

Livrable 8 : Synthèse Sapin de Nordmann



Abies nordmanniana ssp. nordmanniana

(Sapin de Nordmann, Sapin du Caucase)



Rédacteur principal : S. Fournier (ONF)
juillet 2024

Abies nordmanniana ssp. nordmanniana

(sapin de Nordmann ; sapin du Caucase)

Dans la littérature internationale, on le retrouve en anglais sous le nom vernaculaire de *Caucasian fir*, en turc *Doğu Karadeniz göknarı* (sapin de l'est de la Mer Noire). Mais l'évolution de la taxonomie de l'espèce et du nom latin au cours du temps peut créer des incertitudes dans l'interprétation de la bibliographie. La ou les sous-espèces *Abies bornmuelleriana*, *Abies nordmanniana subsp. equi-trojani* (sapin de Bornmüller ou sapin Equi-Trojani) font l'objet d'une fiche de synthèse séparée dans le projet REFER, cette décision n'est pas forcément représentative de l'état actuel des connaissances sur les sous-espèces de *Abies nordmanniana*.

Généralités sur l'espèce

Il existe 3 groupes de sapin Nordmann en Turquie : sapin de Nordmann, sapin de Bornmüller et sapin Equi-Trojani. Leur proximité morphologique, ainsi que les grandes capacités d'hybridation entre les populations des sous-espèces *nordmanniana* ont entraîné des changements réguliers du statut taxonomique des deux derniers. A ce jour, il existe toujours des incohérences taxonomiques entre UICN, American conifer society, Inventaire National du Patrimoine Naturel et l' Illustrated Flora of Turkey qui sont 4 sources reconnues. Les recherches génétiques et morphologiques menées en parallèle n'ont pas encore abouti à ce jour à un consensus scientifique sur la phylogénie de ce complexe d'espèces et du statut de sous-espèce distincte pour le sapin equi-trojani (Usta et Tavşanoğlu, 2023). Sans parti pris, on appellera donc dans cette fiche *Abies nordmanniana* l'ensemble des peuplements de sapin de sous-espèce *nordmanniana* de l'est de la mer Noire, et de nom vernaculaire *Caucasian fir* (ou *Doğu Karadeniz göknarı* en turc) dans la littérature.



Figure 1 : Aire de répartition du sapin de Nordmann en vert dans son aire naturelle de répartition (source : Caudullo et Tinner, 2016). En bleu, l'aire de répartition de *Abies bornmuelleriana*, en marron les populations de sapin equi-trojani (la population du Mont Uludağ est par ailleurs identifiée comme Bornmüller dans la plupart de la littérature).

L'aire naturelle du sapin de Nordmann s'étend dans les montagnes littorales du Nord-Est de la Turquie (chaîne pontique), petit et grand Caucase (Géorgie jusqu'au Kraï de Krasnodar dans le sud-est de la Russie) comme représentés en (Fig. 1) selon (Caudullo et Tinner, 2016). La limite de l'aire naturelle des sous-espèces est assez floue et est modifiée avec les évolutions de la taxonomie mais la limite nord-ouest est souvent fixée autour de la ville de Samsun sur la côte de la Mer Noire. Dans son aire d'origine, on le retrouve donc habituellement en moyenne montagne à des altitudes comprises entre 1000 et 2200 m. L'aire se caractérise par un climat montagnard et un gradient bioclimatique qui évolue côté turc entre l'océanique côté maritime de la chaîne pontique jusqu'au méditerranéen subhumide sur le piémont sud. Suivant ce même gradient, les hivers sont assez chauds à très froids, et la pluviométrie diminue drastiquement de 2000 mm à 550 mm dans l'intérieur des terres (Akman, 1982). Au nord-est de l'aire de répartition dans la chaîne du Caucase, les influences méditerranéennes, continentales, et subtropicales humides de la mer Noire coexistent sur le territoire. Elles sont dépendantes de l'altitude et de l'éloignement au littoral, mais l'aire est globalement très arrosée (1000 à plus de 2000 mm) avec des précipitations régulières pendant l'hiver et des températures douces (Grebenschikov et al, 1974). En revanche, les précipitations estivales restent toujours supérieures à 30 mm. De ce fait, à part les peuplements du sud de l'aire, les étages bioclimatiques du sapin de Nordmann sont globalement caractérisés par une pluviométrie très favorable à la croissance forestière. Bien qu'il

puisse tout de même mieux supporter les sécheresses estivales que le sapin pectiné, il reste plus sensible que les autres *Abies* méditerranéens et notamment le sapin de Bornmüller ou le sapin de Cilicie (*Abies cilicica*) qu'on trouve également en Turquie (Aussenac, 2002).

Le sapin de Nordmann apprécie les sols profonds, humides, bien aérés aux textures argilo-limoneuses ou limono-argileuses, mais à l'inverse du sapin de Bornmüller peut supporter une hydromorphie légère et temporaire hors de la saison de végétation. Au contraire du sapin de Bornmüller et du sapin de Cilicie qui sont considérés comme des espèces vulnérables au changement climatique en Anatolie à l'horizon 2050 (Usta et Tavşanoğlu, 2023), l'évolution des températures et des précipitations attendues dans la région du Caucase et des Alpes pontiques ne semble pas menacer particulièrement l'aire de répartition naturelle du sapin de Nordmann (Tüfekçioğlu et Tüfekçioğlu, 2013).

En France, le sapin de Nordmann a une vulnérabilité aux risques biotiques et abiotiques assez similaire à celle d'*A. alba*. Il est particulièrement sensible aux attaques de champignons (fomès, polypores, chancres, etc.) et à la pourriture des racines. Les étages montagnards où il est naturellement présent n'ont historiquement pas été influencés par des épisodes de feux importants, l'espèce n'est donc pas résistante aux incendies (écorce assez fine notamment). Par ailleurs, le sapin de Nordmann est très sensible à la pollution atmosphérique.

C'est une espèce sciaphile dans son aire d'origine où il est majoritairement et facilement conduit en régénération naturelle. On le trouve en majorité dans des systèmes sylvicoles mélangés gérés avec *Picea orientalis*, *Fagus orientalis* ou encore avec du pin sylvestre notamment sur les stations plus sèches du sud de l'aire. De la même manière que le sapin de Bornmüller, les individus juvéniles sont très sensibles au gel tardif et aux canicules. De ce fait, quand il est régénéré artificiellement en Turquie, la plantation avec abri latéral est privilégiée (plantations par bandes notamment) par rapport aux plantations en plein. Il est planté avec des densités assez importante (2500 plants/ha en plein, 4000 à 5000 plants/ha par bandes). Sur station adaptée, on peut attendre des bons taux de reprise et les services forestiers turcs (OGM) considèrent une plantation de sapin de Nordmann réussie à partir de 80% de survie. En Géorgie, les populations de Sapin de Nordmann représentent la première ressource résineuse du pays devant l'épicéa et sont en majorité non-gérées ou possèdent le statut de forêt de protection. Cette ressource est donc plutôt âgée, 23% des forêts a un âge supérieur à 100 ans (Konstantine Bziava et David Gubeladze, 2003¹). En Géorgie, il peut atteindre des hauteurs très importantes de 50-60m, tandis que la période de végétation dans l'aire de répartition ne se limite qu'à un peu plus de 4 mois de croissance (Grebenschikov et al, 1974).

La productivité du sapin de Nordmann en Turquie est assez forte (9 à 13 m³/ha/an). Comme pour le sapin de Bornmüller, les peuplements turcs de Nordmann atteignent donc généralement un diamètre moyen de 40-45 cm entre 100 et 120 ans.

Introduit en Angleterre comme essence de production, en partie pour sa meilleure résistance à la sécheresse que *Abies alba*, sa productivité moyenne semble supérieure à celle de son aire d'origine, estimée entre 14 et 16 m³/ha/an (forestresearch.gov.uk). De façon similaire, dans les peuplements introduits en Bretagne un diamètre d'exploitabilité de 40 ou 50 cm est attendu après 70 à 80 ans (Hainry et Colombet, 2010). La branchaison importante de l'espèce en plantation rend l'élagage artificiel vivement conseillé pour améliorer la qualité de la bille de pied.

Néanmoins, en Europe il est cultivé en premier lieu en tant que sapin de Noël, où il occupe largement la tête du marché européen.

¹ <https://www.fao.org/3/XII/0608-B1.htm>

Généralités sur le réseau expérimental

Introduit en Europe occidentale au milieu du XIXe siècle, on le retrouve dans les placettes du projet REFER en arboretums et en boisements forestier. Bien que le sapin de Nordmann ne fasse pas partie de la liste des matériels forestiers de reproduction (MFR) éligibles aux aides de l'état, il peut être considéré comme le plus commun des sapins méditerranéens en France. En effet, de petites surfaces de l'espèce ont été plantées en forêt privée et publique tout au long du XXe siècle, et notamment en contexte de plaine à la place du sapin pectiné.

Par ailleurs, l'étude des sapins méditerranéens en recherche et en R&D a entraîné en France une vague d'installation de dispositifs expérimentaux dans les années 1970 par INRAE. Dans ceux-ci, le sapin de Nordmann, intervient dans le dispositif comme essence de comparaison par rapport à une autre espèce d'étude (ex. dans le réseau INRAE d'évaluation des provenances de sapin de Bornmüller). De plus, les données du dispositif de Couchey sont disponibles en accès libre sur la plateforme recherche.data.gouv dans le répertoire de l'infrastructure IN-SYLVA France (Deleuze *et al*, 2024). Les données des sites INRAE sont disponibles sur cette même plateforme (Fady *et al.*, 2023), et les analyses détaillées des sites dans le rapport (Fady et Scotti-Saintagne, 2023).

Dans l'arboretum de Roumare, chaque unité expérimentale a fait l'objet d'une fiche (correspondant à des répétitions de mêmes provenances). Par ailleurs, deux peuplements de sapin de Nordmann ont été mesurés en forêt de Chemiré-sur-Charnie sur des parcelles distinctes.

De ce fait, environ un tiers des sites du projet sont situées dans le Massif-Central (tous dans la moitié sud du massif, excepté l'Arboretum de Royat situé à proximité de Clermont-Ferrand), un autre quart sur les plateaux calcaires du Nord-Est (Côte d'Or, Aube, Haute-Marne, Haute-Saône). Le reste est localisé par ordre d'importance sur le pourtour méditerranéen, dans le centre du Bassin parisien, en Normandie et sur les marges des Pyrénées orientales. L'altitude moyenne des placettes est de 489 m (extrêmes : 115 m – 1820 m).

De ce fait, dans le cadre du projet REFER, 42 placettes réparties sur 32 sites ont été visitées. A celles-ci s'ajoutent 4 peuplements en gestion en forêt publique qui n'ont pas fait l'objet de fiches pour le projet. Les placettes mesurées sont gérées par trois organismes : ONF (19 placettes), CNPF-IDF (16 placettes) et INRAE (7 placettes). Elles peuvent être regroupées en quatre types selon l'objectif qui leur était assigné à l'origine (Tab 1) :

N.B. les valeurs marqués d'une * sont sous-estimées car l'information de la surface totale du peuplement n'a pas été renseignée pour toutes les placettes du type.

Tableau 1 : typologie des placettes de sapin de Nordmann du projet REFER

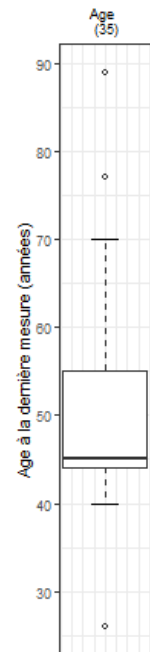
Typologie	Objectif	Nb de placettes	Surface totale (ha)
Dispo. expérimental génétique	Comparaison de clones ou de provenances	18	2,7
Dispo. expérimental sylviculture	Tester l'impact de diverses modalités sylvicoles	3	0,2*
Parcelle d'introduction	Qualifier le comportement potentiel de l'espèce	6	1,2
Parcelles en gestion	Non renseigné	15	55,4*

Surface moyenne des placettes

La surface totale des 42 sites visités est d'au moins 59,5 ha (la surface totale des peuplements n'est pas toujours connue), et est fortement influencée par la surface des peuplements en gestion. En effet, on a l'avantage pour l'étude du sapin de Nordmann de couvrir la gamme complète des types de sites possibles dans le projet, ils permettent de recueillir des informations différentes mais complémentaires. La moitié des placettes est de nature expérimentale, ce qui assure une bonne qualité des données disponibles pour l'espèce (séries temporelles longues). En revanche, ces sites ne sont généralement pas conçus avec une surface de mesure importante et ne sont donc souvent pas représentatifs de la dynamique de peuplement forestier, d'autant plus lorsque les individus deviennent matures. Ici, la surface médiane mesurée sur les sites expérimentaux génétiques ne dépasse pas les 400 m² (moyenne : 838 m²), tandis que la surface totale médiane du peuplement est légèrement inférieure à 600 m² (moyenne : 1513 m²).

Au contraire, les sites en gestion sont par leur surface mieux représentatifs de dynamiques forestières (surface totale moyenne supérieure à 5 ha) mais en général avec une plus grande hétérogénéité de terrain et des données historiques moins précises.

Bien que les parcelles d'introduction puissent être habituellement un intermédiaire intéressant entre ces deux types de placettes, dans le cas du sapin de Nordmann pour le projet REFER, les placettes sont de tailles tout à fait similaires à celles de dispositifs expérimentaux (surface totale moyenne : 2041 m² ; surface mesurée moyenne 800 m²).



Age moyen des placettes

L'âge moyen dans les placettes à la dernière mesure est de 52 ans. Pour 6 placettes mesurées dans le projet, l'âge exact du peuplement est inconnu dont le peuplement en gestion de Nuits-Saint-Georges planté entre 1911 et 1913 (peuplement le plus âgé visité), et le peuplement de Dampierre-sur-Linotte dont l'âge est estimé à 58 ans en 2023 sur la base d'un comptage de cernes. Plus d'un tiers des placettes visitées lors du projet dépasse les 50 ans mais on peut distinguer les arboretums de Royat et Font-Romeu, et le site de Souesmes car ils apportent également des références précieuses en peuplement plus matures avec des âges respectifs de 89, 76 et 77 ans lors de leurs dernières mesures à l'été 2022.

Densités de plantation et actuelles des placettes

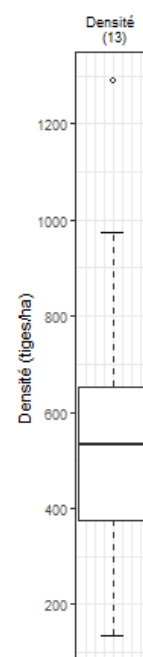
Pour 11 placettes issues de parcelles d'introduction ou de peuplement en gestion, la densité de plantation n'est pas connue. Par ailleurs, le caractère expérimental du réseau de sapin de Nordmann limite également les interprétations sylvicoles qu'on peut réaliser sur les densités de plantation. En effet, on peut faire l'hypothèse que la disponibilité en plants, le nombre d'unités expérimentales à installer et la surface de plantation disponible dans des contextes parfois compliqués ont

probablement été les facteurs décisifs pour décider des schémas de plantation. De plus, aucun site du projet ne compare les performances du sapin de Nordmann selon différentes densités de plantation.

Sur les 15 placettes dont la surface totale plantée avec l'essence est supérieure à 2000 m², six sites ont une densité de plantation intermédiaire de 1400 et 1900 tiges/ha et trois autres ont été installés avec une densité plus importante comprise entre 2000 et 2600 tiges/ha, ce qui est le plus souvent préconisé pour le sapin. Un autre dispositif expérimental en forêt privée a été installé à une densité basse de 1000 tiges/ha. Parmi les autres placettes plus petites, on peut noter un dispositif expérimental planté à 400 tiges/ha sous abri d'un peuplement adulte.

Par ailleurs, on constate que les taux de reprise peuvent être assez contrastés entre les sites mais également au sein d'un même site. Toutefois, les peuplements étant assez matures, il est difficile de retrouver des informations sur les années suivant la plantation. Parmi les quelques sites où des informations ont été retrouvées, certaines plantations ont bien réussies (arboretum de Saint-Lambert, arboretum de Roumare selon les unités expérimentales, Soustelle, Bois-Génard en parcelle 5 par exemple) avec des taux de survie au moins supérieur à 70% dans les années qui suivent la plantation, tandis que sur d'autres sites les taux de reprise sont assez moyens, aux alentours de 60% (Rouffiac-des-Corbières, Bois Génard site d'hybridation contrôlée, deux dispositifs du Treps) avec parfois des regarnis qui ont pu compléter de façon satisfaisante le peuplement (Couchey). Enfin, sur certains sites très contraignants, on peut dire que la plantation a échoué (La Livinière 21% de plants vivants en 2022, 24% à Pelenc-Montmeyan). Il est difficile de conclure sur les raisons de ces échecs, qui peuvent être diverses et interagir entre elles (mauvaise adaptation à la station, qualité des plants, défaut d'entretien de la plantation, etc.).

Comme évoqué précédemment, un certain nombre de placettes du réseau n'ont pas une surface mesurée suffisante pour donner des références dendrométriques à l'échelle du peuplement. Sur les 13 placettes qui le permettent, l'essentiel des densités actuelles est compris entre 375 et 650 tiges/ha. Ces diverses densités sont le reflet de densités de plantation contrastées, de taux de reprise assez moyens à l'installation dans certains sites, modulés dans certaines placettes assez âgées par plusieurs éclaircies qui n'ont pas été documentées. Des phénomènes de mortalité ont été identifiés dans certaines placettes et seront traités dans cette synthèse avec l'état sanitaire des placettes.



Ressources génétiques introduites dans les placettes

L'origine du matériel génétique introduit est connu pour le sapin de Nordmann dans la plupart des dispositifs expérimentaux à l'échelle de la provenance (aire d'origine ou France). Les provenances retrouvées sur les sites sont présentées dans le tableau (Tab 2) ci-dessous avec les informations sur l'origine des provenances à partir de (Fady et al, 2023) et de compte-rendu de mesures INRAE.

Dans les cas de l'arboretum de Saint-Lambert et l'arboretum de Roumare, le matériel génétique est issu de l'aire d'origine sans détail sur la localisation (provenance turque inconnue dans les deux arboretums, et provenance caucasienne inconnue pour le deuxième). Par ailleurs, les plants issus de graines récoltés sur l'arboretum d'Amance ont un risque d'être des individus hybrides car le site abrite d'autres espèces de sapin.

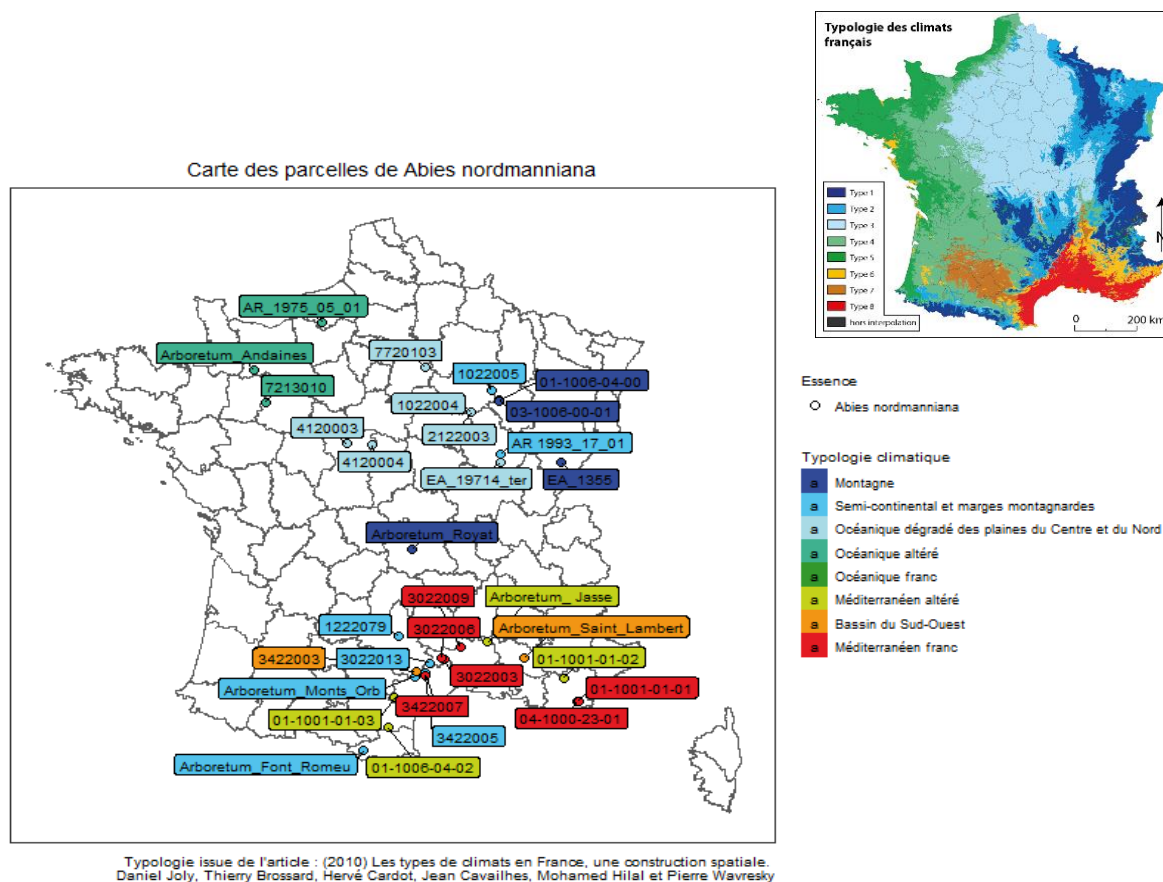
Pour les sites en gestion, le matériel génétique est en revanche d'origine inconnue.

Tableau 2 : Synthèse des provenances de sapin de Nordmann rencontrées sur les placettes du projet REFER (dans le cas où elles sont connues)

Provenance	Dispositif de test/site d'introduction	Information sur l'origine des provenances
Verger de Bout (Forêt de Gros Bois)	Couchey	Pays : France Département : Allier (03)
Combesalat	Rouffiac-des-Corbières	Pays : France Département : Hérault (34) Lat : 43,569. Long : 2.73864 Alti : 960m.
Amance	Bois-Génard, Rouffiac-des-Corbières, Interspécifique Treps, le Treps, Pelenc Montmeyan, la Livinière, Arboretum de Roumare	Pays : France Département : Meurthe-et-Moselle (54) Lat : 48,755. Long : 6,281. Alt : 240m
Krasnodar	Pelenc Montmeyan	Pays : Russie Région : kraï de Krasnodar
Tbilissi	Interspécifique Treps, Rouffiac-des- Corbières	Pays : Géorgie Région : Tbilissi. Lat : 41,68. Long : 44,79
İğdırdag	Interspécifique Treps, Rouffiac-des- Corbières	Pays : Turquie Région : Sivas Lat : 40.34444. Long : 37,85. Alti : 1750-1950 m.
Karanlık Meşe	Interspécifique Treps, Rouffiac-des- Corbières	Pays : Turquie Région : Artvin Lat : 41.15 Long : 42.08 Alti : 1700
Şebinkarahisar	Rouffiac-des-Corbières	Pays : Turquie Région : Giresun Lat : 40.83357 Long : 38.49116
Yaş Meşe	Rouffiac-des-Corbières,	Pays : Turquie Région : Gümüşhane

Distribution et caractéristiques bioclimatiques des placettes d'étude

La figure ci-dessous présente la distribution en France des parcelles de sapin de Nordmann visitées avec indication du bioclimat local :



Les placettes du projet REFER pour le sapin de Nordmann se situent dans une large gamme de types climatiques selon la typologie de climats simplifiée utilisée ici : 10 sites sont caractérisés par un climat méditerranéen (dont 4 en climat altéré qui se distingue du climat franc par des précipitations annuelles plus importantes). Le peuplement en gestion d'Avène dans l'Hérault est plutôt soumis au climat du bassin du Sud-Ouest, dont le cumul des précipitations est faible sur l'année en se démarquant du climat méditerranéen par une concentration des pluies plutôt sur la période estivale. C'est le cas aussi pour l'arboretum de Saint-Lambert dans le Lubéron, mais pour ce dernier le climat pourrait probablement plutôt être qualifié de méditerranéen.

Trois sites situés en Normandie et dans la Sarthe sont représentatifs d'un climat océanique altéré. Par ailleurs, cette influence océanique se dégrade pour 6 sites de plaine du Centre de la France.

Dans le nord-est, 11 sites rentrent dans les typologies des climats plus froids en France. Ils sont caractérisés par une température hivernale assez basse, un nombre de jours de gelées importants, et en climat semi-continental des précipitations estivales plus rares qu'en climat océanique. Toutefois, on peut requalifier le climat de l'arboretum de Font-Romeu dans les Pyrénées orientales en climat montagnard franc au côté de l'arboretum de Royat dans le Massif-Central. Les deux sites du Bois Génard et le peuplement en gestion de Dampierre-sur-Linotte pourraient à l'inverse plus justement être classés en climat semi-continental des plateaux calcaires du nord-est (Haute-Marne et Haute-Saône).

Le tableau (Tab 3) ci-dessous récapitule le nombre de placettes visitées par type climatique, et synthétise leur altitude moyenne et les valeurs moyennes de trois paramètres climatiques considérés

comme déterminants pour la survie et la croissance chez les arbres forestiers : le **déficit hydrique annuel**² (mm), la **température moyenne annuelle** (°C) et la **pluviosité moyenne annuelle** (mm).

N.B. les valeurs extrêmes entre parcelles sont indiquées entre parenthèses

Tableau 3 : Synthèse des types climatiques rencontrés sur les placettes de sapin de Nordmann et leurs caractéristiques

Type climatique	Nb. placettes	Altitude (m)	Déficit hydrique annuel IKS moyen (mm)	Température moyenne annuelle (°C)	Pluviosité moyenne annuelle (mm)
Semi-continental et marges montagnarde	7	799 (262-1820)	134 (47-204)	9,6 (5-11,9)	985 (671-1199)
Montagne	4	416 (285-740)	-75 (-540-105)	9,7 (8,8-10,3)	984 (775-1383)
Océanique altéré	3	186 (120-260)	87 (35-181)	10,6 (10,2-10,8)	902 (820-1012)
Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	6	204 (115-281)	184 (149-210)	11,1 (10,6-11,7)	715 (639-740)
Méditerranéen altéré	4	446 (175-580)	255 (185-350)	12,7 (12,2-13,8)	841 (641-1015)
Bassin du Sud-Ouest	2	582 (473-690)	224 (211-237)	11,7 (11,1-12,2)	792 (755-828)
Méditerranéen franc	6	495 (309-600)	170 (102-205)	12,5 (11,9-13)	1131 (964-1373)

Les trois graphiques ci-dessous présentent la répartition des placettes de *Abies nordmanniana* en fonction des variables IKS TMIa^{3,5} et DHYa⁴, projetés sur le nuage des points forêt de l'IFN, dont la couleur varie en fonction des trois scénarios climatiques⁵ envisagés :

- Gris : Climat actuel
- Jaune : 2070 pour un modèle moyen en scénarios 4.5 (limitant l'élévation de la température à 2,5°C à l'échelle mondiale)
- Orange : 2070 pour un modèle moyen en scénarios 8.5 (limitant l'élévation de la température à 4,4°C à l'échelle mondiale)

Ces graphiques montrent que toutes les placettes d'*Abies nordmanniana* visitées sont situées dans l'enveloppe bioclimatique actuelle des placettes forêt IFN de l'espèce, et sont en majorité marquées par un déficit hydrique positif. On peut toutefois noter que 3 placettes mesurées possèdent des caractéristiques climatiques atypiques par rapport aux restes des points IFN en climat actuel, elles représentent donc des points d'intérêt importants. En effet, le site de Rouffiac-des-Corbières se situe dans une des zones où le déficit hydrique est le plus marqué actuellement en France, mais qui devrait devenir plus courant dans le futur. A l'inverse, le peuplement atypique en gestion de Dampierre-sur-Linotte est situé dans une zone où les bilans hydriques actuels sont très favorables à la production forestière, mais qui pourrait se retrouver en marge des contextes possibles dans un scénario

² Le **déficit Hydrique annuel** (mm) correspond au cumul annuel des déficits hydriques mensuels. Il caractérise le facteur limitant **manque d'eau**. Il est calculé en faisant un bilan cumulatif mensuel des **précipitations** moins l'**évapotranspiration potentielle** (ETP), prenant en compte la **réserve utile maximale du sol**, et d'une façon simplifiée, le fait que les précipitations soient sous forme de neige ou non. Plus la valeur est positive, plus la contrainte sur les peuplements forestiers est forte.

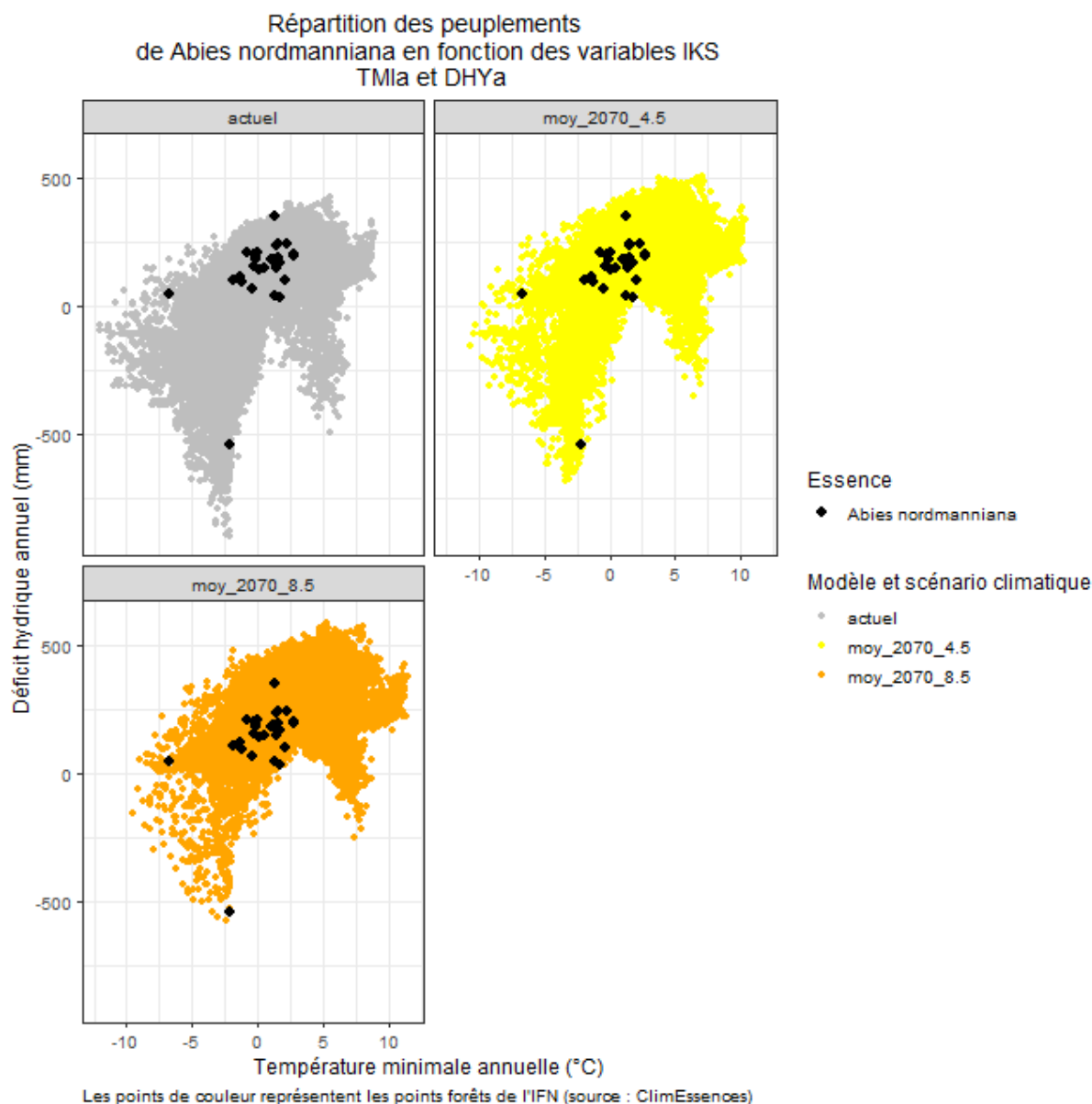
³ L'indicateur **TMIa** est la **température minimale annuelle** (température minimale mensuelle la plus faible sur l'année) en C. Il caractérise le facteur limitant **excès de froid**.

⁴ L'indicateur **DHYa** correspond au **déficit hydrique annuel** (défini plus haut)

⁵ Présentation complète du modèle IKS et des variables climatiques utilisées sur le site **ClimEssences** <https://climesences.fr/modele-iks/presentation/presentation-du-modele-iks>

climatique le plus pessimiste. Enfin l'arboretum de Font-Romeu se situe dans les zones où les températures minimales sont les plus basses en France.

Sur la base des deux scénarios d'évolution tendancielle du climat, ces placettes resteraient dans l'enveloppe bioclimatique future, tout en représentant encore des contextes climatiques extrêmes. Ce constat appuie l'intérêt de continuer à observer l'adaptation du sapin de Nordmann à moyen terme dans les placettes du réseau REFER.



Éléments sur les performances de l'espèce observées dans le réseau REFER

Etat sanitaire actuel des placettes

En faisant abstraction des problèmes de mortalité juvénile décrits précédemment, la majorité des sites d'*Abies nordmanniana* du réseau montre un très bon état sanitaire à l'heure actuelle, même dans certains sites avec un déficit hydrique marqué. Certains sites en revanche semblent confirmer la sensibilité de l'espèce aux champignons : dans les deux dispositifs du Treps et dans le dispositif de La Livinière, c'est la piste d'une pourriture racinaire qui est envisagée pour expliquer les dépérissements (expertise DSF attendue). Toutefois, dans ces derniers toutes les essences des dispositifs semblent

touchées par ces problèmes sanitaires (essences hors du genre *Abies* incluses). Dans le peuplement en gestion de Olmet-et-Villecun dans l'Hérault, des signes de dépérissements marqués (mortalité, rougissement) ont été observés mais avec une hétérogénéité spatiale importante. Certains individus de l'arboretum de Jasse montrent également des déficits foliaires. Par ailleurs, la présence de cônes en abondance sur certains sites (notamment de plaine) peut être un point de vigilance à surveiller, car ils pourraient être liés à des stress importants et être les premiers signes de dépérissements à venir.

Il est assez difficile d'établir les causes de ces quelques problèmes sanitaires. On peut faire l'hypothèse qu'ils pourraient être liés à une mauvaise adaptation à la station et/ou à des causes sylvicoles (surcapitalisation) mais des études plus poussées seraient nécessaires notamment dans la description pédologique des sites.

Dans la suite de ce paragraphe, est présenté un bilan des mesures de croissance et de production prises sur les placettes de *Abies nordmanniana* du projet REFER. La distribution des performances est présentée sous deux formes :

- Diagramme en boîtes : la ligne centrale dans la boîte indique la médiane des données, le bas et le haut de la boîte montre les 25^e et 75^e quantiles. Les traits en pointillés qui s'étendent de la boîte et se terminent par une petite ligne horizontale ("moustache") représentent la variation attendue des données (1,5 fois l'intervalle interquartile).
- Nuage de points : distribution des performances en fonction de l'âge des placettes. La couleur du point correspond à un niveau de déficit hydrique⁶ (DHYa) indiqué par la légende.

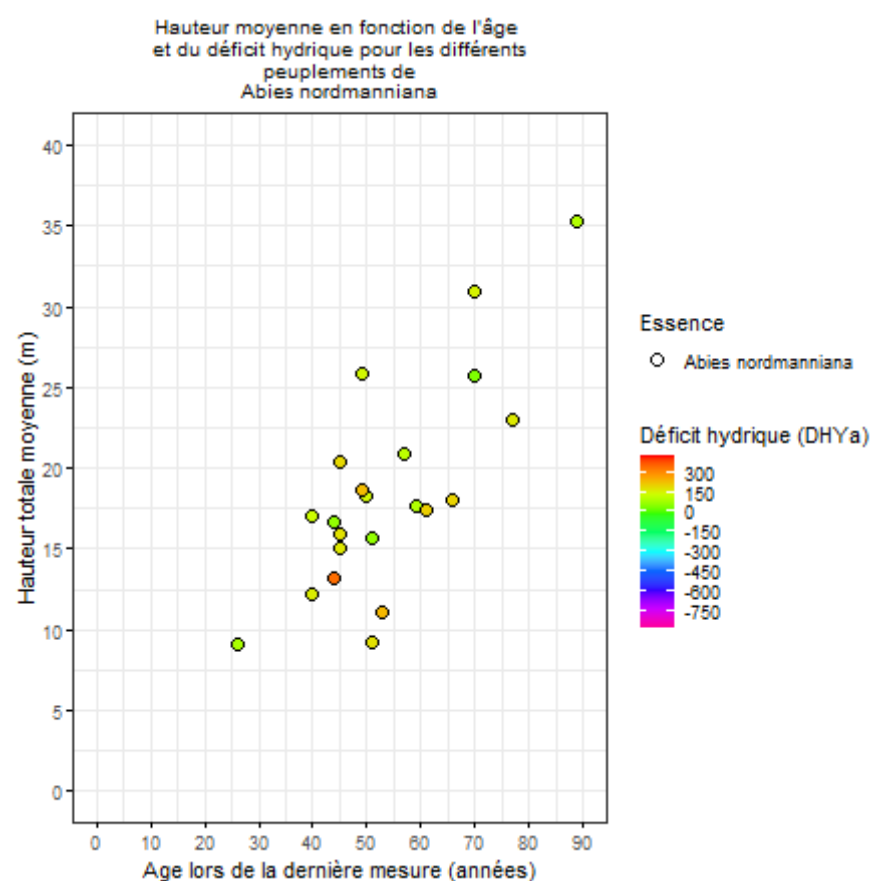
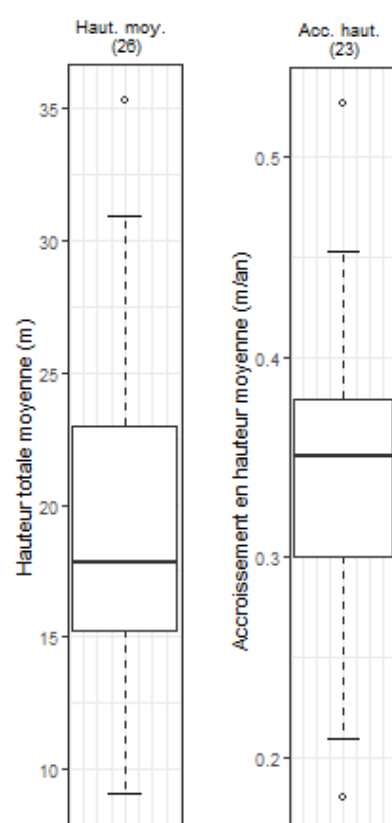
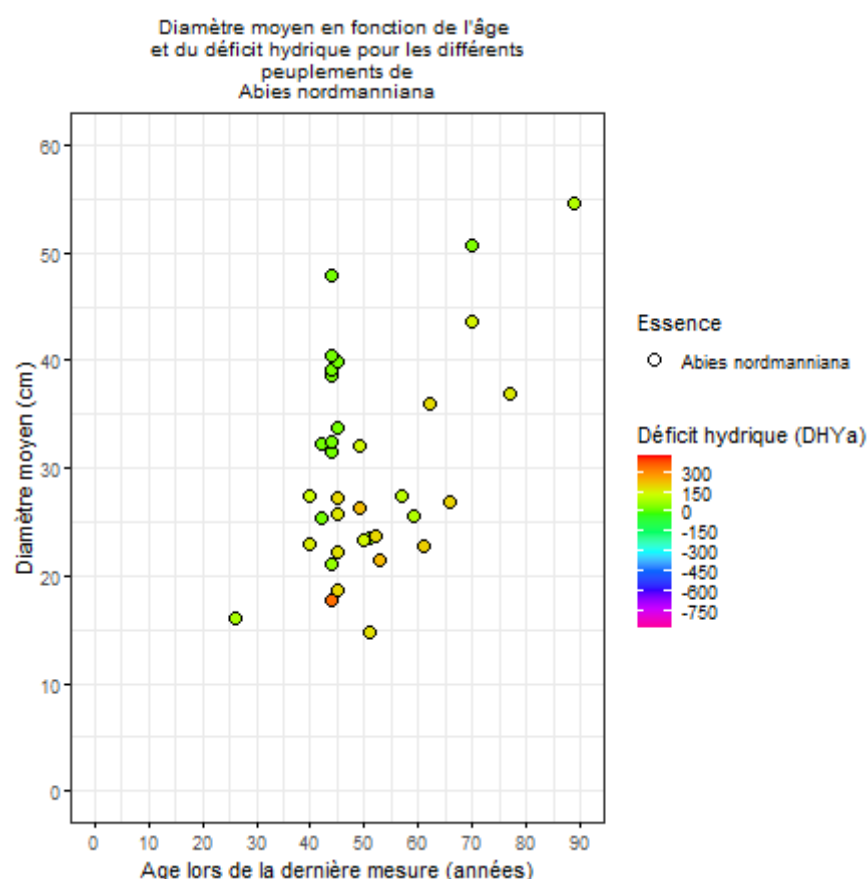
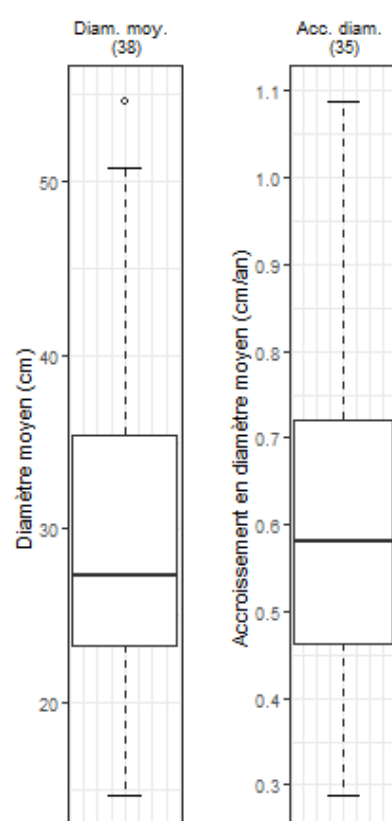
L'interprétation des variables dendrométriques pour le sapin de Nordmann s'avère assez délicate car les peuplements visités peuvent présenter beaucoup d'hétérogénéité. Dans le cas des peuplements mités, le potentiel de croissance peut être réduit par rapport à celui d'un peuplement plein (limite aux lois de Eichhorn⁷) et montrer des profils de tige différents (rapport hauteur/diamètre).

Croissance en diamètre et hauteur

Certains peuplements sont exclus des représentations graphiques car l'âge est inconnu ou la surface de mesures est inférieure à 500m².

⁶ Note : un déficit hydrique est indiqué par une valeur positive de DHYa, une absence de déficit hydrique est indiquée par une valeur négative DHYa.

⁷ Note : la production totale d'un peuplement équiennne monospécifique ne dépend que de sa seule hauteur dominante et est indépendante de la sylviculture appliquée, loi valable seulement si la densité n'est pas trop réduite.



On observe une grande hétérogénéité dans les diamètres et les hauteurs mesurés à un âge donné, même intra-site entre les différentes répétitions : par exemple le diamètre est réparti entre 25 et 47 cm sur les 10 placettes de l'arboretum de Roumare (installées entre 1974 et 1976) avec un effet du bloc environnemental qui semble plus significatif sur le dispositif que l'effet de la provenance (et quasi-absence de déficit hydrique).

On semble observer une influence entre le diamètre à un âge donné et le déficit hydrique dans les placettes mesurées (mais à relativiser par rapport aux sylvicultures réalisées). La relation entre le déficit hydrique et la hauteur moyenne est moins évidente, mais semble tout de même exister.

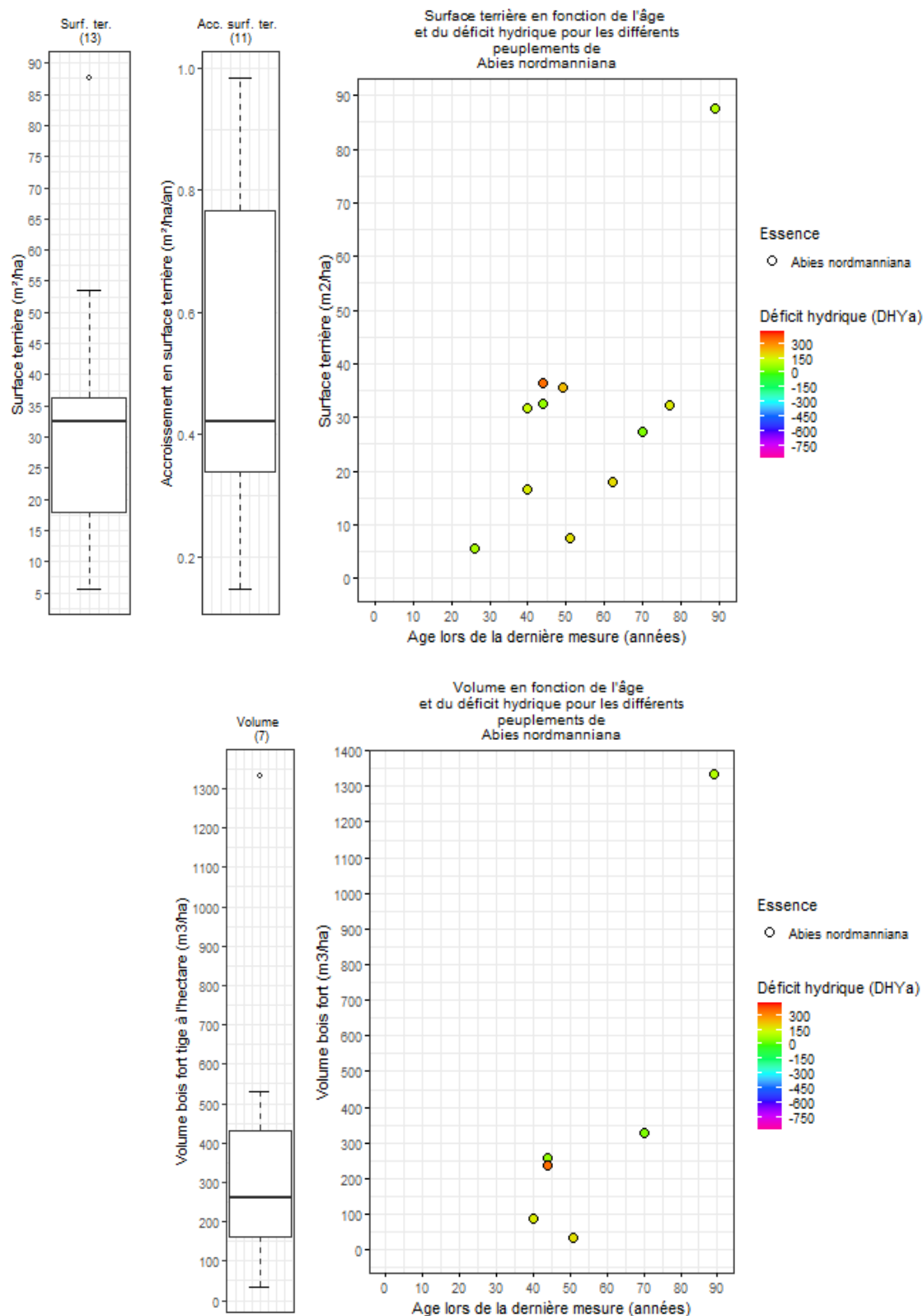
Les sites de la moitié nord de la France ont globalement montré des croissances en diamètre soutenues de à 0,6 à 1 cm/an mais qui pourraient être fortement dépendantes des précipitations annuelles comme illustrées par les largeurs de cernes observées ci-dessous.



Figure 2 : Photographies de souches observées sur les sites de Dampierre-sur-Linotte (à gauche) et des Marêts (à droite). La flèche rouge montre un ou plusieurs cernes de largeur limité suivi les années suivantes de cernes larges.

Surface terrière et volume

Assez peu de placettes de sapin de Nordmann visitées nous permettent d'avoir des données de capital à l'échelle d'un peuplement. On peut toutefois observer que les peuplements en dessous de 20 m²/ha (ou 100 m³/ha) semblent peu capitalisés pour leurs âges respectifs, ce qui pourrait être expliqué par différentes raisons : mauvais taux de reprise (Pelenc-Montmeyan) et/ou mauvaise adaptation à la station, potentielles éclaircies très dynamiques, mais encore fin du stade d'installation en cours pour le site de Couchey.

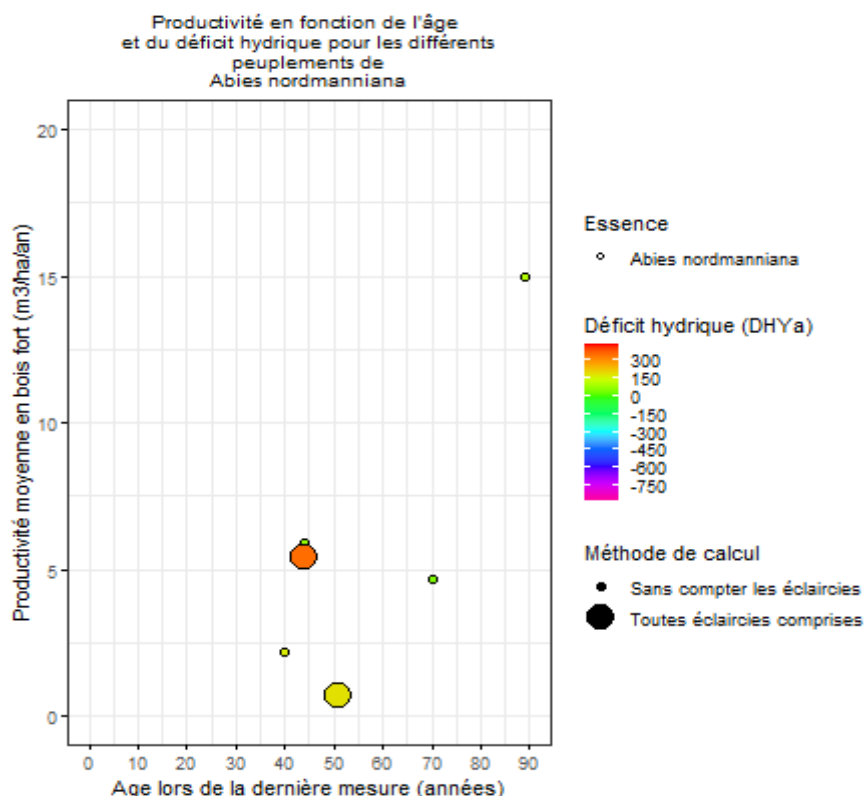


A l'inverse, on peut noter le capital très important dans l'arboretum de Royat (calculée à 88 m²/ha ou 1330 m³/ha). Bien que la parcelle soit en effet très dense et n'ait vraisemblablement pas connu d'éclaircies régulières, la valeur de surface terrière semble ici surévaluée et pourrait s'expliquer par une surface d'échantillonnage trop restreinte par rapport au diamètre moyen des arbres (1300 m² échantillonné pour un Dg de 55 cm). Pour rappel, un filtre d'échantillonnage minimal de 500 m² a été

adopté pour les résultats dendrométriques à l'échelle du peuplement pour cette même raison. Les 6 autres placettes sont, elles, dans des gammes de capital plus classiquement rencontrées dans les peuplements gérés d'*Abies*.

Productivité moyenne

De la même façon, les sites du projet REFER pour le sapin de Nordmann nous apportent des données très lacunaires pour l'étude de la productivité de l'essence, et plutôt dans des peuplements de la fourchette basse (au vu des diamètres rencontrés dans certaines placettes inutilisables ici) pour plusieurs raisons : surface de mesure assez faible, peuplements incomplets, historique de coupes inconnu ... Seules deux placettes possèdent toutes les caractéristiques nécessaires au calcul complet de production (où toutes les éclaircies sont documentées, ou en l'occurrence ici pas d'éclaircies réalisées). Toutefois, celles-ci restent des références dans des peuplements jeunes. Le peuplement de Rouffiac-des-Corbières semble se placer à l'intermédiaire avec une fertilité bonne et une fertilité moyenne par rapport aux sapinières des Pyrénées (par rapport au couple hauteur-âge ; Alger, 2011), bien que la production moyenne de 5 m³/ha/an semble un peu en dessous de ce qui pourrait être attendu mais qui pourrait être expliqué par un taux de survie assez moyen dès la plantation. De façon similaire, le site de Pelenc-Montmeyan a eu un taux de survie très faible et une production moyenne du peuplement à moins d'1 m³/ha/an, ce qui semble confirmer la mauvaise adaptation de l'espèce au site.



Parmi les placettes dont le calcul de production est incomplet et donc en partie sous-estimé, on retrouve l'arboretum de Royat, et les sites de Soustelle, Campestre-et-Luc, et Avène qui ont une croissance assez équivalente à une sapinière pectinée en bonne fertilité du guide sylvicole du Massif-Central (comparaison sur la base du couple hauteur-âge pour Royat et diamètre attendu pour les quatre sites ; Sardin, 2023). Bien que les productivités moyennes à l'échelle du peuplement semblent un peu faibles dans les trois sites en gestion pour ce niveau de fertilité, ces résultats semblent donc confirmer l'hétérogénéité de croissance observée entre les individus du peuplement.

La production moyenne sur le site de Dampierre-sur-Linotte en Haute-Saône reste assez incertaine. Elle semble relativement élevée car supérieure à 10 m³/ha/an aux environs de 56 ans (selon âge compté sur cernes).

Éléments sur les contraintes stationnelles de l'espèce observées dans le réseau REFER

NB. Une partie des sites du réseau a une description pédologique très incomplète ou dans certains cas, elle n'a pas été réalisée. L'analyse des contraintes stationnelles observées est donc ici lacunaire.

Environ les deux tiers des sites sont situés sur des sols assez profonds (50 à 90 cm), bien que pouvant être localement plus superficiels (30 cm environ) de texture à dominante limoneuse. Une grande partie de ces placettes se caractérise par des sols à texture limono-argileuse qui s'enrichissent en argile en profondeur, avec l'exception du site d'Olmet-et-Villecun à la texture argilo-limoneuse dès la surface. De plus, on peut retrouver une texture du sol plus équilibrée sur quelques placettes (dans ce cas limono-argilo-sableux) voire une texture plus enrichie en sable pour quatre sites (limono-sableux ou sablo-limoneux) qui s'avèrent alors assez pauvres chimiquement.

Les sols de ces placettes sont caractérisés par un pH plutôt acide de 4,5 à 5,5, où dans certains sites l'humus a été caractérisé par une minéralisation ralentie et une accumulation de la matière organique de type oligomull, dysmull ou hémimoder (à l'exception du peuplement des Riceys avec un pH de 6,5 et un humus de type eumull). En revanche, la charge en élément grossier peut être assez variée entre ces sites.

Un autre quart des placettes décrites pour le sapin de Nordmann est situé sur des sols superficiels à moyennement profonds (10 à 40 cm environ) caractérisés par une forte hétérogénéité spatiale, avec parfois une dalle calcaire ou une roche schisteuse plus ou moins dégradée affleurante. Bien qu'on ait assez peu d'informations pédologiques dans ces placettes pour le sapin de Nordmann, on peut y retrouver quelques éléments qui caractérisent des contraintes importantes : argiles très compactes sur dalle calcaire (Pelenc-Montmeyan, Bois-Génard), sol calcaire comportant une proportion non négligeable en éléments grossiers (Couchey) qui peuvent s'additionner à une forte pente (Nuits-Saint-Georges).

A ceux-là s'ajoutent deux sites en Sologne aux sols profonds à très profonds (1,80 m de profondeur prospectée sur le site de Mur-de-Sologne) mais très contraignants car de texture sableuse, puis remplacée par des argiles en profondeur. Ces sols sont assez loin de l'autécologie de l'espèce, bien que la rusticité du sapin de Nordmann ait tout de même permis au peuplement de s'installer.

Seule la description des sites d'Avène et de Mur-de-Sologne mentionnent explicitement des marques d'hydromorphie liée à la présence d'une nappe temporaire, à partir de 40 cm de profondeur dans le cas du premier. Parmi les autres sites (notamment ceux avec présence d'argile), il est possible que l'information n'ait pas été relevée ou que la profondeur de sol prospectée ait été trop faible pour voir apparaître des traces d'hydromorphie.

Cette brève description des contraintes stationnelles rencontrées nous permet de faire l'hypothèse que la majorité des placettes visitées dans REFER pour cette espèce est située dans des contextes où la réserve utile en eau est moyenne pour le développement de peuplements forestiers. C'est le cas des peuplements décrits en premier lieu sur les sols plus profonds. Dans le tiers des sites restants, la réserve utile y est plutôt limitante. Ce constat est cohérent avec les valeurs contrastées de déficit hydrique, extraits précédemment du modèle IKS pour caractériser le contexte pédoclimatique des placettes. Dans certains cas toutefois, les comparaisons des valeurs de déficit hydrique en absolu de deux sites ne sont pas faciles à interpréter (spécialement dans les valeurs intermédiaires autour de 150 mm). Il convient donc tout de même de souligner que dans des contextes où la variabilité stationnelle peut être importante (notamment la profondeur de sol) et influencer grandement la réserve utile disponible, il est possible que les facteurs de déficit hydrique IKS utilisés ici représentent mal la réalité des contraintes subies par les peuplements forestiers étudiés.

Comme indiqué dans la bibliographie, l'espèce a bien l'air d'être indifférente à l'acidité du sol, et de posséder une bonne tolérance aux stations calcaires même carbonatées malgré le plus faible nombre de placettes visitées concernées par ce second élément. Si la pluviométrie est suffisante (et en climat constant), l'espèce semble pouvoir s'installer sur des sols un peu plus superficiels, mais potentiellement avec un moins bon taux de reprise et une croissance plus limitée (Couchey, Bois-Génard par exemple). Néanmoins, quelques peuplements se situent dans des zones de déficits hydriques élevés, que le sapin de Nordmann semble tout de même avoir pu supporter (Rouffiac-de-Corbières par exemple). Dans ces peuplements, il serait intéressant de compléter la description stationnelle des sites, car la bibliographie de l'espèce dans son aire d'origine indique qu'un sol favorable peut permettre à l'espèce de supporter des sécheresses estivales marquées. En effet, un sol plus profond et/ou une exposition favorable pourrait être une hypothèse pour expliquer la bonne résistance du peuplement de Rouffiac-des-Corbières, mais il est impossible de l'affirmer à l'heure actuelle. L'évolution de ce peuplement serait intéressante à suivre alors que les fortes sécheresses répétées ces deux dernières années dans le massif des Corbières pourraient déclencher un seuil de mortalité pour le sapin de Nordmann.

Enfin, la capacité de l'espèce à supporter des sols à engorgement léger et temporaire hors saison de végétation le distingue du sapin de Bornmüller. Cette caractéristique a été observée au moins sur deux sites du projet. Toutefois, si on réserve l'introduction de sapins aux zones de montagne et de marges montagneuses dans les stratégies d'adaptation au changement climatique (altitude au moins supérieure à 600 m), les contextes sont rares où le sapin de Nordmann pourrait être mieux adapté qu'une autre espèce d'*Abies* sur le critère de sa tolérance à l'hydromorphie. En effet, les sols à hydromorphie légère ne représentent que 3% des surfaces de forêts de montagne selon l'IGN.

Perspectives de récoltes d'échantillons de bois

Sur les parcelles visitées, 36 placettes sont propices à être des sources d'échantillons de bois dont 27 immédiatement, tandis que les 7 autres placettes pourraient l'être à une échéance estimée entre 5 et 10 ans. Enfin 2 placettes pourraient s'y ajouter dans plus de 10 ans. Contrairement aux autres sapins méditerranéens dans le projet REFER, le diamètre moyen sur les placettes de sapin de Nordmann n'est pas un facteur limitant pour la récolte d'échantillons de bois. En effet, parmi les placettes exploitables immédiatement, les arboretums de Royat, Andaines, Jasse et Roumare (blocs 1 et 7.2) ainsi que les sites en gestion de Nuits-Saint-Georges et Thors possèdent des diamètres moyens supérieurs à 40 cm. Dans la catégorie des bois moyens, 12 placettes pourraient également permettre de récolter des échantillons de bois intéressants de diamètres compris entre 30 et 40 cm.

Parmi les peuplements moins intéressants (en termes de dimensions, notamment), des éclaircies sont toutefois programmées dans les années à venir, tandis qu'elles seraient nécessaires dans d'autres où la surcapitalisation actuelle est un facteur de vulnérabilité important. Par opportunisme, il serait donc possible de récolter des bois sur les sites de Souesmes, Chemiré-en-Charnie, et sur les arboretums de Mont Orb, et Roumare (blocs 2, 5, 7.1, 10).

Perspectives de récoltes de graines

Le sapin de Nordmann ne fait pas partie de la liste des essences soumises aux dispositions du code forestier. De plus les recommandations MFR privilégient l'emploi du sapin de Bornmüller au sapin de Nordmann pour la constitution de plantations forestières, ce qui est confirmé par l'étude sur le sapin de Bornmüller de Fady B, Scotti-Saintagne C (2023).

De ce fait, la récolte additionnelle de graines de l'essence n'est pas forcément nécessaire pour répondre à une demande qui reste très limitée pour un usage forestier. Toutefois, dans un cas hypothétique où une récolte de graines de l'espèce serait nécessaire, les sites en gestion de Dampierre-sur-Linotte (70), Campestre-et-Luc (30), Les Marêts (77) et Avène (34) pourraient être intéressants. Ces quatre peuplements sont en bon état sanitaire et de qualité intéressante.

Propriétés et utilisation du bois

Il reste assez difficile trouver des données relatives aux propriétés physiques et mécaniques propres au bois de *A. nordmanniana* en France, bien qu'elles soient tout de même plus abondantes que pour les autres sapins méditerranéens. En revanche, la littérature turque en sciences du bois, généralement peu traduite en anglais, est moins fournie sur cette sous-espèce que pour le sapin de Bornmüller, même si dans certains articles le sujet d'études entre les deux peut parfois prêter à confusion. C'est une essence de première importance pour la filière bois dans le nord de la Turquie où il est utilisé pour des usages divers (construction, ameublement, placage, caisserie, bois de chauffage, etc.). Le bois de sapin de Nordmann est blanc jaunâtre, non-durable, à aubier non-différencié comme celui d'*A. alba*. Les individus ont généralement une belle forme, un taux d'écorce moyen (environ 11% en volume) avec une bonne rectitude de la grume, soit un bois au fil généralement droit.

Il semble léger avec une infradensité de 330 kg/m³ (400 kg/m³ à 12% d'humidité ; Topaloglu et Erisir, 2018) contre respectivement 350-360 kg/m³ pour le sapin de Bornmüller (Özan, 2017 ; Küçüktüvek et Keskin, 2019) et 380 kg/m³ pour *A. alba* en France, et semble posséder des qualités mécaniques similaires à ces derniers (en résistance en compression tout du moins). Cette comparaison indirecte avec les caractéristiques technologiques moyennes de la ressource française de sapin pectiné et de quelques études turques sur le sapin de Bornmüller reste néanmoins à relativiser car les conditions de croissance et la méthodologie employée pour les tests mécaniques pourraient à elles seules expliquer la variabilité des valeurs. On peut noter que la longueur des fibres semble plus faible que celle du sapin pectiné : 2,67 mm (Topaloglu et Erisir, 2018) à 3,177 mm en moyenne contre 3,66 mm pour le sapin pectiné (Ilvessalo-Pfäffli, 1995).

En Bretagne, le bois de sapin de Nordmann a été plutôt utilisé dans la fabrication de palettes et plus rarement en menuiserie (Hainry et Colombet, 2010), mais les bois étaient encore issus de peuplements jeunes et caractérisés par une croissance rapide dans la région. On peut aussi faire l'hypothèse qu'une partie des bois de sapin de Nordmann commercialisés ces dernières années l'ont été sous le même nom commercial que *A. alba*.

Conclusion

Cette synthèse pour le sapin de Nordmann reste incomplète car une partie des placettes visitées pour le projet REFER n'est pas adaptée pour répondre réellement à des questions sylvicoles (dispositifs expérimentaux, surface échantillonnée trop faible, historique inconnu). De plus, il faut rappeler que le sapin de Nordmann n'est pas identifié comme espèce de reboisement d'intérêt particulier pour l'adaptation des forêts au changement climatique, et ne fait pas partie des MFR éligibles aux aides de l'état contrairement au sapin de Bornmüller, sans changement prévu de ce statut. En effet, l'aire d'origine de ce sapin est caractérisée par des conditions climatiques généralement favorables (pluviométrie très importante notamment), malgré la bibliographie qui lui accorde une meilleure résistance à la sécheresse que celle du sapin pectiné.

Néanmoins, les placettes de sapin de Nordmann dans le projet REFER ont l'avantage de représenter des situations de déficit hydriques plus contrastées par rapport aux autres sapins méditerranéens du projet, ainsi que certains sites âgés.

Par ailleurs, une partie des dispositifs semble avoir été installée dans des conditions très contraignantes qui témoigne ainsi des limites autoécologiques de l'espèce (sols très superficiels participant à un déficit hydrique marqué). Dans ceux-là, les taux de reprise et la mortalité qui a pu suivre y ont montré, sans trop de surprise, la mauvaise adaptation du sapin de Nordmann. Toutefois, bien que l'enjeu de mieux décrire l'autécologie de l'espèce en France soit assez limité, il semblerait intéressant de compléter les descriptions des placettes visitées sur stations plus favorables afin de réaliser des bilans hydriques précis et mieux identifier les seuils de mortalité du sapin de Nordmann au regard des autres sapins méditerranéens réputés moins exigeants. En effet, bien qu'on ait observé un état sanitaire et une croissance globalement satisfaisante, il est possible que la rusticité de l'espèce ait ses limites dans des conditions stationnelles et hydriques assez contraignantes en contexte de changement climatique (plateau calcaire du Nord-Est par exemple). Au vu des quelques dépérissements déjà observés, et de la fructification importante sur beaucoup de sites visités, le scénario d'une détérioration rapide de la ressource dans les années à venir est concevable à l'instar de celle observée pour le sapin pectiné. 22 signalements de mortalité ont été donnés au Département Santé des forêts (DSF) entre 2018 et 2022 sur des peuplements de sapin de Nordmann en plaine ou basse altitude en région Bourgogne-Franche-Comté (Vaufrey, 2023).

Du fait de tous ces éléments, on peut donc admettre qu'il n'est pas forcément nécessaire d'assurer une voie complémentaire de production de semences à usage forestier au vu de la demande et de la réglementation actuelle, bien que des peuplements visités dans le projet pourraient être intéressants dans cette intention.

En revanche, le bois de sapin de Nordmann semble avoir des caractéristiques physiques et des débouchés économiques équivalents au sapin pectiné avec lequel il peut se confondre lors de la commercialisation lorsqu'il a été récolté dans des conditions de croissance similaires. En plaine où il a été introduit, il montre une croissance très soutenue. Toutefois et en rappelant encore la vulnérabilité des *Abies* en basse altitude, ces conditions de croissance produisent du bois d'œuvre de qualité inférieure à ceux de sapins récoltés en montagne (largeurs de cernes notamment).

Contrairement aux autres *Abies* étudiés dans le projet, un nombre important de parcelles pourrait permettre de récolter des échantillons de bois de dimensions commercialisables pour des tests mécaniques. En complément, d'autres sites possèdent actuellement un capital sur pied important, des éclaircies seront donc réalisées dans les années qui viennent et représenteront des opportunités supplémentaires de récolte de bois. Bien que l'étude de l'espèce ne représente pas forcément une priorité, la réalisation de tests sur le sapin de Nordmann pourrait nous aider en premier lieu à positionner l'espèce en référence au côté du sapin pectiné pour une gamme de diamètre, pour les comparer aux résultats d'autres espèces de sapins méditerranéens dont la ressource n'est pas aussi développée en France.

Enfin, bien que l'implantation de l'espèce semble plus facile que pour d'autres espèces du genre *Abies*, elle reste un point faible non-négligeable de l'*Abies nordmanniana* : mauvais taux de reprise constatés dans certains contextes, croissance juvénile lente (jusque plus de 15 ans) et donc travaux de dégagements importants qui doivent être engagés pour réussir la plantation. En conséquence, ces différents points nécessitent un investissement financier lourd qui représente un frein pour les gestionnaires, d'autant plus sans financement public possible, même si par la suite une production proche de celle du sapin pectiné dans le contexte considéré et une régénération naturelle abondante semblent pouvoir être possibles. Bien qu'il n'existe qu'assez peu de référence dendrométrique en plantation pour les espèces de sapins (sapin pectiné inclus), ce constat semble pouvoir être généralisable au genre *Abies* qui est généralement plutôt conduit à partir d'une régénération naturelle. Des expérimentations de plantation sous abri ou en enrichissement en mélange dans une régénération naturelle acquise pourraient être intéressantes pour étudier si ces types d'implantation peuvent être mieux adaptés au caractère sciaphile du sapin juvénile.

Par ailleurs, les provenances de l'aire de répartition échantillonnée dans les dispositifs français sont réduites et assez mal documentées, tandis que les provenances françaises communément commercialisées sont artificielles et risquent d'être hybridées. Bien que l'échantillonnage de nouvelles provenances encore inconnues de l'aire d'origine pourrait être intéressant (notamment peut-être du piémont sud de la chaîne pontique turque), il est plus réaliste de croire que les différents efforts de recherche envisagés ci-dessus seraient en priorité tournés vers d'autres espèces de sapins méditerranéens plutôt que sur le sapin de Nordmann.

Références

Abt D. (2014) Arc jurassien : sapin et épicéa. ONF Office national des forêts, Paris ISBN : 978-2-84207-378-7

Alger E (2011) Sapinières des Pyrénées. ONF Office national des forêts, Paris ISBN : 978-2-84207-346-6

Akman Y (1982) Climats et bioclimats méditerranéens en Turquie. In: *Ecologia mediterranea*, tome 8 n°1-2, 1982. Définition et localisation des écosystèmes méditerranéens terrestres / Definition and localization of terrestrial Mediterranean biota. Saint-Maximin (France) 16-20/11/81. pp. 73-87. <https://doi.org/10.3406/ecmed.1982.1934>

Aussenac G (2002) Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change. *Annals of Forest Science*, 2002, 59 (8), pp.823-832. hal-00881894

Caudullo, G., Tinner, W., 2016. *Abies* - Circum-Mediterranean firs in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayán, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg.

Deleuze C, Richter C, Fournier S (2024) Comparison of species and provenances of fir, pine and cedar in the RDI-ONF network (Couchey- AR AR 1993_17_01), <https://doi.org/10.57745/IRIP73>, Recherche Data Gouv, V1,

Fady B, Scotti-Saintagne C (2023) Potentiel adaptatif du sapin de Bornmüller en France. INRAE. hal-04266113

Fady B, Scotti-Saintagne C, Cano M, Riou A (2023) Fifty years (1965-2023) of phenotypic trait data for Mediterranean *Abies* species from Turkey and the Caucasus in French common gardens, <https://doi.org/10.57745/WMRL9Z>, Recherche Data Gouv, V2

Grebenchikov O.S., Zimina R., Issakov Y, Panfilov D (1974) Les écosystèmes naturels et leur étagement dans le Caucase. In: *Revue de géographie alpine*, tome 62, n°2, 1974. pp. 169-190. DOI : <https://doi.org/10.3406/rga.1974.1367>

Hainry D, Colombet M. (2010) Bilan des introductions et perspectives d'utilisation du Sapin de Nordmann (*Abies nordmanniana*) en Bretagne. Centre Régional de la Propriété Forestière de Bretagne. https://bretagne-paysdelaloire.cnpf.fr/sites/bretagne-paysdelaloire/files/2022-01/sapin_nordmann.pdf

Ilvessalo-Pfäffli M.S (1995) Fiber atlas : Identification of paper-making fibers. Springer edition.

Sardin T (2023) Sylvicultures de l'épicéa, du sapin, du pin sylvestre, du hêtre, du douglas et du mélèze sur le massif central : memento sylvicole. ONF Office national des forêts

Topaloglu E, Erisir E (2018). Longitudinal variation in selected wood properties of oriental beech and caucasian fir. Maderas. Ciencia y tecnología. 20. 10.4067/S0718-221X2018005031101.

Tüfekçioğlu A, Tüfekçioğlu M (2013) Climate Change and Forestry in Turkey: Impacts and Adaptation Measures. <https://hdl.handle.net/11494/559>

Vaufrey F, (2023) Mortalités de sapins pectinés en région Bourgogne-Franche-Comté – point à l’hiver 2022-2023. Information Technique DSF . Pôle Bourgogne Franche-Comté https://draaf.bourgogne-franche-comte.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dsf_bfc_info_tech_sapinspectine_mars2023.pdf

ANNEXE 1 : Caractéristiques physiques et climatiques des parcelles de *Abies nordmanniana ssp. nordmanniana* visitées

Org.	Réf. essai	Nom essai	Alt. (m)	Age fin 2021	Densité init.	Bioclimat	IKS DHYa (mm)	IKS TMla (°C)	IKS SDJa (°C)	Temp. moy.	Somme pluvio.	Sol
ONF	Arboretum_Jasse	Arboretum_Jasse	175	NA	NA	Méditerranéen en altéré	242.8	2.282	5051	13.8	1015	NA
ONF	Arboretum_Andaines	Arboretum_Andaines	260	70	NA	Océanique altéré	44.7	1.305	3427	10.2	1012	Sol lessivé à limon argilo-sableux, moyennement épais et peu caillouteux, RUM sur 70cm = 100mm
ONF	Arboretum_Font_Romeu	Arboretum_Font_Romeu	1820	75	NA	Semi-continentale et marges montagnardes	47.3	-6.721	1800	5	671	Substrat sablo-limoneux assez profond et pauvre chimiquement
ONF	Arboretum_Monts_Orb	Arboretum_Monts_Orb	845	NA	2667	Semi-continentale et marges montagnardes	203.5	-0.243	3418	10.2	1199	NA
ONF	AR_1975_05_01	Arboretum_Roumare	120	46	1667	Océanique altéré	35.2	1.753	3690	10.8	874	Sol pauvre à texture limono-sableuse plus ou moins profond et caillouteux suivant la parcelle
ONF	AR_1975_05_01	Arboretum_Roumare	120	48	1667	Océanique altéré	35.2	1.753	3690	10.8	874	Sol pauvre à texture limono-sableuse plus ou moins profond et caillouteux suivant la parcelle
ONF	AR_1975_05_01	Arboretum_Roumare	120	47	1667	Océanique altéré	35.2	1.753	3690	10.8	874	Sol pauvre à texture limono-sableuse plus ou moins profond et caillouteux suivant la parcelle

Org.	Réf. essai	Nom essai	Alt. (m)	Age fin 2021	Densité init.	Bioclimat	IKS DHYa (mm)	IKS TMla (°C)	IKS SDJa (°C)	Temp. moy.	Somme pluvio.	Sol
ONF	Arboretum_Royat	Arboretum_Royat	740	88	NA	Montagne	105	-1.935	2897	8.8	775	Sol brun-acide sur granite et diorite, sol brun andique sur les formations volcano-sédimentaires, profondeur de sol variable et fertilité très bonne sur les formations volcano-sédimentaires
ONF	Arboretum_Saint_Lambert	Arboretum_Saint_Lambert	690	60	2060	Bassin du Sud-Ouest	211.4	-0.785	3741	11.1	755	NA
CNPF-IDF	3422003	Avene	473	49	2500	Bassin du Sud-Ouest	237.4	1.492	4250	12.2	828	Sol limoneux moyen jusqu'à 70 cm, plutôt meuble, avec une litière conséquente (hémimoder), nappe temporaire de 70 à 40 cm de profondeur, pH = 5, pas de calcaire
CNPF-IDF	3022013	Campestre et Luc	717	39	NA	Semi-continental et marges montagnardes	139.9	0.114	3564	10.6	1107	10 cm LAS 10% EG; ph 5,00
CNPF-IDF	7213010	Chemiré en Charnie	177	NA	1413	Océanique altéré	181.1	0.972	3631	10.8	820	Sol trop sec pour pouvoir faire un sondage pioche tarière
ONF	AR 1993_17_01	Couchey	500	27	1500	Semi-continental et marges montagnardes	93.8	-1.275	3244	9.7	894	Sol brun calcique, profondeur de 15 à 35 cm, facteur limitant faible réserve utile en eau
ONF	EA_1355	Dampierre-sur-Linotte	285	56	NA	Montagne	-540	-2.186	3139	9.3	1383	Sol brun, profondeur 50 à 60 cm, texture limoneuse. Texture grumeleuse. Humus de type mésomull

Org.	Réf. essai	Nom essai	Alt. (m)	Age fin 2021	Densité init.	Bioclimat	IKS DHYa (mm)	IKS TMla (°C)	IKS SDJa (°C)	Temp. moy.	Somme pluvio.	Sol
INRAE	01-1001-01-01	Dispositif intraspecific de sapin de Céphalonie - Le Treps	600	56	2852	Méditerranéen en franc	198.6	2.73	4572	12.5	1080	Siliceux et Schisteux par endroit
INRAE	01-1001-01-02	FD de Pelenc Montmeyan	580	56	1628	Méditerranéen en altéré	185.2	1.1	4371	12.5	833	Argileux sur dalle calcaire
INRAE	01-1001-01-03	FD de la Livinière	450	57	2551	Méditerranéen en altéré	243.6	1.575	4429	12.4	876	Schisteux
INRAE	04-1000-23-01	Interspecific ue Treps	600	49	4671	Méditerranéen en franc	197.6	2.735	4554	12.4	1035	Schisteux profond
CNPF-IDF	7720103	Les Marêts	151	48	2500	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	149	0.439	3620	10.8	639	80cm de Limon moyen et 15 cm LA, pH 5,5
CNPF-IDF	3422005	Les Plans	658	45	NA	Semi-continental et marges montagnardes	174.7	1.502	4074	11.9	1038	Sol à texture limoneuse (Lm) très caillouteux 50% éléments grossiers, meuble, pH 4,5, humus Oligomull, prospection envisagée à 80cm
CNPF-IDF	1022004	Les Riceys	281	44	2500	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	184	-0.125	3550	10.6	733	humus eumull, pH 6,5, texture 10cm AL 10% élément grossiers, 15cm AL 30% EG, 15 cm AL 50% EG, sol carbonaté, pplt bon état sanitaire
CNPF-IDF	3022006	Mandagout	575	49	2500	Méditerranéen en franc	148.8	1.393	4086	11.9	1160	30cm de limon moyen avec une forte charge en EG (25%), sol meuble et acide (pH : 5), humus de type hémimoder.

Org.	Réf. essai	Nom essai	Alt. (m)	Age fin 2021	Densité init.	Bioclimat	IKS DHYa (mm)	IKS TMla (°C)	IKS SDJa (°C)	Temp. moy.	Somme pluvio.	Sol
CNPF-IDF	2122003	Molesme	273	44	NA	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	197.3	-0.151	3562	10.6	734	station assez similaire que celle précédente, cailloux sont plus petits, la prospection est plus profonde, les argiles sont décarbonatées, pente d'environ 5 % exposé Nord, peuplement en bon état sanitaire
CNPF-IDF	1222079	Montrozier	789	56	1500	Semi-continental et marges montagnardes	118.8	-1.344	3219	9.7	1136	Sol à texture sablo limoneuse sur 15cm puis LIS sur 70cm de profondeur mais avec une augmentation progressive de la charge en cailloux : de 5 % à 40%; le sol est plutôt acide pH : (4,5). L'humus est de type Dysmull
CNPF-IDF	4120003	Mur-de-Sologne	115	62	1000	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	192.7	1.5	4028	11.7	702	Sable sur 90 cm puis argile sur 90 cm (avec hydromorphie de plus de 40%)
ONF	EA_19714_t er	Nuits-Saint-Georges	280	110	NA	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	210.2	0.002	3768	11.1	739	Pente supérieure à 50 %, éboulis rocheux, sol brun avec des éléments grossiers dès la surface, profondeur limitée de 5 à 15 cm, texture limoneuse, humus type oligomull, facteur limitant RUM faible.

Org.	Réf. essai	Nom essai	Alt. (m)	Age fin 2021	Densité init.	Bioclimat	IKS DHYa (mm)	IKS TMla (°C)	IKS SDJa (°C)	Temp. moy.	Somme pluvio.	Sol
CNPF- IDF	3422007	Olmet et Villegun	309	65	NA	Méditerrané en franc	204.6	2.723	4770	13	964	Sol assez peu profond à très profond, (30 cm à 90 cm en fonction des relevés pédologiques) de nature principalement argileuse, (texture argilo-limoneuse), le pH est de 5.00 et la station se situe sur une pente de l'ordre de 20 % avec de fortes variations selon les endroits
CNPF- IDF	3022003	Roquedur	445	58	NA	Méditerrané en franc	101.9	2.053	4518	12.5	1373	Pente 40%, Station Haut de versant, sol très limoneux avec 25% EG et acide (pH 4,5)
CNPF- IDF	4120004	Souesmes	125	76	1000	Océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord	172.6	1.3	3987	11.7	740	Sable sur 45 cm de profondeur
CNPF- IDF	3022009	Soustelle	438	39	400	Méditerrané en franc	168	1.74	4506	12.6	1171	Sol brun lessivé, acide pH 4,5, très caillouteux texture LAS
INRAE	03-1006-00- 01	Test de comparaison d'espèces Bois Génard - hybridation contrôlée des sapins du groupe méditerrané ens	320	55	2519	Montagne	67.1	-0.454	3453	10.3	889	n.d

Org.	Réf. essai	Nom essai	Alt. (m)	Age fin 2021	Densité init.	Bioclimat	IKS DHYa (mm)	IKS TMla (°C)	IKS SDJa (°C)	Temp. moy.	Somme pluvio.	Sol
INRAE	01-1006-04-00	Test de comparaison d'espèces Bois-Génard parcelle 5	320	48	2496	Montagne	67.1	-0.454	3453	10.3	889	argile compact sur calcaire en plaquette profondeur 10 à 40 cm
INRAE	01-1006-04-02	Test de comparaison d'espèces Rouffiac des Corbières	580	48	2025	Méditerranéen en altéré	349.7	1.234	4285	12.2	641	Terre de bruyère sur substrat gréseux, une bande argileuse à l'ouest
CNPF-IDF	1022005	Thors	262	69	1900	Semi-continentale et marges montagnardes	157.1	-0.333	3483	10.4	850	Limoneux sableux en surface puis enrichi en argile : 40 cm Lm, 30cm La, 20 cm Al ph 5,00

ANNEXE 2: Nature expérimentale et intérêt potentiel des parcelles de *Abies nordmanniana* ssp. *nordmanniana* visitées

Org.	Réf. essai	Nom essai	Type d'essai	Mat. Veg.	Age fin 2021	Réf. croissance	Réf. production	Source échantillon de bois	Source matériel génétique	Source graines
INRAE	01-1006-04-00	Test de comparaison d'espèces Bois-Génard parcelle 5	Dispositif expérimental génétique	Provenances	48	oui		oui	oui	
CNPF-IDF	7213010	Chemiré en Charnie	Parcelle en gestion	NA	NA	oui		oui	oui	
INRAE	01-1001-01-03	FD de la Livinière	Dispositif expérimental génétique	Provenances	57	oui		oui	oui	
INRAE	01-1001-01-02	FD de Pelenc Montmeyan	Dispositif expérimental génétique	Provenances	56	oui	oui		oui	
INRAE	01-1006-04-02	Test de comparaison d'espèces Rouffiac des Corbières	Dispositif expérimental génétique	Provenances	48	oui	oui	oui		
INRAE	03-1006-00-01	Test de comparaison d'espèces Bois Génard - hybridation contrôlée des sapins du groupe méditerranéens	Dispositif expérimental génétique	Provenances	55	oui		oui		
INRAE	04-1000-23-01	Interspecific Treps	Dispositif expérimental génétique	Provenances	49	oui		oui		
INRAE	01-1001-01-01	Dispositif intraspecific de sapin de Céphalonie - Le Treps	Dispositif expérimental génétique	Provenances	56	oui		oui	oui	
CNPF-IDF	3022003	Roquedur	Parcelle en gestion	NA	58	oui			oui	

Org.	Réf. essai	Nom essai	Type d'essai	Mat. Veg.	Age fin 2021	Réf. croissance	Réf. production	Source échantillon de bois	Source matériel génétique	Source graines
CNPF-IDF	3022006	Mandagout	Parcelle en gestion	NA	49	oui	oui		oui	
CNPF-IDF	4120004	Souesmes	Dispositif expérimental sylviculture	NA	76	oui		oui	oui	
ONF	AR 1993_17_01	Couchey	Dispositif expérimental génétique	Comparaison d'espèces	27	oui	oui			
ONF	Arboretum_Saint_Lambert	Arboretum_Saint_Lambert	Parcelle d'introduction	Provenances	60	oui		oui	oui	
ONF	Arboretum_Monts_Orb	Arboretum_Monts_Orb	Parcelle d'introduction	Essence	NA			oui	oui	
ONF	AR_1975_05_01	Arboretum_Roumare	Dispositif expérimental génétique	Provenances	46	oui		oui	oui	
ONF	AR_1975_05_01	Arboretum_Roumare	Dispositif expérimental génétique	Provenances	48	oui		oui	oui	
ONF	AR_1975_05_01	Arboretum_Roumare	Dispositif expérimental génétique	Provenances	47	oui		oui	oui	
ONF	EA_1355	Dampierre-sur-Linotte	Parcelle en gestion	NA	56	oui		oui	oui	oui
ONF	Arboretum_Jasse	Arboretum_Jasse	Parcelle d'introduction	Essence	NA			oui	oui	
ONF	EA_19714_ter	Nuits-Saint-Georges	Parcelle en gestion	NA	110			oui		

Org.	Réf. essai	Nom essai	Type d'essai	Mat. Veg.	Age fin 2021	Réf. croissance	Réf. production	Source échantillon de bois	Source matériel génétique	Source graines
ONF	Arboretum_Font_Romeu	Arboretum_Font_Romeu	Parcelle d'introduction	Essence	75					
ONF	Arboretum_Andaines	Arboretum_Andaines	Parcelle d'introduction	Essence	70	oui		oui	oui	
ONF	Arboretum_Royat	Arboretum_Royat	Parcelle d'introduction	Essence	88	oui		oui	oui	
CNPF-IDF	3022009	Soustelle	Dispositif expérimental sylviculture	NA	39	oui				
CNPF-IDF	1222079	Montrozier	Parcelle en gestion	NA	56	oui		oui	oui	
CNPF-IDF	1022004	Les Riceys	Parcelle en gestion	NA	44	oui	oui	oui		
CNPF-IDF	1022005	Thors	Parcelle en gestion	NA	69	oui		oui		
CNPF-IDF	2122003	Molesme	Parcelle en gestion	NA	44	oui		oui		
CNPF-IDF	3022013	Campestre et Luc	Parcelle en gestion	NA	39	oui		oui	oui	oui
CNPF-IDF	7720103	Les Marêts	Parcelle en gestion	NA	48	oui	oui	oui	oui	oui
CNPF-IDF	3422005	Les Plans	Parcelle en gestion	NA	45	oui		oui	oui	oui
CNPF-IDF	3422003	Avene	Parcelle en gestion	NA	49	oui		oui	oui	oui
CNPF-IDF	3422007	Olmet et Villecun	Parcelle en gestion	NA	65	oui		oui		oui
CNPF-IDF	4120003	Mur-de-Sologne	Dispositif expérimental sylviculture	NA	62	oui		oui	oui	