

-Ne vaudrait-il pas mieux garder les essences en place, mais aller rechercher des provenances plus aguerries à la sécheresse?

- Ne risque-t-on pas, en installant des essences adaptées au climat de 2050-2100, de sous-estimer les facultés d'adaptation des espèces et des écosystèmes et d'intervenir de façon maladroite, voire néfaste ?

-La promotion d'un matériel reproducteur adapté aux conditions climatiques projetées est-elle une stratégie pertinente face au changement climatique, même si elle mène à la mise en place d'essences adaptées d'une façon sous optimale aux conditions actuelles de station, sachant que cette option inclut un risque considérable induit par les incertitudes dans les projections de climat futur aux échelles locales et régionales?

Nous n'avons pas les connaissances nécessaires pour répondre à la question de l'adaptabilité de la forêt face au changement climatique. Il convient, avant même de chercher des essences adaptées au changement climatique, de s'intéresser de près aux adaptations sylvicoles qui

permettront de maintenir les peuplements en bonnes conditions sanitaires, malgré des conditions climatiques difficiles. La mise en place de peuplements mélangés ; plus résistants est une de ces adaptations. Enfin, à mon avis, avant d'introduire une nouvelle essence il est bon de tester son adaptation locale à petite échelle. C'est ce qu'il est prévu de faire dans le présent projet en installant, à Verdun, un boisement-test de comparaison des essences finales obtenues.

### **3) Protocole d'installation d'un test de comparaison d'essences**

Voilà les points de réflexion les plus importants qui m'ont permis d'aboutir à la proposition de protocole d'installation de boisement test (*voir cette proposition en annexe 10 page MM*) :

Il a tout d'abord fallu déterminer avec précision le but de l'essai : « Comparer plusieurs essences du point de vue de :

- l'état sanitaire : suivi de la mortalité naturelle et du taux de survie, réponses aux évolutions climatiques et aux aléas divers (biotiques et abiotiques) ;
- la croissance et la production (hauteur et circonférence) ;
- la qualité de forme de la tige (rectitude et hauteur élaguée) ;

et ainsi confirmer ou infirmer leur adaptation stationnelle et climatique et donc leur capacité à remplacer les essences en place (épicéa commun et pin noir d'Autriche). »

A partir du moment où l'objectif était clairement identifié, deux types d'expérience étaient envisageables :

- l'essai d'élimination : beaucoup d'espèces de comportement inconnu sont mises en comparaison. Les placettes sont alors petites et le suivi court ;
- l'essai de comportement : peu d'espèces, sur lesquelles on a déjà quelques garanties d'adaptation, sont comparées sur des placettes plus grandes suivies plus longtemps.

Dans notre cas, nous avons choisi, les chercheurs du pôle R&D et moi même, de mettre en place un essai d'élimination puisque c'était le critère survie qui nous intéressait le plus dans cette expérimentation.

La disponibilité des plants a été un point important de ma réflexion pour la rédaction du protocole. En effet, d'après Hervé le Bouler, « *Abies marocana*, *Abies numidica*, *Abies procera* et *Picea engelmannii* ne sont pas produits dans les pépinières françaises car l'on y trouve que les essences et provenances couramment utilisées au moins quelque part en France, donc pour lesquelles il existe un marché ».

Tableau 9 : Provenances recherchées pour les essences sélectionnées

| <b>Essences recherchées</b> | <b>Origine souhaitée</b> |
|-----------------------------|--------------------------|
| <i>Abies procera</i>        | Etats-Unis               |
| <i>Abies marocana</i>       | Maroc                    |
| <i>Abies numidica</i>       | Algérie                  |
| <i>Picea engelmannii</i>    | Etats-Unis               |

Source : réalisation personnelle.

La réussite de la mise en place du test est donc liée à la possibilité d'obtenir des semences pour ces essences d'origine étrangère. Au vu de ces informations, deux options étaient envisageables : la première étant de mettre en place un test avec seulement les essences présentes dans les pépinières françaises. On se retrouverait donc avec un test plus rapidement mis en place et avec moins d'essences. La seconde option étant de mettre en place le test complet mais en prenant en compte la difficulté de se procurer certaines essences qui influera sur le coût mais également sur les délais de mise en place de l'expérimentation. Dans le contexte de Verdun, le second choix m'a paru le plus judicieux (en concertation avec les gestionnaires). En effet, ne tester que les essences communes qui vont de toutes façons être plantées par les gestionnaires pour les reboisements urgents ne présente pas grand intérêt. Si la décision est prise d'installer une expérimentation sur la forêt domaniale de Verdun, les coûts et l'investissement que cela induira ne se justifieront que si l'on met en place un test avec toutes les essences de la liste finale.

Le fait que de nombreuses essences-provenances n'existent pas dans les catalogues des semenciers et pépiniéristes français a conduit Hervé Le BOULER et ses collègues à envisager la création d'un pool collaboratif national de structures et personnes ressource, dont la fonction serait d'organiser et de mettre en œuvre une politique de mises à disposition durable et régulière des plants d'essences-provenances issues des listes et non disponibles actuellement en routine dans le secteur commercial de production de semences et plants. Cependant au vu de la relative incertitude concernant sa création et le délai, j'ai conseillé aux gestionnaires de Verdun de s'adresser au service des graines et plants de l'Office national des forêts, plus connu sous son ancienne dénomination de « sécherie de la Joux » pour l'importation de graines de toutes espèces et de tous continents. Ce service pourra ainsi se charger de l'approvisionnement de ces semences en essayant de s'approcher au mieux des origines souhaitées.

Pour déterminer les caractéristiques du dispositif (nombre de placettes par essences par exemple) je me suis inspirée du « Guide de l'expérimentation forestière » de J. ROSA, P. RIOU-NIVERT et E. PAILLASSA, qui prend spécifiquement en compte le contexte du changement climatique. J'ai adapté les conseils et les informations qu'il fournissait aux spécificités de notre expérimentation, de Verdun et du but visé. Ainsi parmi les critères de

choix du site j'ai imposé un maximum de 2 blocs s'il y avait présence d'une variation sur le site afin de limiter les biais statistiques en ajoutant un facteur « pente » ou « stations » au facteur « essences » étudié. L'objectif de ce dispositif étant de mesurer les performances des espèces en peuplement, les essences seront regroupées en placeaux, dont seuls les quatre arbres centraux seront mesurés. Ils seront entourés de deux rangés d'arbres de la même essence, non mesurés qui constitueront une zone tampon, qui pourra être regarnie en cas de dépérissement dans les cinq premières années.

Une des questions clés a été le compromis entre la taille des placeaux (et le nombre d'arbres mesurés), et le nombre de répétitions par essence permettant une exploitation statistique des mesures.

Le lecteur est vivement invité à consulter le protocole en annexe afin de visualiser plus clairement l'essai. Ce protocole d'expérimentation est un outil dont l'application dépendra de la réflexion amont des gestionnaires de Verdun sur son utilité et ses apports ainsi que sur les moyens financiers et humains qu'ils auront à leur disposition afin de le mettre en place.

## Conclusion

Pour lutter contre les effets négatifs du changement climatique sur les écosystèmes forestiers, avant d'envisager la substitution d'essence, il convient d'adapter la sylviculture : récolte anticipée des peuplements à risques, raccourcissement de l'âge d'exploitabilité, diversification des essences (mélanges), gestion adaptée des lisières (étagées et mélangées), réduction des densités de plantation, travail du sol et contrôle de la végétation herbacée, etc. (*voir la liste des adaptations sylvicoles possibles en annexe 11 page XX*) . Ces aménagements ne suffiront cependant probablement pas à faire face à l'ampleur et à la vitesse de l'évolution du climat. Lorsque cela est nécessaire, les outils climatiques et les données autoécologiques à notre disposition, permettent de créer un outil d'aide à la décision permettant d'orienter le choix du gestionnaire vers telle ou telle essence de substitution. **Toutefois il ne faut en aucun cas considérer cet outil comme une assurance de réussite pour les essences proposées.** En effet, l'adaptation d'une essence dépend de nombreux facteurs, plus ou moins prévisibles ; sylviculture, type de sol, aléas climatiques, mycorhization, compétition interspécifique etc. et les incertitudes liées à ces facteurs ajoutées à celles liées aux prévisions climatiques imposent d'envisager la liste d'essence fournie comme un guide à la réflexion plutôt que comme une garantie de succès.

La difficulté majeure de ce travail est apparue lors de la rédaction du protocole pour le test de comparaison d'essences, avec les problèmes d'approvisionnement en plants de qualité pour les essences atypiques de la liste finale, qui constituent un obstacle réel à la mise en œuvre par les gestionnaires de nos propositions. En définitif je trouve que malgré le temps passé sur cette étude, on ne possède, à sa fin, que très peu de certitude quant à la faisabilité et à la concrétisation du projet.

L'importance des enjeux écologiques et économiques associés à la forêt impose de poursuivre les recherches concernant la lutte contre les dépérissements forestiers liés au changement climatique. Nous pouvons cependant nous demander si les enjeux patrimoniaux et donc le maintien des résineux ne serait pas, ici, un enjeu secondaire à mettre de côté si les effets du changement climatique viennent à se faire ressentir de manière plus marquée dans les années à venir dans le nord-est de la France.

Sur le plan personnel, ce stage, riche en rencontres et découvertes, m'a permis de toucher du doigt une problématique complexe mais passionnante : le réchauffement climatique et ses impacts, tout en travaillant avec une équipe dynamique et sympathique. J'ai également trouvé intéressant de découvrir le monde de la recherche et la mise en œuvre des résultats obtenus pour répondre aux interrogations techniques des forestiers travaillant sur le terrain.

Enfin, il n'a fait que confirmer mon envie de travailler dans le domaine de la forêt et de la sylviculture. Mes collègues m'ont aidée à concrétiser ce souhait en m'entraînant pour l'oral du concours de technicien opérationnel de l'ONF, ce dont je les remercie encore une fois.



## **Bibliographie**

### *Sites :*

- Centre National de Recherches Météorologiques-[en ligne]-[consulté le 20/03/2013] disponible sur : <[www.cnrm.meteo.fr/scampei](http://www.cnrm.meteo.fr/scampei)>.
- Code des Bonnes Pratiques de Sylvicoles en Lorraine-[en ligne]-[consulté le 20/02/2013] disponible sur : <[http://www.crfp.fr/new/telechargement%20dossiers/cbps\\_loorraine.pdf](http://www.crfp.fr/new/telechargement%20dossiers/cbps_loorraine.pdf)>.
- CCBIO Base de connaissances de l'impact du Changement Climatique sur la Biodiversité en France -[en ligne]-[consulté le 28/05/2013] disponible sur : <<http://ccbio.gip-ecofor.org/>>.
- Communication du Centre National de la Recherche Scientifique-[en ligne]-[consulté le 21/03/2013] disponible sur : <<http://www2.cnrs.fr/journal/1392.htm>>.
- EUropean FORest GENetic resources programme-[en ligne]-[consulté le 05/08/2013] disponible sur : <[http://www.euforgen.org/distribution\\_maps.html](http://www.euforgen.org/distribution_maps.html)>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations-[en ligne]-[consulté le 24/01/2013] disponible sur : <<http://www.fao.org/forestry/unasylva/fr>>
- La forêt de Verdun-[en ligne]-[consulté le 24/01/2013] disponible sur : <<http://www.foret.org/la-foret-de-verdun.html>>
- Formation en Biologie Végétale-[en ligne]-[consulté le 08/04/2013] disponible sur : <[http://www.afd-ld.org/~fdp\\_bio/content.php?page=espece&skin=modvi&espece=130](http://www.afd-ld.org/~fdp_bio/content.php?page=espece&skin=modvi&espece=130)>.
- GICC programme de Gestion et Impacts du Changement climatique -[en ligne]-[consulté le 28/05/2013] disponible sur : <<http://www.gip-ecofor.org/gicc/>>.
- GIP-ECOFOR Groupement d'Intérêt Public ECOsystèmes FORestiers -[en ligne]-[consulté le 28/05/2013] disponible sur : <<http://www.gip-ecofor.org/>>.
- « Le reboisement au Québec, guide-terrain pour le choix des essences résineuses », par Madeleine CAUBOUÉ-[en ligne]-[consulté le 20/02/2013] disponible sur : <<http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/guide-terrain-reboisement.pdf>>.
- Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt-[en ligne]-[consulté le 22/02/2013] disponible sur : <<http://agriculture.gouv.fr/sante-des-forets>>
- ONERC Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique -[en ligne]-[consulté le 28/05/2013] disponible sur : <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Impacts-et-adaptation-ONERC-.html>>.
- Office National des Forêts-[en ligne]-[consulté le 27/02/2013] disponible sur : <[http://www.onf.fr/gestion\\_durable/sommaire/action\\_onf/gerer/instrument/20080506-081455-107900/@@index.html](http://www.onf.fr/gestion_durable/sommaire/action_onf/gerer/instrument/20080506-081455-107900/@@index.html)>.
- Portail Education de MétéoFrance-[en ligne]-[consulté le 21/03/2013] disponible sur : <[http://education.meteofrance.com/jsp/site/Portal.jsp?educelm=evolution\\_3\\_0&page\\_id=12598](http://education.meteofrance.com/jsp/site/Portal.jsp?educelm=evolution_3_0&page_id=12598)>.

- Projet de recherche CLIMATOR-[en ligne]-[consulté le 20/03/2013] disponible sur : <[http://www7.avignon.inra.fr/cours\\_en\\_ligne\\_climator](http://www7.avignon.inra.fr/cours_en_ligne_climator)>.
- Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Golfe du Morbihan-[en ligne]-[consulté le 20/02/2013] disponible sur : <<http://www.golfe-morbihan.fr/public/upload/files/diaporamas/28-ppt-TR2-Le-Bouler.pdf>>.
- TRAITAUT Projet d'incubation sur les TRAITs fonctionnels et l'AUTécologie des essences forestières -[en ligne]-[consulté le 28/05/2013] disponible sur : <<http://traitaut.gip-ecofor.org/>>.
- USDA United States Department of Agriculture (National Resources Conservation Service CNRS)-[en ligne]-[consulté le 28/05/2013] disponible sur : <<http://plants.usda.gov/java/>>.

*Livres :*

- Jean-Paul AMAT 1988, « La forêt et la guerre, un exemple des sylvofaciès sur les champs de bataille de la Grande Guerre en Argonne » (Bulletin de l'Association de Géographes Français n°3)-[périodique]-[consulté le 13/03/2013] p.191 à 201 (281 pages).
- M.BAUMER 1977, « Le sapin du Maroc » Revue forestière Française-[PDF]-[consulté le 31/05/2013] p.343 à 354.
- M.BARBERO 1975, « Les forêts de sapin sur le pourtour méditerranéen »-[livre]-[consulté le 24/05/2013] p.1261 à 1279.
- M. BECKER, F. le TACON et J. TIMBAL 1980, « Les plateaux calcaires de Lorraine- Types de stations et potentialités forestières » (ENGREF)-[livre]-[consulté le 13/03/2013] p.53 à 159 et 209 à 216.
- B.BOISSEAU 1996, « Ecologie du pin brutia » (Revue forestière française N°4)-[Revue]-[consulté le 24/05/2013] p.321 à 329.
- Nadine BRISSON et Frédéric LEVRAULT 2007-2010, « Livre vert du projet CLIMATOR » (ANR et INRA)-[livre]-[consulté le 20/03/2013] p.225 à 235 (334 pages).
- CRPF de Lorraine Alsace, « Le choix des essences forestières sur les plateaux calcaire de Lorraine- Guide pour l'identification des stations» 1991-[livre]-[consulté le 13/03/2013] p.13 à 23.
- CRPF de Lorraine Alsace 2006, « Schéma Régional de Gestion Sylvicole de Lorraine »-[PDF]-[consulté le 04/03/2013] p.108 à 113 (210 pages).
- DEBAZAC 1991, « Manuel des conifères » ENGREF-[livre]-[30/05/2013] (160 pages).
- P.M. DESCLOS 2002, « Les pins dans le monde » (La forêt privée n°266)-[périodique]-[consulté le 13/03/2013] p.42 à 46.

- FADY B. Revue des eaux et forêts de 1993 N°2, « Caractéristiques écologiques et sylvicoles des sapins de Grèce »-[PDF]-[consulté le 23/05/2013].
- Xavier GAUQUELIN 2010, « Guide de gestion des forêts en crise sanitaire » (ONF)-[livre]-[consulté le 24/11/2012].
- HUMPHREY J.WELCH 1965, “Conifer Manual” -[livre]-[consulté le 30/05/2013] (425 pages).
- INRA et ONF 2007, « Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques » (Rendez-vous techniques Hors série n°3)-[PDF]-[consulté le 19/03/2013] p.3 à 21 et 95 à 108 (108 pages).
- M.JACAMON 2002, « Guide de dendrologie 4 » ENGREF-[livre]-[consulté le 27/03/2013].
- E. & J.JULLIEN 2010, « Guide écologique des arbres »-[livre]-[consulté le 20/03/2013] (558 pages).
- F.Lebtahi 2000, « Le sapin de Numidie » La forêt algérienne N°3-[Revue]-[consulté le 27/05/2013].
- Olivier MARCET 2006, « Révision d’aménagement forestier de la forêt domaniale de Verdun de 2006 à 2020 » (ONF)-[PDF]-[consulté le 11/03/2013] (108 pages).
- M.S.MARIN 1985, « Morfologia y propiedades quimicas de suelos forestales de Turquia » Anales de Edafologia y Agrobiologia-[livre]-[consulté le 31/05/2013] p.384 et p.393.
- Gérard MASSON 2005, « Autoécologie des essences forestières- Livre 2 : Essences »-[livre]-[consulté le 11/03/2013].
- Hannes MAYER 1965, « Marokkanische und numidische Tanne im nordafrikanischen Atlas » Forst-Wissenschaftliches Centralblatt-[livre]-[consulté le 31/05/2013] p.314 et p.318.
- G.MONTERO 2005, « Red de Parcelas de Introduccion de Especies » IFIE INIA-[livre]-[consulté le 24/05/2013] (370 pages).
- L.M.NAGELEISEN 2010, « La santé des forêts »-[livre]-[consulté le 29/12/2013] p.377 à 383.
- ONF 2006, « Directive Régionale d’Aménagement de Lorraine »-[PDF]-[consulté le 19/03/2013] p.99 et p.137 à 168 (201 pages).
- Y. PEINGS, M. JAMOUS, S. PLANTON, H. Le TREUT sous la direction de J. JOUZEL 2011, « Le climat de la France au XXI<sup>ème</sup> siècle-Scénarios régionalisés » -[PDF]-[consulté le 19/03/2013] (27 pages).
- P.PESSON 1969, « Les scolytes, insectes ravageurs mondiaux des forêts de conifères »-[livre]-[consulté le 03/06/2013] p.693 à 702 (726 pages).
- Philippe RIOU-NIVERT 1996, « Les résineux- Tome 1 : Connaissance et reconnaissance » (IDF)-[livre]-[consulté le 11/03/2013] p.152 à 247 (256 pages).

-Philippe RIOU-NIVERT 2005, « Les résineux- Tome 2 : Ecologie et pathologie » (IDF)-  
[livre]-[consulté le 12/03/2013] p.49 à 90 et 102 à 107 (447 pages).

-J.ROSA 2011, « Guide de l'expérimentation forestière » (CNPFF-IDF)-[livre]-[consulté le  
12/07/2013] (219 pages).

## **Tables des illustrations**

|   |      |
|---|------|
| Image 1 : carte des régions naturelles IFN de Lorraine  | p.5  |
| Image 2 : localisation de Verdun  | p.6  |
| Image 3 : Réserve utile moyenne pour les principaux types de stations à Verdun  | p.7  |
| Image 4 : Répartition des mesures de R.U selon les stations   | p.8  |
| Image 5 : Evaluation de la probabilité de compatibilité climatique locale d'une essence par le modèle                                   | p.19 |
| Image 6 : Détermination des valeurs seuil de la niche climatique d'une essence, représentation dans le plan thermicité - bilan hydrique | p.21 |
| Image 7 : Représentation des lectures des différents scénarios considérés   | p.22 |
| Image 8 : Graphique représentant l'évaluation de la probabilité de présence d'1 essence   | p.24 |
| Image 9 : Evaluation de la probabilité de compatibilité climatique d'une essence  | p.24 |
| Image 10 : Le changement d'usage des sols ; un cercle vicieux dur à intégrer dans la modélisation                                       | p.30 |
| Tableau 1 : Liste d'essences de reboisement sur les plateaux calcaires de Lorraine  | p.9  |
| Tableau 2 : Nomenclature des futurs climatiques   | p.23 |
| Tableau 3 : Comparaisons des simulations climatiques avec le climat actuel de Verdun  | p.23 |
| Tableau 4 : Liste des climats possibles à Verdun pour les horizons temporels 2030 ainsi que 2080  | p.25 |
| Tableau 5 : Exemple d'une liste d'essences évaluées par le modèle IKS   | p.25 |
| Tableau 6 : Exemple de l'évaluation de 3 essences en fonction du cahier des charges   | p.27 |
| Tableau 7 : Liste de la première sélection de 13 essences   | p.27 |
| Tableau 8 : Liste finale des essences de remplacement sélectionnées   | p.28 |
| Tableau 9 : Provenances recherchées pour les essences sélectionnées   | p.33 |

## **Table des annexes**

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Annexe 1 : Calendrier prévisionnel de travail</b>   | <b>p. G</b>  |
| <b>Annexe 2 : Verdun-le climat par saison en 2011</b>  | <b>p. H</b>  |
| <b>Annexe 3 : Carte EUFORGEN de l'aire de répartition de <i>Picea abies</i> et <i>Pinus nigra</i></b>                        | <b>p.I</b>   |
| <b>Annexe 4 : Réglementations en forêt de Verdun</b>   | <b>p. J</b>  |
| <b>Annexe 5 : Explications complémentaires sur les modèles utilisés dans IKS</b>   | <b>p. M</b>  |
| <b>Annexe 6 : Description et analyse des scénarios climatiques obtenus avec IKS</b>  | <b>p. N</b>  |
| <b>Annexe 7 : Liste complète des essences potentiellement adaptées climatiquement (154 résineux)</b>                         | <b>p. AA</b> |
| <b>Annexe 8 : Liste des essences recalées suite à leur confrontation au cahier des charges et raison de leur élimination</b> | <b>p. CC</b> |
| <b>Annexe 9 : Fiches descriptives des essences de la liste finale</b>  | <b>p. GG</b> |
| <b>Annexe 10 : Proposition de protocole d'installation de boisements test</b>  | <b>p. OO</b> |
| <b>Annexe 11 : Les adaptations sylvicoles à mettre en place pour faire face au changement climatique</b>                     | <b>p. YY</b> |



**Annexe 2 : Verdun-les normales climatiques (1971 à 2000)**

| <b>Station de Metz</b>     | <b>Hiver</b> | <b>Printemps</b> | <b>Été</b> | <b>Automne</b> |
|----------------------------|--------------|------------------|------------|----------------|
| <b>Soleil</b>              |              |                  |            |                |
| Heures d'ensoleillement    | 253 h        | 576 h            | 1204 h     | 172 h          |
| Equivalent jours de soleil | 11 j         | 24 j             | 50 j       | 7 j            |
| <b>Pluie</b>               |              |                  |            |                |
| Hauteur de pluie           | 174 mm       | 178 mm           | 185 mm     | 215 mm         |
| <b>Vent</b>                |              |                  |            |                |
| Vitesse de vent maximale   | 40 m/s       | 30 m/s           | 29 m/s     | 37 m/s         |

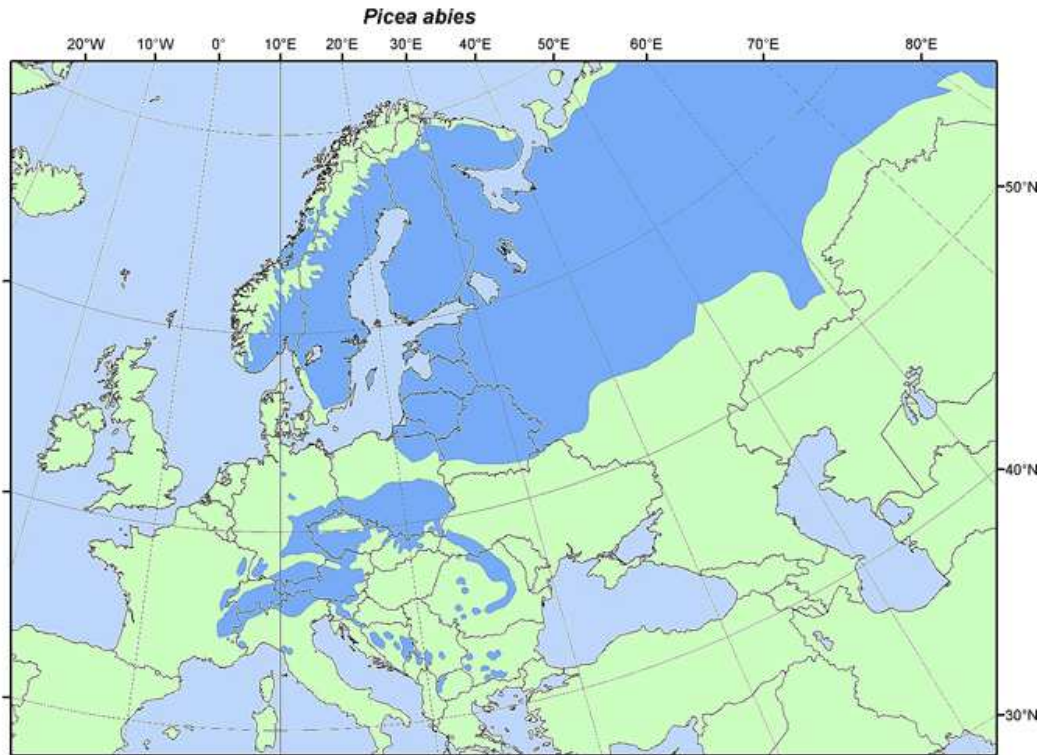
*Source : « Statistiques climatiques de la France 1971-2000 » Direction de la climatologie de Météo France*



### Annexe 3 : Carte EUFORGEN de l'aire de répartition de *Picea abies* et *Pinus nigra*



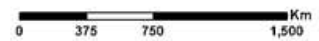
EUFORGEN Secretariat  
 c/o Biodiversity International  
 Via dei Tre Cerri, 472/a  
 00057 Macerata (Fiumicino)  
 Rome, Italy  
 Tel: (+39)085118251  
 Fax: (+39)0851079881  
 euf\_secretariat@cpiar.org  
 More information  
 and other maps at  
[www.euforgen.org](http://www.euforgen.org)



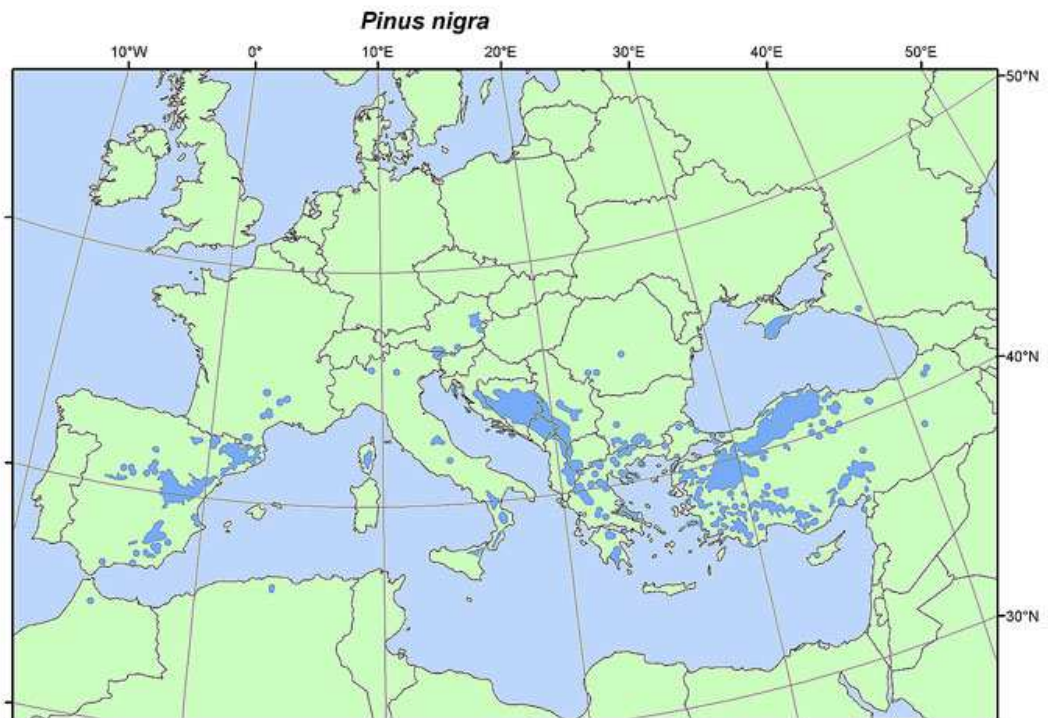
This distribution map, showing the natural distribution area of *Picea abies* was compiled by members of the EUFORGEN Networks based on an earlier map published by H. Schmidt-Vogt in 1977 (Die Fichte, Verlag Paul Parey, Hamburg and Berlin, p.647).

Citation: Distribution map of Norway spruce (*Picea abies*) EUFORGEN 2009, [www.euforgen.org](http://www.euforgen.org).

First published online in 2003 - Updated on 24 July 2008



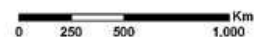
EUFORGEN Secretariat  
 c/o Biodiversity International  
 Via dei Tre Cerri, 472/a  
 00057 Macerata (Fiumicino)  
 Rome, Italy  
 Tel: (+39)085118251  
 Fax: (+39)0851079881  
 euf\_secretariat@cpiar.org  
 More information  
 and other maps at  
[www.euforgen.org](http://www.euforgen.org)



This distribution map, showing the natural distribution area of *Pinus nigra* was compiled by members of the EUFORGEN Networks

Citation: Distribution map of Black pine (*Pinus nigra*) EUFORGEN 2009, [www.euforgen.org](http://www.euforgen.org).

First published online on 26 March 2005 - Updated on 5 December 2011



## **Annexe 4 : Réglementations en forêt de Verdun**

La préservation de la biodiversité et du patrimoine historique dans la forêt domaniale de Verdun est au cœur des préoccupations et fait l'objet de protections adaptées.

### **La forêt domaniale de Verdun est concernée par deux zones Natura 2000 :**

- la Zone spéciale de conservation (ZSC) "Corridor de la Meuse", qui concerne la totalité de la forêt. Elle est principalement liée à la présence de plusieurs espèces de chauves-souris, du Sonneur à ventre jaune et du Triton crêté.
- la Zone de protection spéciale (ZPS) "Forêts et zone humide du pays de Spincourt" qui comprend tout le canton dit "des Jumelles d'Ornes". Ce secteur boisé d'avant-guerre est également en cours de classement en Réserve biologique intégrale (RBI).

### **La forêt comprend aussi deux Zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) :**

- une ZNIEFF de type 1 (milieux ou espèces particulières), "Pelouses de la Zone Rouge".
- une ZNIEFF de type 2 (milieux d'intérêt général) sur le sud de la forêt à partir du fort de Douaumont.

La nouvelle loi d'orientation forestière de 2002 prévoit pour les sites classés et les Monuments Historiques une approbation possible des plans d'aménagement par les administrations compétentes, ce qui remplacerait toutes les demandes d'autorisation ultérieures pour les travaux prévus dans le plan. Dans ce cadre, un zonage pour la protection du patrimoine historique a été défini lors d'une large concertation entre l'ONF, le Conseil Général de la Meuse, la Direction Régionale de l'Environnement, le Service Régional d'Archéologie de la DRAC (Direction Régionale des Affaires Culturelles), le Comité de l'Ossuaire, l'Association Nationale pour le Souvenir de la Bataille de Verdun et la sauvegarde de ses hauts lieux (ANSBV) etc. Il s'appuie sur les réglementations relatives aux sites classés et aux Monuments historiques. On distingue 4 zones :

- **un périmètre de 500 m autour des Monuments historiques**
- **le site classé "Partie centrale du champ de bataille de Verdun"**
- **les villages détruits**
- **le réseau de tranchées.**

Pour chaque zone, la gestion forestière est définie pour préserver au mieux les vestiges de la Première Guerre mondiale. Parmi les mesures adoptées on compte :

#### **- La limitation du nivellement des sols.**

En effet, aucun nivellement du sol ne peut plus être effectué au sein des zones délimitées, à partir de la date de la première matérialisation du périmètre et autour de ces sites une zone de 5 à 20 m est maintenue non nivelée. Mais même hors de ces quatre zones, avant d'entamer des opérations de nivellement dans les zones en régénération et dans les peuplements résineux, l'ONF doit prévenir la Direction régionale des affaires culturelles (Drac) pour qu'elle puisse réaliser un inventaire archéologique et une cartographie des vestiges. Ensuite, la disposition des axes à niveler doit être adaptée à l'inventaire et, en présence de vestiges, l'ONF s'est

engagé à ne pas niveler plus de 20% de la surface pour les peuplements résineux et 16% pour les peuplements feuillus. Cependant, et afin de ne pas handicaper trop lourdement la desserte des parcelles, le nivellement d'un passage sur les tranchées, tous les 40m pour les résineux et tous les 50m pour les feuillus, est envisageable, si nécessaire.

-La matérialisation des limites des zones de ruines des villages détruits.

Elles sont dans un premier temps matérialisées à la peinture sur les arbres, ou sur des piquets, situés sur le périmètre. Ensuite, au fur et à mesure des coupes d'arbres effectuées dans les parcelles concernées, une emprise de 4m de large est définie pour les portions de périmètre qui ne correspondent pas à des pistes préexistantes. Cette emprise sert à la circulation des engins d'exploitation et des tracteurs forestiers et peut être nivelée.

- La limitation de la circulation d'engins à moteur.

Sur une zone de 5 à 20 m autour des 4 sites recensés le passage d'engins est interdit, la circulation se fait donc uniquement sur :

-l'emprise et les pistes du périmètre

-les axes nivelés préexistants

-quelques « axes » ouverts dans les zones, sinuant entre les ruines, qui ne sont pas nivelés. Le nombre et la situation de ces « axes » dépend de la surface et de la forme de chaque zone, ainsi que de l'existence éventuelle d'axes déjà nivelés. Une desserte minimum des zones délimitées est en effet nécessaire à leur gestion forestière. La définition de cette desserte est déterminée avant exploitation par l'ONF en concertation avec la commission municipale. Les engins d'exploitations peuvent abattre et tirer eux-mêmes les arbres à proximité des axes de circulation, dans la limite de la portée de leur bras mécanique. Entre les axes de circulation, et en présence de ruines, l'abattage des arbres doit donc être manuel. Cependant, le bras articulé des machines étant capable de soulever et diriger les grumes, elles réalisent parfois un travail plus soigné qu'un bûcheron ; leur utilisation doit donc être réfléchiée dans chaque cas. De plus l'utilisation du débardage par traction animale doit être envisagée si nécessaire.

-Le passage de la forêt résineuse à la forêt feuillue est la règle.

Le renouvellement des arbres enlevés doit se faire grâce à de la régénération naturelle ou par plantation. Il faut éviter dans la mesure du possible la formation de bandes dans le paysage et préférer structurer le renouvellement par des bouquets de surface limitée.

Néanmoins, une proportion importante de résineux peut être réintroduite par plantation. En effet, la forêt domaniale de Verdun est encore fortement marqué par le passé comme en témoigne son paysage atypique et la présence encore forte des résineux qui rappellent l'histoire du territoire. Cette caractéristique est amenée à « disparaître » avec l'orientation sylvicole donnée à la forêt (et justifiée d'un point de vue écologique). Cette direction peut conduire l'ancien champ de bataille à ressembler à long terme à une forêt classique des Côtes de Meuse, ce qui serait certainement regrettable étant donné le passé unique des lieux. Par ailleurs, au travers d'une enquête « grand public » réalisée lors de Verdun expo en 2003, la population locale s'est largement exprimée en faveur de la transformation des peuplements résineux en peuplements feuillus, mais a tout aussi largement exprimé la crainte d'une disparition totale des résineux. Le problème est donc de savoir quels sont les lieux les plus appropriés pour maintenir à terme la présence des résineux, les lieux les plus fréquentés apparaissant prioritaires aux yeux de tous. La surface totale concernée ne pourrait être trop importante mais devra être répartie de manière pertinente.

-La préservation du réseau de tranchées.

Elle s'effectue grâce à une gestion conservatoire, élaborée avec les services du patrimoine (Drac) et des historiens, sur l'ensemble de la forêt. Elle porte notamment sur trois tranchées sélectionnées pour leur importance historique (35 km de linéaire total).

-L'accueil des visiteurs.

Afin de concilier préservation du patrimoine naturel ou historique et tourisme, les forestiers organisent aussi l'accueil des visiteurs et réglementent l'accès de certains vestiges pouvant présenter un danger pour les visiteurs.

Enfin, la gestion forestière en ancienne zone de combat présente une dernière contrainte liée à la présence éventuelle de munitions non explosées. Cependant, le risque est limité et permet la plupart des travaux, moyennant quelques précautions : il est interdit de faire du feu et les gyrobroyeurs à axe vertical doivent être utilisés avec précaution.

## **Annexe 5 : Explications complémentaires sur les modèles climatiques fournissant les simulations utilisées dans IKS**

Le climat de la Terre est le résultat d'interactions complexes entre de nombreux processus faisant intervenir l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. Les modèles doivent donc prendre en compte les éléments du système climatique suivants :

- l'atmosphère ;
- l'hydrosphère : océans, lacs, rivières ;
- la cryosphère : banquise, surfaces enneigées, calottes polaires ;
- la biosphère continentale et marine ;
- la partie supérieure de la lithosphère, en particulier la partie concernée par le cycle de l'eau.

À défaut d'une solution mathématique simple, la planète est découpée en volumes ou mailles pour se ramener à un calcul informatisé appliqué à un modèle numérique. Les dimensions des mailles sont typiquement de 10 à 300 kilomètres horizontalement et de quelques mètres à quelques centaines de mètres sur la verticale selon les modèles numériques. Les modèles ALD, LMD, MAR sont capables de fournir des projections à haute résolution spatiale pour la France selon des mailles géographiques de l'ordre de la dizaine de kilomètres.

Pour connaître l'évolution du système, on intègre les équations pas à pas en partant des conditions initiales. La référence correspond à une simulation du climat du milieu du XIXe siècle présentant des conditions proches de l'époque préindustrielle. On observe ensuite l'évolution du modèle sous l'effet de perturbations : les forçages, auxquels on le soumet. Ces forçages peuvent être, soit naturels comme la variabilité solaire ou le volcanisme, soit anthropiques : émission de gaz à effet de serre. Dans notre cas ces forçages sont représentés par les scénarios A1B, A2 et B2.

### **Précisions concernant les modèles océaniques**

Les modèles de climat peuvent être couplés avec un modèle océanique (CNMR ou IPSL), qui intègre les paramètres suivants :

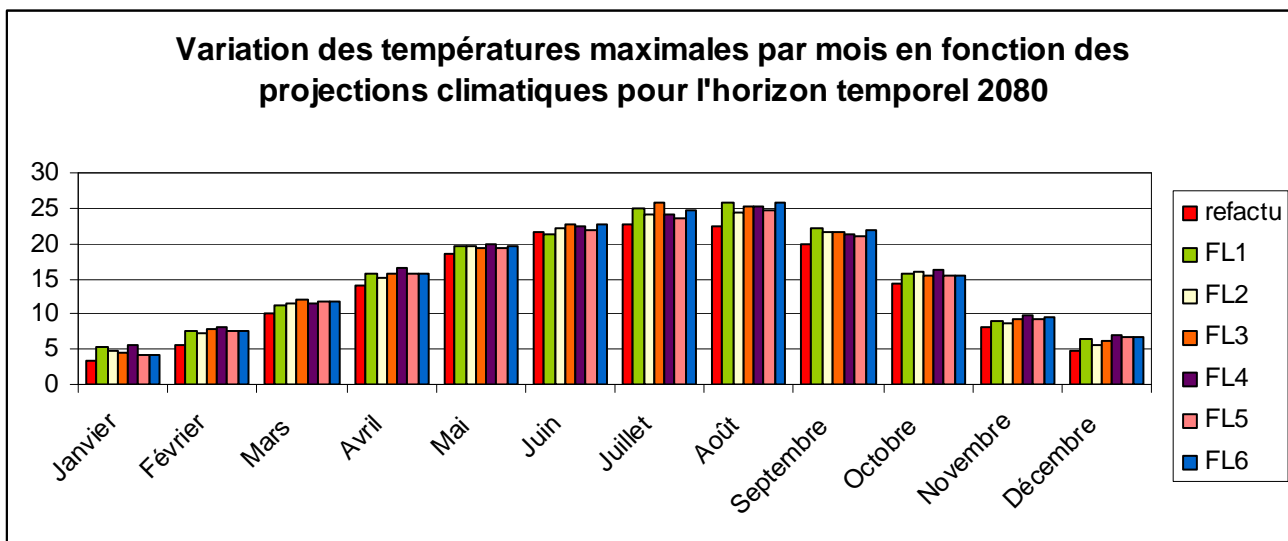
- les courants océaniques (induits entre autre par la gravité terrestre, les courants atmosphériques, la force de Coriolis et l'attraction de la Lune),
- les températures de surface de l'océan (calculées à partir des flux en surface (rayonnement, flux turbulents)),
- la salinité de l'océan.

## Annexe 6 : Description et analyse des différents scénarios climatiques obtenus avec IKS

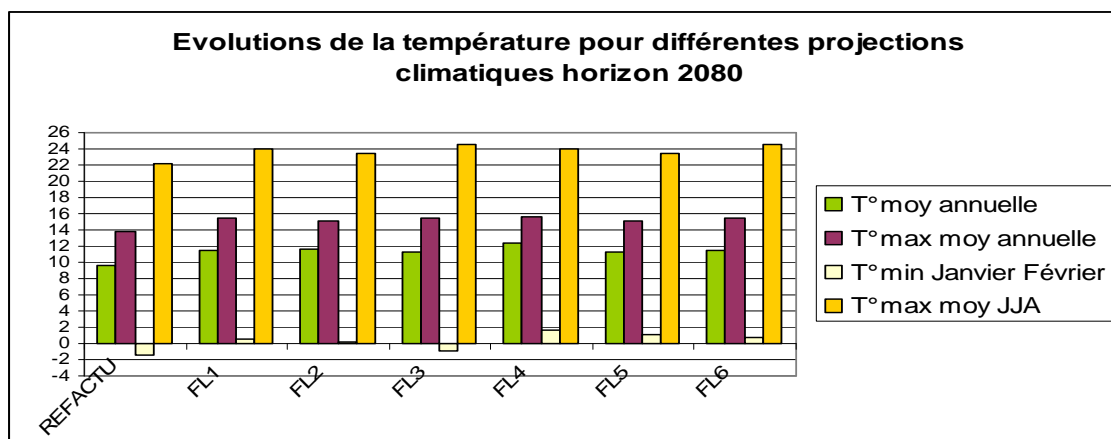
| Projections climatiques | 2080 |
|-------------------------|------|
| ALD-A1B                 | FL1  |
| ALD-A2                  | FL2  |
| ALD-B1                  | FL3  |
| LMD1 (A1B)              | FL4  |
| LMD2 (A1B)              | FL5  |
| MAR (A1B)               | FL6  |

Légende : Pessimiste Optimiste Intermédiaires

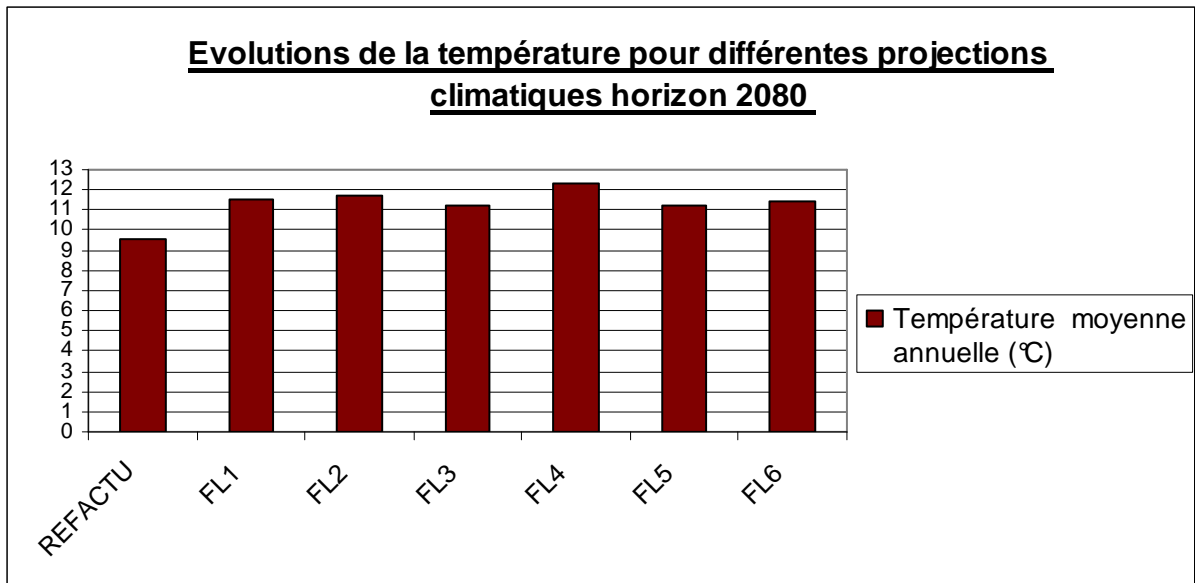
### Pour une altitude de 200 m et une RU de 100 mm :



Les différentes projections climatiques pour 2080 semblent indiquer que tout au long de l'année les températures maximales moyennes devraient être supérieures aux températures maximales moyennes actuelles, la plus forte augmentation étant relevée sur les mois de juillet et d'août. Une exception : la simulation climatique FL1 prévoit des températures maximales moyennes, pour 2080, inférieures à celles actuelles sur le mois de juin.

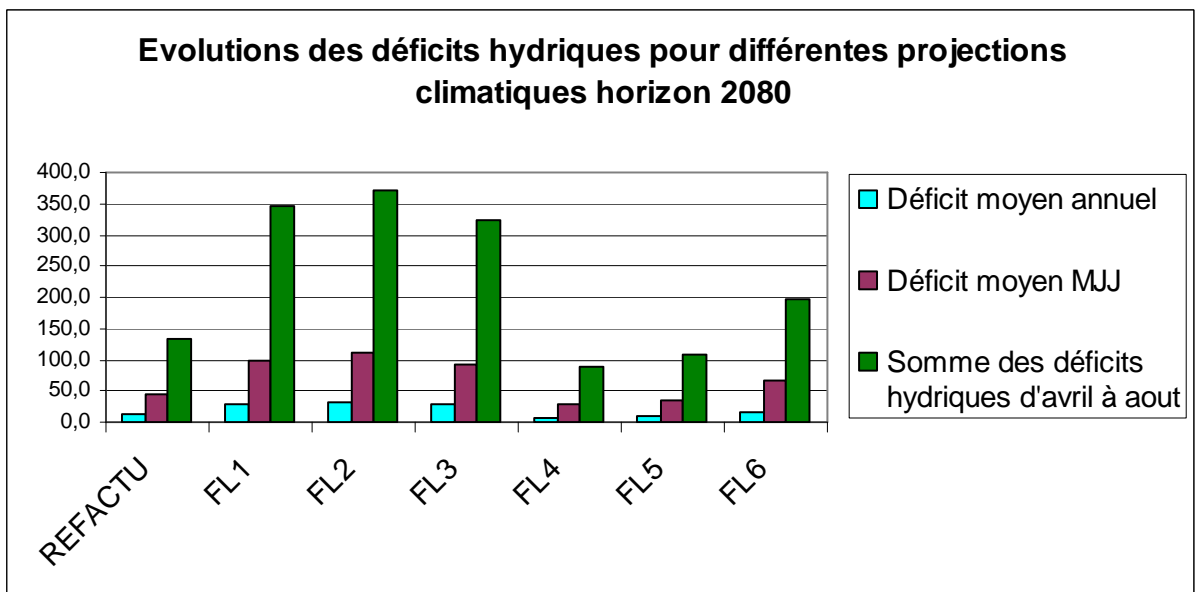


La prévision d'une augmentation globale de la température semble se confirmer au vu du graphique ci-dessus.

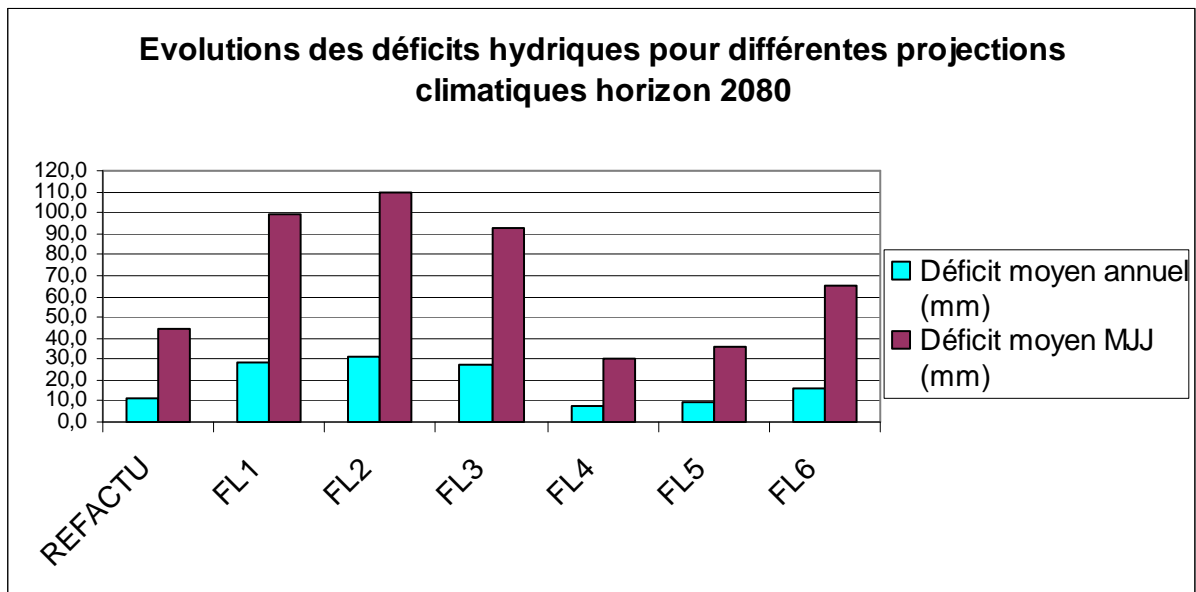


On observe que toutes les simulations climatiques prévoient une augmentation de la température moyenne annuelle d'au moins 1°C.

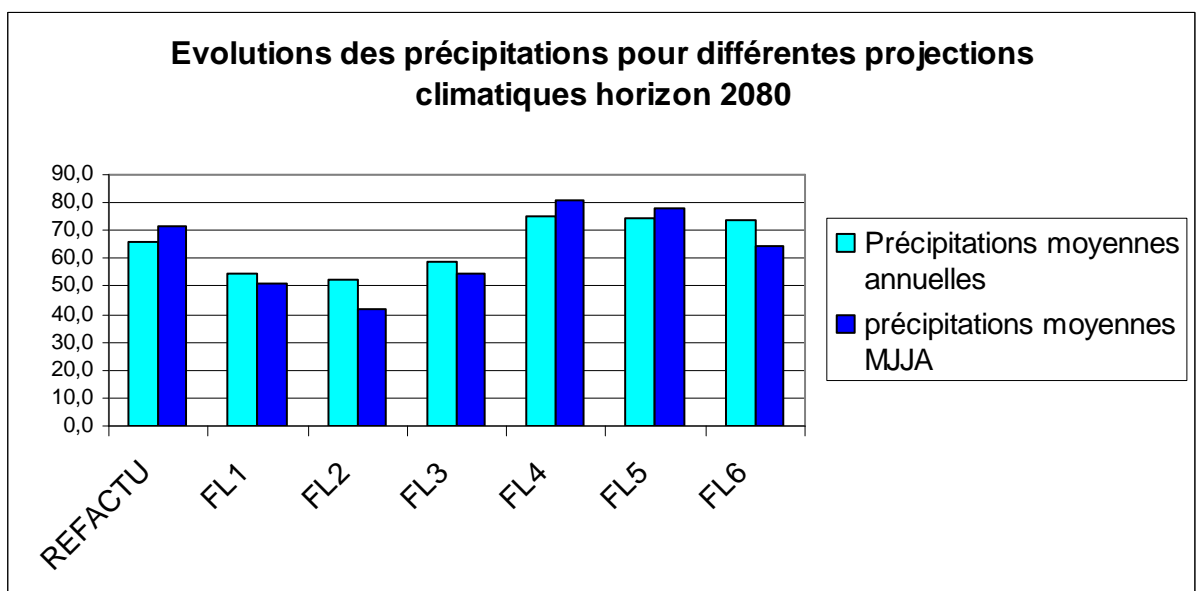
FL4 (LMD1-A1B) prévoit la plus grosse augmentation : presque 3°C.



On observe que les simulations tendent à prévoir une augmentation des déficits hydriques sauf dans le cas de FL4 et FL5. FL2 est la simulation marquant la plus grosse augmentation (scénario pessimiste) !



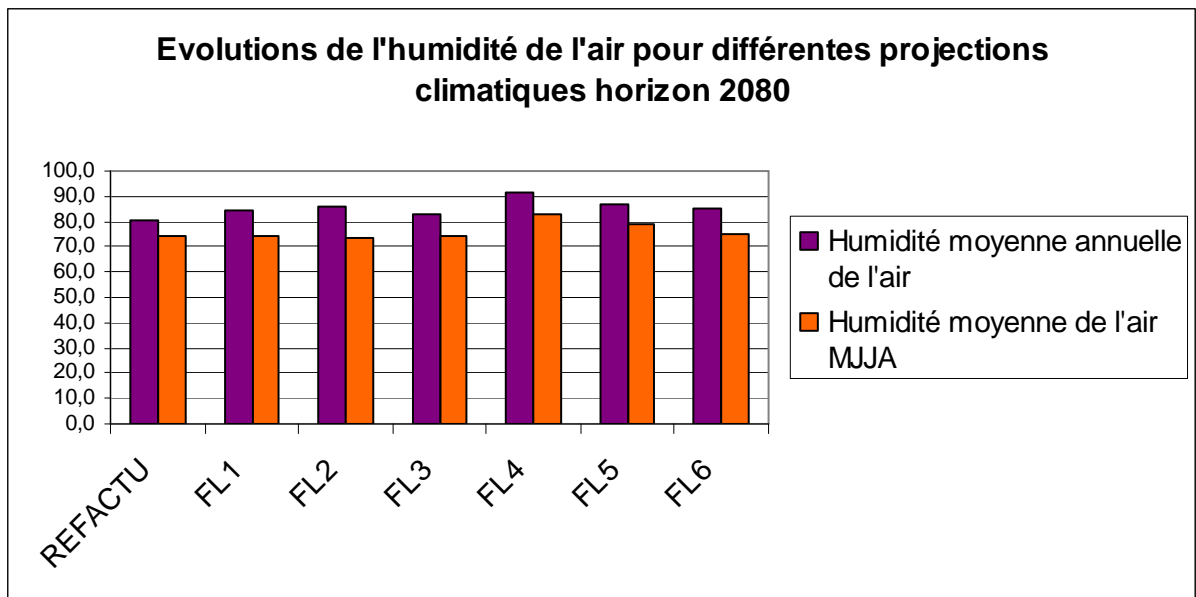
FL4 prévoit la plus forte augmentation de la température moyenne annuelle mais le plus faible déficit hydrique !



Le fait que FL4 prévoit la plus forte augmentation de la température moyenne annuelle mais le plus faible déficit hydrique peut s'expliquer par une prévision d'augmentation importante des précipitations !

Sur 6 simulations, 4 prévoient une baisse des précipitations pendant la période estivale et une hausse pendant la période hivernale : FL1, 2, 3 et 6.

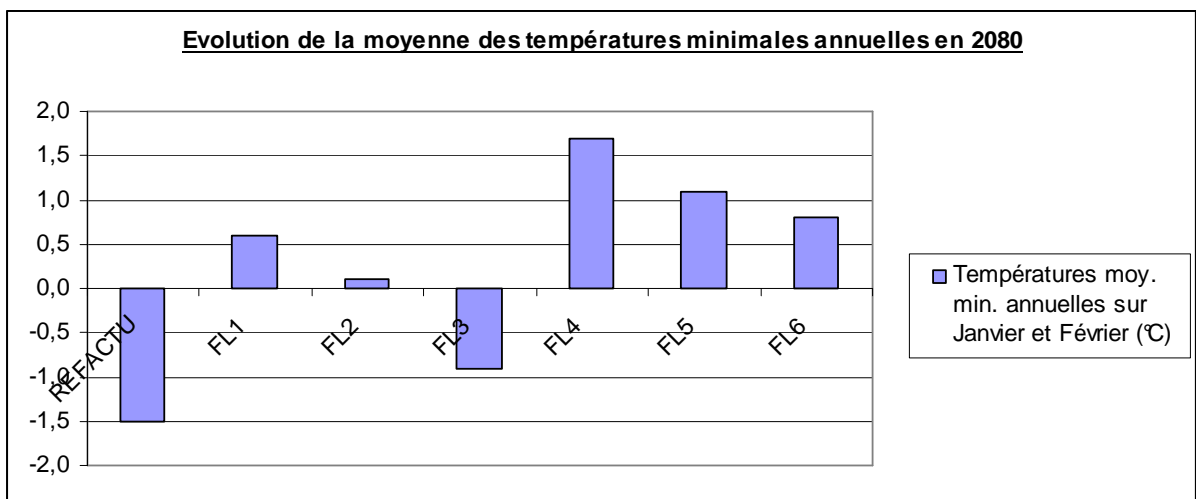




Le scénario FL4 annonce une augmentation de la température et des précipitations donc une hausse de l'humidité de l'air bien visible sur le graphique ci-dessus.

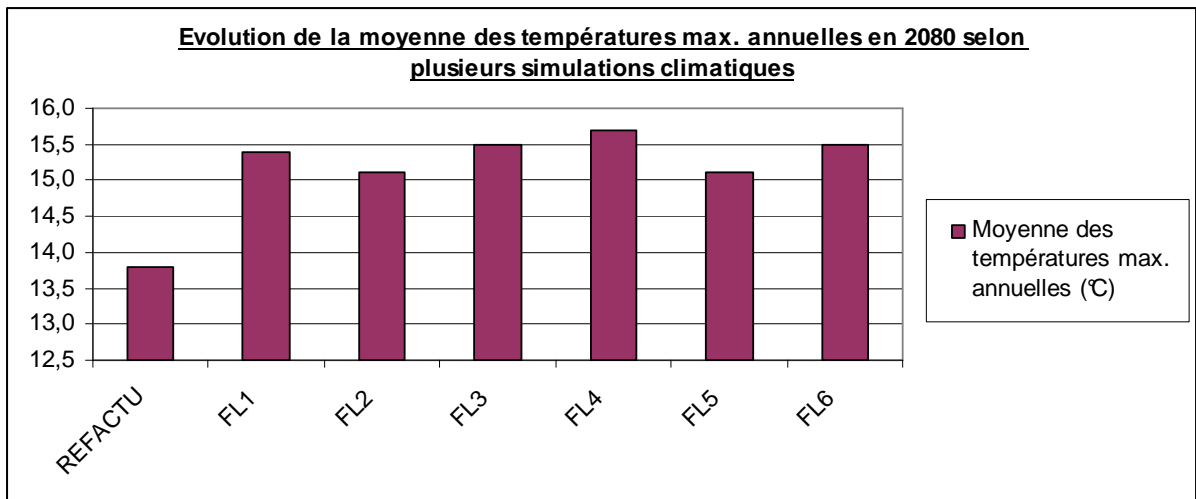
Globalement une légère augmentation de l'humidité de l'air est constatée dans tous les scénarios. Ce qui peut s'expliquer par ceci : les précipitations annuelles ne diminueront au maximum que de 10 mm en même temps qu'une hausse de la température ce qui va induire une hausse de l'évaporation.

**Avec les données utilisées par Hervé Le BOULER dans IKS :**

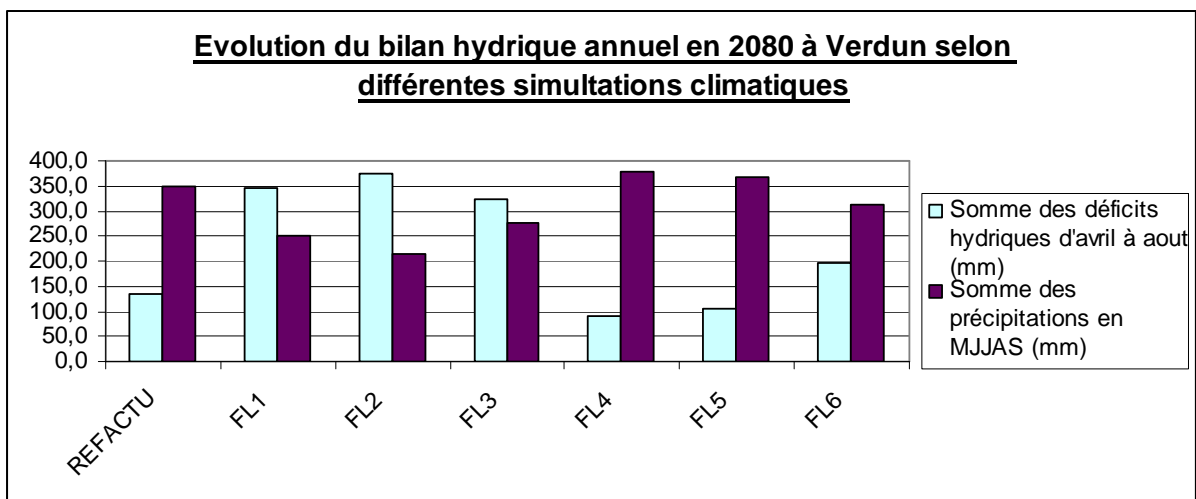


Les simulations climatiques prévoient toutes une augmentation record des températures hivernales (janvier et février) allant jusqu'à 3°C supplémentaires. Seul FL3 garde des températures moyennes minimales négatives sur janvier-février.

Cette hausse des températures hivernales pourra à terme engendrer des problèmes de débournement !

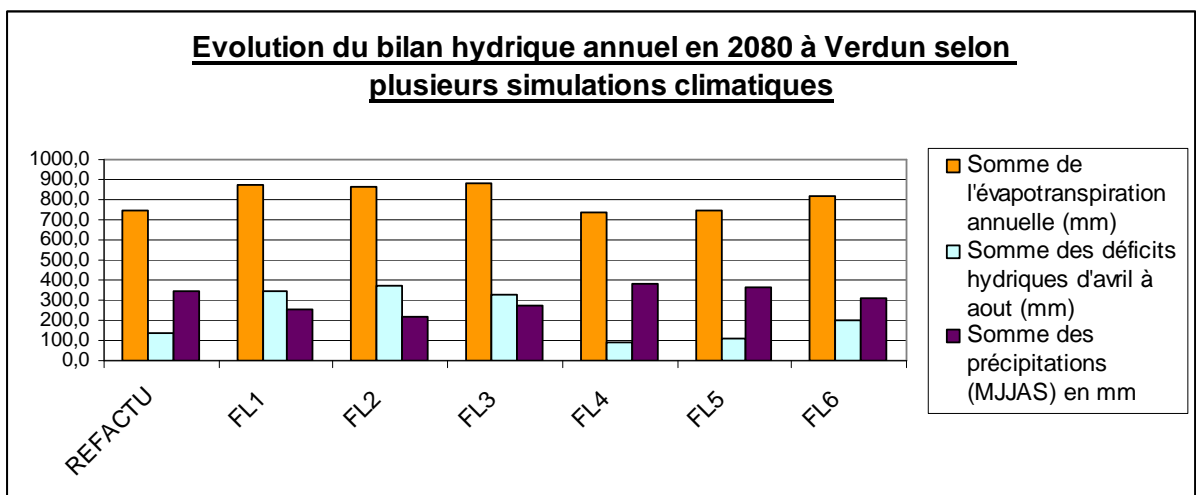


On constate une augmentation des températures moyennes maximales : +2°C maximum !



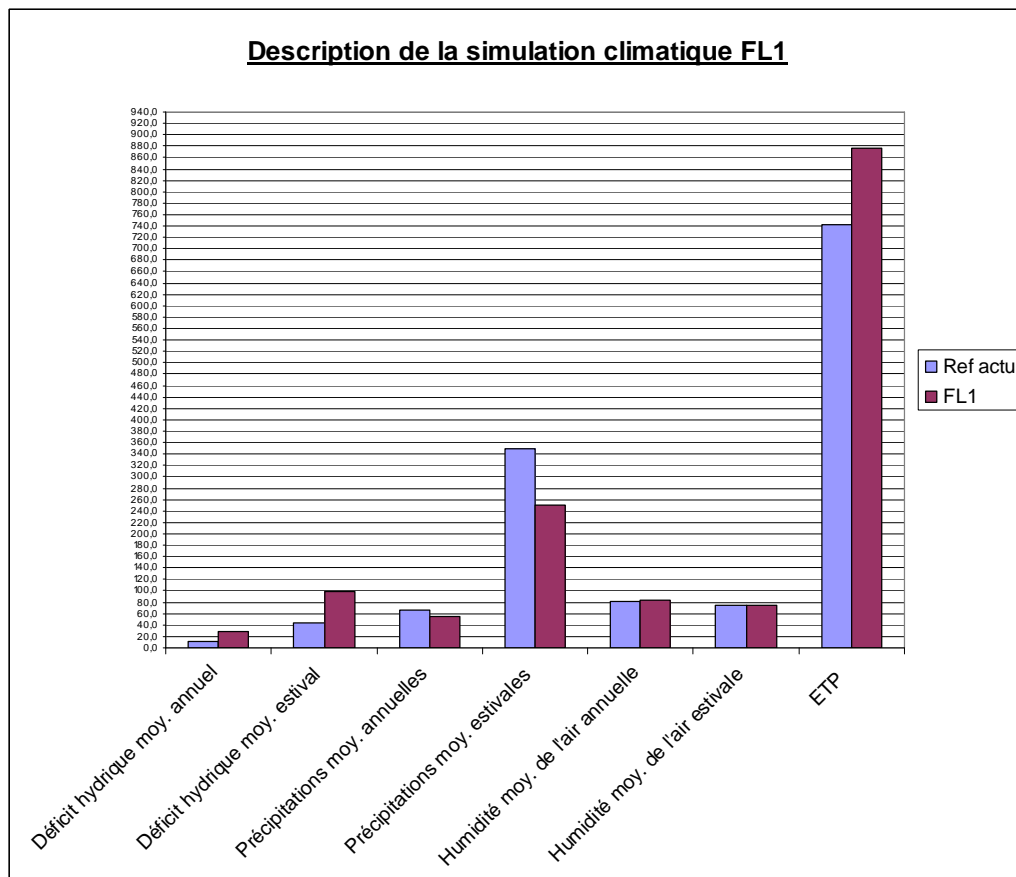
On constate également une augmentation des précipitations estivales pour FL4 et FL5 donc une diminution du déficit hydrique dans cette même période.

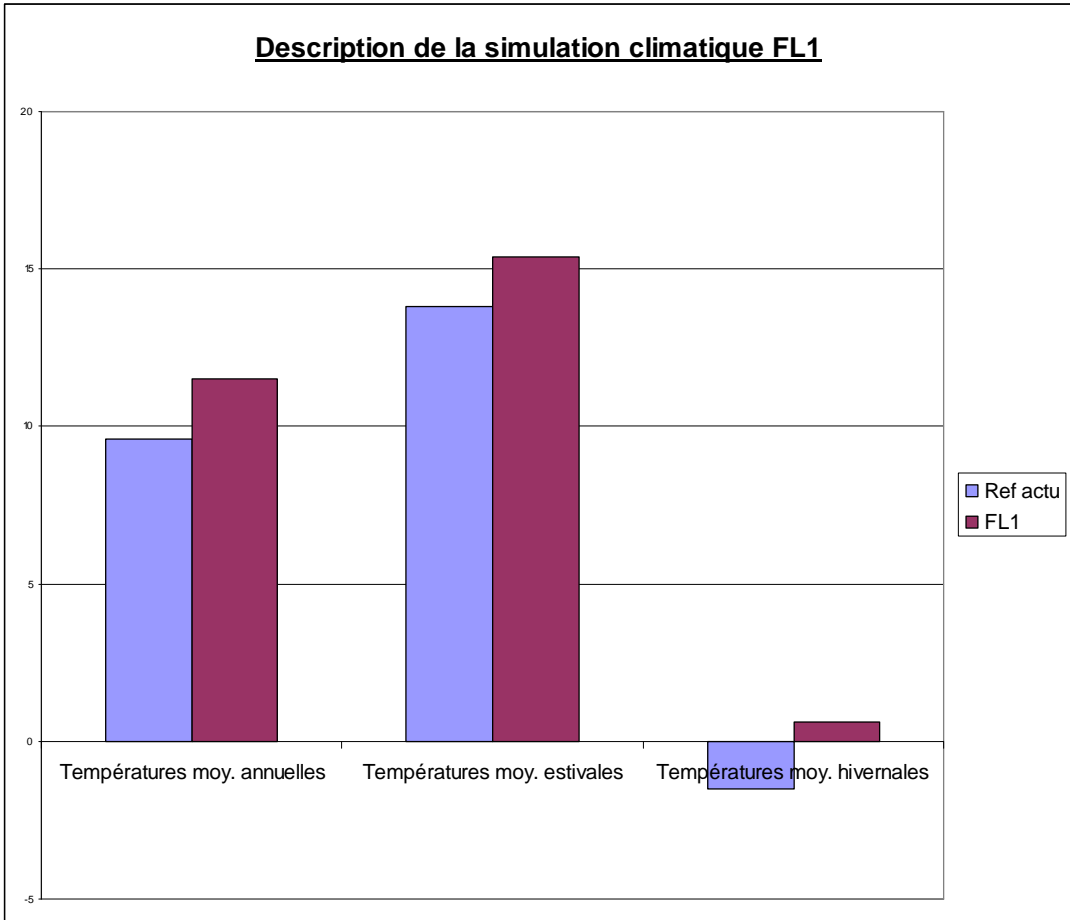
Les températures minimales moyennes (janvier-février) restant négatives, il y aura toujours des épisodes neigeux ce qui peut expliquer que malgré les températures maximales annuelles plus hautes pour FL3, le déficit hydrique estival soit moindre par rapport à FL1 et FL2.



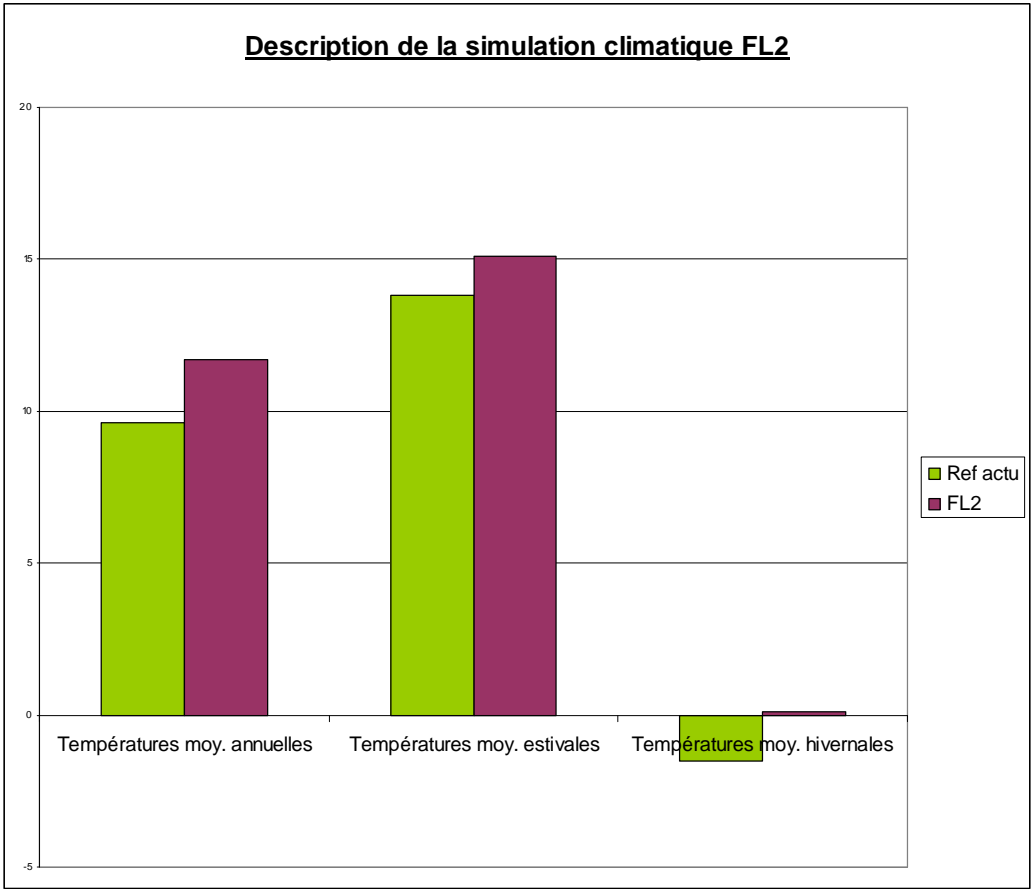
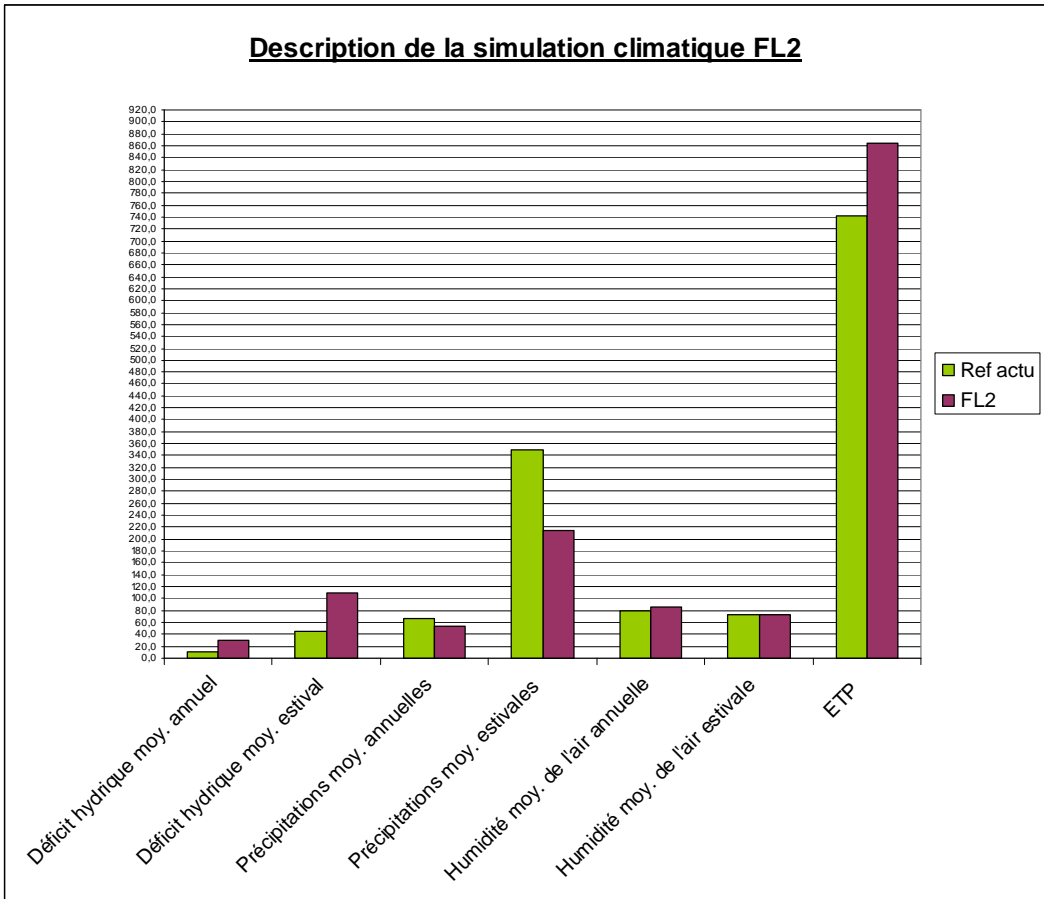
Pour FL1 et FL3 l'humidité moyenne estivale de l'air est la même qu'actuellement malgré une hausse des températures et une baisse des précipitations, cela peut s'expliquer par une hausse de l'évapotranspiration.

## Synthèse :

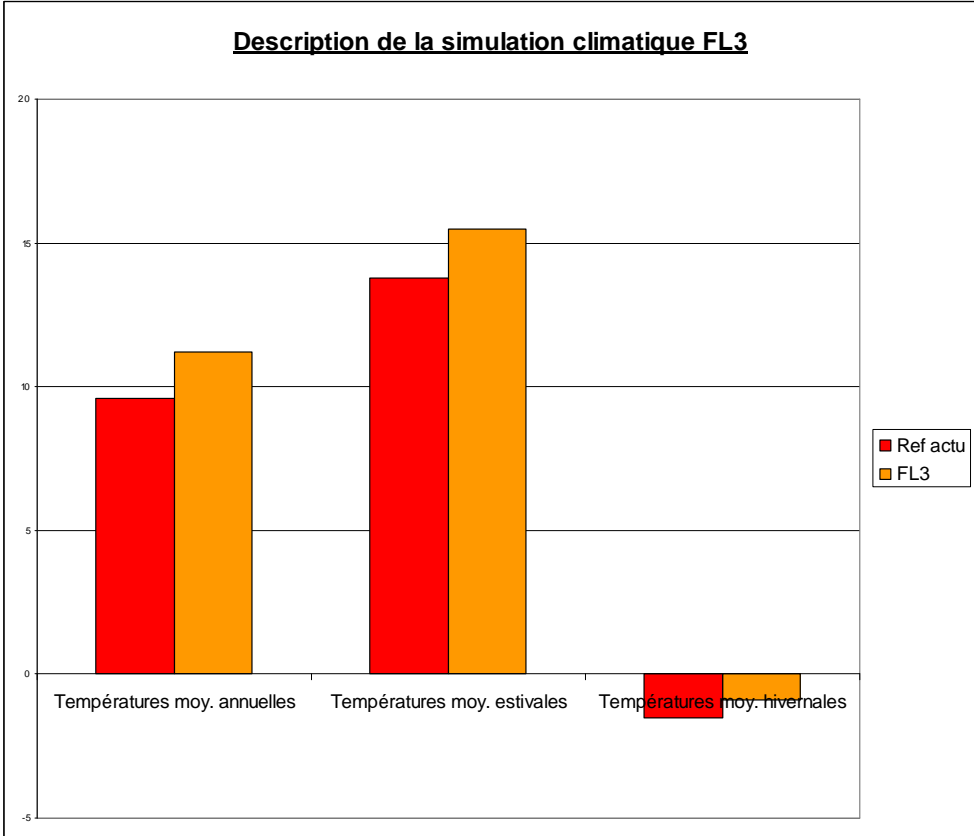
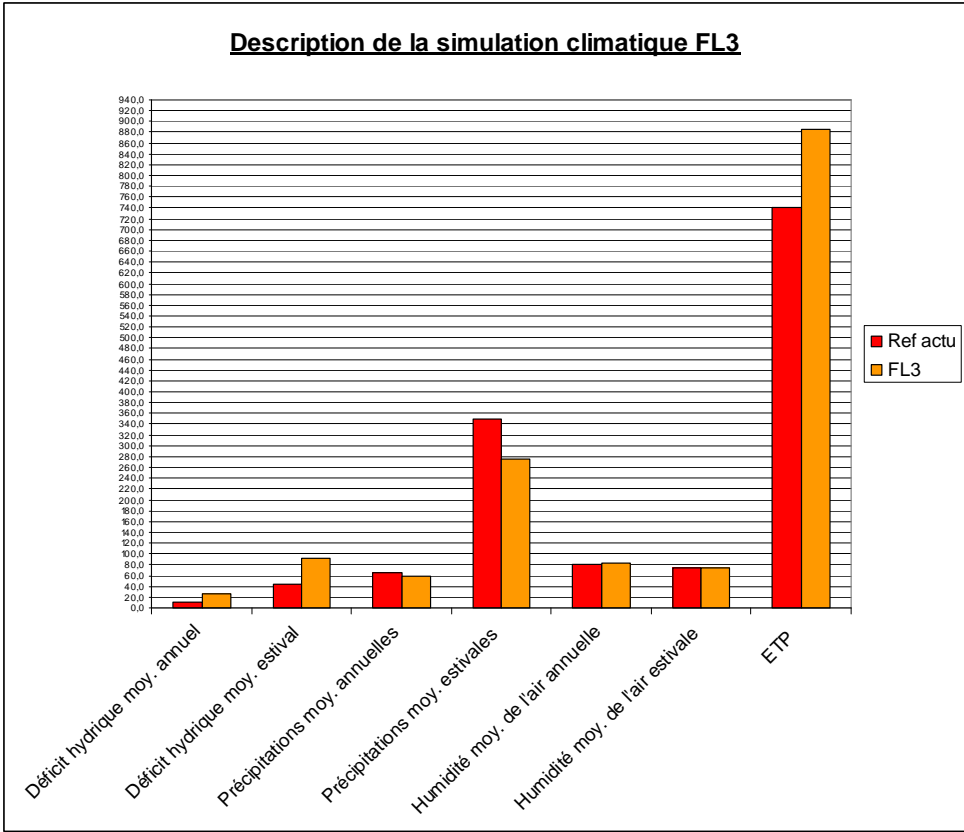




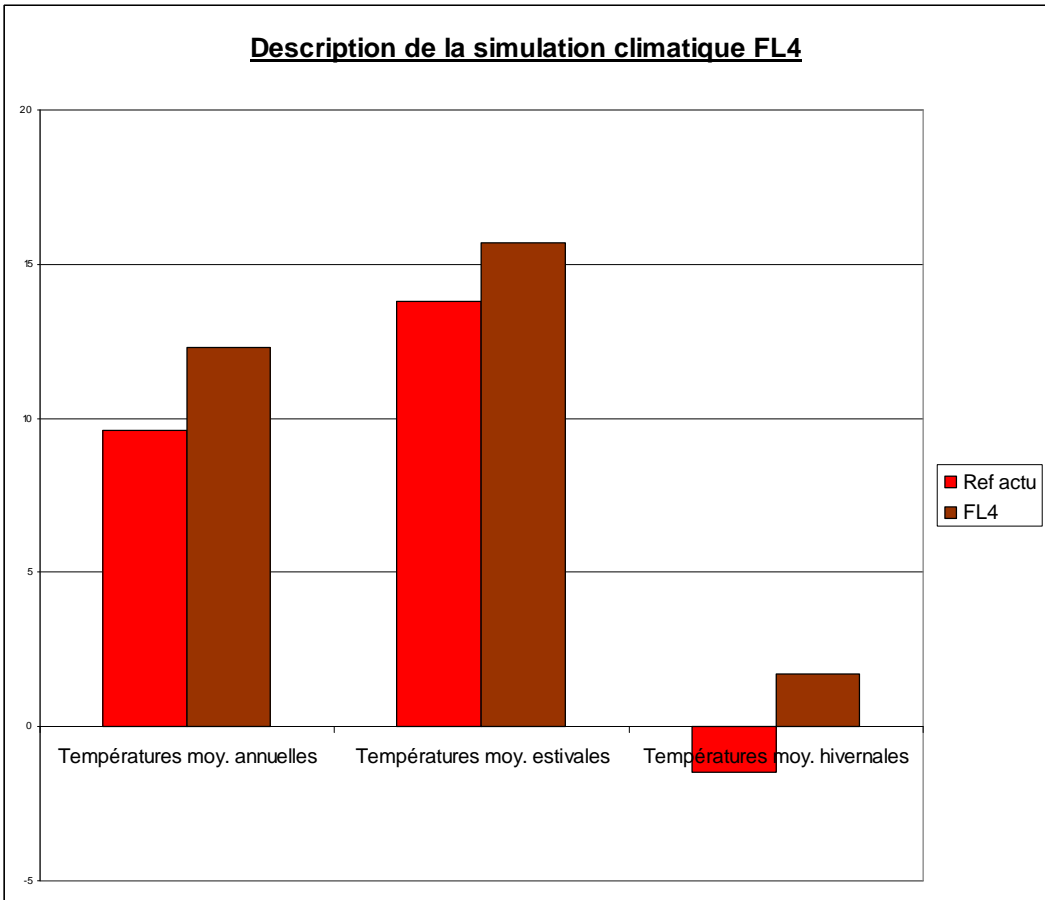
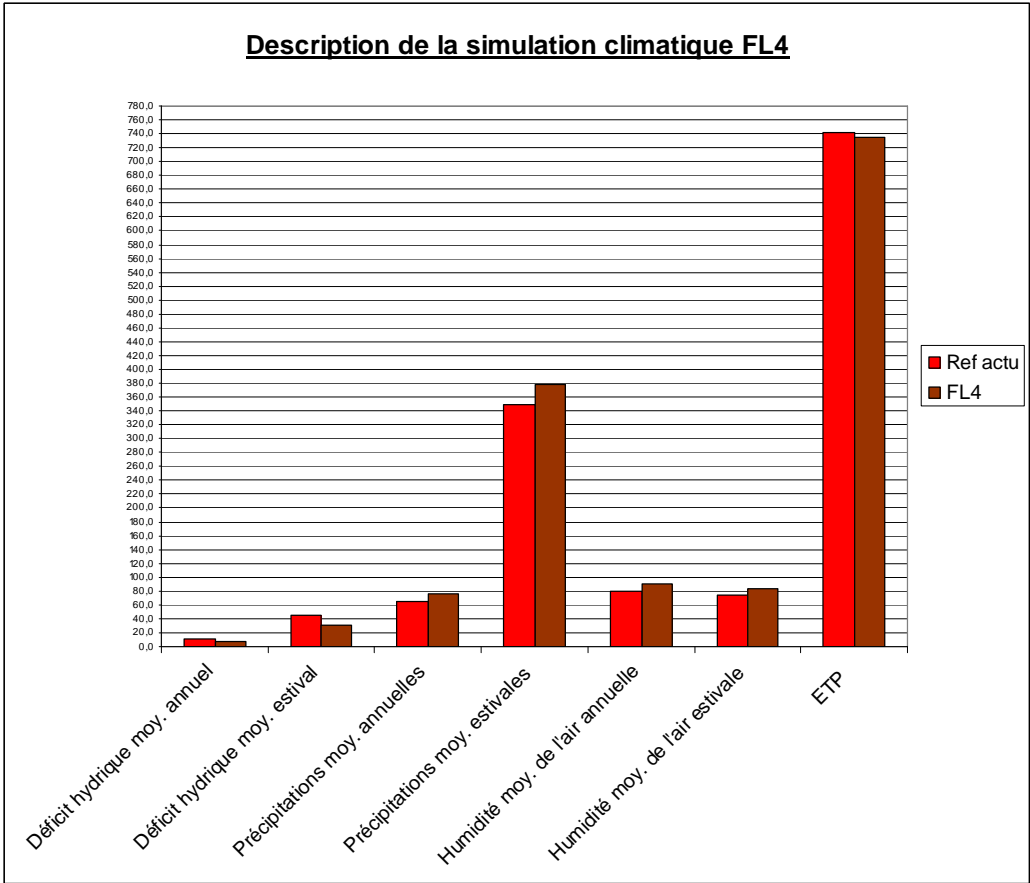
**FL1** : Hausse des températures moyennes annuelles, baisse des précipitations estivales donc hausse du déficit hydrique estival et de l'évapotranspiration.



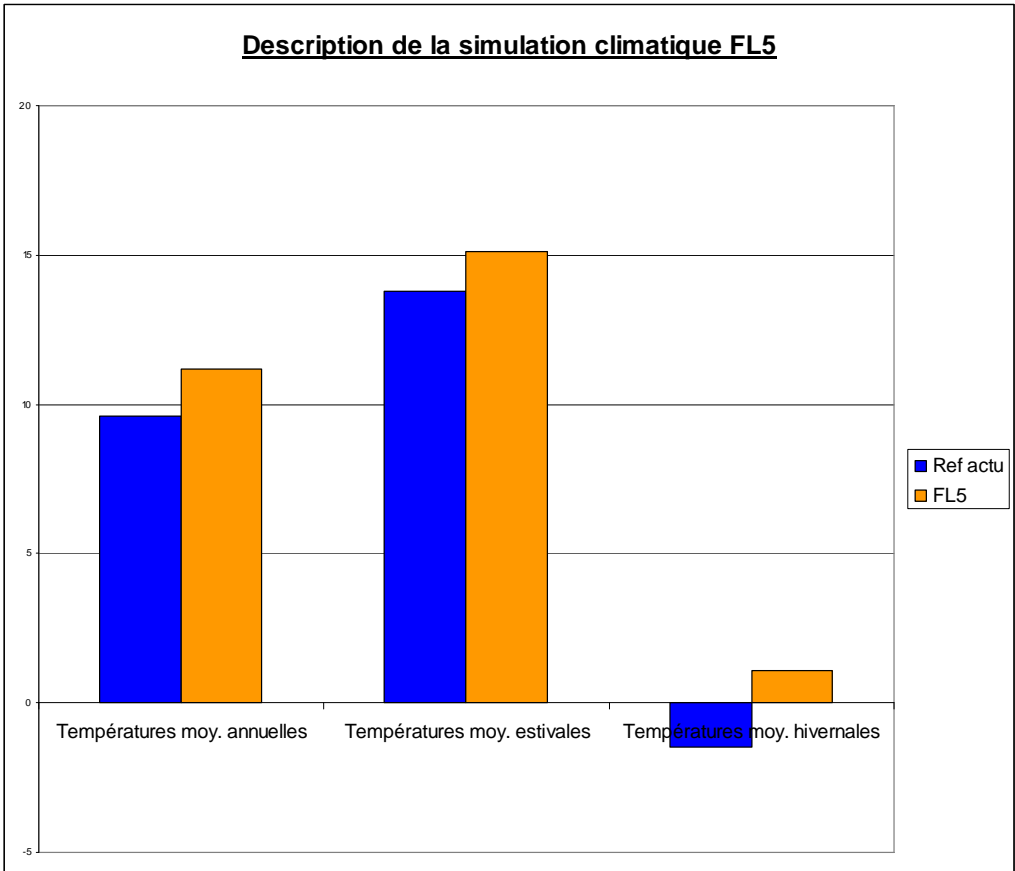
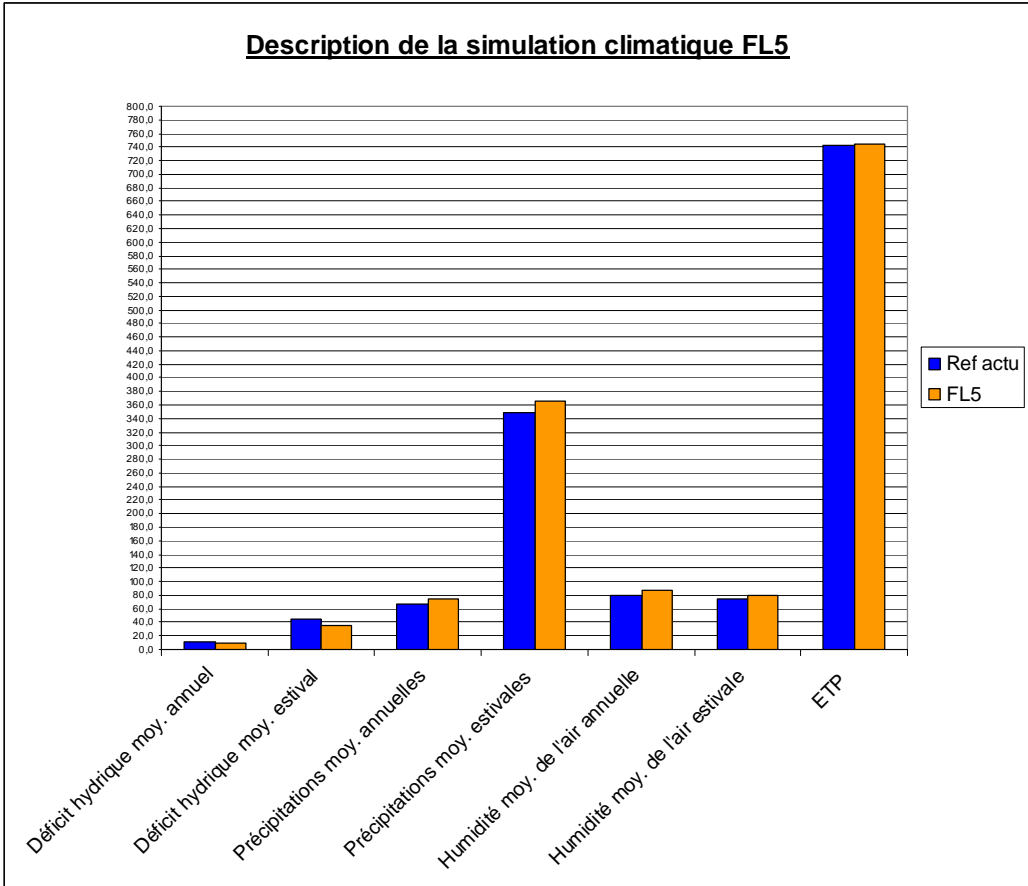
**FL2** : Hausse des températures moyennes annuelles, baisse significative des précipitations estivales donc hausse importante du déficit hydrique estival, diminution importante de l'humidité relative de l'air en période estivale et hausse de l'évapotranspiration.



**FL3** : Hausse importante des températures estivales et baisse des précipitations donc augmentation significative de l'évapotranspiration. Toutefois conservation de températures minimums moyennes annuelles négatives !

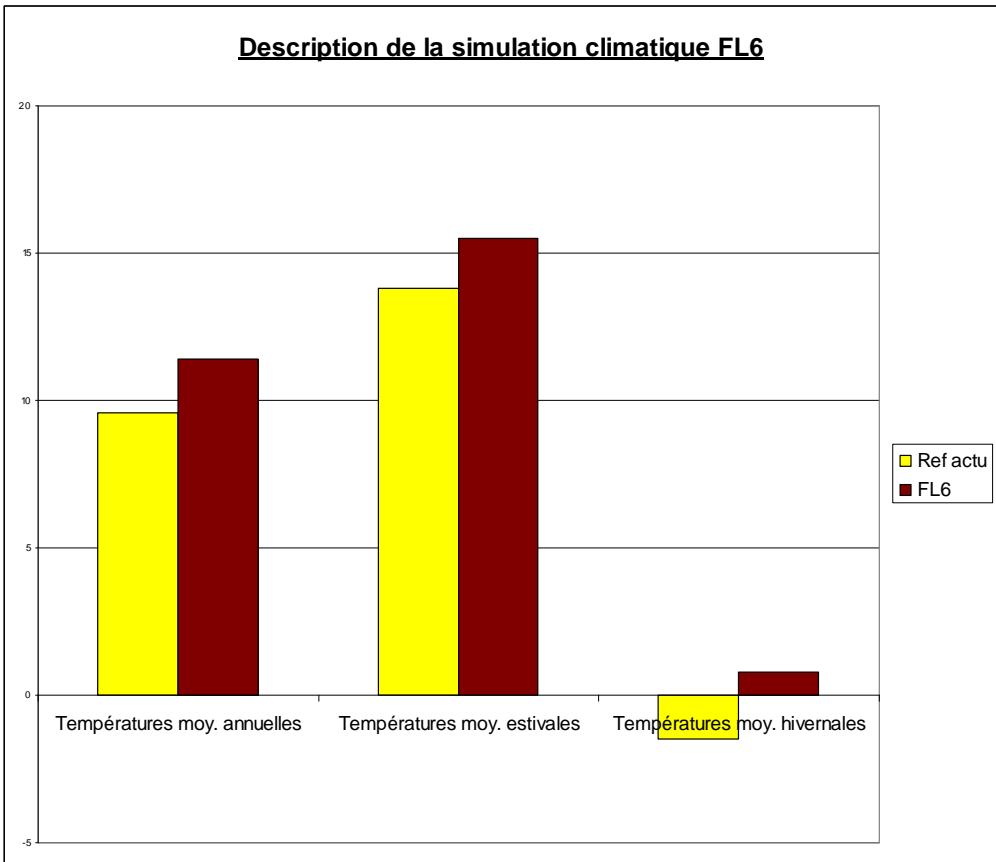
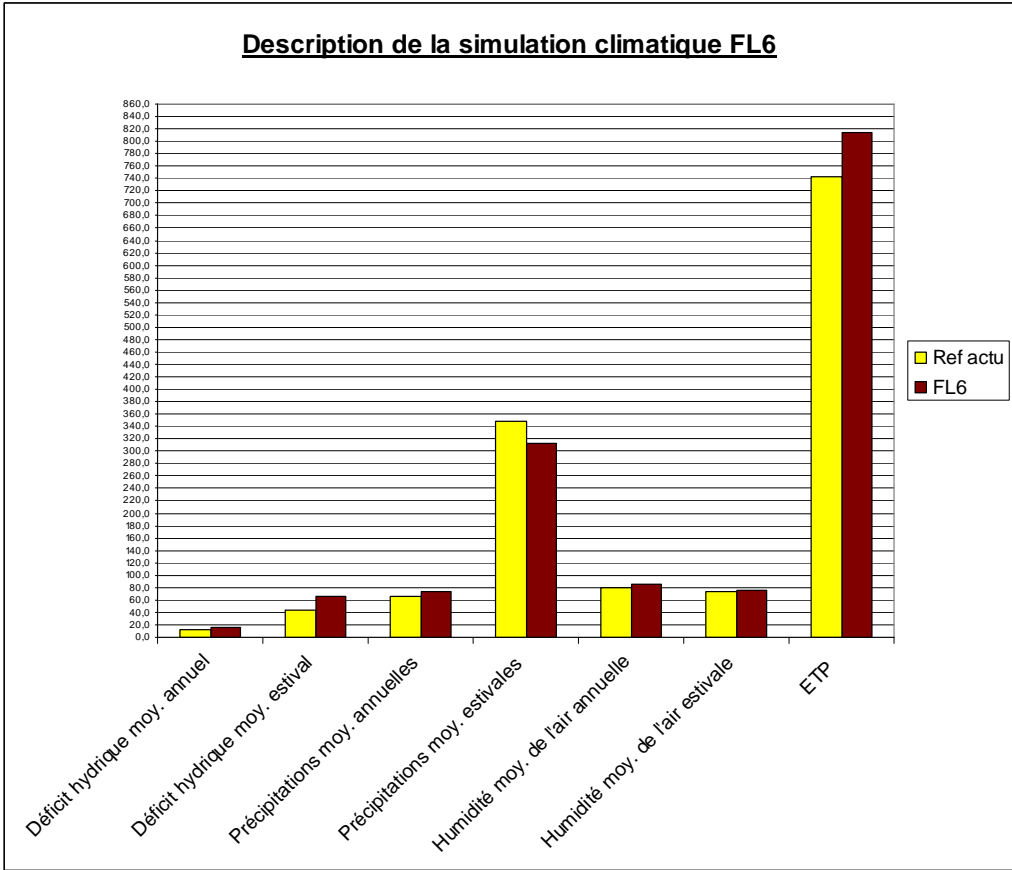


**FL4** : Hausse des températures (très importante en période estivale), augmentation des précipitations estivales donc forte augmentation de l'humidité relative de l'air, forte diminution du déficit hydrique et diminution également de l'évapotranspiration.



**FL5** : Augmentation des températures hivernales et des précipitations estivales donc hausse de l'humidité de l'air et baisse du déficit hydrique.





**FL6** : Hausse des températures estivales donc hausse du déficit hydrique malgré une légère hausse des précipitations estivales.

## **Conclusion :**

En théorie, FL2 présente le scénario de rejet de gaz à effet de serre le plus pessimiste (A2), FL3 le plus optimiste (B1) et les autres sont sensés être intermédiaires (A1B).

En pratique, si on observe les résultats, les simulations de FL2 et FL1 sont les plus pessimistes, FL4 et FL5 semblent les plus optimistes et FL3 et FL6 sont intermédiaires.

J'en conclue que les modèles prennent le pas sur les scénarios et que le modèle Aladin est le plus « pessimiste », que MAR est intermédiaire et que LMD est le plus « optimiste ».

Annexe 7 : Liste complète des essences potentiellement adaptées climatiquement (154 résineux)

|                          |                        |                             |                    |                               |                              |
|--------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------|
| <b>Abies</b>             | <b>Calocedrus</b>      | <b>Juniperus monosperma</b> | <b>Picea</b>       | <b>Pinus brutia</b>           | <b>Pinus wallichiana</b>     |
| Abies amabilis           | Calocedrus decurrens   | Juniperus occidentalis      | Picea asperata     | Pinus bungeana                | Pinus washoensis             |
| Abies cephalonica        |                        | Juniperus osteosperma       | Picea brachytyla   | Pinus contorta                | Pinus yunnanensis            |
| Abies chensiensis        | <b>Cedrus</b>          | Juniperus oxycedrus         | Picea breweriana   | Pinus densata                 |                              |
| Abies cilicica           | Cedrus deodara         | Juniperus phoenicea         | Picea crassifolia  | Pinus edulis                  | <b>Pseudotsuga</b>           |
| Abies concolor           | Cedrus libani          | Juniperus pingii            | Picea engelmannii  | Pinus flexilis                | Pseudotsuga menziesii glauca |
| Abies concolor x grandis |                        | Juniperus przewalskii       | Picea glauca       | Pinus gerardiana              | Pseudotsuga menziesii Total  |
| Abies delavayi           | <b>Cupressus</b>       | Juniperus pseudosabina      | Picea likiangensis | Pinus heldreichii             | Pseudotsuga menziesii Wash   |
| Abies densa              | Cupressus bakeri       | Juniperus recurva           | Picea linzhiensis  | Pinus jeffreyi                | Pseudotsuga sinensis         |
| Abies fabri              | Cupressus cashmeriana  | Juniperus rigida            | Picea mariana      | Pinus koraiensis              |                              |
| Abies fargesii           | Cupressus chengiana    | Juniperus sabina            | Picea meyeri       | Pinus lambertiana             | <b>Sequoiadendron</b>        |
| Abies forrestii          | Cupressus duclouxiana  | Juniperus saltuaria         | Picea neveitchii   | Pinus longaeva                | Sequoiadendron giganteum     |
| Abies fraseri            | Cupressus dupreziana   | Juniperus scopulorum        | Picea obovata      | Pinus monophylla              |                              |
| Abies grandis oreg       | Cupressus funebris     | Juniperus semiglobosa       | Picea omorika      | Pinus monticola               | <b>Taxus</b>                 |
| Abies grandis tot        | Cupressus lawsoniana   | Juniperus sibirica          | Picea orientalis   | Pinus mugo                    | Taxus baccata                |
| Abies grandis Wash       | Cupressus sempervirens | Juniperus squamata          | Picea pungens      | Pinus nigra                   | Taxus brevifolia             |
| Abies lasiocarpa         | Cupressus torulosa     | Juniperus thurifera         | Picea purpurea     | Pinus nigra laricio calabrica | Taxus contorta               |
| Abies magnifica          |                        | Juniperus tibetica          | Picea schrenkiana  | Pinus nigra laricio corsicana | Taxus mairei                 |
| Abies marocana           | <b>Juniperus</b>       | Juniperus virginiana        | Picea smithiana    | Pinus nigra nigricans         | Taxus wallichiana            |
| Abies nephrolepis        | Juniperus chinensis    |                             | Picea spinulosa    | Pinus nigra clusiana          |                              |
| Abies nordmanniana       | Juniperus communis     | <b>Larix</b>                | Picea wilsonii     | Pinus peuce                   | <b>Thuja</b>                 |
| Abies numidica           | Juniperus convallium   | Larix gmelinii              |                    | Pinus ponderosa               | Thuja occidentalis           |
| Abies pindrow            | Juniperus drupacea     | Larix griffithii            | <b>Pinus</b>       | Pinus ponderosa               | Thuja plicata                |

|                              |
|------------------------------|
|                              |
| <b>Abies procera</b>         |
| <b>Abies recurvata</b>       |
| <b>Abies sibirica</b>        |
| <b>Abies spectabilis</b>     |
| <b>Abies veitchii</b>        |
| <b>Abies x borisii-regis</b> |

|                               |
|-------------------------------|
|                               |
| <b>Juniperus excelsa</b>      |
| <b>Juniperus fassettii</b>    |
| <b>Juniperus foetidissima</b> |
| <b>Juniperus formosana</b>    |
| <b>Juniperus horizontalis</b> |
| <b>Juniperus indica</b>       |
| <b>Juniperus komarovii</b>    |

|                           |
|---------------------------|
|                           |
| <b>Larix laricina</b>     |
| <b>Larix lyallii</b>      |
| <b>Larix occidentalis</b> |
| <b>Larix potaninii</b>    |
| <b>Larix sibirica</b>     |

|                          |
|--------------------------|
| <b>Pinus albicaulis</b>  |
| <b>Pinus aristata</b>    |
| <b>Pinus armandii</b>    |
| <b>Pinus attenuata</b>   |
| <b>Pinus balfouriana</b> |
| <b>Pinus banksiana</b>   |
| <b>Pinus bhutanica</b>   |

|                           |
|---------------------------|
| <b>scopulorum</b>         |
| <b>Pinus pumila</b>       |
| <b>Pinus roxburghii</b>   |
| <b>Pinus sibirica</b>     |
| <b>Pinus strobiformis</b> |
| <b>Pinus strobus</b>      |
| <b>Pinus sylvestris</b>   |
| <b>Pinus tabuliformis</b> |

|                           |
|---------------------------|
|                           |
| <b><u>Tsuga</u></b>       |
| <b>Tsuga chinensis</b>    |
| <b>Tsuga dumosa</b>       |
| <b>Tsuga forrestii</b>    |
| <b>Tsuga heterophylla</b> |
| <b>Tsuga mertensiana</b>  |

**Annexe 8 : Liste des essences écartées suite à leur confrontation au cahier des charges et raison de leur élimination**

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b><i>Abies amabilis</i></b>         | <b>calcaire</b>  |
| <i>Abies cephalonica</i>             | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <i>Abies chensiensis</i>             | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies cilicica</i>                | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <b><i>Abies concolor</i></b>         | <b>plus d'un critère principal inconnu</b>                                       |
| <i>Abies delavayi</i>                | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies densa</i>                   | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies fabri</i>                   | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies fargesii</i>                | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies forrestii</i>               | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <b><i>Abies fraseri</i></b>          | <b>taille</b>  |
| <b><i>Abies grandis oreg</i></b>     | <b>calcaire argile gel production</b>  |
| <b><i>Abies grandis tot</i></b>      | <b>calcaire argile gel production</b>  |
| <b><i>Abies grandis Wash</i></b>     | <b>calcaire argile gel production</b>  |
| <b><i>Abies lasiocarpa</i></b>       | <b>taille</b>  |
| <i>Abies magnifica</i>               | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies nephrolepis</i>             | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies pindrow</i>                 | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies recurvata</i>               | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies sibirica</i>                | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Abies spectabilis</i>             | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <b><i>Abies veitchii</i></b>         | <b>critère calcaire non renseigné</b>  |
| <i>Abies x borisii-regis</i>         | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <b><i>Calocedrus decurrens</i></b>   | <b>ressemblance</b>  |
| <b><i>Cedrus deodara</i></b>         | <b>calcaire</b>  |
| <i>Cedrus libani</i>                 | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <b><i>Cupressus bakeri</i></b>       | <b>critère calcaire non renseigné</b>  |
| <b><i>Cupressus cashmeriana</i></b>  | <b>ressemblance</b>  |
| <b><i>Cupressus chengiana</i></b>    | <b>critère calcaire non renseigné</b>  |
| <b><i>Cupressus duclouxiana</i></b>  | <b>critère calcaire non renseigné</b>  |
| <b><i>Cupressus dupreziana</i></b>   | <b>taille</b>  |
| <b><i>Cupressus funebris</i></b>     | <b>ressemblance</b>  |
| <b><i>Cupressus lawsoniana</i></b>   | <b>taille</b>  |
| <b><i>Cupressus sempervirens</i></b> | <b>ressemblance</b>  |
| <b><i>Cupressus torulosa</i></b>     | <b>ressemblance</b>  |

|                       |
|-----------------------|
| Ordre d'élimination : |
| 1                     |
| 2                     |
| 3                     |
| 4                     |
| 5                     |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <i>Juniperus chinensis</i>    | ressemblance   |
| <i>Juniperus communis</i>     | taille   |
| <i>Juniperus convallium</i>   | ressemblance   |
| <i>Juniperus drupacea</i>     | taille   |
| <i>Juniperus excelsa</i>      | taille   |
| <i>Juniperus fassettii</i>    | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <i>Juniperus foetidissima</i> | taille   |
| <i>Juniperus formosana</i>    | taille   |
| <i>Juniperus horizontalis</i> | taille   |
| <i>Juniperus indica</i>       | taille   |
| <i>Juniperus komarovii</i>    | taille   |
| <i>Juniperus monosperma</i>   | taille   |
| <i>Juniperus occidentalis</i> | taille   |
| <i>Juniperus osteosperma</i>  | taille   |
| <i>Juniperus oxycedrus</i>    | taille   |
| <i>Juniperus phoenicea</i>    | taille   |
| <i>Juniperus pingii</i>       | taille   |
| <i>Juniperus przewalskii</i>  | taille   |
| <i>Juniperus pseudosabina</i> | taille   |
| <i>Juniperus recurva</i>      | taille   |
| <i>Juniperus rigida</i>       | taille   |
| <i>Juniperus sabina</i>       | taille   |
| <i>Juniperus saltuaria</i>    | taille   |
| <i>Juniperus scopulorum</i>   | taille   |
| <i>Juniperus semiglobosa</i>  | taille   |
| <i>Juniperus sibirica</i>     | taille   |
| <i>Juniperus squamata</i>     | taille   |
| <i>Juniperus thurifera</i>    | taille   |
| <i>Juniperus tibetica</i>     | taille   |
| <i>Juniperus virginiana</i>   | ressemblance   |
| <i>Larix gmelinii</i>         | ressemblance   |
| <i>Larix griffithii</i>       | ressemblance   |
| <i>Larix laricina</i>         | ressemblance   |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <i>Larix lyallii</i>      | ressemblance   |
| <i>Larix occidentalis</i> | ressemblance   |
| <i>Larix potaninii</i>    | ressemblance   |
| <i>Larix sibirica</i>     | ressemblance   |
| <i>Picea asperata</i>     | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea brachytyla</i>   | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea breweriana</i>   | calcaire   |
| <i>Picea crassifolia</i>  | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea glauca</i>       | plus d'un critère principal inconnu  |
| <i>Picea likiangensis</i> | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea linzhiensis</i>  | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea mariana</i>      | taille   |
| <i>Picea meyeri</i>       | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea neoveitchii</i>  | taille   |
| <i>Picea obovata</i>      | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea omorika</i>      | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <i>Picea orientalis</i>   | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <i>Picea pungens</i>      | calcaire   |
| <i>Picea purpurea</i>     | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea schrenkiana</i>  | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea smithiana</i>    | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea spinulosa</i>    | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Picea wilsonii</i>     | taille   |
| <i>Pinus albicaulis</i>   | taille   |
| <i>Pinus aristata</i>     | taille   |
| <i>Pinus armandii</i>     | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Pinus attenuata</i>    | taille   |
| <i>Pinus balfouriana</i>  | taille   |
| <i>Pinus banksiana</i>    | taille   |
| <i>Pinus bhutanica</i>    | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Pinus brutia</i>       | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <i>Pinus bungeana</i>     | taille et ressemblance   |
| <i>Pinus contorta</i>     | calcaire   |
| <i>Pinus densata</i>      | critère calcaire non renseigné   |
| <i>Pinus edulis</i>       | taille   |
| <i>Pinus flexilis</i>     | taille   |
| <i>Pinus gerardiana</i>   | taille   |
| <i>Pinus heldreichii</i>  | plus d'un critère principal inconnu  |
| <i>Pinus jeffreyi</i>     | plus d'un critère principal inconnu  |
| <i>Pinus koraiensis</i>   | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Pinus lambertiana</i>  | calcaire   |
| <i>Pinus longaeva</i>     | taille   |
| <i>Pinus monophylla</i>   | taille   |
| <i>Pinus monticola</i>    | plus d'un critère principal inconnu  |

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <i>Pinus mugo</i>                    | taille   |
| <i>Pinus nigra laricio corsicana</i> | calcaire   |
| <i>Pinus peuce</i>                   | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Pinus ponderosa</i>               | calcaire   |
| <i>Pinus ponderosa scopulorum</i>    | calcaire   |
| <i>Pinus pumila</i>                  | taille   |
| <i>Pinus roxburghii</i>              | calcaire   |
| <i>Pinus sibirica</i>                | critère calcaire non renseigné   |
| <i>Pinus strobiformis</i>            | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Pinus strobus</i>                 | calcaire   |
| <i>Pinus sylvestris</i>              | calcaire   |
| <i>Pinus tabuliformis</i>            | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Pinus wallichiana</i>             | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <i>Pinus washoensis</i>              | + de trois critères principaux inconnus ou au moins un critère principal négatif |
| <i>Pinus yunnanensis</i>             | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Pseudotsuga menziesii glauca</i>  | calcaire   |
| <i>Pseudotsuga menziesii Total</i>   | calcaire   |
| <i>Pseudotsuga menziesii Wash</i>    | calcaire   |
| <i>Pseudotsuga sinensis</i>          | critère calcaire non renseigné   |
| <i>Sequoiadendron giganteum</i>      | production   |
| <i>Taxus baccata</i>                 | taille   |
| <i>Taxus brevifolia</i>              | taille   |
| <i>Taxus contorta</i>                | taille   |
| <i>Taxus mairei</i>                  | taille   |
| <i>Taxus wallichiana</i>             | taille   |
| <i>Thuja occidentalis</i>            | taille   |
| <i>Thuja plicata</i>                 | ressemblance   |
| <i>Tsuga chinensis</i>               | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Tsuga dumosa</i>                  | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Tsuga forrestii</i>               | critères principaux uniquement négatifs et/ou non renseignés                     |
| <i>Tsuga heterophylla</i>            | calcaire et production   |
| <i>Tsuga mertensiana</i>             | calcaire sol et gel  |



## Annexe 9 : Fiches descriptives des essences de la liste finale

### Pin laricio de Calabre ( *Pinus nigra subsp. laricio var. calabrica* )

Famille : *Pinaceae*

Genre : *Pinus*



Origine : sous-espèce endémique de Méditerranée.

Utilisation : appréciés pour leur rectitude, leur bois à cœur rouge présente de bonnes qualités mécaniques. Les utilisations varient, du déroulage et du tranchage, pour les plus belles billes à la charpente, la menuiserie et l'ébénisterie pour les autres.

Caractéristiques : Résistant au calcaire actif et à l'hydromorphie, aux sols argileux, aux scolytes, au gel tardif, à l'abrutissement par les cerfs. Essence de pleine lumière qui supporte les sécheresses estivales et résiste au froid.

Problèmes relevés : Il peut être sensible aux frotis des cervidés et à certains insectes comme la chenille processionnaire.

Envisagé pour remplacer : le pin noir d'Autriche avec un facteur d'incertitude «très favorable».

Sources : -« Les Essences de reboisement tome 2 » Synthèses bibliographiques réalisées par les élèves de l'ENGREF, (1986)-[livre]-[consulté le 22/05/2013].

-Philippe RIOU-NIVERT 2005, « Les résineux- Tome 2 : Ecologie et pathologie » (IDF)-[livre]-[consulté le 12/03/2013] p.49 à 90 et 102 à 107 (447 pages).

-Gérard MASSON 2005, « Autoécologie des essences forestières- Livre 2 : Essences »-[livre]-[consulté le 11/03/2013].

## Sapin d'Algérie ou sapin de Kabylie (*Abies numidica*)

Famille : *Pinaceae*

Genre : *Abies*



Origine : Algérie, où c'est une espèce endémique sur Djebel Babor, une montagne de l'Atlas algérien.

Utilisation : Son bois est utilisé pour la menuiserie et pour la charpente, car facile à travailler.

Caractéristiques : Il est estimé parmi les sapins le plus tolérant à la sécheresse. Il s'adapte aux sols rocailloux, calcaires, argileux. Il est résistant au gel tardif et aux dégâts liés aux cerfs.

Problèmes relevés : Sa résistance aux scolytes n'a pas pu être documentée.

Envisagé pour remplacer : l'épicéa avec un facteur d'incertitude «envisageable».

Sources : -M.BARBERO 1975, « Les forêts de sapin sur le pourtour méditerranéen »-[livre]-[consulté le 24/05/2013] p.1261 à 1279.

-F.Lebtahi 2000, « Le sapin de Numidie » La forêt algérienne N°3-[Revue]-[consulté le 27/05/2013].

-M.JACAMON 2002, « Guide de dendrologie 4 » ENGREF-[livre]-[consulté le 27/03/2013].

## Sapin de Nordmann ou sapin du Caucase (*Abies nordmanniana*)

Famille : *Pinaceae*

Genre : *Abies*



Origine : Cette espèce est originaire des régions tempérées d'Asie occidentale : région du Caucase : Géorgie, Russie (Ciscaucasie), Arménie, ainsi qu'au sud et au nord de la mer Noire : Turquie, Crimée. Il a été introduit en Europe depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle.

Utilisation : Essence de reboisement employée pour sa rusticité. Cette espèce est de nos jours très utilisée pour la production de sapins de Noël. Bois : son bois tendre et léger, blanc jaunâtre, sans canaux résinifères est facile à travailler mais cependant un peu noueux. Il est utilisé pour la menuiserie, la charpente, la caisserie, le coffrage et la papeterie.

Caractéristiques : Essence résistante au calcaire, aux sols à tendance argileuse, aux gelées tardives, au froid et aux sécheresses, ainsi qu'aux scolytes et aux dégâts liés aux cerfs.

Problèmes relevés : Son bois n'a pas une qualité aussi appréciable que l'épicéa commun (nœuds).

Envisagé pour remplacer : l'épicéa avec un facteur d'incertitude «favorable».

Sources : -Philippe RIOU-NIVERT 1996, « Les résineux- Tome 1 : Connaissance et reconnaissance » (IDF)-[livre]-[consulté le 11/03/2013] p.152 à 247 (256 pages).

-Philippe RIOU-NIVERT 2005, « Les résineux- Tome 2 : Ecologie et pathologie » (IDF)-[livre]-[consulté le 12/03/2013] p.49 à 90 et 102 à 107 (447 pages).

-M.JACAMON 2002, « Guide de dendrologie 4 » ENGREF-[livre]-[consulté le 27/03/2013].

-« Les Essences de reboisement tome 2 » Synthèses bibliographiques réalisées par les élèves de l'ENGREF, (1986)-[livre]-[consulté le 22/05/2013].

## Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* subsp. *nigra* var. *nigra* Arn.)

Famille : *Pinaceae*

Genre : *Pinus*



Origine : On le trouve en Europe méridionale, de l'Espagne à la Crimée, en Asie Mineure, à Chypre et, localement, dans les montagnes de l'Atlas en Afrique du Nord-Ouest.

Utilisation : Le bois du pin noir, semblable à celui des pins sylvestres et pins rouge (*Pinus resinosa*), est modérément dur et présente un grain droit. Il tend cependant à être plus rugueux, plus mou et moins fort, en raison de la croissance plus rapide de l'arbre. Il possède de bonnes propriétés mécaniques mais avec beaucoup de nœuds. On l'emploie, en Europe surtout, comme combustible, ainsi que dans la fabrication de papier et dans la construction générale.

Caractéristiques : Le pin noir d'Autriche est une essence héliophile, cependant les semis peuvent supporter un léger ombrage dans le jeune âge. Il résiste très bien au froid, au gel tardif et à la sécheresse, aussi qu'au vent et à la pollution atmosphérique. Il présente un enracinement puissant qui tolère aussi bien les sols calcaires que les sols argileux compacts. Il n'a pas de sensibilité particulière aux scolytes et aux dégâts de cerfs.

Envisagé pour remplacer : / avec un facteur d'incertitude «favorable».

Sources : -Philippe RIOU-NIVERT 2005, « Les résineux- Tome 2 : Ecologie et pathologie » (IDF)-[livre]-[consulté le 12/03/2013] p.49 à 90 et 102 à 107 (447 pages).

-Gérard MASSON 2005, « Autoécologie des essences forestières- Livre 2 : Essences »-[livre]-[consulté le 11/03/2013].

-« Les Essences de reboisement tome 2 » Synthèses bibliographiques réalisées par les élèves de l'ENGREF, (1986)-[livre]-[consulté le 22/05/2013].

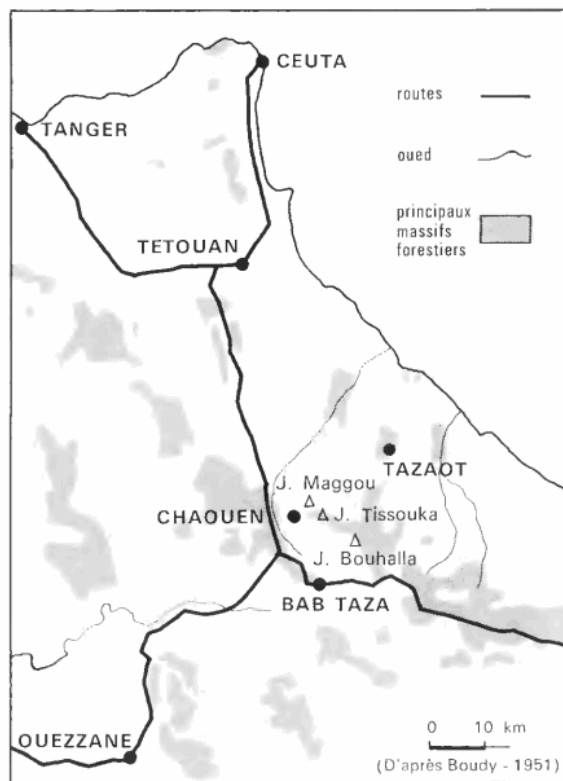
## Sapin du Maroc (*Abies marocana*)

Famille : *Pinaceae*

Genre : *Abies*



Origine : endémique du Rif



Utilisation : bois noueux, lourd utilisé pour la menuiserie courante et la caisserie.

Caractéristiques : essence d'ombre, résistante au gel tardif et à la sécheresse. *Abies marocana* supporte les sols calcaire et argileux. Ce sapin ne présente pas de sensibilité particulière aux scolytes.

Problèmes relevés : sa résistance aux dégâts liés aux cerfs n'a pas pu être renseignée et l'intérêt économique de son bois n'est pas comparable à celui de l'épicéa.

Envisagé pour remplacer : l'épicéa avec un facteur d'incertitude «possible».

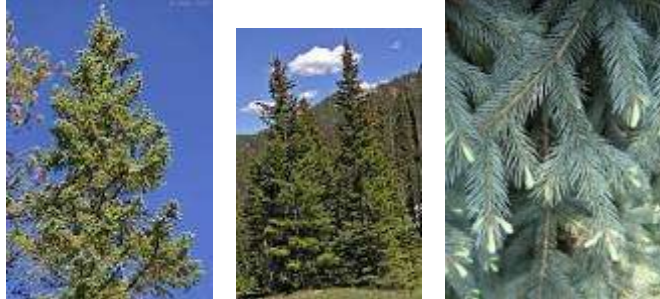
Sources : -M.BAUMER 1977, « Le sapin du Maroc » Revue forestière Française-[PDF]- [consulté le 31/05/2013] p.343 à 354.



## **Epinette d'Engelmann ou épicéa d'Engelmann (*Picea engelmannii*)**

Famille : *Pinaceae*

Genre : *Picea*



Origine : Amérique du Nord et en particulier des Montagnes Rocheuses (du Montana jusqu'à l'Arizona) ; il existe deux populations isolées dans le nord du Mexique. Il fut introduit en 1850 en Europe.

Utilisation : bois élastique et résistant utilisé pour la production de bois d'œuvre en construction générale et pour la fabrication de pâte à papier. Cette essence a une productivité assez élevée en station adaptée et présente un intérêt économique semblable à l'épicéa.

Caractéristiques : le sol propice à cette essence est calcaire, elle supporte les sols argileux, résiste bien au gel et tolère bien l'ombre. L'essence ne semble pas craindre les dégâts imputables aux cervidés.

Problèmes relevés : la résistance aux scolytes n'a pas pu être renseignée.

Envisagé pour remplacer : l'épicéa avec un facteur d'incertitude «possible».

Sources : -G.MONTERO 2005, « Red de Parcelas de Introduccion de Especies » IFIE INIA-[livre]-[consulté le 24/05/2013] (370 pages).

-USDA United States Department of Agriculture (National Resources Conservation Service CNRS)-[en ligne]-[consulté le 28/05/2013] disponible sur :

<<http://plants.usda.gov/java/>>.

## Pin de Salzman (Pinus nigra clusiana)

Famille : Pinaceae

Genre : Pinus



Origine : arbre très rare et typiquement cévenol. Il n'existe, au plan national, que dans de rares sites du sud de la France, en quasi-totalité en Languedoc Roussillon. On peut l'observer en Cévennes, entre Bessèges (Gard) et les Vans (Ardèche), aux confins des Cévennes, au col d'Uglas (Gard) et au Roc des Hourtous surplombant les gorges du Tarn.

Utilisation : Depuis la fin du XIXe siècle, malgré sa rusticité, il a très peu fait l'objet d'utilisation sylvicole. Ces peuplements sont souvent résiduels, ayant fréquemment souffert des incendies et du surpâturage.

Caractéristiques : Peu exigeant en eau et en nutriment, il peut coloniser les stations les plus arides. Il supporte les sols calcaires ainsi que les sols argileux. Il résiste également aux parasites tels que la processionnaire du pin ainsi qu'aux scolytes. Il ne présente pas de sensibilité aux dégâts liés aux cervidés.

Ces qualités d'adaptation aux milieux méditerranéens et plus particulièrement sa résistance à la sécheresse mais aussi au gel tardif sont particulièrement intéressantes notamment dans le contexte de changements climatiques.

Problèmes relevés : comme il a très peu fait l'objet d'utilisation sylvicole, sa capacité à fournir du bois d'œuvre n'a pas pu être renseigné de source sûre.

Envisagé pour remplacer : le pin noir d'Autriche avec un facteur d'incertitude «possible».

Sources : -USDA United States Department of Agriculture (National Resources Conservation Service CNRS)-[en ligne]-[consulté le 28/05/2013] disponible sur : <<http://plants.usda.gov/java/>>.

-M.JACAMON 2002, « Guide de dendrologie 4 » ENGREF-[livre]-[consulté le 27/03/2013].

-E. & J.JULLIEN 2010, « Guide écologique des arbres »-[livre]-[consulté le 20/03/2013] (558 pages).

Annexe 10 :

**Proposition de protocole d'installation de boisements test**

• **Renseignements généraux**

**But :** Le facteur testé par l'expérimentation est l'essence. Il s'agit de comparer plusieurs essences du point de vue de :

- **l'état sanitaire**
- **la croissance** (et la production)
- **la qualité**

Et de confirmer ou infirmer leur adaptation stationnelle et climatique et donc leur capacité à remplacer les essences actuellement en place (épicéas communs et pins noir d'Autriche).

**Type d'expérience :** essai d'élimination (beaucoup d'espèces de comportement inconnu mises en comparaison, placettes petites et suivi court).

**Espèces :**

|                       | <b>Remplacement épicéa commun</b>      | <b>Remplacement pin noir d'Autriche</b> |
|-----------------------|--|---|
| <b>Très favorable</b> | <i>Abies procera</i>                   | <i>Pinus nigra laricio calabrica</i>    |
| <b>Favorable</b>      | <i>Abies nordmanniana</i>              | Maintien même essence                   |
| <b>Possible</b>       | <i>A. marocana / Picea engelmannii</i> | <i>Pinus nigra clusiana</i>             |
| <b>Envisageable</b>   | <i>Abies numidica</i>                  |   |
| <b>Témoin</b>         | <i>Picea abies</i>                     |   |

**Emplacement du dispositif :** FD de Verdun (Meuse)

**Durée prévue de l'essai :** 15 à 20 ans maximum.

**Contexte météorologique :** Climat de type océanique à influence continentale avec des saisons de végétation de 7 mois maximum, des précipitations moyennes estivales (j-j-a) de 80 mm par mois, une température moyenne d'été (juin-juillet-août) de 16°C et une température moyenne de janvier de -2°C.



## II-Elevage

### Disponibilités des plants :

Il apparaît que la mise en place du test d'expérimentation dépend entièrement de la capacité à obtenir des graines (de bonnes qualités) pour les essences à tester d'origine étrangère.

| Essences recherchées                 | Origine souhaitée           | Remarques   |
|--------------------------------------|-----------------------------|---|
| <i>Abies procera</i>                 | Aire naturelle (Etats-Unis) | Zone de provenance à préciser                               |
| <i>Abies nordmanniana</i>            | Aire naturelle ?            | Ou <i>Abies bornmuelleriana</i><br>provenance VAG* France ? |
| <i>Abies pinsapo var. marocana</i>   | Aire naturelle (Maroc)      | /   |
| <i>Abies numidica</i>                | Aire naturelle (Algérie)    | /   |
| <i>Pinus nigra nigricans</i>         | France Nord-est             | Témoin local  |
| <i>Pinus nigra laricio calabrica</i> | France (verger PLA-VG-002)  | /   |
| <i>Pinus nigra clusiana</i>          | France (PCL901)             | /   |
| <i>Picea engelmannii</i>             | Aire naturelle (Etats-Unis) | Zone de provenance à préciser                               |

\*Vergers à Graines.

(Démarche à suivre si l'on souhaite introduire du matériel biologique forestier en France en annexe page WW)

### >Approvisionnement.

La difficulté de se procurer certaines essences influera sur le coût des plants qui, en cas d'obligation d'importation des graines, se situera alors approximativement autour de 10 euros. Mais elle aura également un impact sur les délais de mise en place de l'expérimentation : Joel CONCHE ; responsable du service des graines et plants de l'Office national des forêts, plus connu sous son ancienne dénomination de « sécherie de la Joux » donne comme ordre d'idée de délais : « Approvisionnement sur la saison 2013/2014, éducation dans les pépinières du PNRGF, disponibilité entre 2016/2017 et 2017/2018 des plants. ». Il faudra donc contacter la sécherie de la Joux 5 ans avant la date de plantation souhaitée.

Contact : [joel.conche@onf.fr](mailto:joel.conche@onf.fr).

A renseigner :

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Catégorie réglementaire</b> | couleur de l'étiquette   |
| <b>Type de plants</b>          | racines nues ou godets...                                      |
| <b>Lieu de production</b>      | ville/village/lieu-dit   |
| <b>Nom de la pépinière</b>     |  |
| <b>Méthode</b>                 | Par exemple : semis manuel en pleine terre à densité identique |
| <b>Milieu</b>                  |  |
| <b>Date de semis</b>           |  |
| <b>Repiquage</b>               | indiquer l'âge, la date, l'espacement, le milieu...            |

### III-Mise en place de l'expérimentation

#### 1) Critères de choix du site

- Le site doit être facile d'accès afin de faciliter le suivi.
- Au vu du dispositif d'une surface de 4 ha, un site d'au moins 5 ha est recherché pour l'expérimentation afin de pouvoir avoir le choix de l'emplacement.
- On choisira pour l'implantation de l'expérimentation une parcelle initialement boisée en résineux et pour laquelle l'aménagement prévoit une mise en régénération. Celle-ci ne devra pas avoir été entamée afin d'éviter d'avoir un travail préalable à la plantation du fait de la présence de semis etc.
- Si un facteur varie sur le site (rupture de pente, changement de versant, changement de type de station...) il sera possible de mettre en place deux blocs distincts. Sur chaque bloc on mettra 10 placettes de chaque essence qui seront ensuite réparties aléatoirement dans le bloc. Cependant l'expérimentation ne devra compter que 2 blocs maximum, ce qui implique de trouver un site avec un seul gradient stationnel qui varie.
- Si, sur le site, on note la présence de trous d'obus, deux options :
  - 1-Soit ils sont répartis de manière assez régulière : alors on plante avec une répartition systématique des plants et il faudra lors des premières mesures indiquer l'emplacement de l'arbre par rapport au trou (fond, bordure, pente)
  - 2-Soit ils sont répartis de manière irrégulière et dans ce cas on ne plantera de manière systématique que si le diamètre des trous est inférieur à 2m50 sinon on décalera la ligne de plantation.
- Il faut favoriser un site avec une certaine homogénéité du sol, du fait des bouleversements pédologiques induits par la guerre cette homogénéité sera représentée surtout par les types de stations. Il faudra donc choisir une parcelle avec un seul type de station, ou deux maximum et dans ce cas mettre en place deux blocs (voir ci-dessus). Afin de vérifier que le site ne présente pas un sol atypique par rapport aux stations représentatives de Verdun, on effectuera 4 relevés pédologiques (le choix entre fosses pédologiques ou relevés à la tarière étant laissé à la décision du gestionnaire), répartis de manière aléatoire sur le site mais suivant le gradient si il y en a un (exemple : dans le sens de la pente).
- En ce qui concerne la pente, on choisira un site avec une pente maximum de 20% (cette valeur est néanmoins à confirmer sur le terrain).

Informations à renseigner une fois le site choisi :

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Altitude :</b>                     |  |
| <b>Latitude :</b>                     |  |
| <b>Longitude :</b>                    |  |
| <b>Exposition :</b>                   |  |
| <b>Pente :</b>                        |  |
| <b>Station météo la plus proche :</b> | Metz-Frescaty (50 km environ de Verdun)                  |
| <b>Type de sol :</b>                  | (humus, roche mère, structure, texture, hydromorphie...) |
| <b>Végétation :</b>                   |  |

## 2) Déroulement du chantier préalable à la plantation

L'état du chantier de reboisement est à prendre en compte car il influera directement sur le coût de préparation et de plantation et peut remettre en cause l'installation d'un essai :

| Etat du site                         | Travaux préalables à la plantation                                    | Outil, matériel  |
|--------------------------------------|---|--|
| Boisement                            | Coupe rase, mise des rémanents dans les cloisonnements.               | Râteaux forestiers sur tracteur ou pelle mécanique.          |
| Ancienne coupe (Végétation herbacée) | Broyage de la végétation, mise des rémanents dans les cloisonnements. | Râteaux forestiers sur tracteur ou pelle mécanique, broyeur. |
| Coupe récente (Pas de végétation)    | /   | /  |

Le type de travaux effectués avant la plantation ainsi que leur date de réalisation devront être renseignés. Il faudra également noter l'état ou les états du site avant les travaux (peuplement ouvert ou fermé ? concurrence herbacée ?) ainsi que leur localisation sur le site car cela peut avoir un impact sur la facilité de reprise des plants et sur leur survie

## 3) Caractéristiques du dispositif

### → Installation

À titre indicatif, pour notre essai voilà le temps approximatif (d'après le « guide de l'expérimentation » de J.ROSA et P.RIOU-NIVERT) qu'il faut prévoir pour mener à bien l'essai :

| Travaux                     |  | Journées ETP (Equivalent temps plein) y compris déplacement (<100km) |
|-----------------------------|--|--|
| <b>Installation</b>         | Etablissement du protocole                         | 3  |
|                             | Recherche de site, convention, etc.                | 4  |
|                             | Piquetage  | 4  |
|                             | Réception des plants et assistance à la plantation | 3  |
|                             | Contrôle de reprise et mesures de départ; peinture | 4  |
|                             | Saisie, compte rendu d'installation                | 2  |
| <b>Suivi</b>                | Mesures et observations                            | 8  |
|                             | Saisie, compte rendu                               | 2  |
|                             | Imprévus (regarnis...)                             | 3  |
| <b>Autres interventions</b> | Désignation d'arbre d'avenir                       | 4  |
|                             | Martelages d'éclaircies                            | 6  |
| <b>Total</b>                |  | <b>43</b>  |

A renseigner à la réception des plants :

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| <b>Age des plants :</b>           |              |
| <b>Traitements particuliers :</b> | (ex. hylobe) |
| <b>Date d'arrachage :</b>         |              |
| <b>Conditions de stockage :</b>   |              |
| <b>Conditions de transport :</b>  |              |
| <b>Date de livraison :</b>        |              |

A renseigner lors de l'installation des plants :

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Date de plantation :</b>      | ?  |
| <b>Météo à la plantation :</b>   | ?  |
| <b>Opérateurs :</b>              | ?  |
| <b>Densité :</b>                 | 2 m par 3 m  |
| <b>Consignes de plantation :</b> | Potet à la pioche, répartition aléatoire des placettes sur le site, plantation entre les cloisonnements. |

Il faut prévoir à chaque fois 20 placettes par essence : 4 arbres centraux représenteront l'objet d'étude et ils seront entourés d'une zone tampon (2 rangés d'arbres de la même essence soit 32 plants) non mesurée, afin que l'individu étudié soit bien un arbre en milieu forestier (mini-peuplement).

### **Implantation des placettes**

Le dispositif sera constitué de placettes de forme +/- carré, disposées dans des zones homogènes du site choisi, aussi voisines que possible les unes des autres. Ces placettes seront matérialisées par 4 piquets durables d'au moins 1,20 m plantés à chaque coin de la placette de traitement (placette de mesure + zone tampon) et dont l'extrémité est peinte de couleur différente selon l'essence mise en comparaison. Le piquet du coin de la placette de mesure par lequel commenceront les mesures sera identifié. Un piquet sera également disposé à chaque centre de placette afin de bien identifier les 4 arbres inclus dans la zone de suivi.

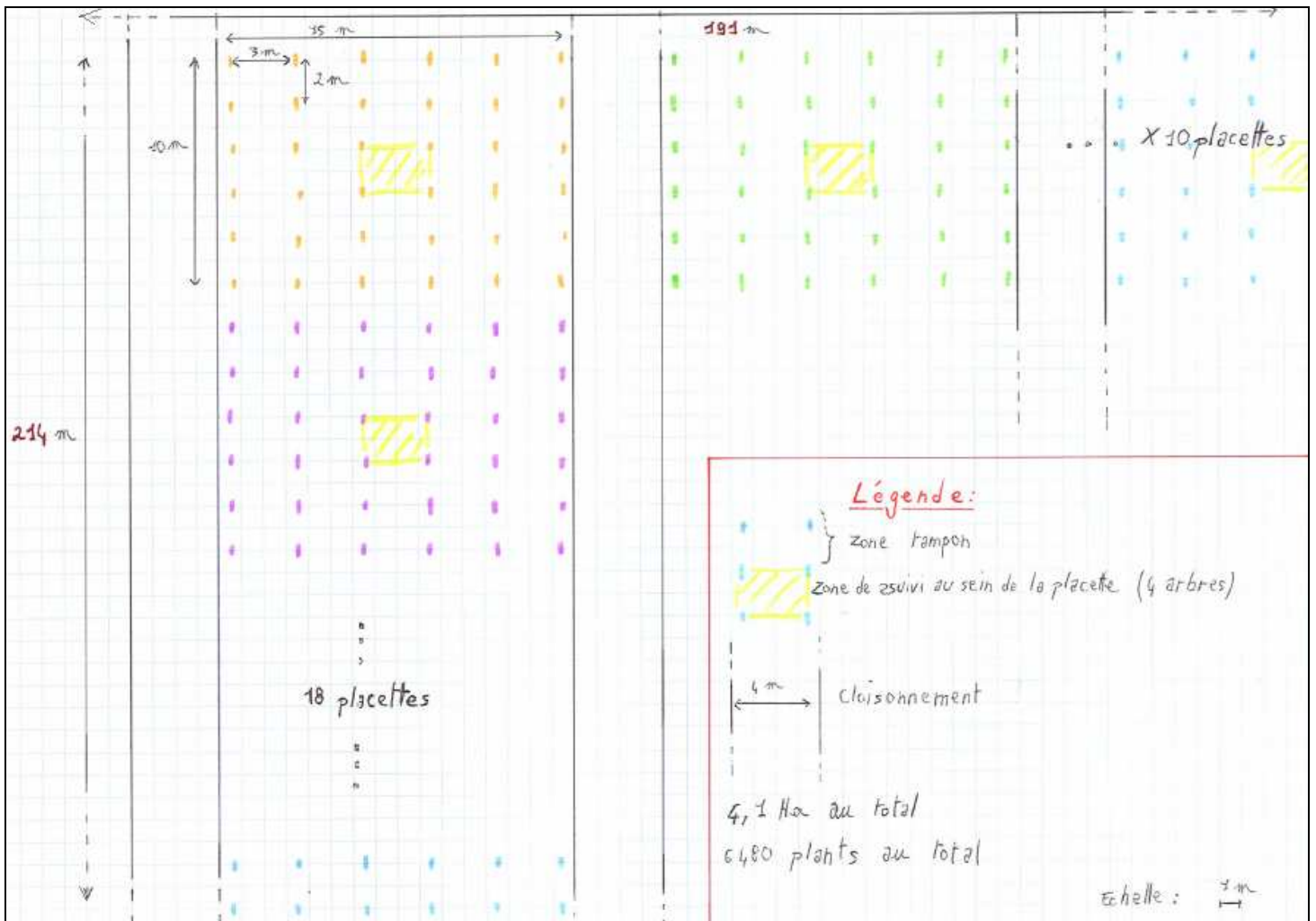
**Surface :** Dans l'expérimentation, chaque arbre sera espacé de son voisin de 2 m par 3 m et on comptera le même espacement entre chaque placette ce qui nous donnera une densité de plantation de 1667 plants/hectare (*référence : Guides sylvicoles des CRPF*). En installant un dispositif de forme rectangulaire (18 placettes par 10), on obtiendra ainsi une surface de 408 ares soit 4,1 hectares. Dans notre cas il nous faudra donc un site de 5 hectares minimum.

### → Répartition des plants

|  |               |
|--|---------------|
| <b>Nombre de plants mesurés par placette :</b>             | 4             |
| <b>Nombre de plants tampons par placette :</b>             | 32            |
| <b>Nombre total de plants par placette :</b>               | 36            |
| <b>Nombre d'essences par placette :</b>                    | 1             |
| <b>Nombre d'essences à tester :</b>                        | 8 + le témoin |
| <b>Nombre de placettes par essence :</b>                   | 20            |
| <b>Nombre total de placettes :</b>                         | 180           |
| <b>Nombre de plants mesurés dans l'expérience :</b>        | 720           |
| <b>Nombre de plants de zone tampon :</b>                   | 5760          |
| <b>Nombre total de plants (expérience + zone tampon) :</b> | 6480          |
| <b>Nombre de plants prévus en regarnis :</b>               | ?             |

En cas de dépérissement il est prévu de regarnir uniquement la zone tampon afin de maintenir l'effet peuplement, et ce sur une période de 5 ans. Après quoi on cessera de regarnir la zone tampon même en cas de dépérissements. Il faudra également songer à noter, à chaque regarni : la date, l'identification de la placette et le nombre de plants réintroduits dans l'expérimentation.

## Organisation potentielle du site du test de comparaison d'essences



## IV-Coûts

**Tableau des coûts indicatifs de mise en place**

| Opérations   | Coûts HT   |
|--|--|
| Traitement de la végétation herbacée : broyage                                     | 180 à 450 euros/ha (selon la concurrence)          |
| Coupe rase de 5 Ha   | compensés par la vente du bois                     |
| Plantation   | 550 euros/ha                                       |
| Utilisation d'un râteau forestier pour dégager les rémanents                       | environ 200 euros/ha                               |
| Piquetage de 180 placettes   | environ 400 euros/ha                               |
| Matériel de piquetage : piquets et peinture (4 piquets aux angles et un au centre) | environ 2000 euros de matériel (6 euros le piquet) |
| <b>Total pour 5 Ha =</b>   | <b>10 000 euros maximum</b>                        |

*Source : projet LORRAINE et "guide de sylviculture des pineraies des plaines"*

## V-Suivi

### Périodicité des mesures

Les premières mesures seront faites après la première année de végétation sur tous les plants. Elles seront ensuite répétées chaque année pendant au moins 3 ans. La périodicité peut ensuite être allongée à 2 puis 3 ans. Les mesures de croissance seront impérativement prises hors période de végétation.

**Quels plants mesurer :** on mesurera les 4 arbres centraux de la placette sans prendre en compte l'état des arbres de la zone tampon.

### Types de mesures

3 à 4 paramètres seront impérativement à relever sur chaque plant mesuré (ici 4 par placettes) :

- L'état sera décrit de la manière suivante : vivant ou mort ou encore vivant mais présentant un problème sanitaire. La notation des problèmes sanitaires sera faite au moyen d'un code comportant 5 lettres (pour l'organe atteint et le symptôme) et un chiffre de 0 à 5 (pour la quantification). Par exemple un frottis de gibier atteignant de la moitié aux  $\frac{3}{4}$  du tronc sera noté TECOR 3 (pour Tronc/écorçage/niveau 3). Le tableau suivant résume les notations possibles.

| Note quantitative du problème sanitaire | Correspondance en fréquence   | Correspondance en % équivalent |
|---|-------------------------------|--------------------------------|
| 0                                       | Nulle ou très faible          | 0 à 5%                         |
| 1                                       | Faible                        | 6 à 25%                        |
| 2                                       | Modérée                       | 26 à 50%                       |
| 3                                       | Importante                    | 51 à 75%                       |
| 4                                       | Très importante               | 76 à 95%                       |
| 5                                       | Toute la partie est concernée | 96 à 100%                      |

Attention pour attribuer la note quantitative à l'effet opérateur ! Il faut veiller si il doit y avoir changement d'opérateur à ce que l'opérateur initial effectue les premières mesures avec celui qui prend le relais afin que se dernier puisse s'étalonner.

| Organe                | Symptôme  | Code  |
|-----------------------|---|-------|
| Feuilles ou aiguilles | consommation  | FCONS |
|                       | changement de couleur (partielle, par taches ou totale) | FCOUL |
|                       | changement de forme (y compris réduction de taille)     | FFORM |
|                       | manque (ou chute)                                       | FMANQ |
| Bourgeons             | consommation  | BOCON |
|                       | dessèchement  | BODES |
| Branches              | dessèchement (y compris galeries sous-corticales)       | BMORT |
|                       | déformation (chancre, nécrose corticale...)             | BDEFO |
|                       | écorçage  | BECOR |
|                       | manque (y compris bris)                                 | BMANQ |
| Tronc                 | dessèchement (y compris galeries sous-corticales)       | TDESS |
|                       | déformation (chancre, nécrose corticale, fente...)      | TDEFO |
|                       | écorçage (gibier)                                       | TECOR |
|                       | blessure (mécanique)                                    | TBLES |

Source : Guide d'expérimentation.

- La hauteur est à prendre pour chaque plant, du sol jusqu'à la base du bourgeon le plus haut de l'arbre, avec une règle au cm près puis, à partir d'1 m, avec une perche au dm près et après 10 m au dendromètre au dm près.
- La circonférence sera prise à 1,30 m dès que les  $\frac{3}{4}$  des arbres dépasseront 3m de hauteur. La mesure de circonférence relaie celle des hauteurs (avec une année de recouvrement). Celle-ci continue à être prise pour les arbres qui n'ont pas encore dépassé 1,30 m.
- La qualité de l'arbre sera représentée par une note de rectitude d'une part :

| Note de rectitude | Critères d'évaluation   |
|-------------------|---|
| 1                 | arbre droit sur toute la hauteur de la tige                     |
| 2                 | arbre droit sur au moins les 2/3 inférieurs de la tige          |
| 3                 | arbre droit sur au moins le tiers inférieurs de la tige         |
| 4                 | arbre n'ayant pas au moins le tiers inférieurs de la tige droit |



En complément, et si le gestionnaire l'estime nécessaire, la hauteur élaguée sera mesurée sur les arbres à partir de 10 ans.

*Recommandations : Il serait intéressant de noter également les événements climatiques locaux marquants!*

**Mode d'archivage des données :**

Il est impératif de stocker les données sur support informatique, selon les normes en vigueur au sein du réseau R&D de l'ONF.

**Travaux sylvicoles :** à titre indicatif, pour les placettes qui atteindront une hauteur dominante d'environ 15m pendant la durée du test (entre 15 et 25 ans selon les essences), et présentant une densité supérieure à 1000 tiges/ha, une 1<sup>ière</sup> éclaircie devra être réalisée de manière systématique (1 ligne sur 3) , de façon à abaisser la densité à 1000 tiges/ha (*Référence : P.DEMARCQ (ONF), O.PAIN (AFOCEL)*), en prenant garde de ne pas toucher aux lignes sur lesquelles poussent les 4 arbres mesurés. Le nombre d'arbre dans la placette sera alors abaissé à environ 21 arbres.

## **Annexe du protocole :**

### **Démarche à suivre si l'on souhaite introduire du matériel biologique forestier en France**

#### **>Réglementation**

1) Le code forestier donne une liste restrictive des essences et sources de semences et de plants dont il peut être fait commerce, la seule possibilité d'y déroger est de faire faire les travaux par ou sous le contrôle des organismes de recherche développement forestiers agréés (INRA, RD ONF, IDF) avec un protocole, une traçabilité et en informant les services forestiers d'Etat du lieu de plantation (contrôleurs des ressources génétiques à la DRAAF).

2) Pour les forêts faisant l'objet d'une certification gestion durable (PEFC pour les forêts domaniales françaises), on ne peut planter, sauf dérogation scientifique qui doit faire l'objet d'un dossier précis, que ce qui est prévu dans les documents d'aménagement locaux, ce qui exclut les nouvelles essences et provenances.

*Il est donc primordial que cet essai soit réalisé dans le cadre d'un partenariat entre l'UT de Verdun et le pôle R&D de Nancy.*

3) Au titre de la prévention des risques sanitaires, les introductions doivent être faites dans les règles de la police phytosanitaire avec des autorisations d'importation et des documents officiels émis par le pays d'origine. Ceux-ci sont variables selon les pays et les espèces : il faut donc au moment de lancer le projet se renseigner auprès des autorités des pays concernés sur les mesures à suivre.

#### **Contact pour le Maroc :**

ONPV  
Direction de la protection des végétaux  
Contrôles techniques et répression des fraudes  
Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire  
Avenue de la Victoire, B.P. 1308  
RABAT (Maroc)  
Tel: +212 7771547  
Fax: +212 7770049

#### **Contact pour l'Algérie :**

Direction de la Protection des Végétaux et des Contrôles Techniques  
Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural  
12 Boulevard du Colonel Amirouche  
ALGER  
Tel: 213/23 50 31 73  
Fax: 213/23 50 31 77

## Annexe 11 : Les adaptations sylvicoles à mettre en place pour faire face au changement climatique

| Conseils sylvicoles  | ...pour faire face à : |                    |
|--|------------------------|--------------------|
|  | Plus de croissance     | Plus de sécheresse |
| <b>Gestion des peuplements</b>                                       |                        |                    |
| Récolte anticipée des peuplements à risques                          |                        | X                  |
| Raccourcissement de l'âge d'exploitabilité                           | X                      | X                  |
| Intensification en futaie régulière (éclaircies précoces et fortes)  | X                      | X                  |
| Diversification des essences (mélanges)                              |                        | X                  |
| Révision des techniques d'exploitation en station pauvre (rémanents) | X                      |                    |
| Surveillance phytosanitaire  | X                      | X                  |
| Dynamisation des circuits de commercialisation                       | X                      |                    |
| <b>Reboisement</b>   |                        |                    |
| Choix judicieux du matériel végétal (essence, provenance)            |                        | X                  |
| Adaptation essence-station   |                        | X                  |
| Réduction des densités de plantation                                 |                        | X                  |
| Diversification des essences (mélanges)                              |                        | X                  |
| Travail du sol et contrôle de la végétation herbacée                 |                        | X                  |
| Surveillance phytosanitaire  |                        | X                  |

*D'après L-M.NAGELEISEN et al., 2010, « La santé des forêts », citant Bossy et al., 1994; Bastien et al., 2000; Roman-Amat, 2000 et divers auteurs*