

État des connaissances sur le paulownia

Un engouement récent en France
sur un genre peu connu

Jimmy Bonigen et Benjamin Cano





SOMMAIRE

1.	EN BREF, À RETENIR :	3
2.	BIOLOGIE	4
3.	HISTORIQUE ET DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS	6
4.	AUTÉCOLOGIE DU PAULOWNIA	8
4.1	CONDITIONS CLIMATIQUES	8
4.2	UN FORT BESOIN EN EAU	10
4.3	CONDITIONS ÉDAPHIQUES	13
5.	(SYLVI)CULTURE	13
5.1	TRAVAUX AVANT PLANTATION	13
5.2	LA PLANTATION	13
5.3	TRAVAUX SYLVICOLES (TAILLES, RECÉPAGE)	15
5.4	RÉCOLTE ET PRODUCTIVITÉ	16
6.	RISQUES SANITAIRES	19
6.1	RISQUES ABIOTIQUES	20
6.2	RISQUES BIOTIQUES	21
6.2.1	AGENTS PATHOGÈNES	21
6.2.2	INSECTES RAVAGEURS	28
7.	IMPACTS SUR L'ÉCOSYSTÈME	32
7.1	CARACTÈRE INVASIF	32
7.2	AUTRES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT	35
8.	VALORISATIONS	36
8.1	PROPRIÉTÉS DU BOIS	36
8.2	BOIS D'ŒUVRE	38
8.3	BOIS D'INDUSTRIE	38
8.4	BOIS ÉNERGIE	40
8.5	AUTRES USAGES	40
9.	ASPECTS LÉGISLATIFS ET FISCAUX EN FRANCE	42
10.	CONCLUSION	43
11.	ENTREPRISES CITÉES	44
12.	BIBLIOGRAPHIE	44

Crédits photos :
• Couverture :
© Jan Alonzo, Wikimedia
commons CC BY-SA 2.0
• photo sommaire :
Sophie Saint-Jore ©
CNPf

JUILLET 2025
© CNPF-IDF

1. En bref, à retenir :

- Groupe d'espèces du genre Paulownia se caractérisant par une **très forte dynamique de croissance** en condition culturale intensive (travail du sol, fertilisation, irrigation, traitements phytosanitaires, tailles).
- Groupe originaire d'**Asie de l'Est**. De nombreux retours d'expérience pour produire du bois à l'international notamment dans le Sud puis l'Est de l'Europe, très peu de recul en France sauf en horticulture (essence depuis longtemps implantée dans les parcs urbains).
- Développement depuis quelques années de plusieurs start-ups en France, spécialisées dans la vente et le conseil sur les paulownias.
- Besoins climatiques contrastés entre espèces, avec une tolérance au froid entre **29 °C et 0 °C**, limitant l'aire d'implantation d'un certain nombre d'espèces au Nord et en altitude. On note une sensibilité importante au vent et aux gelées tardives.
- **Arbres très exigeants en eau** (particulièrement les premières années), tout en étant sensibles à l'engorgement et aux sols lourds. À réserver aux sols filtrants et en régime hydrique non limitant. L'apport de fertilisation et d'irrigation est indispensable pour atteindre de bons rendements.
- Plantation à densité variable : entre 200 et 800 plants/ha pour produire du bois d'œuvre en **5 à 12 ans**, et entre 1 200 et 2 000 plants/ha pour la production de biomasse avec une rotation de **3 ou 4 ans**.
- Renouvellement par recépage :
 - 3 à 5 cycles pour la production de biomasse en très courte rotation ;
 - jusqu'à 9 cycles en rotation plus longue pour la production de bois d'œuvre avec la sélection d'une tige par cépée, suivie en taille et élagage pour produire du bois de qualité.
- Risques sanitaires biotiques très nombreux dans son aire naturelle et les aires d'introduction les plus anciennes (États-Unis, Australie, Europe centrale...). Nombre d'espèces citées dans cette synthèse = 35 agents pathogènes, 34 insectes ravageurs.
- Signalements de pathogènes (*Phytophthora* spp.) et/ou insectes ravageurs (*Halyomorpha halys*) potentiellement risqués pour le paulownia en France.
- Risques avérés de colonisation des écosystèmes patrimoniaux liés au caractère invasif de l'essence : grande capacité de dissémination des espèces naturelles
- **Bois très léger**, à exclure des usages nécessitant une bonne résistance mécanique. Bonne stabilité dimensionnelle, peu putrescible, facile à travailler, bon isolant thermique et peu inflammable.
- Usages variés du bois :
 - bois d'œuvre : ameublement, artisanat, skis, panneaux contreplaqués ;
 - usages industriels : laine de bois, papier, biopolymères ;
 - production d'énergie : bois de chauffage peu calorifique, granulé, intéressant pour la production de bioéthanol.
- Intérêts divers : ornemental, agroforesterie, engrais vert, vertus thérapeutiques, bioremédiation.
- Statut réglementaire des paulownias pas encore très bien défini en France. Une plantation de paulownias n'est actuellement pas admise dans les **documents de gestion durable**. Il n'apparaît pas dans les **arrêtés MFR** (matériels forestiers de reproduction) et n'est donc pas finançable au niveau des aides publiques. Il est également confronté à la réglementation européenne dans certaines conditions en forêt. Par ailleurs, la plantation en plein de paulownias n'est pas finançable par la **PAC**.
- Finalement, de par leur comportement héliophile, leur dynamique de croissance, les pratiques culturales qui leur sont adaptées et leurs valorisations historiques en agroforesterie, les paulownias apparaissent comme des **arbres à réserver au monde agricole**.

2. Biologie

Les paulownias, membres de la famille des paulowniacées (anciennement classés parmi les scrophulariacées), sont des arbres caducs à croissance rapide connus pour leur capacité à produire rapidement une biomasse importante (Tusevhaan *et al.*, 2023). Au moins **huit espèces de paulownias sont bien identifiées**, réparties en deux clades sur la base des caractéristiques de leurs inflorescences et de leurs fruits. Mais selon Danciu *et al.* (2016), il existerait plus de 20 espèces assez proches morphologiquement et génétiquement. Il n'y a aucun consensus sur le nombre exact d'espèces de paulownia d'après une référence de 2010 (Akyildiz and Kol, 2010).

Paulownia tomentosa en fleur à Baden-Baden (Allemagne).

© Gerd Eichmann, Wikimedia commons CC BY-SA 4.0



Parmi les espèces les plus couramment cultivées, on trouve *P. tomentosa*, *P. elongata*, *P. fortunei*, *P. fargesii*, *P. galbrata* et *P. catalpifolia* (Jakubowski, 2022) ainsi que des hybrides sélectionnés pour leur productivité et leur adaptabilité environnementale (Lugli *et al.*, 2023) tels que *P. elongata* x *P. fortunei* ou *P. fortunei* x *P. tomentosa*. Certains des hybrides les plus connus sont les clones *in vitro* « 112 » (*P. elongata* x *fortunei*), « Cotevisa 2 » (*P. elongata* x *fortunei*), « Sundsu 11 » et « Shan Tong » (*P. fortunei* x *P. tomentosa*). Il existe également des hybrides naturels, tels que *P. taiwaniana*, issu d'un croisement entre *P. kawakamii* et *P. fortunei* (Rana *et al.*, 2018).

Les hybrides de paulownia « Shan Tong » se distinguent par une croissance rapide, une bonne résistance au froid jusqu'à -27 °C et un bois léger. Ils sont largement utilisés dans la production de papier, de meubles et de biomasse, notamment en Pologne (Ptach *et al.*, 2017). Ils sont obtenus par multiplication *in vitro* des espèces *P. tomentosa* et *P. fortunei* (Jakubowski, 2022). Les paulownias peuvent atteindre une hauteur de 20 à 30 mètres dans des conditions naturelles et jusqu'à 50 mètres (Hassanzad Navroodi, 2013) pour un diamètre de plus de 2 mètres pour des arbres enregistrés en Chine, au sein de leur aire d'origine.

Les paulownias forment de nombreuses branches basses en milieu ouvert mais à plus forte densité, ils présentent une bonne rectitude de tronc. Ils développent en quelques années un système racinaire pivotant puissant qui leur permet de chercher de l'eau en profondeur, les rendant ainsi relativement résistants à la sécheresse **tant qu'ils ont accès à une nappe d'eau**, idéalement à moins de 2 m de profondeur. Pour autant, **ils restent des arbres réputés exigeants en eau, particulièrement les premières années**. Par ailleurs, leur importante surface foliaire couplée à une **faible capacité de régulation stomatique conduit à une forte évapotranspiration, qui les rend non économes en eau** (Danciu *et al.*, 2016). Leur capacité de croissance va de pair avec une **forte capacité d'absorption des éléments nutritifs, avec pour conséquence un fort besoin en**

éléments nutritifs pour maintenir des rendements de production soutenus, impliquant un risque d'appauvrissement des sols acides, mais aussi une potentielle valorisation de ces arbres pour la phytoremédiation des sols contaminés par les métaux lourds (Zhang *et al.*, 2020).

La reproduction des paulownias peut se faire par voie sexuée ou végétative, voie privilégiée dans le cadre de la production de biomasse (Dubova *et al.*, 2019) via le recépage du taillis. Ils produisent des graines abondantes après l'âge de 8 ans en moyenne. Ce sont de petites graines à ailettes qui se propagent par anémochorie. Les graines ont besoin de lumière et d'un sol aéré et frais pour germer.

Les paulownias présenteraient une activité photosynthétique en C₄, ce qui leur permet d'optimiser leur métabolisme photosynthétique en conditions d'ensoleillement (Tusevhaan *et al.*, 2023). Les plantes en C₄ ont une stratégie d'adaptation leur permettant de capturer efficacement le dioxyde de carbone dans des environnements chauds et secs, en utilisant des cellules spéciales permettant de réaliser la photosynthèse même en période de sécheresse en gardant les stomates fermées pour minimiser la perte d'eau pendant la photosynthèse. Certains promoteurs d'investissement dans les plantations de paulownia font référence à cette prétendue supériorité photosynthétique du paulownia, un avantage par exemple dans la séquestration de carbone. **Cependant la communauté scientifique n'est pas unanime sur le sujet**, et des scientifiques ont montré que certaines espèces (*P. tomentosa*, *P. fortunei* et *P. kawakamii*) n'utilisaient pas la photosynthèse en C₄ (Young and Lundgren, 2023). On retrouve bien des enzymes métaboliques liées à la photosynthèse en C₄ chez les paulownias comme pour d'autres plantes en C₃, mais leur niveau d'activité est plus faible que pour des plantes en C₄ (Georgieva *et al.*, 2018).

Les performances de croissance sont affectées par divers stress, tels que la sécheresse, le manque de lumière ou la salinité. Ces arbres sont des **héliophiles stricts**, incapables de pousser à l'ombre d'autres arbres. Ils présen-



Fruit de *Paulownia tomentosa*.

Mireille Mouas © CNPF

traient une bonne capacité d'installation en milieu ouvert, ce qui, couplé à leur croissance juvénile exceptionnelle, fait d'eux des **pionniers très vigoureux pouvant coloniser les zones ouvertes suite à des perturbations** (Starfinger *et al.*, 2003), présentant donc un **risque d'invasivité** qui sera investigué dans le chapitre 6.

La phénologie des paulownias est très dépendante de la température. Même plantés au printemps, les jeunes plants de paulownia commencent à pousser de mi-avril à début mai. Les jeunes arbres peuvent fleurir prématurément en cas de chaleur précoce en sortie d'hivers, exposés alors au risque de gelée tardive. Ils peuvent développer de nouveaux bourgeons ou rejets après un stress comme un coup de froid par exemple (Danciu *et al.*, 2016).

3. Historique et développements récents

Les espèces du genre *Paulownia* sont indigènes d'une vaste zone du continent asiatique, allant de la Corée au Vietnam et des contreforts du Tibet jusqu'à l'île de Taïwan.

Le nom "*paulownia*" a été donné à l'arbre en l'honneur d'Anna Pavlovna Romanova, grande-duchesse de Russie, et plus tard, reine des Pays-Bas, qui a parrainé la deuxième expédition de Philipp von Siebold au Japon en 1861 (Tusevhaan *et al.*, 2023).



Portrait d'Anna de Pavlovna.
© Jan Baptist van der Hulst

Ils sont cultivés depuis longtemps en Chine, où ils ont été au centre d'un vaste projet agroforestier dans les années 70. Près de 1,3 millions d'ha de terres agricoles ont été plantés avec cette essence. Zhu Zhao-hua et son équipe ont accompagné les agriculteurs dans ce projet en étudiant les paulownias sous de nombreux aspects (Zhu *et al.*, 1986). Ce chercheur chinois a notamment formé en 1974 un groupe de recherche national sur ce genre botanique (Gyuleva, 2008).

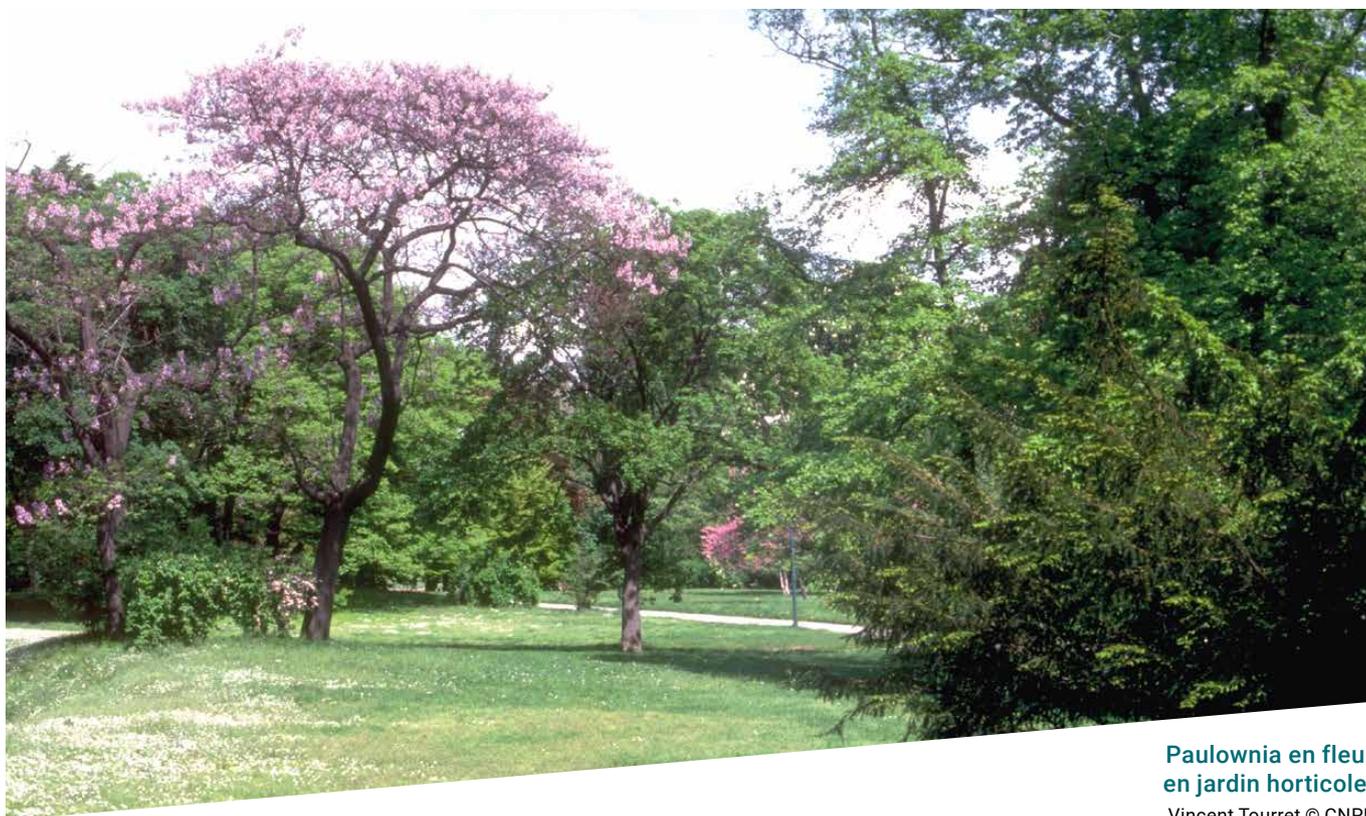
À ce jour, les paulownias ont été largement introduits au Japon, en Australie, au Brésil, en Europe et aux États-Unis, initialement comme arbre d'ornement et en agroforesterie. Aujourd'hui, environ 50 pays développent des programmes de reboisement avec certaines espèces et hybrides de ce genre (Berdón *et al.*, 2017). L'un des premiers pays à l'introduire à grande échelle a été les États-Unis, avec des paulownias (*P. tomentosa*) importés vers 1840.

En raison de sa croissance rapide, il a été surnommé "l'arbre du futur". Au cours des 150 dernières années, il s'est répandu dans les différents États, posant parfois problème en raison de son caractère colonisateur (Lugli *et al.*, 2023) conduisant à un débat animé sur toutes les espèces de paulownia (Tusevhaan *et al.*, 2023). Bien que son caractère envahissant

ait été reconnu dans certaines zones géographiques conduisant à son éradication dans certains États des États-Unis, sa réputation d'arbre extrêmement productif et ses nombreuses valorisations possibles font du paulownia un arbre encore très recherché. En dehors de son aire d'origine, les meilleures conditions de croissance se trouvent au Moyen-Orient et dans le Sud de l'Europe, où on l'a expérimenté depuis assez longtemps. **Les espèces pures initialement cultivées sont aujourd'hui de plus en plus remplacées par les hybrides** à l'exemple de la Bulgarie, où la culture des espèces pures avaient globalement échoué (Gyuleva, 2008).

La première trace historique d'introduction de paulownia en Europe est l'arrivée d'un *P. tomentosa* à Paris au Jardin des Plantes en provenance du Japon en 1834. Il a survécu jusqu'en 1956, soit pendant 122 ans (Santi and Muller, 2023). Depuis, cette essence s'est largement répandue dans les parcs et jardins des grandes villes d'Europe dont la France. **Aujourd'hui, la culture du paulownia est largement dominée en Europe par des hybrides sélectionnés principalement *in vitro*, avec des clones spécifiques comme le « 112 », « Cotevisa 2 » et « Shan Tong »** (Rana *et al.*, 2018).

Les recherches sur la culture du paulownia sont encore relativement récentes en Europe, avec **des expériences principalement axées sur la reproduction des hybrides développés en Asie ou dans le Sud de l'Europe** (Jakubowski, 2022). **Des études sur la productivité des paulownias sont actuellement en cours en Europe centrale.** En Bulgarie, de nombreuses études sont menées sur les espèces à croissance rapide en forêt. Des plantations forestières intensives à courte rotation à partir de clones sélectionnés de peuplier, saules, paulownia ou encore acacia sont suivies. La biomasse provenant des plantations est vue comme une nouvelle alternative



Paulownia en fleur
en jardin horticole.

Vincent Tourret © CNPF

pour la production de bioéthanol (Yavorov *et al.*, 2015). En Slovaquie, les paulownias sont testés en raison de leur productivité et la possibilité de valoriser des terres en déprise agricole, ou encore en agroforesterie dans une optique de restauration du milieu (Pástor *et al.*, 2022). Les résultats actuels ne semblent pas être à la hauteur des résultats obtenus au Moyen-Orient et dans le Sud de l'Europe (Jakubowski, 2022) sans doute en raison de conditions pédoclimatiques moins adaptées.

On ne trouve quasiment aucune étude publiée en France sur le sujet du paulownia en plantation « forestière », en dehors de la littérature horticole.

Les essais sur le terrain sont encore peu nombreux et très récents pour la plupart avec peu de retour d'expériences. Pour autant, plusieurs entreprises spécialisées dans le paulownia se développent aujourd'hui en France comme la start-up **AB Paulownia** créée fin 2022 et basée à Fyé, dans la Sarthe. Elle accompagne les clients dans leur projet depuis l'achat des plants jusqu'à la vente du bois. C'est le distributeur exclusif du clone « Cotevisa 2 » produit par l'entreprise espagnole **COTEVISA**, un hybride de *P. elongata* et *P. fortunei*. **Arbrepaulownia** est un pépiniériste représentant de WeGrow en France. Le consortium **WeGrow** fondé en 2009 en Allemagne fait partie des principaux pro-

ducteurs d'arbres paulownia en Europe mais également un important exploitant des plantations de paulownia. Arbrepaulownia distribue les hybrides NordMax21®, Phoenix One®, H2F3® et H2F4® (*P. catalpifolia* x *fortunei*), tous produits par WeGrow. Sa société sœur KIRITEC basée en Allemagne est spécialisée dans la vente de paulownia en s'approvisionnant sur le marché européen. Elle gère toute la chaîne de production : du transport, du séchage et du stockage jusqu'au sciage et à la transformation et la vente du bois. On peut également citer d'autres pépiniéristes comme **Paulownia France** implanté depuis 2018 dans le Lot-et-Garonne. Cette société, une des leaders du marché en France, a introduit cette culture dans l'hexagone depuis quelques années. Elle propose les variétés « Shan Tong », « G3 », « Lankao », « Z07 », « EMPRESS DYNAMITE » qui est une exclusivité de l'entreprise pour un usage agroforestier et ornemental mais aussi les espèces pures *P. fortunei* et *P. elongata*.

Paulownia Energy, société fondée en Ukraine en 2017 s'est installée en France en 2022. Le groupe a également ouvert des pépinières en Pologne et en Italie en 2023. Il produit les variétés suivantes : « Shan Tong », « Pao Tong Z07 », le paulownia « Energy » (*P. fortunei* x *elongata*) produit *in vitro* par l'entreprise en Ukraine ainsi que les espèces *P. tomentosa* et *P. elongata*.

4. Autécologie du paulownia

4.1 Conditions climatiques

Les paulownias sont répartis des zones tropicales aux zones tempérées. Les températures maximales absolues dans leur aire de répartition peuvent varier entre 31 et 47 °C. On les trouve à des altitudes allant du niveau de la mer jusqu'à environ 2 400 m d'altitude (Danciu *et al.*, 2016).

D'après Berdon *et al.* (2017), confirmé par Lugli *et al.* (2023) :

- *P. tomentosa* nécessite des températures supérieures à un minimum de -20 °C ;
- *P. elongata* et *P. catalpifolia* de -15 °C à -18 °C ;
- *P. fortunei*, *P. australis*, *P. kawakamii* et *P. fargesii*, de -5 °C à -10 °C.

Danciu *et al.* (2016) avancent plutôt que *P. elongata* supporte des températures jusqu'à -26 °C, non sans conséquence néanmoins sur la

croissance. En effet, selon Olave *et al.* (2015), les hivers très froids limitent la croissance des paulownias dans les latitudes nordiques.

Des écologues chinois ont réalisé une étude sur l'aire de répartition de 3 espèces principales de paulownia en Chine (aire de répartition naturelle) mais aussi dans ses aires d'introduction pour *P. tomentosa* (Fang *et al.*, 2011).

Les résultats ont été repris par Georges Pottecher, fondateur de FORESTYS qui a également calculé les limites climatiques de *P. tomentosa* sur l'ensemble de ses aires de présence (naturelle et introduction) à partir de 11 236 observations recensées par le GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*) et en croisant ces zonages avec les données climatiques de Chelsa Climate. Ainsi la niche climatique identifiée pour ces espèces confirme les chiffres précédemment cités, tout en apportant des précisions supplémentaires.

Tableau 1 –Niche climatique de quelques espèces de paulownia. D'après Georges Pottecher, FORESTYS

Espèce	Température moyenne annuelle	Température moyenne du mois le plus chaud	Température minimale absolue	Température moyenne du mois le plus froid	Pluie annuelle (mm)	Pluie estivale (mm)
<i>Paulownia elongata</i> (Chine)	12,5 à 16 °C	24 à 28 °C	-15 °C	-4 à 4 °C	600-1400	350-550
<i>Paulownia fortunei</i> (Chine)	15 à 23 °C	19 à 30 °C	-10 °C	0 à 17 °C	1200-2500	370-1400
<i>Paulownia tomentosa</i> (Chine)	11 à 17 °C	16 à 29 °C	-25 à -20 °C	-15 à 14 °C	500-1500	230-900
<i>Paulownia tomentosa</i> (monde, GBIF)	9,4 à 16 °C	Moyenne des Tmax : 21 < Tx < 30,5 °C		Moyenne des Tmin : -3,9 < Tn < 4,7 °C	585-1420 (> 900 dans la partie la plus chaude de l'aire)	110-390 (50-150 dans la partie la plus chaude de l'aire)
Saint Quentin (02) pour 1991-2020	10,8 °C	18,4 °C Tx = 24 °C	-20 °C en 1985 -14,8 °C en 2013	3,6 °C Tn = 1,1 °C	683	191

Feuille de paulownia.

Carole Penpoul © CNPF

La dernière ligne du tableau correspond aux données climatiques de la ville de Saint Quentin dans l'Aisne, dans un contexte climatique tempéré océanique dégradé typique de la région Hauts-de-France. On constate que *P. tomentosa* apparaît comme l'espèce la plus adaptée à ces conditions typiques du Nord de la France.

Selon El-Showk et El-Showk, les températures optimales de croissance pendant la saison de végétation se situeraient entre 24 °C et 29 °C quelle que soit l'espèce. Plusieurs articles (Hassanzad Navroodi, 2013 ; Jakubowski, 2022) considèrent plutôt des températures optimales entre 15 et 23 °C.

Les conditions climatiques méditerranéennes affectent négativement la production des paulownias, en raison d'un fort déficit de pression de vapeur (VPD) entraînant une forte évapotranspiration (Icka *et al.*, 2016).

L'hybride « Shantong » qui a été développé en Chine en 1982 peut résister à des températures jusqu'à -29 °C. Il présente de surcroît une croissance plus rapide et une résistance plus élevée à la sécheresse que les espèces pures dont il est issu. Il est adapté aux conditions continentales rencontrées en Europe de l'Est, comme en Roumanie (Danciu *et al.*, 2016).

Concernant les autres hybrides, ils sont actuellement principalement cultivés dans le sud de l'Europe, où les gelées sévères ne se produisent pas, il n'y a donc pas de données confirmées sur la résistance au gel des hybrides introduits, et les essais dans des régions plus froides sont souvent trop jeunes pour pouvoir conclure (Berdón *et al.*, 2017). L'hybride « Cotevisa 2 », commercialisé en France par AB Paulownia est réputé résistant au gel en hiver mais des dégâts ont été observés en France face aux gelées tardives en avril, avec une perte de dominance apicale en raison d'un débournement précoce.

Cependant, certaines observations ont déjà été faites dans des zones géographiques plus froides : le taux de survie des plants dans des



expériences turques sur des plants originaires de Chine se situe entre 50 % et 90 % en raison du gel. En Irlande du Nord, la survie variait de 70 % à 95 % pour les hybrides d'origine espagnole, sauf pour une étude où le taux de survie n'était que de 20 %. En revanche la survie des hybrides d'origine marocaine était de 30 % en moyenne.

Une étude menée à Zaporizhzhia entre 2000 et 2019 montre que *Paulownia tomentosa* est affecté par les gelées tardives en raison de sa phénologie : sa saison de végétation commence fin avril pour finir fin novembre dans la zone d'étude (Dubova *et al.*, 2019). En revanche les températures minimales restant supérieures à -20 °C à Zaporizhzhia, *P. tomentosa* s'est globalement acclimaté et est utilisé dans l'aménagement paysagé (Berdón *et al.*, 2017). Les mêmes auteurs signalent pourtant une mortalité complète des plants en hiver dans une plantation en Turquie à 1 400 m d'altitude.

Certaines études ont souligné que le gel est particulièrement dommageable pour la croissance des jeunes plants de paulownia lorsque les pousses sont vertes, c'est-à-dire au début de l'hiver ou pendant les gelées printanières. Les clones *in vitro* « 112 » de paulownia créés par les espagnols (hybride *P. elongata x fortunei*) présenteraient une grande résistance aux

températures extrêmes, entre -25 et +45 °C, et un bois de haute qualité (Durán Zuazo *et al.*, 2013). Cependant, des recherches menées en République tchèque ont montré une croissance insatisfaisante de ces clones au cours des deux premières années de culture en raison du gel (Kadlec *et al.*, 2021). D'autres chercheurs ont enregistré des dommages importants causés par la neige en hiver 2001 sur le site d'Ulubey situé en altitude en Turquie. À l'inverse, des essais menés en Albanie dans la région de Korça, confrontée à des hivers froids avec des températures descendant jusqu'à -25 °C et une pluviométrie limitée (750 mm par an), ont montré des résultats satisfaisants sur la croissance avec peu de mortalité (Icka *et al.*, 2016). Pour citer des hybrides diffusés en France, si on en croit l'entreprise Arbrepaulownia qui le commercialise, le cultivar « NordMax21 » résisterait au gel jusqu'à -22 °C. « H2F3 » et « H2F4 » tiendraient jusqu'à -20 °C tandis que « Phoenix One » ne tiendrait pas en dessous de -10 °C.

Paulownia tomentosa
en Provence-Alpes-
Côte d'Azur.

Carole Penpoul © CNPF



Les paulownias sont réputés sensibles au vent, particulièrement les 3 premières années. Ils ont de très grandes feuilles à leur état juvénile, et la tige n'est pas suffisamment ligneuse à ce stade, ce qui la rend fragile aux dommages mécaniques. De plus le système racinaire des jeunes plants n'est pas encore très développé comparé à leur taille, avec le risque de chablis et de plans inclinés (El-Showk and El-Showk, 2003). Par la suite, la tige est plus solide et les feuilles plus réduites, ce qui limite le risque. Par exemple, des expériences menées en Nouvelle-Zélande ont montré sur de jeunes plantations des dégâts sur les branches causés par des vents de l'ordre de 40 km/h, des observations corroborées par Barton L. (2007), observant même des ruptures de tige pour des vents de force comparable.

Le vent limiterait également la croissance des arbres (Berg *et al.*, 2020), affectant même la croissance annuelle 3 à 4 ans après le fort coup de vent (Tusevhaan *et al.*, 2023) et déforme la bille de pied. Pástor *et al.* (2022) confirment dans leur étude en Slovaquie une grande sensibilité du paulownia aux dommages causés par le vent : cinq ans après la plantation, près de 25 % des individus plantés de paulownia présentaient des signes de dommages à la couronne (branches ou tige centrale cassées). Des essais menés en Slovaquie (Pástor *et al.*, 2022) ont montré des résultats très contrastés avec des échecs attribués à différents événements météorologiques inhabituels (gel, sécheresse et vents forts). **Il est recommandé de planter les paulownias sur une zone protégée du vent mais avec un bon ensoleillement, idéalement en exposition Sud** (El-Showk and El-Showk, 2003).

4.2 Un fort besoin en eau

On retrouverait des paulownias dans des zones géographiques avec des précipitations annuelles très variables, entre 500 et 2 800 mm (Hassanzad Navroodi, 2013) avec un optimum au-dessus de 1 400 mm (sans apport par irrigation).

Comme nous l'avons vu le paulownia est réputé sensible aux inondations et à l'engorgement et nécessite donc un bon drainage des sols. Les arbres perdent leurs feuilles et peuvent



Plantation de paulownia pour la production de bois d'œuvre, avec système d'irrigation goutte à goutte.

© Ioannis Ioannidis, Pixabay

même mourir après que le terrain a été inondé pendant une courte période de 3 à 5 jours en période de végétation (Danciu *et al.*, 2016). **Pour autant le besoin en eau est important.**

L'aire de répartition concerne des précipitations annuelles variant de 500 mm à 2 600 mm avec une forte disparité entre populations et espèces (Berdón *et al.*, 2017), **un minimum de 750 mm/an revient souvent dans la littérature** (Danciu *et al.*, 2016), **sachant que des précipitations moindres sont supportables si la majorité de l'eau tombe pendant la période de végétation, ou si des paramètres compensateurs sont présents** (présence d'une nappe d'eau à faible profondeur). Ces chiffres sont confirmés par l'analyse de Georges Pottecher résumée dans le chapitre précédent avec une forte amplitude de précipitation allant de 500 mm (pour *P. tomentosa*) à 2 500 mm (pour *P. fortunei*). Hassanzad Navroodi (2013) donne une fourchette entre 500 et 2800 mm avec un optimum au-dessus de 1400 mm, les paulownias étant affectés par le manque d'eau en-dessous de ce seuil sans facteur compensateur ou apport par irrigation. Il faut naturellement prendre ces chiffres de façon indicative, car ils dépendent de nombreux facteurs : espèces, conditions stationnelles, microclimat, répartition des pluies dans l'année...

Dans tous les cas, **les rendements exceptionnels de production qu'on retrouve dans la**

littérature demandent une forte quantité d'eau et d'engrais. Les systèmes culturaux pour la production de biomasse à très courte rotation s'inscrivent davantage dans une approche de culture conventionnelle que de sylviculture. L'approvisionnement en eau peut contribuer à la production de plus de feuilles et, par conséquent, à une croissance accrue des pousses (Berdón *et al.*, 2017).

L'arbre doit être bien irrigué jusqu'à ce qu'il établisse un système racinaire suffisant (El-Showk and El-Showk, 2003).

Le paulownia doit consommer par exemple 1 000 à 2 000 litres d'eau par arbre en première année de végétation pour atteindre une production soutenue (García-Morote *et al.*, 2014).

Arbrepaulownia préconise 3 000 m³/ha/an d'eau pour les hybrides que l'entreprise commercialise. L'irrigation est donc généralement nécessaire, sauf si les conditions stationnelles suffisent à satisfaire les forts besoins en eau de la plante, particulièrement les premières années. Selon El-Showk (2003) **les jeunes plants doivent impérativement être irrigués le jour de leur plantation et à nouveau quelques jours plus tard et à plusieurs reprises pendant la saison de végétation jusqu'à ce qu'ils établissent un système racinaire suffisant.** Dans les régions du monde très arrosées, l'irrigation n'est cependant pas nécessaire. Le paillage peut aider à minimiser les pertes dues à l'évaporation pendant la saison chaude.

Berón *et al.* (2017) insiste sur l'importance de l'irrigation les premières années dans le contexte du sud-ouest de l'Espagne, en précisant qu'elle n'est plus indispensable par la suite pour la survie des plants mais incontournable pour optimiser les rendements pendant les périodes de sécheresse. Les irrigations par aspersion qui délivrent des doses optimales d'eau aux plantes sont recommandées (Ptach *et al.*, 2017). Grâce aux essais dans le sud-est de la Pologne, Litwińczuk et Jacek (2023) montrent que l'irrigation est indispensable pour la croissance des paulownias sur sols sableux : augmentation de 65,5 % de la croissance en hauteur et de 53,3 % de la croissance en diamètre par rapport aux témoins non irrigués.

En France, Arbrepaulownia et AB Paulownia s'entendent sur la nécessité absolue d'un arrosage régulier pendant les 8 à 12 premières semaines pour réussir la plantation. AB Paulownia recommande par exemple 5 à 10 litres d'eau par arbre et par semaine sur cette période. Par la suite, le besoin en système d'irrigation va dépendre des conditions stationnelles (accessibilité de la nappe, réserve en eau du sol), des conditions climatiques (pluviométrie, bilan hydrique) et des objectifs de production.

4.3 Conditions édaphiques

On ne retrouve pas une bibliographie très foisonnante en ce qui concerne les conditions pédologiques dans lesquelles les paulownias ont été testés en Europe. De façon générale, les exigences édaphiques de ces espèces (profondeur, taux d'argile, humidité et drainage, pH) diffèrent peu entre elles. **Les paulownias sont considérés comme assez plastiques**, même si les meilleurs rendements se font nécessairement sur les stations les plus fertiles avec des sols profonds (Danciu *et al.*, 2016).

Les paulownias peuvent bien pousser dans des sols pauvres en éléments nutritifs, où leur grande capacité à absorber les ions Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ leur confère un avantage. En conséquence de leur rusticité quant aux conditions trophiques, ils permettent de valoriser des terrains difficiles (Yadav *et al.*, 2013). Il a été par exemple utilisé avec un grand succès dans des projets de restauration minière (El-Showk and El-Showk, 2003) même si les enjeux de production sont limités dans ces conditions.

Sa capacité à pousser dans les sols très salins fait débat. Jakubowki (2022) par exemple le considère sensible au sel. Tusevhaan *et al.*, (2023) considèrent à l'inverse que les paulownias ne sont pas adaptés à des sols à pH inférieur à 5 mais qu'ils peuvent supporter des pH de 8 ou 9 typiques des sols salés. **Dans tous les cas la qualité du sol affectera fortement les rendements de production. On peut globalement considérer que le pH est optimal entre 5,5 et 7,5, comme pour beaucoup d'essences.** Les paulownias n'ont pas montré un comportement particulièrement calcifuge dans les retours d'expérience de plantation en terrain calcaire.

Les meilleurs rendements sont atteints sur des sols riches en éléments nutritifs, fertilisés plusieurs fois par an avec des engrais azotés (Danciu *et al.*, 2016). Par exemple, des essais dans le sud-ouest de l'Espagne ont donné de bons rendements sur des sols alluviaux bien drainés (pH de 7,5) et un apport de 500 Kg/ha d'un engrais 15-10-15 (N-P-K) appliqué de début juin 2012 (année de la plantation) jusqu'en juin 2014 (Berdón *et al.*, 2017). Un apport de fertilisation au printemps en amont et au moment de la plantation peut également être recommandé selon Arbrepaulownia. AB Paulownia recommande des apports d'engrais pendant environ 5 ans. **L'entreprise ne recommande pas la plantation dans des sols pH < 5 pour des questions de rendement.**

Ils sont en revanche sensibles à l'engorgement ou encore au manque d'eau, appréciant donc les sols frais filtrants et profonds (El-Showk and El-Showk, 2003). Ainsi les sols sableux, argilo-sableux voire limoneux conviennent bien si la nappe est accessible à moins de 1,5-2 m de profondeur (Danciu *et al.*, 2016). **À l'inverse, les sols argileux, rocheux et à régime hydrique déficitaire ne sont pas favorables.**

En raison de la rapidité de production de biomasse des paulownias, il peut y avoir des changements notables dans le sol après leur plantation (Tusevhaan *et al.*, 2023). Après un an de suivi du sol, il a été constaté que la population microbienne du sol avait diminué autour des arbres, ce qui était lié à une diminution de la teneur en nutriments. D'autres chercheurs ont rapporté des changements similaires liés à l'activité microbienne du sol. Cependant Pástor *et al.* (2022) rappellent l'intérêt de ces arbres en agroforesterie : les racines profondes de l'arbre aident à retenir l'humidité, tandis que les feuilles mortes agissent comme un engrais. Les troncs et les grands houppiers des arbres fournissent de l'ombre, protègent le sol contre l'érosion éolienne et abritent les cultures contre les vents desséchants.

5. (Sylvi)culture

Outre les arbres d'ornement, on retrouve le paulownia principalement dans des systèmes agricoles conventionnels ou en taillis à courte rotation.

5.1 Travaux avant plantation

Quelques articles présentent les travaux réalisés avant l'installation des essais de paulownia. **Les plantations se font généralement après un travail important du sol** : labour en plein sur 30-40 cm de profondeur, passage d'une houe rotative/covercrop (Danciu *et al.*, 2016), sous-solage à 80 cm de profondeur (Berdón *et al.*, 2017). Il est conseillé de réaliser les travaux du sol (décompactage, herse, rotavateur) quelques mois avant la plantation pour laisser le temps au sol de reposer (travaux entre janvier et mars pour une plantation à partir de fin avril par exemple).

Il est impératif de planter les paulownias en pleine lumière : une légère ombre peut causer des déformations, et un ombrage plus marqué peut entraîner la mort des plants rapidement (El-Showk and El-Showk, 2003). Les plantations se faisant en milieu ouvert, il est recommandé un désherbage mécanique ou chimique (glyphosate) avant et après plantation (El-Showk and El-Showk, 2003). **Plusieurs désherbages mécaniques peuvent être nécessaires durant la première année si la végétation concurrente est vigoureuse.**

Le paillage est également recommandé dans ces conditions de compétition avec les adventices, et permet de surcroît d'éviter le gel du système racinaire en hiver, comme l'étude de Kadlec *et al.* (2021) en Ukraine a pu le démontrer sur le paulownia clone *in vitro* « 112 ». Certaines plantes de couverture comme le trèfle peuvent aussi être semées (préconisations de AB Paulownia) car elles présentent une concurrence moindre pour l'eau, tout en enrichissant le sol en azote. L'application d'engrais NPK est recommandée pour viser de bons rendements comme nous l'avons déjà vu (Kadlec *et al.*, 2021).



Passage de covercrop sur sol labouré.

Philippe Van Lerberghe © CNPF

5.2 La plantation

Il est recommandé de planter des plants d'un an d'un diamètre minimum à la base de la tige de 1,0 cm en potet travaillé dans des trous de 30 x 30 x 30 cm. Kadlec *et al.*, (2021) ont montré que la croissance et le taux de reprise était meilleur que pour des trous de 20 cm de côté. El-ShowketEl-Showk(2003) recommandent même des trous de 70-80 cm de côté pour 50 à 60 cm de profondeur pour des plants de 1 ou 2 ans. **Les plants peuvent être vendus en racine nue ou en godet.**

AB Paulownia propose des plants en pots de 9 cm de côté, produits en Espagne. Arbrepaulownia propose quant à lui des plants en motte. **Ils sont produits à la demande en serre pendant quelques semaines avant d'être livrés et plantés.**

Jeune plant de paulownia en motte à la pépinière (France).

Source : Paulownia.Energy – www.paulownia.energy/fr





Ouverture de potets, mini-pelle et dent becker.

René Sabatier © CNPF

Boisement de paulownia sur terre agricole de 6 ha réalisé en Hauts-de-France. Ici, les paulownias ont 1 an de pousse.

Marie Pillon © Fransylva



On trouve différentes recommandations concernant la période de plantation : idéalement au printemps après les dernières gelées (fin avril, début mai). Les périodes propices pour la plantation des boutures vont de novembre à fin avril (Danciu *et al.*, 2016). Arbrepaulownia recommande pour ses hybrides une plantation entre mi-avril et début août afin qu'ils aient le temps de développer leur racine pivot avant l'hiver. AB Paulownia recommande de planter soit à l'automne (septembre à novembre), soit au printemps (mi-avril à juin).

Les trous peuvent être remplis d'un mélange de tourbe et d'engrais (Danciu *et al.*, 2016) pour accentuer la croissance initiale. Il faut veiller à **ne pas enterrer le collet, voire à le laisser dépasser de 2-3 cm au-dessus du niveau du sol.** La qualité du plant (racine bien développée, tige lignifiée) est naturellement un élément fondamental à la bonne reprise de même que la qualité de la plantation (El-Showk and El-Showk, 2003). Si la plantation est exposée au vent, il est nécessaire de mettre un tuteur de soutien au cours des premières années de croissance.

Les paulownias sont généralement plantés en plein ou en ligne. L'écartement recommandé dépend des objectifs de production (Tusevhaan *et al.*, 2023). Pour une valorisation en bois d'œuvre, Danciu *et al.* (2016) recommande un écartement minimum de 4 m entre les plants sur la ligne, pour des densités entre 550 et 750 arbres/ha. L'investissement est d'environ 3 000 euros/ha, auxquels s'ajoutent les coûts de préparation du sol (labour, fraissage ou labour au disque, creusement de trous, etc.), les **dépenses d'entretien** (comprenant les activités de fertilisation, de taille et d'élimination des mauvaises herbes, de récolte et de stockage), ainsi que celles **de l'irrigation**, qui peuvent varier en fonction du système d'irrigation (écoulement dans les fossés, irrigation goutte à goutte) (Danciu *et al.*, 2016).

Une étude menée en Iran dans la forêt de Shast Kalate a testé 3 espacements : 5 x 6, 8 x 6 et 7 x 7 m. Les résultats globaux ont indiqué que les arbres qui avaient le plus grand diamètre, la plus grande hauteur et le plus grand volume moyen correspondent à l'espacement de 7 x 7 m, mais que l'espacement de 5 x 6 m permettait d'avoir la plus grande production moyenne de bois par hectare annuellement avec 24,6 m³ par an (Z and D, 2010).

Toujours en Iran, Nahid *et al.* (2008) ont mené une autre étude comparative entre *P. fortunei* et peuplier avec de plus faibles écartements : 3 x 3 mètres, 4 x 4 mètres et 5 x 5 mètres. Plus la distance entre plants est faible, plus la croissance en hauteur semble importante, ce qui est confirmé par d'autres études (Fang *et al.*, 1988). Les peupliers ont été plus poussants que les paulownias (croissance annuelle moyenne en hauteur de 1,6 m pour les peupliers et 1,2 m pour les paulownias). En revanche la croissance en diamètre était supérieure en moyenne pour les paulownias (2,4 cm/an). Ces résultats sont inférieurs à la croissance moyenne des paulownias observée dans l'étude menée par Zhu *et al.* (1986) dans la région d'origine de l'espèce, soit 3 cm/an sur le diamètre et 1,3 m/an en hauteur en moyenne pour des écartements de 5 x 5 m.

Bien qu'il n'y ait **pas d'études publiées aujourd'hui sur les résultats des plantations de paulownias en France**, certaines entreprises comme Arbrepaulownia apportent des recom-

mandations techniques précises pour leurs variétés.

Ainsi ils préconisent une plantation en 4 x 4 m (640 arbres/ha) pour les clones H2F3, NordMax21 et H2F4 avec des coupes envisageables dès 8 à 10 ans, et 4 x 3 m (800 arbres/ha) pour Phoenix One avec une première coupe possible dès la 5^e année.

Paulownia France prône des distances de plantation en France entre 5 x 5 m et 6 x 6 m en plein, ou de 4 à 6 m en ligne agroforestière, selon le cultivar de paulownia sélectionné.

AB Paulownia préconise entre 4 x 4 m et 6 x 6 m, soit entre 300 et 625 plants par hectare de « Cotevisa 2 ».

Les hybrides de paulownia sont cultivés dans des cycles courts de 5 à 10 ans pour le bois rond, mais ces cycles sont encore plus courts pour un objectif biomasse, soit 3 à 4 ans (Tusevhaan *et al.*, 2023).

Dans le cas où la plantation est destinée exclusivement à la production de biomasse, une densité de 1 600 arbres/ha à 2 000 arbres/ha est recherchée (Icka *et al.*, 2016) ; impliquant un investissement d'au moins 8 000 euros/ha, auxquels s'ajoutent les autres dépenses (Danciu *et al.*, 2016).

Berdón *et al.* (2017) ont testé 4 clones à ces densités pour la production de biomasse (« Cotevisa 2 », « L1 » (*P. elongata* x *fortunei*), « X1 » (*P. fortunei*), « 112 » dans le sud de

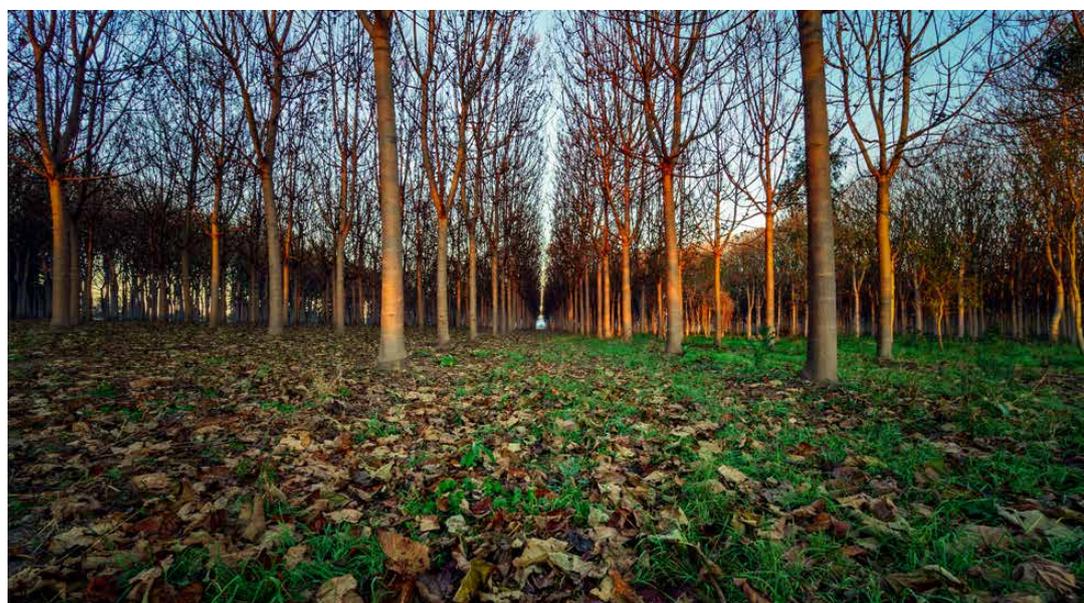
l'Espagne avec des résultats satisfaisants. Tusevhaan *et al.* (2023) et Icka *et al.* (2016) mentionnent des plantations encore plus denses : 2 000 à 3 300 plants/ha notamment en Bulgarie (par exemple des écartements de 3,3 x 1 m ou 2 x 1,5 m).

Pour l'agroforesterie, des écartements plus larges sont recommandés. Par exemple, Yoon et Toomey (1986) ont montré que des arbres plantés à 5 mètres l'un de l'autre, avec 10 mètres entre chaque rangée permettait un rendement en blé comparable à une culture en champ ouvert.

En milieu agricole, les paulownias vont rapidement jouer les rôles qu'on peut attendre d'un bon arbre agroforestier : effet brise-vent, limitation de l'érosion, maintien des sols et enrichissement en matière organique riche en nutriments, ombrage et pouvoir rafraîchissant de l'évapotranspiration, accueil d'une certaine biodiversité (insectes, oiseaux s'en servant comme perchoir par exemple) et constitution d'une trame verte, valorisations diverses (bois, feuilles, écorces).

5.3 Travaux sylvicoles (tailles, recépage)

Pour la production de bois d'œuvre, il est recommandé de tailler les paulownias, de préférence dès la seconde année puis tous les ans jusqu'à atteindre entre 2 et 8 m de troncs sans branches.



Plantation de paulownias élagués en forêt de Richmond (Australie, 2014).

© Jan Alonzo, Wikimedia commons CC BY-SA 2.0

AB Paulownia fixe par exemple pour objectif d'atteindre une bille élaguée de 6,5 m pour des paulownias « Cotevisa 2 » de 3 ans. L'entreprise recommande d'élaguer les branches 2 fois par an sur la seconde et troisième année pour atteindre cet objectif. Il faut garder au moins 1/3 du houppier en feuilles pour ne pas ralentir la croissance de l'arbre et limiter les risques liés au vent (Berdón *et al.*, 2017). **Il est conseillé d'opérer les tailles au printemps, avant la saison de croissance. Les semis d'un an mal conformés peuvent être recépés avant l'émergence des nouvelles feuilles au début de la seconde ou troisième saison de végétation.**

Un recépage pratiqué un an après la plantation (à 4 cm du sol maximum) peut être recommandé de façon systématique comme le présente

Plantation de paulownias près de Valence (Espagne).

© Codex, Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0



Pástor *et al.* (2022) sur des hybrides *P. elongata* x *fortunei* plantés à 625 plants/ha ou encore AB Paulownia sur le « Cotevisa 2 », lorsque les pieds ont atteint 8 à 10 cm de diamètre. L'année suivante, la tige la mieux conformée de chaque pied recépé est gardée, et les autres sont coupées (El-Showk and El-Showk, 2003). Il est conseillé ensuite d'éliminer les bourgeons qui vont repartir du pied, en maintenant uniquement la tige qui constituera la bille de pied. Zhu *et al.* (1986) ont été les premiers à développer des méthodes de taille de formation sur paulownias consistant à supprimer certains bourgeons et à en favoriser d'autres afin de contrebalancer le port naturellement court et mal conformé des principales espèces de paulownia.

Pour la production de biomasse, un recépage est réalisé à très courte rotation (3-4 ans), aucune autre intervention que le recépage n'est nécessaire tant que les souches ne sont pas épuisées (Berdón *et al.*, 2017). Selon Danciu *et al.* (2016), il est possible de récolter entre 3 et 5 cycles de cette façon avant de replanter des arbres de franc pied. Pour des cycles de production plus longs (8 ans), Icka *et al.* (2016) considèrent quant à eux qu'il est possible de faire 8 ou 9 rotations par recépage avant d'épuiser le système racinaire, pouvant vivre environ 70 ans.

5.4 Récolte et productivité

Les paulownias sont réputés pour leur croissance extraordinaire. La génétique, le contexte pédoclimatique et les méthodes culturales sont autant de facteurs qui peuvent fortement faire varier cette productivité (Capaross *et al.*, 2007). Des spécimens battant des records ont été décrits en Chine, comme le *P. fortunei* âgé de 80 ans qui poussait dans la province de Kweichow, atteignant une hauteur de 49,5 m pour un diamètre de 202 cm et un volume de bois de 34 m³. Parmi les arbres plus jeunes, un *P. fortunei* de 11 ans, cultivé dans la région autonome zhuang du Guangxi dans le sud de la Chine, mesurait 22 m de haut avec un diamètre de 75 cm et un volume de bois de 3,7 m³ (Tusevhaan *et al.*, 2023).

La plupart des espèces de paulownia peuvent être récoltées en moins de 15 ans (Akyildiz and Kol, 2010), et dès 6 ou 7 ans en moyenne pour les clones actuellement sur le marché pour la

production de bois d'œuvre. **Il est conseillé de récolter les arbres pendant l'automne et l'hiver. En effet, le bois récolté pendant la saison de croissance peut contenir de grandes quantités de composés polyphénoliques pouvant développer des taches après plusieurs années.** Il est aussi plus humide, donc sèche moins vite et est plus exposé aux agents de dégradations.

Des études comparatives ont montré la supériorité du paulownia en terme de croissance sur d'autres essences à croissance rapide comme les saules, les peupliers ou encore l'eucalyptus, à condition d'être dans des conditions optimales : pleine lumière, sol riche en nutriments, aéré et bien alimenté en eau (Cathy, 2021 ; Tusevhaan *et al.*, 2023).

Dans des conditions naturelles, un arbre de **10 ans** peut mesurer **30 à 40 cm de diamètre** à hauteur de poitrine (Tusevhaan *et al.*, 2023) et peut avoir un **volume** de bois de **0,3 à 0,5 m³** (Starfingier *et al.*, 2003; Yadav *et al.*, 2013) pour une **hauteur** totale de **8 à 12 m** et un rayon de couronne de 3 à 5 m. Il s'agit là de standards chinois en système extensif (Wang and Shogren, 1992). *P. elongata* présente de bonnes performances de croissance avec un accroissement **annuel moyen du diamètre** entre **3 et 4 cm par an** (et un maximum de 9 cm certaines années), pour un **accroissement moyen annuel sur le volume de 0,04 à 0,06 m³** (Kaymakci *et al.*, 2013) soit une production moyenne entre **16 à 30 m³/ha/an** pour une densité de plantation classique (400-500 tiges/ha). Berdón *et al.* (2017) confirme ces tendances pour les clones de paulownia, avec des diamètres de **22 cm** atteints en **4 ans** et de **45 cm** en **10 ans** pour des rendements de l'ordre de **12 à 16 m³/ha/an**. La **croissance moyenne en hauteur** est d'environ **2 m par an** (Danciu *et al.*, 2016 ; Lugli *et al.*, 2023).

En système plus intensif, les arbres peuvent atteindre **1 m³** de bois en seulement **5 à 7 ans** comme cela a pu être observé en Turquie notamment (Lugli *et al.*, 2023), avec en moyenne une **hauteur de 17 m** et un **diamètre** à hauteur de poitrine de **30 cm** (YOON and TOOMEY, 1986), ce qui permet d'avoir une production totale sur cette période entre **150 tonnes et 330 tonnes de matière sèche par hectare** pour une densité de 2 000 plants/ha (Ates

et al., 2008). La **première année**, la croissance en **hauteur** peut atteindre jusqu'à **6 m** des conditions optimales puis **2 à 3 m** supplémentaire les années suivantes, pour atteindre un **diamètre de 20 à 25 cm** vers l'âge de **4 ans** (Hassanzad Navroodi, 2013).

Les clones de paulownia *in vitro* « 112 » et paulownia « Cotevisa 2 » créés par des chercheurs espagnols présenteraient des croissances encore supérieures aux autres variétés, atteignant au maximum **25 à 30 cm de diamètre et une hauteur de 15 à 20 mètres** soit environ **0,3 m³ de bois** en seulement **3 ou 4 ans** (Icka *et al.*, 2016) dans des conditions de culture très intensives. Cela implique l'application de fertilisants N-P-K riches en azote plusieurs fois par an, un désherbage les premières années autour des plants, un bon travail du sol avant plantation pour garantir la reprise des plants et un régime d'arrosage soutenu (inondation 2 fois par semaine avec un minimum de 10 litres par plante au cours des premiers mois après la plantation) via un système de goutte à goutte par exemple (Danciu *et al.*, 2016).

AB Paulownia fixe pour le « Cotevisa 2 » un objectif moyen entre **0,5 m³ et 1 m³ de bois d'œuvre par arbre en 7 ans**, avec un **diamètre minimum à 1,30 m de 35 cm**. Son site internet indique une productivité pouvant atteindre **310 à 600 m³/ha en 7 ans**, à laquelle il faudrait ajouter, d'après l'entreprise, un volume équivalent de bois énergie (branches et houppier) bien qu'ils ne fassent pas clairement référence à une étude scientifique pour appuyer ces propos. Cela représente une productivité potentiellement considérable, fixée **entre 44 et 85 m³/ha/an de bois d'œuvre sur 7 ans et le double** pour le volume total de bois. Cet objectif semble atteignable en système cultural très intensif, comme l'atteste par exemple les résultats records présentés par Icka *et al.* (2016) mais il reste à priori ambitieux et encore non démontré dans le contexte cultural et pédoclimatique français. À titre comparatif en France, d'après ClimEssences, un peuplement de Douglas produit **entre 15 et 25 m³/ha/an** dans des conditions de production voire plus, un peuplement de Séquoia géant autour de **20 et jusqu'à 44 m³/ha/an** pour une plantation en Belgique, un peuplement d'Eucalyptus « Gundal » entre **10 et 40 m³/ha/an** suivant la disponibilité en eau ou encore un peuplement

de Séquoia toujours vert jusqu'à **30 m³/ha/an** (50 m³/ha/an atteint en Nouvelle-Zélande).

Cependant Pástor *et al.* (2022) ont trouvé des résultats bien inférieurs aux chiffres avancés par AB Paulownia pour « Cotevisa 2 » en Slovaquie. Les plants ont atteint un diamètre moyen de **21,5 cm, 7 ans** après la plantation pour une hauteur de 11,2 m. Le dispositif expérimental n'a pas été équipé d'un système d'irrigation. Le sol était riche en nutriments et aéré mais pas fertilisé. **En système moins intensif, les performances moyennes sont donc globalement plus faibles. Les résultats de croissance et de production sont aussi généralement plus élevés dans le Sud de l'Europe par rapport à l'Europe centrale** (Jakubowski, 2022). Danciu *et al.* (2016) proposent pour l'Europe des rendements indicatifs présentés dans le tableau suivant :

Âge	Hauteur [m]	Diamètre [cm]
Approx. 6 mois	2 ... 3	4 ... 6
1 an	4 ... 5	8 ... 10
2 ans	10 ... 12	15 ... 20
3 ans (approx. 0,3 m ³)	15 ... 20	24 ... 30
6 ans (approx. 0,5 m ³)	18 ... 22	35 ... 40
9 ans (approx. 0,7 m ³)	20 ... 25	45 ... 55

Ces résultats sont globalement conformes avec les performances obtenues dans les systèmes de production intensifs étudiés.

Les plantations de paulownias orientées vers la production de biomasse gagnent en popularité. Le recépage peut se faire tous les 3-4 ans pour un volume de bois de l'ordre de **0,3 m³** par plant (Icka *et al.*, 2016), ce qui fournit entre **200 et 500 m³ de bois par ha** suivant les densités de départ. On peut noter encore une fois de fortes variabilités de performances entre espèces et hybrides testés dans des contextes pédoclimatiques variés.

En Espagne certains essais montrent des productivités de l'ordre de 6 tonnes de matière sèche par hectare et par an (**6 t/ha/an**) (Ayrilmis and Kaymakci, 2013).

Détaillons le cycle cultural d'un dispositif particulièrement productif pour mettre en perspec-

tive les résultats obtenus : l'étude de Berdón *et al.* (2017) dans la région de l'Extremadura au sud-ouest de l'Espagne s'intéresse aux 4 clones suivants : « Cotevisa 2 », « L1 », « X1 », « 112 ». Les dispositifs sont irrigués par un système de goutte à goutte, assurant également la fertilisation via un engrais N-P-K 15-10-15 appliqué pendant les 2 premières années. Le terrain a subi un travail du sol important (labour en plein, sous-solage et désherbage mécanique + traitement chimique) avant l'installation des plants. Les plants sont protégés des lagomorphes (lapin), un traitement au glyphosate est réalisé après plantation, et plusieurs traitements phytosanitaires sont réalisés afin d'avorter les attaques pathogènes. Dans ces conditions, les clones « L1 », « Cotevisa 2 » et « 112 » ont montré un comportement similaire en termes de croissance en diamètre et de rendement en biomasse. Ces trois clones sont nettement supérieurs au clone « X1 », ce qui signifie qu'ils sont mieux adaptés à la région étudiée. La production totale de la parcelle pour la production de biomasse était de **24,3 tonnes de matière sèche par hectare** avec un cycle de coupe de 3 ans, soit **8,1 t/ha/an** pour la parcelle entière.

En Bulgarie, Gyuleva (2008) rapporte une expérience de 5 ans comparant la productivité de deux paulownias : l'espèce *P. tomentosa* et l'hybride de *P. elongata* x *P. fortunei*.

P. tomentosa avait une productivité plus élevée de **3,5 t/ha** (matière sèche) après 2 ans de croissance et de **37 t/ha/an après 4 ans (soit 9,2 t/ha/an)**, tandis que la productivité de *P. elongata* x *P. fortunei* était de 2,7 t/ha après 2 ans et de **20 t/ha après 4 ans (soit 5 t/ha/an)**.

Les meilleurs résultats provenaient du sud-ouest du pays. Au Kirghizistan, (Baier *et al.* (2021) ont démontré une production de biomasse allant de **1,5 à 3,4 Kg par arbre et par an**, avec une consommation d'eau allant de **433 à 613 litres par arbre et par an** apportée par un système d'irrigation.

D'autres études montrent des résultats contrastés sur certains hybrides : les « Cotevisa 2 » et « Suntzu 11 » cultivés en Espagne dans la province de Séville ont montré une production de **4 à 7 t/ha/an** (Icka *et al.*, 2016), « Cotevisa 2 » montrant une productivité moyenne 1,8 fois supérieur à « Suntzu 11 ». Cependant les mêmes clones testés dans la région de Cordoue en Espagne n'ont montré qu'une productivité de

1,7 à 2,3 t/ha/an de matière sèche (Tusevhaan *et al.*, 2023) dans des conditions culturales moins intensives mais avec un régime hydrique satisfaisant. Sur les sols dégradés ou plus pauvres, les paulownias présentent donc un taux de croissance plus faible (Jakubowski, 2022). Dans une étude de 3 ans en Espagne par exemple, un rendement en biomasse de *P. fortunei* géré de façon extensive n'a atteint que 3,3 t/ha de matière sèche (soit **1,1 t/ha/an sur 3 ans**), ce qui est très faible comparé à l'*Eucalyptus globulus* cultivé en parallèle (40,4 t/ha/an) (Gyuleva, 2008).

Bien qu'il faille rester vigilant en comparant les accroissements moyens en masse entre des dispositifs d'âges différents, on peut conclure que les bonnes productivités sont obtenues dans des systèmes fertilisés, traités et irrigués, le paulownia étant très exigeant quant aux conditions hydriques et édaphiques. L'irrigation est très souvent indispensable à la survie des plants les premières années (Akyildiz and Kol, 2010).

Dans les pays où le marché du paulownia s'est développé comme les États-Unis, son bois d'œuvre peut atteindre de bons prix, parfois même supérieurs au noyer (Berdón *et al.*, 2017). Le prix du bois de paulownia varie en fonction de sa qualité. Le bois d'œuvre vendu en Chine peut varier de **250 à 550 \$/m³** en fonction de la qualité du bois, tandis que le bois de haute qualité en provenance d'Australie peut coûter jusqu'à **2 000 \$/m³**. **Rappelons que le marché du paulownia ne s'est pas encore développé en France.** AB Paulownia propose à ses clients des contrats d'exclusivité pour le rachat de bois d'œuvre à des prix entre **150 €/m³** bord de route pour la meilleure qualité et **80 €/m³** pour une bille plus « branchue », soit un revenu espéré à l'hectare entre **60 000 et 80 000 €** d'après les estimations qu'ils mettent en avant. S'agissant d'un rachat bord de route, l'exploitation, le façonnage et le stockage des grumes sont à la charge du client propriétaire de la plantation. **L'entreprise ne s'engage pas sur la productivité ou la qualité espérée de la plantation.**

6. Risques sanitaires

L'histoire des préoccupations sanitaires relative aux paulownias a été marquée dès le début du XX^e siècle par des premières publications décrivant des problématiques dans leur aire asiatique d'origine. Des nécroses corticales sur troncs et branches, attribuées aux pathogènes *Valsa paulowniae*, sont alors décrites, provoquant dépérissements et mortalités dès 1916 en Chine (Hemmi, 1916).

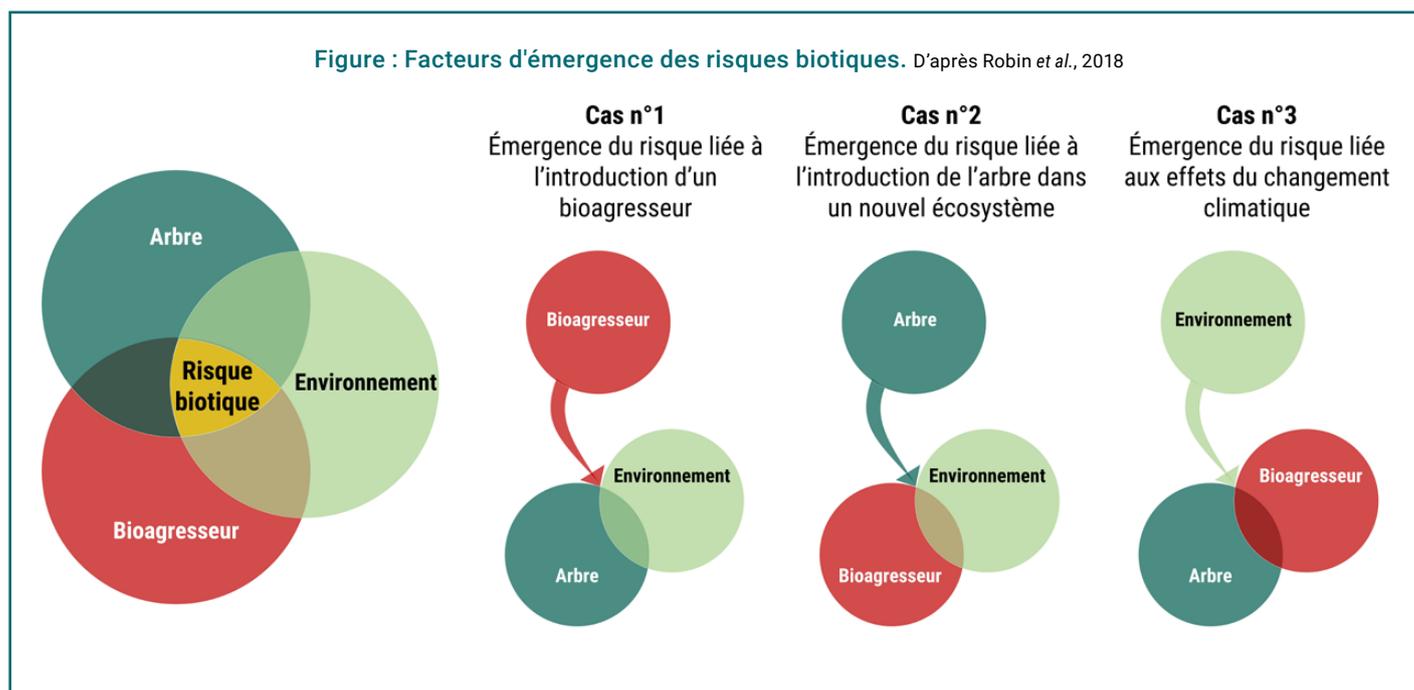
Puis, à partir des années 80, l'engouement grandissant à travers le monde pour cette essence en rapport avec sa productivité et ses nombreux usages (Milenković *et al.*, 2018 ; Snow, 2015 ; Stepchich, 2017), a conduit les principaux pays où elle a été introduite, à analyser les risques de tous ordres qu'elle pouvait engendrer. Les campagnes d'introduction dans des bassins de production parfois importants et présents dans tous les continents ont notamment fait l'objet d'attentions particulières portées sur les risques sanitaires auxquels le

paulownia s'exposait et risques écologiques que son usage faisait courir sur les écosystèmes en place. Les risques sanitaires ont même assez tôt représenté des chapitres structurants dans les premiers guides de gestion (Rao, 1986), s'appuyant sur une littérature grandissante dans ce domaine.

Comme toutes les espèces d'arbres, les paulownias s'exposent à des risques sanitaires dans tous les contextes dans lesquels ils sont cultivés. En dehors des dommages d'origine abiotique exprimant la réponse des caractères écologiques et la sensibilité de l'essence par rapport à son environnement (Aloi *et al.*, 2021 ; Owfi, 2021 ; Ray *et al.*, 2005 ; Stepchich, 2017), les dommages provoqués par des bioagresseurs sont également fréquemment rapportés et étudiés.

Les publications qui décrivent et analysent l'impact de ces différentes problématiques

Figure : Facteurs d'émergence des risques biotiques. D'après Robin *et al.*, 2018



sanitaires à travers le monde, constituent l'opportunité de profiter d'expériences édifiantes pour éclairer les stratégies françaises de valorisation de l'essence. Néanmoins, l'évaluation de ces risques doit nécessairement passer par une contextualisation qui doit aussi déterminer la nature du danger potentiel ainsi que la cible. En ce sens, on peut distinguer deux angles d'approche : (i) les risques sanitaires auxquels s'expose directement l'essence ; (ii) les risques que font peser son introduction sur les écosystèmes en place.

L'introduction de bioagresseurs inféodés aux paulownias via du matériel végétal importé depuis leur aire d'origine (pathogènes ou ravageurs ayant co-évolué avec les paulownias), est un premier angle de lecture des risques sanitaires. Mais l'exposition à des bioagresseurs déjà présents dans les contextes environnementaux dans lesquels les paulownias sont introduits, représente un second angle de vigilance qui doit aussi structurer l'évaluation des risques sanitaires.

L'évolution de l'environnement en conséquence du changement climatique est par ailleurs susceptible de modifier durablement la dimension de ces risques sanitaires. L'évolution des paramètres climatiques est en effet susceptible de favoriser (ou neutraliser) la pathogénicité, l'agressivité ou les performances de disper-

sion des bioagresseurs, mais également d'accentuer la vulnérabilité de l'essence si cette dernière est affaiblie par des conditions climatiques de moins en moins en adéquation avec ses exigences.

Les différents processus physiologiques, biologiques (reproduction, multiplication, infection), pathologiques et épidémiologiques (fréquence, distribution, dispersion, impact, gamme d'hôtes, facteurs environnementaux) auxquels la culture des paulownias en France ne saurait sans doute échapper, sont bien documentés dans la bibliographie internationale. Cela constitue un sérieux atout pour bénéficier des connaissances déjà acquises sur ces aspects en dehors de nos frontières.

Sans objectif d'exhaustivité, les paragraphes suivants listent et décrivent certains des exemples de risques abiotiques et biotiques les plus cités dans la littérature scientifique.

6.1 Risques abiotiques

Les risques abiotiques les plus fréquents auxquels s'exposent les paulownias sont le reflet de leurs caractères autécologiques décrits précédemment, et en particulier leurs exigences pour la qualité-fertilité des sols et la disponibilité en eau. Des liens entre conditions environnemen-

tales et vitalité ou encore productivité sont régulièrement établis par de nombreux travaux de recherches et publications (Stepchich, 2017). Dans son aire d'origine en Asie, les paulownias reçoivent beaucoup d'eau durant l'été coïncidant avec leur saison de végétation (Ray *et al.*, 2005). Ils exigent donc des conditions généreuses de climat et sol et ne répondent pas bien aux sols pauvres. Ils sont sensibles à la sécheresse, aux vents forts, aux salinités et alcalinité élevées, aux sols hydromorphes et mal drainés (sensibilités des graines aux pourritures), engorgements, grands froids températures inférieures à -20 °C (Owfi, 2021 ; Ray *et al.*, 2005).

Peu de publications font mention de dégâts conjoncturels d'origine abiotique (gelées, inondations, sécheresses...). Cela est sans doute le fruit d'une répartition mondiale en adéquation avec ses caractères écologiques jusqu'à présent, mais aussi des procédés culturaux qui préviennent de leur vulnérabilité face aux conditions les plus contraignantes de leur aire de présence (irrigation sous les climats les plus secs).

On peut noter toutefois que l'essence montre un caractère de sensibilité au froid capable par exemple d'établir des corrélations nettes entre présence de l'espèce et altitude (Essl, 2007). L'étude a montré que 81 % des occurrences de paulownias en Autriche étaient situées entre 100 et 300 m d'altitude (100 % des signalements < 500 m).

Sous les climats les plus arides, les paulownias s'exposent à des facteurs limitants en lien avec leurs exigences d'alimentation en eau. Cela explique sans doute que les comportements des différentes espèces de paulownia, aient déjà soutenu des stratégies lisibles quant à l'introduction artificielle de l'essence : *P. elongata* et *P. fortunei* étant plus adaptés aux climats chauds et secs du sud de l'Europe et *P. tomentosa*, plutôt introduit en France (Aloi *et al.*, 2021).

Dans les années à venir, il est donc probable que le réchauffement climatique rebatte les cartes de manière assez importante. Si *P. elongata* et *P. fortunei* pourraient peut-être rencontrer plus de contextes favorables dans des zones plus septentrionales en Europe, à la faveur du réchauffement des températures conjugué à

l'augmentation du régime pluviométrique, il n'en est pas de même pour les zones les plus méridionales qui suscitent déjà quelques interrogations. En effet, les paulownias apprécient de pouvoir bénéficier d'une hygrométrie élevée et une bonne alimentation en eau dans le sol. L'irrigation peut alors devenir indispensable quand les précipitations estivales sont insuffisantes, ce qui est classiquement le cas pour les climats à influence méditerranéenne, comme l'illustre exemple des systèmes de production australiens où le recours à l'irrigation est systématique dans les contextes climatiques rencontrés (Ray *et al.*, 2005). Les modalités culturales qui pourraient alors s'imposer dans ce même type de contexte en France amèneraient sans doute à réserver exclusivement la production de paulownia en dehors des écosystèmes forestiers.

Quant à *Paulownia tomentosa* et les hybrides, le manque de recul apporte de grandes incertitudes quant à la réponse qu'ils illustreront en contexte climatique changeant.

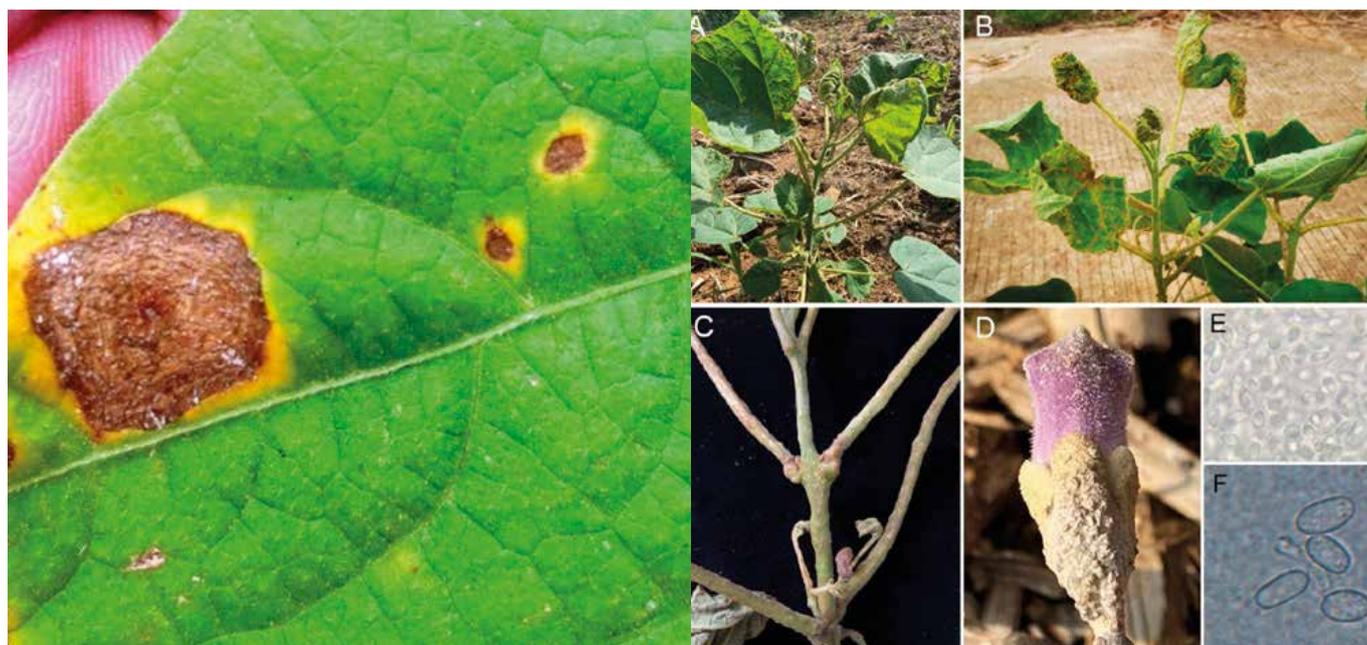
6.2 Risques biotiques

6.2.1 Agents pathogènes

• Sur feuilles, pousses et rameaux

De nombreux agents pathogènes foliaires des paulownias sont régulièrement cités dans la littérature. S'illustrant en différents endroits du globe, les agents d'anthracnose des feuilles abondent particulièrement. Ces maladies d'origine cryptogamique expriment leurs dommages par des processus d'obstruction des stomates consécutivement au développement mycélien des champignons pathogènes à l'origine de l'infection.

Sphaceloma paulowniae, s'inscrit comme l'une des espèces les plus communément citées. Elle est à l'origine d'impacts importants à travers le globe depuis longtemps (Nirmal, 2012 ; Phillips and Burdekin, 1992 ; Rao, 1986 ; Ray *et al.*, 2005). Les nécroses foliaires brunes, bordées d'un liseré jaune pâle caractéristique, sont les principaux symptômes des premiers stades de cette maladie. Ces nécroses aboutissent au flétrissement et au dessèchement des feuilles, des fleurs et tiges dont l'infection est également possible.



Nécroses foliaires (à gauche) et flétrissements, dessèchements provoqués par l'anthraxose du paulownia (*Sphaceloma paulowniae*), avec vues microscopiques des spores infectieuses.

Source : Paulownia.Energy – www.paulownia.energy/fr

Comme pour beaucoup de maladies foliaires, les conditions climatiques jouent un rôle important dans la sévérité et la précocité des attaques. Pour cette anthracnose, la température optimale de germination des spores est de 25 °C et l'humidité relative doit être élevée. Elle est optimale quand elle atteint plus de 90 % correspondant aux caractéristiques climatiques des zones du globe dans lesquelles la maladie est présente. Pendant la période de végétation, les précipitations et l'humidité ambiante influencent donc la propagation et le développement de la maladie. En pépinière, si les semis sont trop denses, mal ventilés, à l'ombre, ou en conditions d'humidité atmosphérique élevée, le taux d'infection devient très important.

De nombreux autres agents d'anthraxose sont régulièrement cités comme : *Gloeosporium kawkamii* et *Spliacelorna paulowniae* aux États-Unis (Nirmal, 2012), *Pseudocercospora* sp., *Cercospora* sp., *Corynespora cassiicola* et *Ascochyta paulowniae* en Australie (Ray et al., 2005), ou encore *Didymella tandonii*, *Phomopsis indica*, *Phaeoseptoria paulowniae* sp. nov. et *Cercospora apii* qui ont inquiété les communautés forestières d'Inde à la fin des années 80 (Dadwal et al., 1987). Dans cette étude, les dépérissements observés sur *Paulownia taiwaniana* ont particulièrement pu être attribués à *Phomopsis indica*.

Plus récemment étudiée en Chine en 2021, la « galle du paulownia » a pu être attribuée à *Elsinoe ampelina*, agent d'anthraxose bien connu en France pour les dégâts qu'il a pu provoquer sur le vignoble par le passé. L'étude a révélé une identité génétique proche de *Sphaceloma paulowniae* et a confirmé des dommages et dégâts importants sur *Paulownia fortunei* dans son aire d'origine (Liu et al., 2022).

Toujours sur les feuilles, des pathologies foliaires de type Mildew comme *Phyllactinia guttata*, *Uncinula clintonii* (Nirmal, 2012) ou encore *Phyllosticta paulowniae* (Dadwal et al., 1987 ; Nirmal, 2012 ; Ray et al., 2005) sont également citées. Ces pathologies provoquent également des tâches foliaires à l'origine de réductions de croissance qui compromettent la production de biomasse-énergie aux États-Unis (Nirmal, 2012) et engendrent des mortalités en pépinières (Dadwal et al., 1987).

À l'ouest de l'Australie, un autre complexe impliquant 4 espèces du genre *Alternaria* a provoqué des dégâts significatifs au début des années 2000 (Ray et al., 2005). Il s'agit de la maladie des tâches sombres des feuilles ou « brûlure du paulownia ». Elle se caractérise par des symptômes très caractéristiques à l'origine de son nom avec l'apparition de tâches foliaires se présentant sous la forme de plages

nécrotiques noires devenant progressivement brun clair, avec une décoloration à l'interface des tissus sains. Les nécroses sont décrites comme démarrant du pétiole de la feuille et se propagent ensuite aux rameaux pour provoquer des chancres sur les tissus lignifiés. Les dommages conduisent à une mortalité des parties aériennes situées au-dessus des chancres, pouvant entraîner la mort totale de la tige sur de jeunes arbres de moins de 5 ans.

Il a également été possible d'isoler d'autres agents dont le niveau de pathogénicité reste à pondérer (Ray *et al.*, 2005). Parmi les espèces les plus fréquemment citées, on retrouve :

- dans les chancres : *Picococcus* sp. (15 %), *Chaetomium* sp. (10 %), *Ulocladium* sp. (10 %) et *Stemphylium* sp. (10 %),
- dans les feuilles : *Epicoccum* sp. (36 %), *Curvularia* sp. (14 %), *Ulocladium* sp. (18 %) et *Fusarium* sp. (14 %)

D'autres études démontrent les effets des conditions environnementales (températures, humidité, stade de développement des feuilles) sur les processus pathologiques d'*Alternaria alternata* (Pleysier *et al.*, 2006).

Une autre pathologie provoquée par un complexe de champignons associant bien souvent *Rhizoctonia solani* et *Fusarium* sp., est rapportée en plusieurs endroits du globe, comme étant à l'origine de fontes de semis (Mehrotra and Mehrotra, 2000 ; Phillips and Burdekin, 1992 ; Rao, 1986). La maladie peut aussi affecter les jeunes plantations de printemps.

Ses principaux symptômes sont des nécroses sur racines et parties aériennes et un dessèchement des plants. Les agents pathogènes passent l'hiver sur des fragments de plantes dans le sol et commencent à se propager au début du printemps après un dégel. La gravité de l'infection dépend des caractéristiques du sol, du niveau d'inoculum dans le sol et surtout du mode de propagation par des fragments végétaux infectés au sol de propagation (Rao, 1986 ; Ray *et al.*, 2005)

• Sur rameaux, branches et tronc

Parmi les cas de dommages les plus cités sur rameaux et branches, on retrouve la maladie du « balai de sorcière ». Elle est provoquée par une bactérie du genre *Phytoplasma* et signalée dans divers contextes géographiques, notamment en Asie de l'est (Chine, Japon, Corée) d'où elle serait originaire (Hiruki, 1999 ; Rao, 1986). Des signalements en Argentine, aux USA (Mehrotra and Mehrotra, 2000 ; Phillips and Burdekin, 1992), ainsi qu'en Europe (Zhang *et al.*, 2024), pourraient être les conséquences d'introduction via du matériel infecté.

La maladie s'exprime par des symptômes touchant les organes pérennes de l'arbre (branches, tronc, racines). Elle se manifeste par un développement anarchique et très abondant de bourgeons dormants de l'axe infecté, aboutissant à la formation d'une ramification à l'architecture déstructurée. Jaunissement des feuilles et microphyllie complètent le tableau symptomatologique.



Vue microscopique du mycélium de *Rhizoctonia solani* (à gauche) et nécrose sur pousses de jeunes semis provoquant la fonte des semis (à droite).

Source : Paulownia.Energy – www.paulownia.energy/fr



Développement anarchique de la ramification (à gauche) et mortalités de rameaux (à droite) provoqués par la maladie du balai de sorcière (*Phytoplasma* sp.).

Source : Paulownia.Energy – www.paulownia.energy/fr

Des dégâts sont fréquemment rapportés avec des pertes de croissance ainsi que des mortalités importantes dans les peuplements aux stades jeunes semis à gaulis, liées à des destructions racinaires. La réduction de croissance peut atteindre 20 à 25 % sur arbres adultes. Les jeunes plants sont les plus vulnérables avec des taux de mortalité de 5 à 30 % en pépinière. En peuplements adultes, 50 à 80 % des tiges peuvent être infectées (Rao, 1986).

La maladie est en général transmise par du matériel végétal infecté. Certains insectes sont néanmoins vecteurs de la bactérie, comme la cicadelle *Empoasca flavescens* (Rao, 1986), ou encore plusieurs espèces de punaises du genre *Halyomorpha* (Hiruki, 1999).

L'existence de plusieurs revues qui expertisent la maladie du balai de sorcière, accompagnée d'études sur la résistance des paulownias à son égard – en particulier les hybrides de paulownia (*P. tomentosa* x *P. fortunei*) plus récemment obtenus pour répondre à des objectifs de production – confirment que cette pathologie constitue un enjeu prioritaire pour cette essence dans tous les pays où elle est cultivée et en particulier en Asie (Liu *et al.*, 2013 ; Nirmal, 2012 ; Zhang *et al.*, 2024).

Les programmes de créations variétales en faveur de l'obtention des hybrides résistants de paulownia (*P. tomentosa* x *P. fortunei*) soutiennent notamment certains travaux qui ont permis l'identification des séquences génétiques responsables de l'expression de la maladie, pour sélectionner les caractères de résistance (Liu *et al.*, 2013).

En ce qui concerne d'autres problématiques signalées sur branches et rameaux, il convient aussi de noter les dommages (plus anecdotiques mais sérieux) provoqués par le parasitisme de deux espèces de gui (*Loranthus parasiticus* et *Loranthus yadoriki*), qui sont rapportés depuis les années 80 en Chine (Rao, 1986).

• Sur tronc, collet et racines

Des dégâts de type pourriture blanche attribués au champignon basidiomycète *Pycnoporus cinnabarinus* ont été signalés à l'ouest de l'Australie comme étant à l'origine de mortalités importantes sur paulownia (Bayliss *et al.*, 2007). Habituellement saproxylophage, et même utilisé dans l'industrie papetière pour dégrader la lignine, ce pathogène a révélé un comportement primaire sur paulownia, ce qui a provoqué une inquiétude de la filière de production de l'essence. L'étude documente des symptômes de pourriture blanche du collet aboutissant à la mortalité de la tige.



À gauche : jeunes basidiomes de *Pycnoporus cinnabarinus* éclatant à travers l'écorce d'un individu de *Paulownia fortunei* âgé de 6 ans dans une plantation commerciale en Australie occidentale. Le développement de la pourriture blanche bien visible, provoque un décollement de l'écorce.

À droite : pourriture du bois causée par *Pycnoporus cinnabarinus* se produisant sous le collet et s'étendant jusqu'aux racines d'un arbre *Paulownia fortunei* âgé de 6 ans.

NB : basidiomes proéminents, mycélium orange et pourriture blanche bien visibles.

Source : Bayliss *et al.*, 2007.

Les blessures de taille sont les principales portes d'entrée du pathogène dans l'arbre. Les conditions de rayonnement solaire et de stress hydrique des arbres y sont également décrits comme des facteurs d'expression de la maladie, suggérant un rôle plutôt secondaire du pathogène dont le risque pourrait devenir croissant dans le contexte du changement climatique.

Les dégâts d'une autre pourriture blanche provoqués par *Trametes hirsuta* sont documentés en Serbie, mentionnant dépérissements et casses importantes de tiges sur jeunes plantations (Milenković *et al.*, 2018).

Problématiques un peu plus inquiétantes compte tenu de leur proximité avec la France, des espèces de *Phytophthora* sont également mentionnées sur paulownia en Italie. Une étude récente réalisée en Calabre (sud du pays) a mis en évidence des dégâts très importants provoqués par *Phytophthora nicotianae* et *P. palmivora*. Ils ont été identifiés sur près de 40 % des tiges dans des plantations d'hybrides *Paulownia elongata* x *P. fortunei* (Aloi *et al.*, 2021).



À gauche : sporophores du champignon *Trametes hirsuta*.

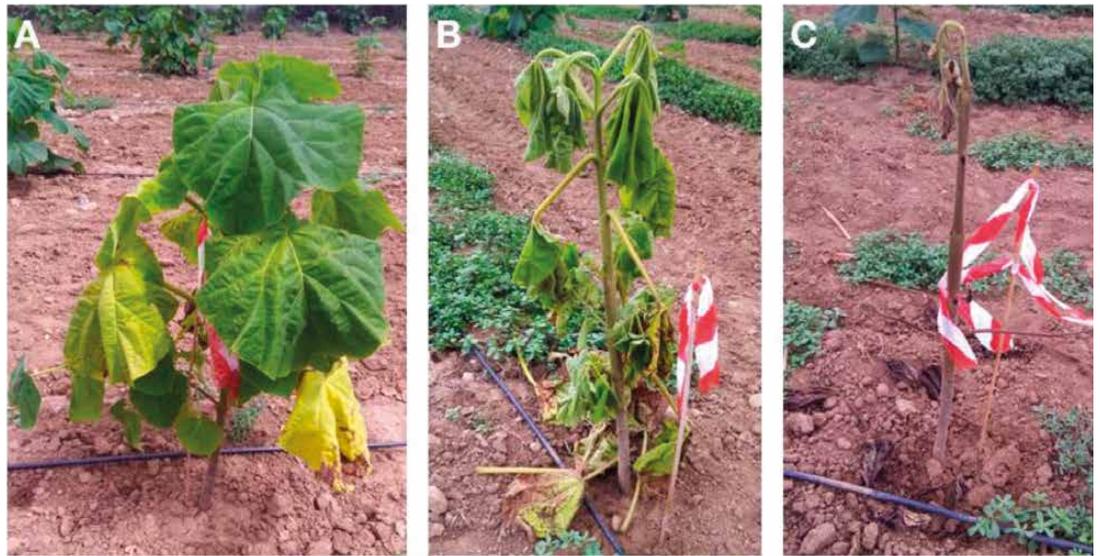
Au Centre : dommages sur tronc de *P. tomentosa* provoqués par pourriture blanche.

À droite : dégâts à l'échelle d'une parcelle.

Source : Milenković *et al.*, 2018.

Symptômes de flétrissement, de retard de croissance, de jaunissement des feuilles, de défoliation et de mortalité totale dans une jeune plantation d'hybrides de paulownia (*Paulownia elongata* x *P. fortunei*) en Calabre.

Source : Aloï et al., 2021.



Les symptômes rapportés décrivent des feuilles chlorotiques, jusqu'à un jaunissement total, des flétrissements, retards de croissance et des nécroses à la base du tronc et au collet, parfois

accompagnés de mortalités. Les dégâts sont souvent décrits comme très importants avec des mortalités totales.

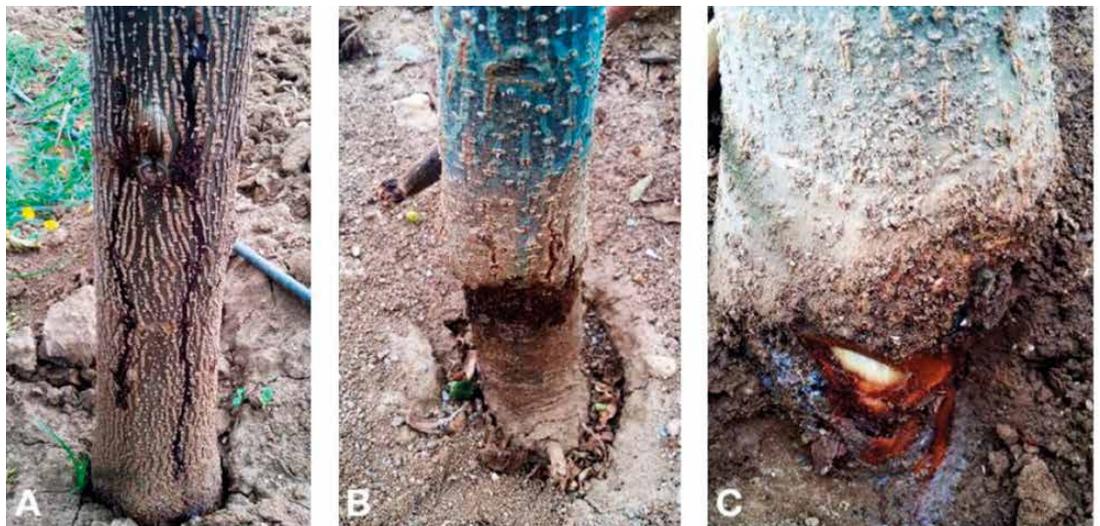
Feuilles chlorotiques, flétrissements et retards de croissance dans une jeune plantation de 4 ans. À droite : au premier plan, regarni pour remplacer les arbres morts, provenant d'une pépinière différente.

Source : Aloï et al., 2021.



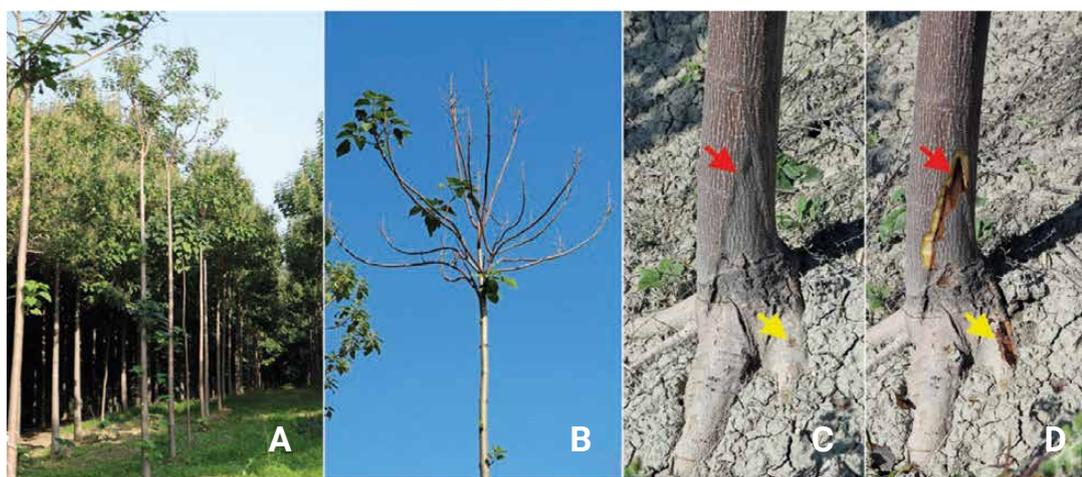
Nécrose au collet de la tige avec exsudat brun foncé sur des hybrides *Paulownia elongata* x *P. fortunei*. Symptômes de pourriture sévère du collet sur les jeunes arbres (4 ans).

Source : Aloï et al., 2021.



Toujours en Italie, mais cette fois dans le centre du pays, d'importants dégâts ont également été rapportés grâce à des méthodes de télédétection et imageries drone durant les printemps 2022 et 2023 (Bregant *et al.*, 2023). Les mêmes symptômes de jaunissement, chancres suintants à la base des troncs et au collet, des pourritures racinaires, comme des mortalités de rameaux, branches, voire d'indi-

vidus entiers, ont pu être observés. Les travaux de recherche qui s'en sont suivis ont mis en évidence l'implication de plusieurs pathogènes, dont 3 phytophthoras distincts de ceux découverts en Calabre : *Macrophomina phaseolina*, *Botryosphaeria dothidea* associés à *Phytophthora pseudocryptogea*, *P. citrophthora* et *P. erythroseptica* (Bregant *et al.*, 2023).



Aperçu des symptômes détectés sur les plants de paulownia suivis dans l'étude : dépérissement important des houppiers (A et B) ; arbre présentant un chancre avec renflement au collet causé par *Macrophomina phaseolina* (flèche rouge) et un chancre suintant de *Phytophthora pseudocryptogea* (flèche jaune) sur la racine principale causé par *Phytophthora pseudocryptogea* (flèche jaune) (C), particulier de la lésion nécrotique interne (écorce interne) sur celle-ci arbre (D).

Source : Bregant *et al.*, 2023.



Chancre en coupe transversale (E), symptômes typiques de la pourriture des racines causée par *Phytophthora* (F).

Source : Bregant *et al.*, 2023

La plupart de ces espèces de *Phytophthora* sont polyphages et fréquemment détectées dans les pépinières en Europe, y compris en France, sur plants et eaux d'irrigation.

• Dans les vaisseaux du bois

Dans le cadre d'une étude conduite en Espagne, des inoculations artificielles réalisées en laboratoire ont démontré que les hybrides *P. elongata* x *P. fortunei* étaient résistants à la verticilliose, une maladie provoquée par le champignon pathogène *Verticillium dahliae* (Jiménez-Fernández *et al.*, 2015). Pour les espagnols, cela constitue une opportunité de reconversion des oliveraies infectées. Ce caractère de résistance pourrait également être utile en France où la verticilliose est fréquemment présente dans les sols, provoquant

ponctuellement des dommages (notamment sur érables, hêtre...). C'est particulièrement le cas en agrosystèmes (agroforesterie, boisements de terres agricoles), dont les sols riches en azote et les procédés culturaux à l'origine de blessures racinaires (travaux du sol à proximité des arbres), représentent des facteurs importants d'infection et d'expression de la maladie.

6.2.2 Insectes ravageurs

Bien qu'ils représentent une part sensiblement moins importante de la littérature, insectes et mammifères font aussi partie du panorama des

Tableau 2 – Revue (non-exhaustive) des mentions répertoriées d'insectes ravageurs sur paulownias.

Ordre	Famille	Types de dommages		
		Défoliateurs	Xylophages	Piqueurs-suceurs
Lépidoptères	Noctuidae	<i>Agrostis ipsilon</i> ^{1,2} <i>Agrostis toxionis</i> ¹ <i>Agrostis segetum</i> ¹ <i>Heliothis armigera</i> ² <i>Heliothis peltigera</i> ² <i>Plusia orichalcea</i> ² <i>Plusia nigrisigna</i> ²		
	Geometridae	<i>Hyposidra talaca</i> ³ <i>Ectropis bhurmitra</i> ³ <i>Pingasa chlorea</i> ³		
	Pieridae	<i>Catopsilia crocale</i> ²		
	Lymantridae	<i>Lymantria</i> sp. ²		
	Brachodidae	<i>Phycodes radiata</i> ²		
	Nymphalidae	<i>Precis orithya</i> ²		
	Sphingidae		<i>Psilogamma menephron</i> ¹	
Coléoptères	Scarabaeidae	<i>Maladera orientalis</i> ¹ <i>Anomala corpulenta</i> ¹ <i>Holotrichia diomphalia</i> ¹		
	Chrysomelidae	<i>Basiprionota bisignata</i> ¹		
	Cerambycidae		<i>Batocera horsfieldi</i> ¹ <i>Megopis sinica</i> ¹ <i>Xylotrechus stebbingii</i> ²	
Orthoptères	Gryllotalpidae	<i>Gryllotalpa unispina</i> ¹ <i>Gryllotalpa africana</i> ¹		
Hémiptères	Cicadellidae			<i>Empoasca flavescens</i> ¹ <i>Cicadella viridis</i> ¹
	Aleyrodidae			<i>Aleuroplatus pectiniferus</i> ²
	Miridae			<i>Cyrtopeltis tenuis</i> ²
	Margarodidae			<i>Drosicha stebbingii</i> ²
	Aphididae			<i>Myzus persicae</i> ²
	Pentatomidae			<i>Halyomorpha halys</i> ^{4,5} <i>Halyomorpha mista</i> ⁵ <i>Halyomorpha picus</i> ⁵
Isoptères	Termitidae		<i>Odontotermes obesus</i> ²	

1. (Rao, 1986).

2. (Bajwa and Gul, 2000)

3. (Mukhtar *et al.*, 2003).

4. (Jones and Lambdin, 2009).

5. (Hiruki, 1999).

risques sanitaires auxquels sont exposés les paulownias. Les dommages sévères liés à des insectes sont en général moins fréquents.

Des travaux de recherche ont en effet démontré que les paulownias présentait des structures morphologiques particulières dans leurs feuilles et organes de reproduction. Selon les stades de développement de la plante, ces structures participent à lutter contre les consommations d'animaux herbivores comme insectes défoliateurs. Héritées d'une longue évolution sur le plan génétique, ces structures traduisent en effet différentes stratégies mises en place par la plante comme le caractère répulsif de substances, attractif d'auxiliaires de lutte, ou encore le développement d'organes spécifiques participant au dysfonctionnement des mécanismes d'établissement comme l'entrave à la progression des chenilles par exemple (Kobayashi *et al.*, 2008). C'est probablement la raison pour laquelle les publications faisant état de risques sanitaires liés à des insectes ravageurs, sont moins nombreuses. Certaines d'entre elles confirment bien cette caractéristique avantageuse en mentionnant une globalement faible sensibilité des paulownias aux insectes (Nirmal, 2012).

Néanmoins, l'essence n'en reste pas moins appétente pour de nombreuses espèces. La plupart des mentions d'insectes ravageurs

sur paulownias, concerne des défoliateurs, en moindre mesure des piqueurs-suceurs et des xylophages.

Peu de ces espèces suscitent de réelles inquiétudes. Cependant, l'une d'entre elles s'est révélée épidémique et a justifié la mise en œuvre de stratégies de lutte alliant insecticides, bandages des troncs et travaux du sol pour destruction des œufs (Bajwa and Gul, 2000). Il s'agit de *Xylotrechus stebbingii* (Cerambycidae originaire d'Asie). Ce longicorne, proche de *Xylotrechus chinensis*, colonise le territoire français depuis sa première observation dans les Alpes Maritimes en 1993. Il affectionne de nombreuses essences feuillues notamment l'aulne, le chêne, le figuier, le frêne, le micocoulier, le mûrier, l'olivier, l'orme, les peupliers, le platane, le savonnier et le sumac, cette liste n'étant sans doute pas exhaustive. Par analogie, son appétence pour le paulownia en France peut être considérée comme très probable. Il est désormais observé dans une grande partie du sud de la France ainsi que dans le val de Saône et en région parisienne (Roques, com.pers., "INPN," 2024). Il est aussi suivi plus largement en Europe où il été intercepté en Allemagne pour la première fois en 2007, et où il est aujourd'hui considéré comme établi. Depuis, plusieurs autres foyers européens importants ont été détectés, notamment en Espagne (2013 en Catalogne et 2018 dans la région de Valence) et en Grèce (2017 à Héraklion).

Adultes de *Xylotrechus stebbingii*.

Source : INPN, 2024.

Photos : © J. Touroult, © B. Calmont/INPN



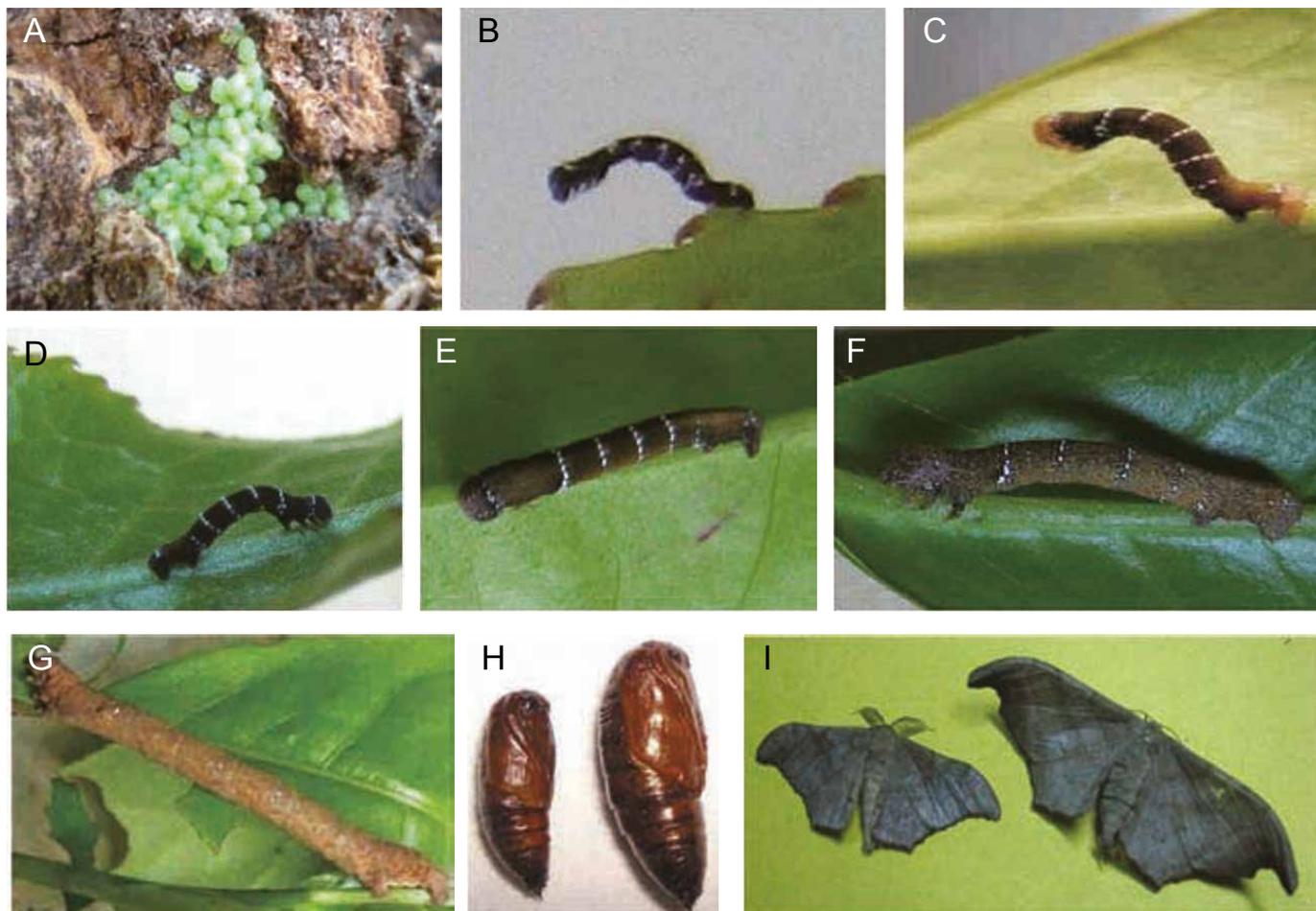
Une étude conduite au Pakistan dans des plantations et des pépinières de cinq espèces de paulownia (*P. elongata*, *P. fargesii*, *P. fortunei*, *P. kawakamii*, *P. tomentosa*) met en évidence l'implication de 14 espèces d'insectes responsables de dommages significatifs – voir Tableau 1 (Bajwa and Gul, 2000).

Par ailleurs, des dégâts importants causés par trois espèces de géométrides (*Hyposidra talaca*, *Ectropis bhurmitra* et *Pingasa chlorea*) sont également rapportés en Inde. Si les deux dernières ont montré un impact plus mineur, la première est à l'origine des principaux dommages sur *Paulownia fortunei* (Mukhtar et al., 2003).

Enfin, la punaise diabolique (*Halyomorpha halys*) originaire d'Asie est responsable de défoliations de paulownias aux États-Unis, dans le Tennessee (Jones and Lambdin, 2009). Au-delà des dommages de défoliations qui ne semblent pas préoccupants pour la santé des paulownias, c'est surtout son rôle de vecteur du phytoplasme responsable de la maladie du balai de sorcière (cf 1.2.1) ainsi que d'autres phytoplasmes dangereux pour d'autres espèces végétales, qui pourraient être préoccupants. Hormis les États-Unis, *H. halys* est une espèce invasive dans de nombreux autres pays (Kuhar and Kamminga, 2017 ; Nielsen and Hamilton, 2009).

Stades de développement de *Hyposidra talaca*. Œufs (A), larve de 1^{er} stade (B), larve de 2^e stade (C), larve de 3^e stade (D), larve de 4^e stade (E), larve de 5^e stade (F), larve de 5^e stade (avancé) (G), pupes (H), papillons adultes (mâles et femelles) (I).

Source : Roy et al., 2017.

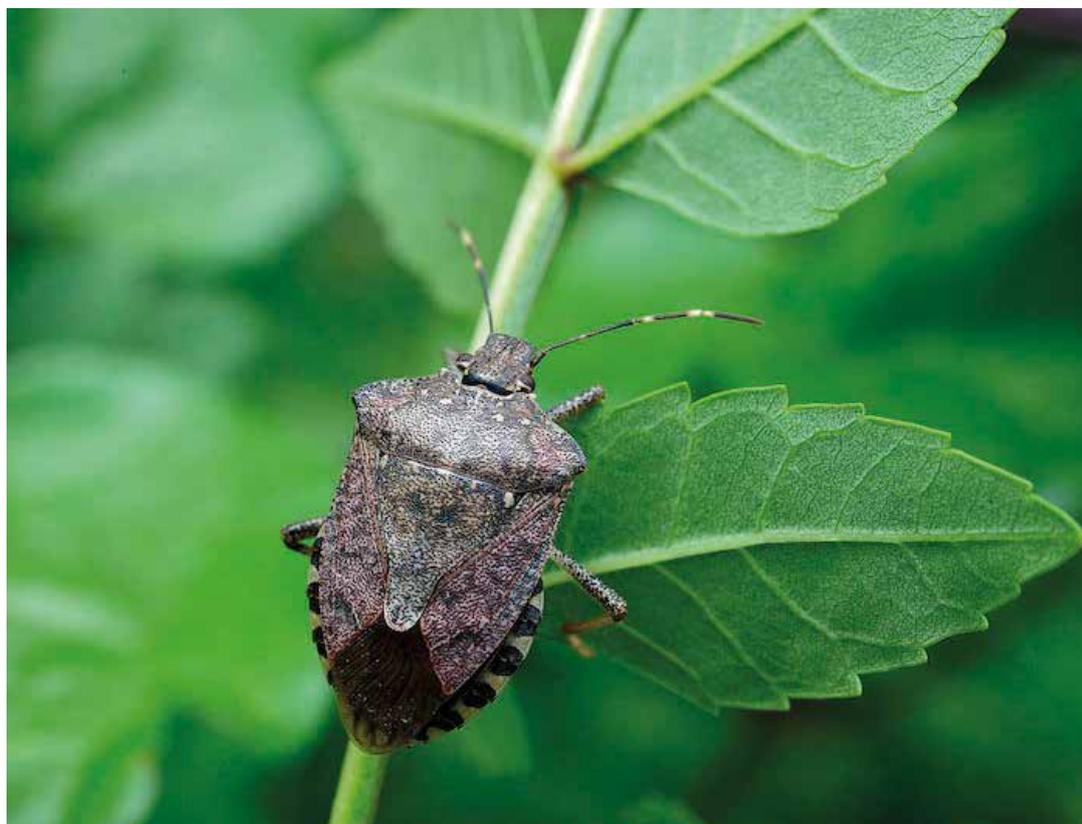


Elle est d'ailleurs abondamment décrite en France comme une espèce exotique envahissante ("ANSES," n.d.; "E-Phytia," n.d.) et citée comme un ravageur de plusieurs variétés d'arbres fruitiers et de légumes (FREDON, s. d.). Au-delà de son impact direct sur les paulownias, *H. halys* pourrait donc représenter un risque supplémentaire de transmission de certaines maladies à d'autres hôtes d'enjeu important pour l'alimentation humaine, voire à d'autres essences forestières.

À noter qu'en plus d'*Halyomorpha halys*, deux autres espèces de punaises (*H. picus* et *H. mista*) étaient déjà mentionnées en Chine, Corée et au Japon comme des vecteurs potentiels de la maladie du balai de sorcière sur paulownias (Hiruki, 1999). Au-delà de leur impact direct sur les paulownias, *H. halys* pourrait donc représenter un risque supplémentaire de transmission de certaines maladies.

Stade larvaire d'*Halyomorpha halys*.

© Jean-Claude Streito, INRAE



Stade adulte d'*Halyomorpha halys*.

© Jean-Claude Streito, INRAE

7. Impacts sur l'écosystème

L'introduction des différentes espèces de paulownia en dehors de leur aire d'origine suscite beaucoup d'interrogations autour des risques d'impacts sur les écosystèmes en place. La principale préoccupation (la plus documentée) est le risque d'invasion. Il est avéré dans une grande partie des pays où l'essence a été introduite depuis longtemps. D'autres impacts, susceptibles de mettre en évidence un rôle de l'essence dans la perturbation des équilibres écosystémiques, existent aussi, mais plus marginaux.

7.1 Caractère invasif

La richesse de la littérature sur le caractère invasif des paulownias confirme que le sujet représente une préoccupation importante dans tous les contextes du globe où ses différentes espèces sont cultivées. On détecte cependant des nuances de positionnement sur cette question parfois clivante. Elles reposent sur des résultats scientifiques (niveaux assez variables de l'invasivité très dépendante de facteurs contextuels ou des espèces de paulownias...), mais aussi sur la considération des enjeux exposés à ce risque.

Plusieurs publications citent un caractère invasif de *Paulownia tomentosa* plus expressif que *Paulownia elongata* (Aloi *et al.*, 2021 ; Snow, 2015) en faisant état d'une problématique nettement plus impactante en Asie, qu'en Amérique du nord et en Europe (Owfi, 2021).

Aux États-Unis, une thèse explore de manière très approfondie le sujet dès le début des années 2000 (Longbrake, 2001). Fondée sur une étude menée dans l'Ohio, l'objectif d'évaluation de l'invasivité de *Paulownia tomentosa* selon un gradient de perturbations des milieux en forêts gérées a permis d'éprouver des méthodes associant évaluation de la croissance et du taux de survie dans les jeunes stades de développement, mais aussi de délivrer des conclusions sur les facteurs d'invasion, parmi lesquels :

- *P. tomentosa* est capable de constituer des banques de graines dans le sol pouvant survivre très longtemps
- Les coupes rases engendrent les risques les plus élevés d'invasion en modifiant la température des premiers horizons du sol et en favorisant la germination des graines et le développement des semis.
- Les sols riches en azote pourraient permettre à *P. tomentosa* de se maintenir en sous-étage (ombre).
- La compétition des autres espèces présentes peut ne pas être suffisamment performante pour entraver le potentiel invasif de *P. tomentosa* (selon certaines conditions).

Par la suite, plusieurs autres études ont confirmé les mêmes postulats, mais aussi et surtout permis d'établir une relation entre intensité de l'invasivité et perturbation du milieu. Le pouvoir de colonisation de *P. tomentosa* après des événements brutaux (tempêtes de grêle, incendies et traitements chimiques de la végétation...) est alors établi dans l'Ohio, décrivant la dynamique de végétation de l'essence plus compétitive que celle des espèces natives (Chongpinitchai, 2012 ; Chongpinitchai and Williams, 2021). L'impact sur la biodiversité locale y est également mis en évidence.

D'autres études éclairent sur le rôle des incendies pouvant représenter des événements activateurs du potentiel invasif de l'espèce. Une étude des performances de germination des graines de *P. tomentosa* après un incendie a notamment démontré que les concentrations plus élevées de certains éléments chimiques des sols issus de produits de combustion, conjuguées à l'augmentation de température et un apport de lumière massif, favorisaient la germination (Todorović *et al.*, 2010).

L'étude de la Forêt d'État de Shaunee dans l'Ohio, incendiée en 2009 sur plus de 1 200 ha, vient néanmoins nuancer ces conclusions en démontrant que *P. tomentosa* a recolonisé les espaces brûlés au même titre que d'autres



À gauche :
colonisation
post-incendie de
Paulownia tomentosa
dans la région
naturelle de Linville
Gorge, Caroline du
Nord.

© Dane Kuppinger.

Ci-dessous :
régénération
naturelle de
Paulownia tomentosa
en milieu naturel.

Source : www.hovos.com



espèces présentes avant la crise. Les densités et proportions de tiges n'ont pas montré de progression significative entre milieux incendiés et non-incendiés, indiquant un caractère invasif non-corrélé (Williams and Wang, 2021). Il semble donc que le caractère invasif du paulownia aux États-Unis ne soit pas aussi problématique qu'en Asie, et s'exprime surtout de manière assez variable en réponse à une conjugaison subtile de plusieurs conditions environnementales fondées sur la perturbation des milieux en place (Owfi, 2021). Le pouvoir multiplicateur de l'essence par les graines semble notamment moins performant que les rejets et drageons, du fait de leur petite taille (faibles réserves nutritives). Les besoins de lumière au sol pour activer la germination confirme bien son statut de pionnier strict de l'essence (Owfi, 2021), ce qui tendrait à pondérer les risques en milieux naturels plus fermés.

En Europe, les tendances renvoient les mêmes signaux. Une étude comparative conduite en Allemagne de 6 outils de classification des risques liés à l'usage d'espèces exotiques

(dont paulownia) appliqué à des cas d'étude (120 points), conclut que les risques liés à l'usage du paulownia restent globalement faibles à modérés. Toujours d'après cette étude, ils seraient même moindres que pour d'autres essences nord-américaines comme le chêne rouge, le frêne rouge ou encore le douglas. La capacité de *P. tomentosa* à coloniser des milieux y est reconnue performante, classant spécifiquement le risque invasif à un niveau élevé. Mais des biais importants comme le manque de recul (antériorité de présence de l'essence), la faible représentativité de l'essence ou encore son occurrence assez systématique en milieux très anthropisés, tendent à relativiser la fiabilité de ce type de conclusion (Bindewald *et al.*, 2020).

Une autre étude s'est attachée à suivre le processus d'invasion de *Paulownia tomentosa* en Autriche. À partir de 151 placettes échantillonnées sur tout le territoire (selon divers gradients environnementaux structurés par des cartes de végétation), l'étude a montré que dans la majorité des cas (83 %) *P. tomentosa* se présentait

en micro-populations et se comportait comme un pionnier au comportement très rudéral (colonise fortement les milieux urbains, perturbés et anthropisés... = dans les fissures de milieux urbanisés, ballast de chemins de fer...). La colonisation d'habitats naturels à partir des points de présence recensés (7 %) comme les clairières forestières, qui inclut reboisements et ripisylves, reste rare (Essl, 2007).

L'essence est même maintenue en dehors de listes d'espèces invasives en Bulgarie car elle est reconnue globalement plus profitable pour la protection des sols contre l'érosion, la production de miel ou encore de biomasse (Stepchich, 2017). En revanche toutes les études font consensus sur le fait que les effets du changement climatique pourraient catalyser son comportement invasif et contribuer à une progression de ce risque (Aloi *et al.*, 2021 ; Bindewald *et al.*, 2020 ; Essl, 2007 ; Todorović *et al.*, 2010). Certaines publications passent en revue de nombreuses démarches entreprises à travers le monde pour le développement de méthodes de lutte contre le caractère invasif du paulownia, notamment par procédés chimiques, mécaniques ou biologiques (Owfi, 2021).

En bref...

D'après le Centre de Ressources espèces exotiques envahissantes, *Paulownia tomentosa* est une espèce « à surveiller », dans la mesure où si les risques en France sont encore mal connus, cette essence a déjà démontré un caractère envahissant dans le monde et notamment en Europe. Quant aux différents hybrides sélectionnés pour la production de bois ou de biomasse, même s'ils sont réputés être stériles, ce même centre de ressources incite là encore à la prudence. « Un répertoire des hybrides commercialisés devrait être établi pour faciliter l'accès aux informations concernant leurs utilisations et installations sur le territoire et permettre la mise en place de suivis de certaines plantations. Il s'agit là d'un axe de recherche important à développer pour améliorer les connaissances du potentiel envahissant des hybrides de *P. tomentosa* et établir de meilleures évaluations de risques permettant d'encadrer leur gestion future dans des conditions adaptées de sécurité environnementale. ».

Les graines de *P. tomentosa* ont besoin de lumière pour germer. Cela réduit les risques de voir cette essence se propager sous couvert forestier, mais ne l'empêche pas pour

À Kirchberg, dans le Haut-Rhin ces jeunes paulownias sont apparus au beau milieu d'une sapinière vosgienne sans que la provenance des graines ait pu être identifiée.

© Claude Hoh



autant. À l'occasion d'un webinaire organisé en février 2025 pour faire un point sur cette essence, Claude Hoh, responsable de l'équipe forêt à la Chambre d'agriculture d'Alsace, a donné quelques exemples attestant qu'il est désormais possible de trouver du *P. tomentosa* issu de semis dans différentes forêts. Dans le Haut-Rhin, sur les hauteurs de Kirchberg, à une trentaine de kilomètres à l'ouest de Mulhouse, de jeunes paulownias sont apparus au milieu des accrus (voir photo ci-après) à la faveur d'une coupe qui avait permis un apport de lumière très localisé. Ces quelques très jeunes sujets affichent une certaine vigueur, mais il est actuellement impossible de savoir d'où proviennent les graines qui en sont à l'origine. Il n'y a pas d'arbre mère à proximité.

À l'inverse, il existe différents exemples de jeunes paulownias poussant également dans des zones forestières, mais à proximité de parcs où cette essence avait été plantée à des fins ornementales et expliquant de ce fait quelle est l'origine des graines. Claude Hoh a pris l'exemple d'une forêt bordant la petite ville allemande de Friburg-en-Brigau, où de jeunes paulownias d'âge différent et mesurant parfois jusqu'à 15 mètres de hauteur poussent dans une hêtraie-sapinière. Dans cette ville située

à une cinquantaine de kilomètres de Colmar, sur la bordure ouest de la forêt noire, ils sont manifestement issus de graines émises par des arbres présents dans des parcs situés en bordure de forêt. On retrouve un cas de figure similaire à côté de Locarno en Suisse où, là aussi, de jeunes paulownias issus d'arbres de parc ont réussi à germer dans une châtaigneraie.

7.2 Autres impacts sur l'environnement

Les autres impacts sur l'environnement liés au paulownia renvoient peu de publications ou mentions, à l'exception de la capacité de l'essence à fixer l'azote et en amender le sol (Owfi, 2021), caractéristique susceptible de modifier les cortèges végétaux en place et menacer des espèces natives patrimoniales d'intérêt potentiellement conservatoire.

À noter que la culture du paulownia s'illustre aussi dans la littérature pour les atouts qu'elle présente en matière de phytoremédiation. Certaines études ont démontré les capacités de l'essence à dépolluer les sols de certains intrants comme les pesticides à forte rémanence (Mamirova et al., 2022).

À gauche : en Allemagne à Friburg-en-Brigau, ces paulownias poussent dans une éclaircie en bordure d'une hêtraie-sapinière.

© Claude Hoh

À droite : à Locarno, en Suisse, ces jeunes paulownias poussent dans un chablis de châtaigniers avec des graines provenant d'arbres de parcs situés à proximité.

© Claude Hoh



8. Valorisations

8.1 Propriétés du bois

Feuille pionnier à croissance très rapide, le paulownia présente sans surprise un bois très léger, comparable au bois de balsa (Lugli *et al.*, 2023). Sa densité varie de 218 à 353 Kg/m³ (Jakubowski, 2022 ; Tusevhaan *et al.*, 2023) pour une teneur en humidité de 12 %, avec une moyenne autour de 268 Kg/m³ d'après l'entreprise (KIRITEC, 2020) pour 253 Kg/m³ à 0 % d'humidité (densité à sec étuvé). **C'est donc un bois environ 2 à 3 fois plus léger que du chêne sessile par exemple.** La densité du bois varie principalement en fonction de la vitesse de croissance (largeur des cernes) bien qu'il existe une **différence significative entre espèces à largeur de cerne comparable** (Bozkurt and Erdin, 1990).

P. tomentosa présente une densité moyenne légèrement plus élevée que *P. elongata* et *P. fortunea* par exemple. Une densité de bois de plus de 400 Kg/m³ a été mesurée pour l'hybride Shan Tong en Bulgarie. L'hybride « Cotevisa 2 » présenterait une densité entre 250 et 300 Kg/m³.

D'après les conclusions d'une étude turque (Akyildiz and Kol, 2010), c'est un bois très poreux (de l'ordre de 80 %) lié à sa faible densité, permettant une teneur en humidité maximale de 303 % (Cathy, 2021).

Les propriétés mécaniques du paulownia ne sont pas très éloignées du bois de peuplier. La résistance à la flexion statique du bois de paulownia varie de 24 à 43,6 MPa, selon l'espèce, tandis que le module d'élasticité varie de 2 651 à 4 917 MPa, voire jusqu'à 5 900 MPa pour *P. tomentosa* (Tusevhaan *et al.*, 2023). Les tests mécaniques de l'entreprise (KIRITEC, 2020) donnent des résultats globalement supérieurs sur leurs hybrides : entre 36,2 et 50,5 MPa (moyenne à 42,5 MPa) pour la résistance à la flexion et entre 3 120 et 6 842 MPa (moyenne à 5 033 MPa) pour le module d'élasticité. L'ensemble des autres caractéristiques techniques du bois de paulownia testé par KIRITEC (2020) est résumé sur le tableau ci-dessous :

MECHANICAL PROPERTIES

	NORM	UNIT	AVERAGE	MINIMUM	MAXIMUM
Flexural strength	i.A. DIN 52186	N/mm ²	42,47	36,24	50,47
Modulus of elasticity, Young's Modulus	i.A. DIN 52186	N/mm ²	5033	3120	6842
Tensile strength parallel to the fiber	i.A. DIN 52188	N/mm ²	43	27,17	61,72
Compressive strength parallel to the fiber	i.A. DIN 52185	N/mm ²	23,42	14,64	40,26
Impact strength	DIN 52189	Nm/cm ²	2,2	1,0	3,4
Indentation resistance Brinell scale - radial	i.A. DIN 1534	N/mm ²	7,22	4,79	10,68
Indentation resistance Brinell scale - tangential	i.A. DIN 1534	N/mm ²	7,33	4,98	12,25
Indentation resistance Brinell scale - longitudinal	i.A. DIN 1534	N/mm ²	23,50	16,38	31,37
Screw extraction resistance radial	i.A. EN 320	N	511	338	737
Screw extraction resistance longitudinal	i.A. EN 320	N	509	175	771
Screw extraction resistance tangential	i.A. EN 320	N	544	236	793

Dans l'étude de Akyildiz et Kol (2010), le module d'élasticité du paulownia s'est avéré inférieur à celui des espèces comparées (peuplier tremble, aulne glutineux, châtaignier commun, hêtre d'orient). Dans cette étude, le bois de paulownia peut être classé comme très faible pour la résistance à la compression et faible pour le module d'élasticité et la résistance à la flexion, selon la classification de Bozkurt et Erdin (1990). **Ce bois malléable présente donc une faible résistance. Par conséquent, il n'est pas adapté à une utilisation comme bois de construction nécessitant une bonne résistance mécanique** (Akyildiz and Kol, 2010).

Ceci étant dit, relativement à sa densité très basse, c'est un bois plutôt résistant à la torsion, et à la contraction (pas de fente ou de fissures) (Danciu *et al.*, 2016). **Bien qu'ayant une résistance mécanique globalement faible comparé à d'autres essences utilisées dans la construction bois, les paulownias ont donc un rapport résistance-densité élevé**, très utile, notamment lorsque des structures très légères mais robustes sont requises, comme dans la construction de panneaux composites. **Il faut garder en tête que les propriétés mécaniques sont assez variables entre les différentes espèces.** Cet aspect a été souligné par Feng *et al.* (2020) qui ont testé 23 clones et ont démontré une forte variation dans les propriétés du bois.

Le bois est réputé peu putrescible et d'une grande stabilité dimensionnelle (Bergmann, 1998). **Il est résistant aux vers du bois et aux termites en raison de sa teneur élevée en tanins** (Yadav *et al.*, 2013).

Il sèche rapidement mais se déforme peu en séchant (Danciu *et al.*, 2016 ; El-Showk and El-Showk, 2003). Il peut être séché en séchoir en 24 à 48 heures et à l'air libre en 30 à 60 jours (Ates *et al.*, 2008; Yadav *et al.*, 2013). Il présente un faible coefficient de rétrécissement et ne gauchit pas en séchant (Akyildiz and Kol, 2010). En effet le retrait (retraits radial, tangentiel et volumétrique) et le gonflement volumétriques du bois de paulownia sont inférieurs à ceux d'es-

èces similaires, ce qui le classe comme **bois à faible retrait** (Bozkurt and Erdin, 1990). Les tests mécaniques menés par l'entreprise allemande (KIRITEC, 2020) donnent les résultats suivants : retrait différentiel radial entre 8 % et 15 % avec une moyenne de 12 % ; retrait différentiel tangentiel entre 16 % et 27 % avec une moyenne à 22 %. **De même, les produits en bois de paulownia subissent peu de déformations avec les variations d'humidité au cours de leur vie comparé à d'autres types de bois.** Cette propriété offre un avantage très important dans différents domaines d'utilisation comme le mobilier.

Le bois de paulownia est doux, à grain droit poreux avec un lustre satiné (Kalaycioglu *et al.*, 2005). Il est réputé facile à raboter, scier ou sculpter sans risque d'éclats (Kaymakci *et al.*, 2013) et accepte facilement les teintures, la peinture et la colle (Icka *et al.*, 2016). **C'est un bois d'une faible conductivité thermique**

(0,063-0,086 kcal x m⁻¹ x hr⁻¹ x C⁻¹) (Akyildiz and Kol, 2010), ce qui en fait donc un **bon isolant** (Ayrilmis and Kaymakci, 2013) et un atout en tant que matériau de construction là où l'isolation est requise (Zhang *et al.*, 2020). Au Japon, il était d'usage de mettre ses objets de valeur dans des coffres en paulownia car en cas d'incendie, c'était souvent le dernier bois à brûler. **Il est naturellement résistant au feu** (Akyildiz and Kol, 2010) avec une température d'allumage élevée de 420-430 °C par rapport à la moyenne des feuillus dont la température d'allumage est de 220-225 °C (Danciu *et al.*, 2016). **Les propriétés d'absorption sonore sont toutefois médiocres**, ce qui réduit sa qualité d'insonorisation par rapport au balsa par exemple. Ceci dit, un traitement hydrothermal (Kolya and Kang, 2021) des panneaux permet d'améliorer l'absorption sonore pour des usages résidentiels (Tusevhaan *et al.*, 2023).

En conclusion le bois de paulownia n'est pas adapté aux utilisations nécessitant une bonne résistance mécanique (poutres, pièces porteuses, ossature bois). Il est léger, résistant à la pourriture et exempt de déformations et fissures (Akyildiz and Kol, 2010) et peut donc trouver de nombreux usages.

8.2 Bois d'œuvre

En Chine et dans d'autres pays asiatiques, le bois de paulownia est beaucoup utilisé de façon traditionnelle : ameublement (tables, chaises, coffres, boîtes...), sabots, articles de cuisine (pots de riz, seaux d'eau, bols, cuillères et bâtonnets), des outils agricoles ou d'artisanat (Akyildiz and Kol, 2010). Son bois léger et facile à travailler trouve une variété d'autres applications telles que la construction navale, l'aéronautique, les caisses d'emballage, les cercueils, la menuiserie et le moulage (Jr. Flynn and Holder, 2001). Plus récemment, il est utilisé en bois d'ingénierie, pour la fabrication de skis ou de planches de surf (Lugli *et al.*, 2023) mais aussi pour le revêtement de sol (Kaymakci *et al.*, 2013) ou encore les contreplaqués et les panneaux (Beel *et al.*, 2005). Pour la construction, son bois léger et peu putrescible est un atout à condition de ne pas l'exposer à de fortes contraintes mécaniques. Il est utilisé pour les portes, les fenêtres, les cloisons ou les plafonds par exemple (El-Showk and El-Showk, 2003).



À gauche :
Saladier en
P. tomentosa.

© Stephen J. Mildenhall

En raison de sa faible conductivité thermique, la laine de bois de paulownia serait idéale comme matériau d'isolation. Les ruches fabriquées en bois de paulownia sont légères et bien isolées et produisent un rendement de miel plus élevé (El-Showk and El-Showk, 2003).

Le paulownia est fréquemment utilisé pour la fabrication d'instruments de musique, bien que son bois ne soit pas un bon absorbant sonore (Jakubowski, 2022). Il aurait pourtant d'excellentes qualités de résonance d'après El-Showk and El-Showk (2003). Rappelons que les bois de résonance qui rentrent dans la fabrication des violons par exemple sont souvent des arbres qui ont poussé lentement mais régulièrement (épicéa de montagne par exemple). Des tests ont également montré que le bois de paulownia se prête bien à la fabrication de crayons, présentant des propriétés prometteuses par rapport au peuplier et au genévrier, couramment utilisés dans ces produits.

8.3 Bois d'industrie

En raison de sa concentration élevée en cellulose allant jusqu'à 440 g de cellulose/kg (Yadav *et al.*, 2013) le bois de paulownia est adapté à la fabrication de pâte de cellulose (Ates *et al.*, 2008). Les États-Unis développent aujourd'hui le paulownia dans la fabrication de pâte à papier (Tusevhaan *et al.*, 2023). Cependant les chercheurs ont souligné que les fibres de paulownia sont courtes et ne conviennent qu'à certaines qualités de papier. La taille des fibres prend des valeurs typiques des espèces à feuilles caduques utiles dans cette industrie, plus courte que les fibres de résineux (Icka *et al.*, 2016). Le bois est également commercialisé pour la production de panneaux de particules orientées (Akyildiz and Kol, 2010). Les propriétés de ces panneaux peuvent être améliorées, notamment via des méthodes de traitement à haute pression qui fonctionnent bien pour des bois de faible densité comme le paulownia (Tusevhaan *et al.*, 2023). Il y a actuellement beaucoup de recherches en cours visant à promouvoir l'utilisation du bois de paulownia dans la production de plastiques et de composites bois et dans la production de biopolymères (Akyildiz and Kol, 2010).



À gauche : Tabouret en paulownia. François d'Alteroche © CNPF

À droite : Planche de surf en paulownia. © PaulowniaEgypt, Wikimedia commons CC BY-SA 4.0



Utilisation de paulownia pour la conception de panneaux d'alcôve au Japon, ici dans une salle de banquet.

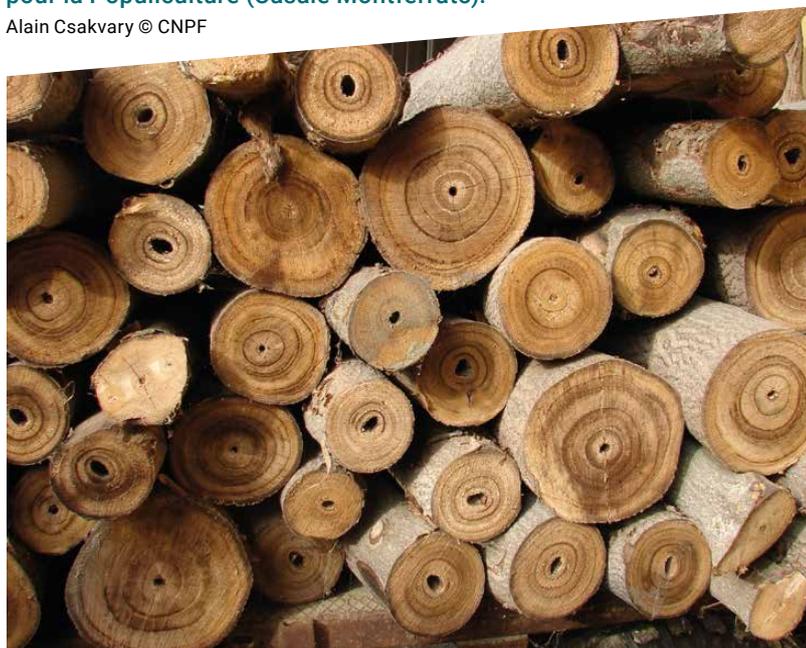
© Wikimedia CC BY 4.0

8.4 Bois énergie

S'agissant d'un bois léger, le pouvoir calorifique rapporté au volume de bois de paulownia reste nécessairement assez médiocre comparé à d'autres essences. Une comparaison des granulés, selon les normes européennes, produits à partir de plantations jeunes de *P. elongata* x *P. fortunei* a montré leur mauvaise qualité par rapport aux granulés de *Pinus radiata* et *Eucalyptus nitens*. Cependant, dans une autre étude évaluant la production de briquettes et de granulés à partir de sciure, des effets énergétiques satisfaisants ont été obtenus pour *P. tomentosa* et *P. elongata*. Les hybrides testés (9501 et Shan Tong) ont produit des valeurs calorifiques brutes légèrement inférieures de 19,5 MJ/kg (hybride 9501) et 19,6 MJ/kg (Shan Tong) par rapport au saule (19,9 MJ/kg) et au peuplier (19,8 MJ/kg) (Tusevhaan *et al.*, 2023). Dans l'étude de Jakubowski (2022), le bois de paulownia se comporte encore moins bien, avec un pouvoir calorifique calculé de 15,4 MJ/kg (3680 kcal/kg). Bien qu'il n'ait pas une bonne réputation comme bois de chauffage, il est valorisé pour la production de charbon de bois en raison de son cycle de production rapide (Ates *et al.*, 2008). Par ailleurs, sa forte teneur en cellulose permet de valoriser le paulownia pour la fabrication de bioéthanol (Yadav *et al.*, 2013).

Billons de paulownia pour le bois énergie à l'Institut d'Expérimentation pour la Populiculture (Casale Monferrato).

Alain Csakvary © CNPF



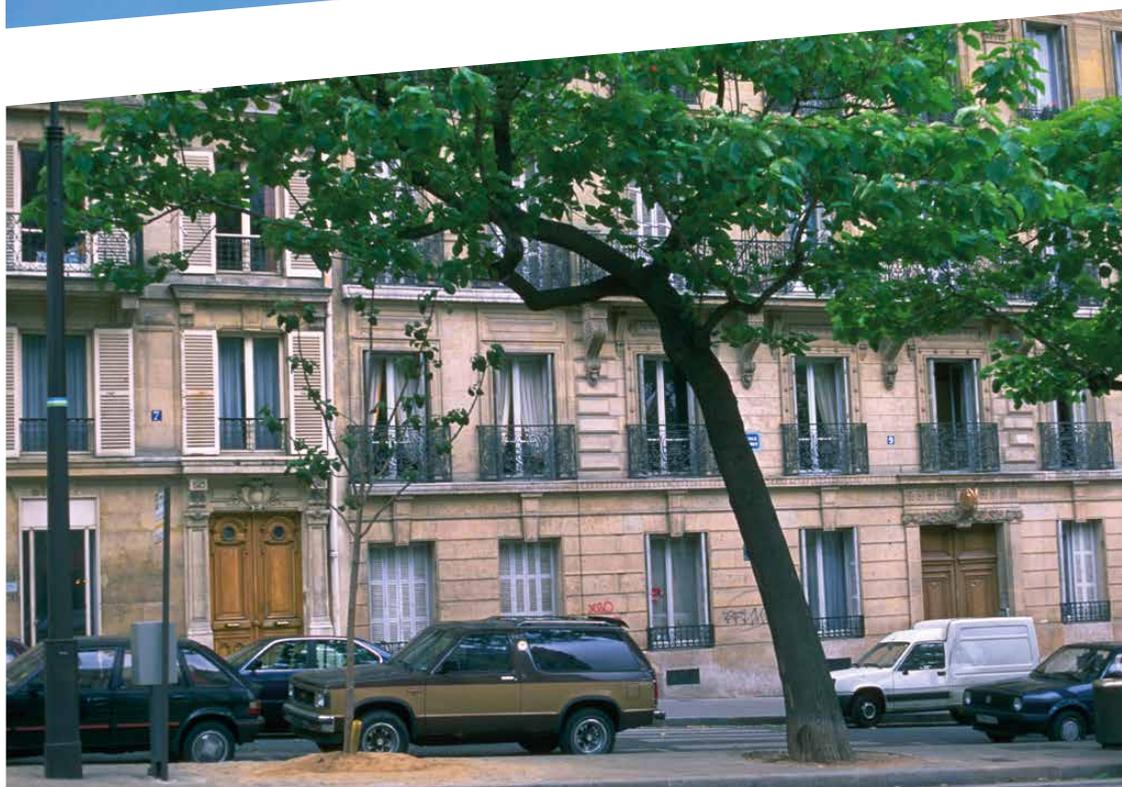
8.5 Autres usages

Les fleurs et les feuilles de paulownia sont une bonne source de graisses, de sucres et de protéines pour l'alimentation du bétail (Al-Sagheer *et al.*, 2019). La teneur en composés azotés des feuilles de paulownia peut être comparée à celle de plusieurs plantes de la famille des légumineuses (Icka *et al.*, 2016), famille évolutivement proche du genre paulownia. Les feuilles de paulownia sont également utilisées comme engrais vert sous forme de compost (Yadav *et al.*, 2013). Un arbre âgé de 8 à 10 ans produit près de 100 Kg de matière verte contenant environ 2,8 à 3 % d'azote et 0,4 % de potassium (Bergmann, 1998). Le bois lui-même serait un bon matériau pour le compostage ; il est à la fois riche et renouvelable rapidement (El-Showk and El-Showk, 2003). De par sa croissance rapide, le paulownia est un bon fixateur de carbone. Un seul arbre fixerait environ 22 Kg de CO₂ et rejetterait 6 Kg d'O₂ par an selon Lucas-Borja *et al.* (2011), ce qui représenterait une fixation de carbone à l'hectare d'environ 1250 tonnes/ha/an (Bikfalvi, 2017). La floraison abondante de paulownia est une bonne source de production de miel (Yadav *et al.*, 2013), permettant d'obtenir une production de miel allant jusqu'à 700 Kg/ha/an (Bikfalvi, 2017).

Les fleurs, les feuilles, les fruits et l'écorce de paulownia contiennent des substances agissant favorablement sur le foie, les reins, la vésicule biliaire et les poumons. Ils peuvent donc être utilisés comme médicaments, avec des effets anti-inflammatoires, antitussifs, diurétiques et antihypertenseurs (Lugli *et al.*, 2023). Traditionnellement, son écorce de tige a été utilisée dans la médecine traditionnelle chinoise comme composant de remèdes pour les maladies infectieuses telles que la gonorrhée, l'érysipèle (Kolya and Kang, 2021) ou encore la bronchite, la dysenterie bactérienne, l'entérite aiguë, la parotidite et la conjonctivite aiguë (Liao *et al.*, 2008). Le thé et le sirop extraits des fleurs de paulownia ont un effet positif sur les problèmes de foie et de rate ainsi que sur la bronchite. Récemment, les feuilles et les fleurs sont utilisées dans l'industrie cosmétique pour la production de parfums, de crèmes, etc. (Danciu *et al.*, 2016).



Fleurs de paulownia.
Sophie Saint-Jore © CNPF



***P. tomentosa*,
avenue Carnot
Paris 17^e.**
Vincent Tourret © CNPF

C'est également un arbre ornemental (Asai *et al.*, 2008) très répandu dans le monde. Il serait adapté pour la restauration des mines et la gestion des eaux usées comme nous l'avons déjà vu. Des tentatives d'utilisation des espèces de paulownia pour la phytoremédiation des métaux lourds dans les sols contaminés ont indiqué une accumulation significative de métaux tels que le cuivre, le zinc et le cadmium, bien que cela soit dû à leur productivité élevée en biomasse plutôt qu'à leur potentiel d'accumulation de métaux (Tusevhaan *et al.*, 2023). Une autre étude a trouvé une différence significative dans les accumulations de plomb et de zinc entre différents hybrides (Macci *et al.*, 2012).



**Écorce de
paulownia.**
Mireille Mouas © CNPF

9. Aspects législatifs et fiscaux en France

Arbrepaulownia présente le paulownia comme un arbre non forestier qui ne serait pas soumis à la législation pour les bois et les forêts. Selon eux, l'implantation de paulownia n'est soumise à aucune réglementation sauf dans le contexte des zones protégées type Natura 2000 (N2000).

Pour rappel, les plantations en plein d'essence forestière qui rentrent dans la définition de la forêt de l'Inventaire forestier national (IFN : surface de plus de 0,5 ha, surface de recouvrement > 10 %, hauteur des arbres à maturité > 5 m, largeur > 20 m) avec une destination forestière (production principale de bois) sont considérées comme des forêts au niveau réglementaire. De ce fait la plantation doit être précédée d'une étude au cas par cas, voire d'une étude d'impact si exigée par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL). La plantation peut également être soumise à des réglementations spécifiques (réglementation des boisements sur certaines communes, autres zonages réglementaires : N2000, arrêté de protection du biotope...). Une fois planté, il faut également réaliser le changement de nature de culture en nature de bois au niveau du cadastre.

Le statut réglementaire du paulownia n'est pas encore clairement défini en France. Si à l'avenir il est répertorié comme une essence forestière, il rentrerait dans cette réglementation. En revanche, si ce n'est pas le cas, cela peut avoir d'autres conséquences : le remplacement d'un milieu forestier par une plantation de paulownias, correspondrait alors à une suppression de l'état boisé suivi d'un changement d'affectation et perte de la destination forestière. Cette transformation est soumise à la réglementation sur le défrichement.

Envisageons le paulownia comme une essence forestière, bien qu'il ne soit pas clairement défini comme tel selon le ministère de l'Agriculture et de la souveraineté alimentaire (MASA) aujourd'hui. Dès lors que la culture de paulownia apparaît non conforme aux schémas régionaux

de gestion sylvicole (SRGS) qui cadrent la gestion durable en forêt privée, elle n'est pas considérée comme une pratique de gestion durable des forêts et on ne peut donc pas l'intégrer dans un document de gestion durable (PSG, CBPS+, RTG). Or la plupart des SRGS spécifient une rotation minimale de 15 ans pour le taillis, ce qui disqualifie les cultures de paulownia qui ont généralement des rotations plus courtes, même pour la production de bois d'œuvre. Le SRGS de Bretagne précise par exemple que la gestion de type taillis à très courtes rotation (inférieurs à 15 ans) est proscrite. Les taillis à courte rotation ne sont pas considérés comme des peuplements forestiers, mais comme des cultures agricoles. La culture de paulownia en France s'inscrivant dans ce cas, elle ne peut donc pas être intégrée à un document de gestion forestière. De plus, la conversion d'une forêt en plantation de paulownia qui constitue un taillis n'est pas autorisée par les SRGS, ne respectant pas le principe de non régression de l'état boisé.

En ce qui concerne les subventions publiques, aides régionales (FEADER), nationales (France 2030, LBC) ou européennes ou les dispositifs fiscaux (crédits d'impôt DEFIT travaux...), les paulownias ne sont actuellement pas finançables, n'étant pas sur les listes des arrêtés MFR (matériels forestiers de reproduction). De plus, il faut disposer d'un document de gestion durable pour bénéficier de ces aides.

Concernant le nouveau volet « règlement européen contre la déforestation et la dégradation des forêts » (RDUE), on peut considérer la plantation de paulownia comme une forêt de plantation au sens de l'article 2. 11 du RDUE en raison de ses caractéristiques : plantation monospécifique, équienne, à courte rotation, comportant des pratiques agricoles (labour, irrigation). Or la transformation d'une forêt régénérée naturellement vers une forêt de plantation est considérée comme une dégradation au sens du RDUE, ce qui rend illégale la commercialisation du bois issu de la forêt qui était naturellement régénérée. En revanche, la conversion d'une peupleraie en plantation de paulownia n'est pas

considérée comme une dégradation au sens du RDUE, ne conduisant donc pas à une interdiction de commercialisation du bois de peuplier.

Les démarches réglementaires précédemment présentées ne sont pas à réaliser dans un contexte de plantation ne rentrant pas dans la réglementation forestière. Cependant, le MASA précise que la plantation de paulownia n'est pas une surface agricole au sens de la PAC. Il

ne figure pas dans la liste des espèces éligibles aux aides de la PAC pour culture ligneuse de moins de 20 ans. Dans tous les cas, au-delà de 100 plants/ha, les parcelles plantées d'arbres ne peuvent pas bénéficier des subventions de la PAC. En revanche l'implantation de paulownia en ligne ou de façon isolée à faible densité, permettant l'exercice d'une activité agricole dans une prairie ou culture, n'empêche pas l'admissibilité aux aides surfaciques de la PAC.

10. Conclusion

Bien connus historiquement en Chine où ils sont utilisés en agroforesterie et pour divers usages traditionnels, les paulownias ont d'abord conquis les parcs et jardins des grandes villes du globe pour leur intérêt ornemental. Dès le XIX^e siècle, ils ont été cultivés pour leur bois dans de nombreux pays du monde entier (Australie, États-Unis...) et progressivement dans toute l'Europe.

Les paulownias sont des champions en termes de productivité. Leur bois, bien que très léger et peu adapté aux usages mécaniquement contraignants trouvent pour autant de nombreuses applications anciennes comme nouvelles, comme bois d'œuvre et dans un usage industriel (bioplastiques, bioéthanol...). On comprend alors aisément pourquoi ils suscitent tant d'intérêt et de passions. Récemment, plusieurs entreprises se sont implantées en France dans le but de développer le paulownia dans l'hexagone. Certaines entreprises promettent des gains formidables, à l'issu d'un très court cycle de production.

Il n'y a pas à ce jour de publications scientifiques rendant compte des capacités de production des plantations de paulownia en France. Ailleurs, les forts rendements annon-

cés ne sont atteints que dans des conditions culturales très intensives alliant travail du sol en profondeur, irrigation, fertilisation et épandage de produits phytosanitaires. Le manque d'eau, tout comme son excès, apparaît comme particulièrement limitant pour la survie et la croissance des paulownias qui ont donc besoin d'un apport contrôlé et soutenu en eau.

Le paulownia, tel un pur-sang arabe, est un arbre d'une incroyable rapidité de croissance, atteignant des hauteurs remarquables en peu de temps. Toutefois, comme le pur-sang, il nécessite une attention délicate et des soins constants pour prospérer : contrôle de la végétation, taille dynamique et recépage les premières années. Son caractère sensible le rendant particulièrement vulnérable aux aléas (coup de vent, gel, engorgement, sécheresse).

Son entretien est comparable à celui d'une monture de prestige, exigeant des investissements significatifs en temps et en ressources.

Au-delà de cette métaphore équestre approximative, on peut affirmer que la production de bois de paulownia repose sur des façons culturales intensives propres au monde agricole. C'est d'ailleurs aux agriculteurs que s'adressent les promoteurs du paulownia et non aux forestiers. Rappelons enfin que les

taillis à très courte rotation dont fait partie la culture de paulownia, ne sont pas considérés comme des méthodes de gestion durable de la forêt d'après les SRGS notamment. Finalement, peut-on encore parler ici de forêt ?

Face au changement climatique, l'introduction de nouvelles essences mieux armées face aux sécheresses et aux canicules est un des leviers

d'action envisagés par les forestiers. À ce titre, les paulownias sont de piètres candidats. Sensibles au manque et à l'excès d'eau, aux gelées tardives et au vent même modéré. Enfin l'utilisation de clones sur le marché actuel amenuise le risque d'invasivité mais l'absence de diversité génétique sur ces plantations clonales est un autre facteur de vulnérabilité identifié face aux pathogènes.

11. Entreprises citées

AB Paulownia - URL : <https://www.abpaulownia.fr/>

WeGrow - URL : <https://www.wegrow.de/>

arbrepaulownia (WeGrow) - URL : <https://www.arbrepaulownia.fr/>

KIRITEC - URL : <https://www.kiritec.eu/>

Paulownia France - URL : <https://www.paulowniafrance.com/>

Paulownia Energy - URL : <https://paulownia.energy/fr/>

12. Bibliographie

Akyildiz M.H., Kol H.S., 2010. Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. *Journal of Environmental Biology*, 31(3):351-5.

Aloi F., Riolo M., La Spada F., Bentivenga G., *et al.*, 2021. Phytophthora Root and Collar Rot of Paulownia, a New Disease for Europe. *Forests*, 12, 1664. <https://doi.org/10.3390/f12121664>

Al-Sagheer A.A., Abd El-Hack M.E., Alagawany M., Naiel M.A., *et al.*, 2019. Paulownia Leaves as A New Feed Resource: Chemical Composition and Effects on Growth, Carcasses, Digestibility, Blood Biochemistry, and Intestinal Bacterial Populations of Growing Rabbits. *Animals* (Basel), 9, 95. <https://doi.org/10.3390/ani9030095>

- ANSES, 2015. *Fiche de reconnaissance : Halyomorpha halys* (Stål, 1855). *La punaise diabolique*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ANSES-FRI-La-punaise-diabolique.pdf>
- Asai T., Hara N., Kobayashi S., Kohshima S., Fujimoto Y., 2008. Geranylated flavanones from the secretion on the surface of the immature fruits of *Paulownia tomentosa*. *Phytochemistry*, 69, 1234-1241. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.11.011>
- Ates S., Ni Y., Akgul M., Tozluoglu A., 2008. Characterization and evaluation of *Paulownia elongata* as a raw material for paper production. *African Journal of Biotechnology*, 7 (22).
- Ayrlimis N., Kaymakci A., 2013. Fast growing biomass as reinforcing filler in thermoplastic composites: *Paulownia elongata* wood. *Industrial Crops and Products*, 43, 457-464. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.07.050>
- Baier C., Thevs N., Villwock D., Emileva B., Fischer S., 2021. Water productivity of *Paulownia tomentosa* x *fortunei* (Shan Tong) in a plantation at Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan, Central Asia. *Trees*, 35, 1627-1637. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02141-8>
- Bajwa G.A., Gul H., 2000. Some observations on insect species of *Paulownia* species at Pakistan Forest Institute Campus, Peshawar. *The Pakistan Journal of Forestry*, 50, 71-80.
- Barton I.L.; Nicholas I.D.; Ecroyd C.E., 2007. *Paulownia*. *Forest Research Bulletin*, New Zealand 231: 1-[72].
- Bayliss K.L., Foster C., Dell B., Hardy G.E.St.J., 2007. *Pycnopus cinnabarinus* is pathogenic on living *Paulownia* trees. *Australasian Plant Pathology*, 36, 53. <https://doi.org/10.1071/AP06079>
- Beel M., Davis S., Murphy J., Piper P., 2005. Product potential of paulownia timber. *Australian Forestry*, 68, 3-8. <https://doi.org/10.1080/00049158.2005.10676219>
- Berdón J., Montero-Calvo A., Barroso L., Alcobendas A., Cortés J., 2017. Study of *Paulownia*'s Biomass Production in Mérida (Badajoz), Southwestern Spain. *Environment and Ecology Research*, 5, 521-527. <https://doi.org/10.13189/eer.2017.050709>
- Berg E.C., Zarnoch S.J., McNab W.H., 2020. Survivorship, attained diameter, height and volume of three *Paulownia* species after 9 years in the southern Appalachians, USA. *Journal of Forestry Research*, 31, 2181-2191. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01021-9>
- Bergmann B.A., 1998. Propagation method influences first year field survival and growth of *Paulownia*. *New Forests*, 16, 251-264. <https://doi.org/10.1023/A:1006529622871>
- Bikfalvi M., 2017. The intelligent tree. <https://www.paulowniagreene.ro/wp-content/uploads/2013/09/Paulownia-Clon-in-Vitro-112-Presentation-EN-new.pdf>
- Bindewald A., Michiels H.-G., Bauhus J., 2020. Risk is in the eye of the assessor: comparing risk assessments of four non-native tree species in Germany. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 93, 519-534. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz052>
- Bozkurt Y., Erdin N., 1990. Physical and mechanical properties of wood used in trade. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University Series*, B 40(1):6-24.
- Bregant C., Carloni F., Balestra M., Linaldeddu B.T., Murolo S., 2023. Pathogenicity of *Botryosphaeriaceae* and *Phytophthora* species associated with *Paulownia* dieback, canker and root rot in Italy. *Phytopathol. Mediterr.*, 62, 481-488. <https://doi.org/10.36253/phyto-14910>
- Capaross S., Diaz MJ., Ariza J., Lopez F., Jiménez L., 2008. New perspectives for *Paulownia fortunei* L. valorisation of the autohydrolysis and pulping processes. *Bioresource Technology*, Volume 99, Issue 4, 741-749. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852407001058>
- Cathy, 2021. Empress Splendor trees and Invasiveness World Tree. <https://worldtree.eco/paulownia-and-invasivness/>

- Chelsa Climate. <https://chelsa-climate.org/>
- Chongpinitchai A.R., 2012. *The Effects of Wildland Fire and Other Disturbances on the Nonnative Tree Paulownia tomentosa and Impacts on Native Vegetation*. Thèse, The Ohio State University, 125 p.
- Chongpinitchai A.R., Williams R.A., 2021. The response of the invasive princess tree (*Paulownia tomentosa*) to wildland fire and other disturbances in an Appalachian hardwood forest. *Global Ecology and Conservation*, 29, e01734. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01734>
- ClimEssences. <https://climessences.fr/node/2>
- Dadwal V.S., Soni K.K., Jamaluddin J., 1987. Foliage diseases of *Paulownia* in nursery and their control. *Indian Journal of Forestry*, 10, 253–256.
- Danciu A., VI V., Grigore I., Soric C., et al., 2016. Considerations on the importance of the paulownia trees planting. *International Journal of Engineering*, Tome XIV, 4, 73-80.
- Dubova O., Voitovych O., Boika O., 2019. *Paulownia tomentosa* – new species for the industrial landscaping. *Current Trends in Natural Sciences*, Vol. 8, Issue 16, pp. 19-24.
- Durán Zuazo V., Bocanegra J., Torres F., Rodriguez C., Martínez J.R., 2013. Biomass yield potential of paulownia trees in a semi-arid Mediterranean environment (S Spain). *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 3, 789–793.
- El-Showk S., El-Showk N., 2003. *The Paulownia Tree: An Alternative for Sustainable Forestry*, 8 p.
- E-Phytia. *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) – *La Punaise diabolique*. <http://ephytia.inra.fr/fr/C/20532/Agiir-Punaise-diabolique>
- Essl F., 2007. From ornamental to detrimental? The incipient invasion of Central Europe by *Paulownia tomentosa*. *Preslia*, 79(4), 377–389.
- Fang J., Wang Z., Tang Z., 2011. *Atlas of Woody Plants in China: Distribution and Climate*. Springer Berlin, 2000 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15017-3>
- Fang L., Qi L., TiShun Z., 1988. Simulated study on the model of radiation transmission in agrisilvicultural systems. *Acta Agriculturae Universitatis Henanensis*, Vol. 32, n° 3, 243-248.
- Feng Y., Cui L., Zhao Y., Qiao J., et al., 2020. Comprehensive Selection of the Wood Properties of Paulownia Clones Grown in the Hilly Region of Southern China. *BioResources*, 15, 1098–1111.
- FORESTYS – Information pour adapter la sylviculture au changement global. <https://www.forestys.fr/>
- García-Morote F.A., López-Serrano F.R., Martínez-García E., Andrés-Abellán M., et al., 2014. Stem Biomass Production of *Paulownia elongata* x *P. fortunei* under Low Irrigation in a Semi-Arid Environment. *Forests*, 5, 2505–2520. <https://doi.org/10.3390/f5102505>
- GBIF – Accès libre et ouvert aux données sur la biodiversité. <https://www.gbif.org/fr/>
- Georgieva K., Ivanov K., Georgieva T., Geneva M., et al., 2018. EDTA and citrate impact on heavy metals phytoremediation using paulownia hybrids. *International Journal of Environment and Pollution*, 63, 31. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2018.092985>
- Gyuleva V., 2008. Project “Establishment of geographical plantation of Paulownia elongata hybrids in Bulgaria” - Contract 37 with State Forestry Agency (2007-2010). *Bulgarian Academy of Sciences*, Monthly informational bulletin about science and technologies, 3–5.
- Hassanzad Navroodi I., 2013. Comparison of growth and wood production of *Populus deltoides* and *Paulownia fortunei* in Guilan province (Iran). *Indian Journal of Science and Technology*, 6, 84–88. <https://doi.org/10.17485/ijst/2013/v6i2.14>

- Hemmi T., 1916. On the Die-back Disease of *Paulownia tomentosa* caused by a New Species of Valsa. *Shokubutsugaku Zasshi*, 30, en304–en315. <https://doi.org/10.15281/jplantres1887.30.304>
- Hiruki C., 1999. Paulownia witches'-broom disease important in East Asia. *Acta Hort.*, 63–68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.496.6>
- Icka P., Robert D., Icka E., 2016. *Paulownia Tomentosa*, a Fast Growing Timber. *Annals "Valahia" University of Targoviste – Agriculture*, 10 (1). https://www.researchgate.net/publication/309656225_Paulownia_Tomentosa_a_Fast_Growing_Timber
- INPN, 2024. *Xylotrechus stebbingi* (Gahan, 1906). https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/223106
- Jakubowski M., 2022. Cultivation Potential and Uses of *Paulownia* Wood: A Review. *Forests*, 13, 668. <https://doi.org/10.3390/f13050668>
- Jiménez-Fernández D., Olivares-García C., Trapero-Casas J.L., Requena J., et al., 2015. Symptomless Host and Nonhost Responses of *Paulownia* (*Paulownia* spp.) to Olive-Defoliating *Verticillium dahliae*. *Plant Disease*, 99, 962–968. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-14-0883-RE>
- Jones J.R., Lambdin P.L., 2009. New County and State Records for Tennessee of an Exotic Pest, *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae), with Potential Economic and Ecological Implications. *Florida Entomologist*, 92, 177–178. <https://doi.org/10.1653/024.092.0132>
- Jr. Flynn J.H., Holder C.D. (Eds.), 2001. *A Guide to Useful Woods of the World*, 2nd edition. Forest Products Research, Madison, Wis., 618 p.
- Kadlec J., Novosadová K., Pokorný R., 2021. Preliminary results from a plantation of semi-arid hybrid of *Paulownia* Clone in vitro 112® under conditions of the Czech Republic from the first two years. *Baltic Forestry*, 27. <https://doi.org/10.46490/BF477>
- Kalaycioglu H., Deniz I., Hiziroglu S., 2005. Some of the properties of particleboard made from paulownia. *Journal of Wood Science*, 51, 410–414. <https://doi.org/10.1007/s10086-004-0665-8>
- Kaymakci A., Bektas I., Bal B., 2013. Some Mechanical Properties of *Paulownia* (*Paulownia elongata*) Wood. Conference: International Caucasion forestry symposium.
- KIRITEC, 2020. Specialist for Kiri wood. <https://www.kiritec.eu/en/>
- Kobayashi S., Asai T., Fujimoto Y., Kohshima S., 2008. Anti-herbivore Structures of *Paulownia tomentosa*: Morphology, Distribution, Chemical Constituents and Changes During Shoot and Leaf Development. *Annals of Botany*, 101, 1035–1047. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn033>
- Kolya H., Kang C.-W., 2021. Hygrothermal treated paulownia hardwood reveals enhanced sound absorption coefficient: An effective and facile approach. *Applied Acoustics*, 174, 107758. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107758>
- Kuhar T.P., Kamminga K., 2017. Review of the chemical control research on *Halyomorpha halys* in the USA. *Journal of Pest Science*, 90, 1021–1031. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0859-7>
- Liao L., Mei H., Li J., Li Z., 2008. Estimation and prediction on retention times of components from essential oil of *Paulownia tomentosa* flowers by molecular electronegativity-distance vector (MEDV). *Journal of Molecular Structure*, THEOCHEM 850, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.theochem.2007.10.008>
- Litwińczuk W., Jacek B., 2023. Growth of *Paulownia* ssp. Interspecific Hybrid 'Oxytree' Micropropagated Nursery Plants under the Influence of Plant-Growth Regulators. *Agronomy*, 13, 2474. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102474>

- Liu R., Dong Y., Fan G., Zhao Z., *et al.*, 2013. Discovery of Genes Related to Witches Broom Disease in *Paulownia tomentosa* x *Paulownia fortunei* by a De Novo Assembled Transcriptome. *PLoS ONE*, 8, e80238. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080238>
- Liu Y., Zhong F., Chen J., 2022. *Elsinoe ampelina* causing *Paulownia* scab in China. *European Journal of Plant Pathology*, 162, 989–994. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02446-x>
- Longbrake A.C.W., 2001. Ecology and invasive potential of *Paulownia tomentosa* (*Scrophulariaceae*) in a hardwood forest landscape. Ohio University, 174 p. PhD. Dissertation.
- Lucas-Borja M.E., Wic-Baena C., Moreno J.L., Dadi T., *et al.*, 2011. Microbial activity in soils under fast-growing *Paulownia* (*Paulownia elongata* x *fortunei*) plantations in Mediterranean areas. *Applied Soil Ecology*, 51, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.08.011>
- Lugli L., Mezzalana G., Lambardi M., Zhang H., La Porta N., 2023. *Paulownia* spp.: A Bibliometric Trend Analysis of a Global Multi-Use Tree. *Horticulturae*, 9, 1352. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121352>
- Macci C., Doni S., Peruzzi E., Ceccanti B., Masciandaro G., 2012. Bioremediation of polluted soil through the combined application of plants, earthworms and organic matter. *Journal of Environmental Monitoring*, 14, 2710–2717. <https://doi.org/10.1039/c2em30440f>
- Magar L. B., Khadka S., Joshi J. R. R., Pokharel U., *et al.*, 2018. Total Biomass Carbon Sequestration Ability under the Changing Climatic Condition by *Paulownia tomentosa* Steud. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 6(3), 220-226.
- Mamirova A., Baubekova A., Pidlisnyuk V., Shadenova E., *et al.*, 2022. Phytoremediation of Soil Contaminated by Organochlorine Pesticides and Toxic Trace Elements: Prospects and Limitations of *Paulownia tomentosa*. *Toxics*, 10, 465. <https://doi.org/10.3390/toxics10080465>
- Mehrotra M., Mehrotra A., 2000. Butt and root rot – a threat to *Paulownia* at New Forest. *Indian Journal of Forestry*, 23(2), 220.
- Milenković I., Tomšovský M., Karadžić D., Veselinović M., 2018. Decline of *Paulownia tomentosa* caused by *Trametes hirsuta* in Serbia. *Forest Pathology*, 48, e12438. <https://doi.org/10.1111/efp.12438>
- Mukhtar A., Manoj K., Ramakant M., 2003. Infestation level and population trends of geometrids on *Paulownia fortunei*. *Indian Forester*, 129, 1399–1404.
- Nielsen A.L., Hamilton G.C., 2009. Life History of the Invasive Species *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in Northeastern United States. *Annals of the Entomological Society of America*, 102, 608–616. <https://doi.org/10.1603/008.102.0405>
- Nirmal J., 2012. « *Paulownia* », in: *Handbook of Bioenergy Crop Plants*, pp. 671–686. C. Kole, C. P. Joshi, D. R. Shonnard, CRC Press Inc, 874 p.
- Olave R., Forbes G., Muñoz F., Lyons G., 2015. Survival, early growth and chemical characteristics of *Paulownia* trees for potential biomass production in a cool temperate climate. *Irish Forestry Journal*, 72, n° 1 & 2, pp. 42-57.
- Owfi R., 2017. Ecophysiological study of *Paulownia tomentosa*. *International Journal of Current Research*, 9, 12, pp. 63582–63591.
- Pástor M., Jankovič J., Belko M., Modranský J., 2022. Evaluation of selected growth parameters of *Paulownia cotevisea* plantation in the Danubian Lowland. *Journal of Forest Science*, 68, 156–162. <https://doi.org/10.17221/155/2021-JFS>
- Paulownia.Energy France, 2024. Les principales maladies et insectes nuisibles de *Paulownia*. <https://paulownia.energy/fr/article/view/les-principales-maladies-et-insectes-nuisibles-de-paulownia/>
- Phillips D.H., Burdekin D.A., 1992. *Diseases of Forest and Ornamental Trees, second edition*. Palgrave Macmillan UK, London, 581 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-10953-1>

- Pleysier C.E., Bayliss K.L., Dell B., Hardy G. E. St. J., 2006. Temperature, humidity, wounding and leaf age influence the development of *Alternaria alternata* lesions on leaves of *Paulownia fortunei*. *Australasian Plant Pathology*, 35, 329.
<https://doi.org/10.1071/AP06030>
- Ptach W., Łangowski A., Rolbiecki R., Rolbiecki S., et al., 2017. The influence of irrigation on the growth of *Paulownia* trees at the first year of cultivation in a light soil. International scientific conference. *Rural Development 2017*, 763–768.
- Ray J.D., Burgess T., Malajczuk N., Hardy G. E. S. J., 2005. First report of *Alternaria* blight of *Paulownia* spp. *Australasian Plant Pathology*, 34, 107.
<https://doi.org/10.1071/AP04087>
- Riahifar N., Fallah A., Mohammadi Samani K., Gorji Mahlebani Y., 2008. Comparing the growth of *Paulownia fortunei* and *Populus deltoides* plantations under different spacing in Northern Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 16(3), 454-444.
- Robin C., Desprez-Loustau M.-L., 2018. Émergences de maladies chez les arbres forestiers : définitions, concepts et recommandations. *Revue Forestière Française*, n° 6, 569.
<https://doi.org/10.4267/2042/70305>
- Roy S., Das S., Handique G., Mukhopadhyay A., Muraleedharan N., 2017. Ecology and management of the black inch worm, *Hyposidra talaca* Walker (Geometridae: Lepidoptera) infesting *Camellia sinensis* (Theaceae): A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 16, 2115–2127.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61573-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61573-3)
- Saeedi Z., Azadfar D., 2010. Effect of spacing on growth characteristics of *Paulownia fortunei* (case study: Dr. Bahram Nia forest management plan, Gorgan). *Iranian Journal of Forest*, 2 (2), 151–163.
- Santi F., Muller S., 2023. Dans nos villes et nos campagnes, le paulownia est-il un arbre aussi « magique » qu'on le dit ? *The Conversation*.
<http://theconversation.com/dans-nos-villes-et-nos-campagnes-le-paulownia-est-il-un-arbre-aussi-magique-quon-le-dit-217851>
- Snow W.A., 2015. Ornamental, crop, or invasive? The history of the Empress tree (*Paulownia*) in the USA. *Forests, Trees and Livelihoods*, 24, 85–96.
<https://doi.org/10.1080/14728028.2014.952353>
- Starfinger U., Kowarik I., Rode M., Schepker H., 2003. From Desirable Ornamental Plant to Pest to Accepted Addition to the Flora? – the Perception of an Alien Tree Species Through the Centuries. *Biological Invasions*, 5, 323–335. <https://doi.org/10.1023/B:BINV.0000005573.14800.07>
- Stepchich A., 2017. « Environmental aspects in cultivation of *Paulownia* in Bulgaria », in: *Agrotechnology and Plant Protection*. Presented at the AGROSYM 2017, Sofia.
- Streito J.-C., 2022. *Halyomorpha halys* : Reconnaître la punaise diabolique.
<http://ephytia.inra.fr/fr/C/27104/Agiiir-Reconnaitre-la-punaise-diabolique>
- Todorović S., Božić D., Simonović A., Filipović B., et al., 2010. Interaction of fire-related cues in seed germination of the potentially invasive species *Paulownia tomentosa* Steud. *Plant Species Biology*, 25, 193–202.
<https://doi.org/10.1111/j.1442-1984.2010.00293.x>
- Tusevhaan N., Mambetov B., Abayeva K., 2023. *Paulownia*. Scientific Collection « InterConf », 153, 93–107.
- Wang Q., Shogren J.F., 1992. Characteristics of the crop-paulownia system in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 39, 145–152.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016788099290050L>
- Williams R., Wang H., 2021. Effects of Wildfire and the Presence of the Invasive *Paulownia tomentosa* on the Regeneration of Native Tree Species in North-Central Appalachia. *Fire*, 4 (3), 60. <https://doi.org/10.3390/fire4030060>
- Yadav N.K., Vaidya B.N., Henderson K., Lee J.F., et al., 2013. A Review of *Paulownia* Biotechnology: A Short Rotation, Fast Growing Multipurpose Bioenergy Tree. *American Journal of Plant Sciences*, 4, 2070-2082.
<https://doi.org/10.4236/ajps.2013.411259>

- Yavorov N., Petrin S., Valchev I., Nenkova S., 2015. Potential of fast growing poplar, willow and paulownia for bioenergy production. *Bulgarian Chemical Communications*, 47, 5–9.
- Yoon C.S., Toomey G., 1986. China's wonder tree. IDRC Reports, p. 11-12.
- Young S.N.R., Lundgren M.R., 2023. C₄ photosynthesis in *Paulownia*? A case of inaccurate citations. *Plants, People, Planet*, 5, 292–303. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10343>
- Zhang M., Chen Y., Du L., Wu Y., *et al.*, 2020. The potential of *Paulownia fortunei* seedlings for the phytoremediation of manganese slag amended with spent mushroom compost. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 196, 110538. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110538>
- Zhang Y., Qiao Z., Li J., Bertaccini A., 2024. Paulownia Witches' Broom Disease: A Comprehensive Review. *Microorganisms*, 12, 885. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12050885>
- Zhao-Hua Z., Ching-Ju C., Xin-Yu L., Yao Gao X., 1986. *Paulownia in China: cultivation and utilization*. Asian Network for Biological Science : International Development Research Center, Singapore, 74 p.