

Plan d'action PARSADA de la filière châtaigne

Instituts techniques et organisations mobilisés pour construire le plan d'action

Coordination : UMR INRAE BIOGECO (Biodiversité Gènes et Communautés), Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE-CNRS), CTIFL (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes), Invenio (station d'expérimentation de la filière fruits et légumes en Nouvelle Aquitaine), Chambre d'Agriculture de l'Ardèche et Syndicat National des Producteurs de Châtaignes.

Avec la participation de UR INRAE FRISE (Génie des Procédés FRIgorifiques pour la Sécurité alimentaire et l'Environnement), UMR INRAE Sophia Agrobiotech (interactions entre plantes, bioagresseurs et symbiotes), Institut de Recherche pour le Développement, Université de Montpellier, IPREM (Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux), CETEV (Centre d'Expertise en Techniques Environnementales et Végétales), Chambres d'Agriculture de Haute Corse, Lozère, Lot, Lot et Garonne, Dordogne, Corrèze, Nouvelle Aquitaine, Occitanie et de structures castanéicoles : syndicats de producteurs de châtaignes du Var, des Cévennes, de Dordogne, syndicat de défense de la châtaigne d'Ardèche, Groupement régional des producteurs et transformateurs de châtaignes et marrons de Corse (GRPTCMC), Union Languedoc-Roussillon des acteurs castanéicoles (ULRAC), Comité interprofessionnel du noyer et du châtaignier du Bas Limousin (Corrèze), Syndicat des producteurs de marrons-châtaignes et petits fruits du Limousin (Haute-Vienne), Comité interprofessionnel des fruits à coque du Lot, Union Interprofessionnelle châtaigne du Sud-Ouest, Comité interprofessionnel de la châtaigne d'Ardèche.

Une mobilisation d'une ampleur inédite

En 2010, l'arrivée du cynips du châtaignier avait entraîné une forte mobilisation, permettant la mise en place d'une lutte biologique collective avec d'excellents résultats. Elle avait rassemblé le réseau français des castanéiculteurs avec la création en 2012 du syndicat national des producteurs de châtaignes et renforcé le partenariat avec les chercheurs et les organismes techniques.

Le présent plan a bénéficié de ce réseau. Une concertation nationale d'une ampleur inédite pour notre filière a été menée en 2024 avec plus d'une trentaine de partenaires et l'appui du ministère de l'agriculture.

Châtaignes et marrons

Châtaignes et marrons sont le même fruit, issu du châtaignier. Dans le langage courant, on a tendance à nommer "marron" toute châtaigne de gros calibre ou à employer ce terme pour les produits issus de la transformation de châtaignes : crème de marrons, marrons glacés... Il ne doit pas être confondu avec le fruit du marronnier d'Inde qui lui n'est pas comestible.

Pourquoi un plan national châtaigne ?

Le châtaignier européen (*Castanea sativa*) est une essence multi-usage, assurant une production de bois et de fruits et jouant un rôle primordial au sein des économies locales.

Pendant très longtemps, en France, le châtaignier a joué un rôle essentiel pour les populations rurales auxquelles il fournissait « le pain » (plus de 500 000 t de châtaignes étaient produites en 1880 ; Bruneton-Governatori 1999) et également le bois. La culture du châtaignier a donné lieu à une grande diversité de variétés, d'usages et de pratiques, il en a résulté un profond attachement des populations à cette espèce, attachement qui persiste encore de nos jours. Malheureusement, l'apparition à la fin du XIX^{ème} siècle de la maladie de l'encre a fortement décimé la châtaigneraie française. Cette situation s'est aggravée au

XXème siècle avec l'exode rural et l'émergence dans les années 60 de la maladie du chancre provoquée par *Cryphonectria parasitica*. En ce début de XXIème siècle, les effets du changement climatiques accentuent les maladies des arbres et augmentent les problèmes de qualité des fruits (pourritures en forte hausse et extension des chenilles foreuses).

La production française de châtaignes est d'environ 9000 t en moyenne annuelle sur les 5 dernières années (source Agreste). Elle se répartit sur un grand nombre de départements et deux bassins aux stratégies différenciées :

- Le bassin Sud-Est a assuré 58 % de la production moyenne quinquennale 2019-2023 soit environ 5200 tonnes/an, issues majoritairement de vergers dits « traditionnels » car composés d'arbres souvent plus que centenaires de l'espèce européenne *Castanea sativa* et localisés en zone de montagne aux conditions d'exploitation difficiles. Les principaux départements producteurs (moyenne de plus de 400 tonnes/an) sont l'Ardèche, La Lozère, le Gard, la Drôme, La Haute-Corse, le Var, l'Hérault, la Corse du Sud.
- Le bassin Sud-Ouest a assuré 40 % de la production moyenne quinquennale soit environ 3600 tonnes/an, provenant majoritairement de vergers plus récents de variétés hybrides (croisement entre espèces européenne et asiatiques). Les principaux départements producteurs (moyenne de plus de 400 tonnes/an) sont la Dordogne, la Corrèze, la Haute-Vienne, le Lot, le Tarn-et-Garonne, le Lot-et-Garonne, la Charente, l'Aveyron.
- Le solde (moins de 200 tonnes) est réparti sur une quarantaine de départements d'autres régions françaises.

Après une baisse continue depuis le XIXème siècle, la surface de verger est depuis peu en légère augmentation, avec une surface d'environ 9 000 ha (données agreste 2023).

La production française actuelle de châtaigne ne permet pas de satisfaire ses marchés. La France est ainsi importatrice nette, essentiellement à partir de ses voisins européens (Espagne, Italie, Portugal). Elle importe plus de 10 000 t/an et exporte moins de 3 000 t/an (données 2020 Sources Eurostat et Livre blanc de la châtaigne).

Le plan d'action national de la filière châtaigne a l'ambition de développer la production française de châtaignes. Deux axes stratégiques sont privilégiés pour les cinq années à venir (2025-2029) : la mise en place d'une véritable structuration de la filière châtaigne et la recherche de solutions aux principaux problèmes sanitaires qui affectent la production et sont accentués par le changement climatique. Le présent plan vise à répondre à ce deuxième axe. Nous nous sommes basés sur la méthode Parsada. Deux diagnostics ont été élaborés, le premier sur les maladies et ravageurs et le second sur l'adaptation au changement climatique, dont sont tirés deux plans d'actions.

Diagnostic Maladies et ravageurs

La maladie de l'encre : une maladie racinaire complexe, aux effets majeurs

Axe 1 : La connaissance du ravageur et des auxiliaires

Les mortalités et les dépérissements causés par la maladie de l'encre sont en augmentation depuis plusieurs années (Sources : département santé des forêts et observations de terrains SNPC dont missions d'enquête calamités agricoles Ardèche). Ce problème sanitaire est majeur pour la châtaigneraie en zone

traditionnelle, qui assure plus de 50 % de la production française. L'encre est une urgence sanitaire pour la châtaigneraie nationale, en particulier dans le contexte du changement climatique.

La maladie de l'encre, causée par *Phytophthora cinnamomi* et *P. cambivora*, se manifeste en verger adulte par des symptômes de dépérissement, qui s'observent d'abord au sommet du houppier des arbres, sous la forme d'une réduction de la croissance des rameaux, du jaunissement et flétrissement des feuilles. In fine, l'arbre est complètement défolié et meurt (Robin & Marchand 2022). Ces symptômes, dits secondaires, ne sont pas spécifiques de la maladie, à l'inverse des symptômes primaires. Les symptômes primaires sont des infections racinaires, causées par les zoospores, et dont les conséquences sont la destruction du système racinaire, qui entraîne une réduction de l'apport nutritif et hydrique de l'arbre, et en conséquence un dépérissement généralisé, puis la mortalité de l'arbre. Les nécroses qui se développent dans les racines de l'arbre se prolongent parfois dans le collet puis le tronc, où des lésions accompagnées d'écoulements noirâtres, similaires à de l'encre, peuvent être observées.

La croissance, multiplication et dissémination des deux *Phytophthora* sont favorisées par les précipitations et les températures élevées, qui ainsi amplifient et accélèrent la propagation de l'encre. A l'inverse, les sécheresses vont diminuer l'inoculum du sol, et limiter la croissance des *Phytophthora* dans les tissus. Mais en formant des spores de conservations (chlamydospores) ces agents pathogènes peuvent résister à plusieurs semaines de sécheresse.

Par ailleurs, le châtaignier, essence sensible au manque (réserve utile minimum de 120 mm) et à l'excès d'eau (Bourgeois et al. 2004), lorsqu'il est infecté par l'encre, est plus vulnérable au changement climatique actuellement à l'œuvre (augmentation de la fréquence des événements extrêmes tels que sécheresses ou tempêtes, et réchauffement). En effet, la destruction du système racinaire par les *Phytophthora* réduit leur capacité à absorber l'eau et accroît leur sensibilité au stress hydrique à des stress hydriques et accélère leur dépérissement (Maurel et al. 2001a, 2001b)

Ainsi directement ou indirectement les interactions encre et changement climatique vont mettre en péril les châtaigniers (Desprez-Loustau et al. 2007). Ce pathosystème illustre bien la nécessité, pour prédire la résilience des vergers, de prendre en compte non seulement la vulnérabilité des arbres aux agents pathogènes mais aussi de l'étudier dans le contexte des cascades de risques, dans lequel les mortalités ne sont pas toujours la conséquence d'aléas abiotiques.

La non-spécificité des symptômes d'encre (dépérissement) est la cause d'une première difficulté de diagnostic de la maladie. Un châtaignier soumis à un stress abiotique, par exemple un stress hydrique, présente un faciès similaire à celui d'un arbre infecté par les agents de l'encre. Il est probable que de nombreux événements de dépérissement du châtaignier aient été attribués à des stress abiotiques alors que *P. cinnamomi* et/ou *P. x cambivora* étaient impliqués. Une étude épidémiologique menée dans les peuplements forestiers français de châtaigniers a confirmé que *P. cinnamomi* était plus largement répandu en France que les données du Département de la Santé des Forêts ne le laissaient penser (Marchand 2022).

Une autre difficulté pour réaliser un diagnostic est que l'inoculum *Phytophthora* peut être très dilué dans le sol, et donc difficilement détectable. Aucune méthode efficace de détection de *P. cinnamomi* du sol, opérationnelle et utilisable sur le terrain, n'est disponible actuellement.

De ce fait, la prévalence de l'encre en vergers, et en particulier dans le Sud -Est de la France, où les données du DSF sont plus rares, n'est pas connue. Or pour mobiliser des leviers, il est tout d'abord nécessaire d'identifier les causes des dépérissements observés. Une connaissance précise de la répartition de *P. cinnamomi* et de *P. x cambivora* est indispensable pour mettre en place des mesures de prévention et de suivi pertinentes. Prévoir la menace que constitue l'encre pour les vergers actuels et futurs dans le contexte du changement climatique nécessite aussi de connaître sa distribution actuelle.

Axe 2 : Les solutions à l'échelle de la plante

Face à la mortalité causée par *P. cinnamomi* et *P. cambivora*, dès le début du vingtième siècle, l'utilisation d'espèces asiatiques résistantes, *Castanea crenata* (châtaignier japonais) et *C. mollissima* (châtaignier chinois), a été envisagée. Si ces deux espèces n'ont pas été utilisées pour la production de bois (à cause de leur faible croissance) ou de fruits (incompatibilité pour le greffage avec les variétés locales), elles l'ont été comme parents dans des programmes d'hybridation interspécifiques avec *C. sativa* (Barreneche et al. 2019). La sélection et la multiplication de ces porte-greffes ont ainsi été initiées dès les années 1950 pour réguler la maladie de l'encre. En Europe, chez nos plus proches voisins, peu de programmes de création sont en cours, associé au fait également que le déplacement de matériel végétal d'un pays à un autre, voire d'un continent à un autre devient de plus en plus compliqué en raison de problèmes sanitaires croissants. En France, les programmes de création variétale du châtaignier se sont poursuivis à l'INRA jusqu'en 1996 sur deux orientations : la création de variétés fruitières pour l'utilisation en frais et la création de porte-greffes résistants à la maladie de l'encre. La création variétale a été arrêtée et les derniers numéros sont en cours d'évaluation par Invenio (programme fruit) et le CTIFL (programme porte-greffe). Des hybrides interspécifiques, *C. sativa*, *C. crenata* et *C. mollissima*, ont abouti à l'identification et l'inscription au catalogue de plusieurs porte-greffes résistants à l'encre. Ils ne sont cependant pas adaptés dans toutes les conditions de cultures, excluant une grande partie des châtaigneraies de moyenne montagne du Sud-Est.

Par ailleurs, l'existence de variabilité pour la résistance à l'encre, entre provenances et aussi intra provenance chez *C. sativa*, sous l'effet de la forte pression de sélection exercée par ce pathogène a été mise en évidence (Robin et al. 2006). Il apparaît donc possible de sélectionner et créer des porte-greffes sativa résistants à l'encre. Depuis 2007, un programme de sélection massale a été mis en place par un consortium (INRA, CA07, ULRAC, CTIFL, GRPTCMC) dans la zone Sud-Est de production afin de sélectionner des individus, candidats porte-greffes, déjà installés dans les châtaigneraies très anciennes depuis (plusieurs centaines d'années) et qui montrent des qualités de résistance à l'encre. Ce programme a permis la sélection en Ardèche, Gard-Lozère et Corse de premiers candidats résistants présentant un potentiel d'adaptabilité au sol et au climat important.

Pour augmenter les probabilités de détecter de tels individus, il est nécessaire de les rechercher dans les foyers de la maladie, lorsque ceux-ci sont connus. Par ailleurs, la conservation et l'évaluation de dizaines de porte-greffes de variétés françaises et étrangères, dont la résistance à l'encre est mal connue, ne sont pour l'instant pas assurées.

L'augmentation des défenses d'un arbre peut être aussi le résultat d'interactions avec des organismes mutualistes (ou symbiotrophes, tels que les champignons mycorhiziens par exemple). Par ailleurs, d'autres microorganismes du sol peuvent avoir un effet antagoniste aux *Phytophthora* spp. Une plus grande diversité de taxons saprotrophes a été mise en évidence dans des parcelles forestières de châtaigniers infectées par *P. cinnamomi*, que dans celles qui ne le sont pas (Marchand 2022). Différentes espèces ont été identifiées comme ayant un effet antagoniste connu sur les espèces de *Phytophthora*, par exemple les espèces de *Trichoderma* sur *P. cinnamomi* (Chambers et Scott, 1995). Le microbiote du châtaignier (sol et racines) reste encore malgré tout très mal connu, et l'expérience acquise avec d'autres pathosystèmes suggère que sa composition est dépendante de nombreux facteurs (Prospero et al. 2022). Rechercher une méthode innovante de protection contre l'encre du châtaignier à l'aide de ce levier nécessite encore de nouvelles études.

La résistance à l'encre peut aussi être améliorée par des traitements endothérapeutiques (Brandano et al. 2023). Des travaux ont montré que le K-phosphonate pouvait réduire la taille des lésions causées par des *Phytophthora* spp. dans les tiges de châtaigniers. Cette efficacité varie en fonction de la concentration appliquée et de l'espèce de *Phytophthora* testée. Ces résultats doivent être confirmés par d'autres essais, en d'autres contextes.

Axe 3 : Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage

Le contrôle de l'encre du châtaignier en vergers devrait donc s'appuyer sur une combinaison de leviers divers tels que le déploiement de plants résistants (capacité à empêcher les infections), le déploiement de plants tolérants (capacité à croître et fructifier malgré une infection), la prophylaxie, l'utilisation de plants sains ou le traitement des arbres infectés. Prédire les effets à moyen terme de ces leviers sur le risque épidémique et la production des vergers de châtaigniers reste cependant un défi. Ces leviers sont en effet très souvent étudiés indépendamment des contextes agricoles dans lesquels leur mobilisation s'inscrit : irrigation, densité de châtaigniers, sélection variétale ciblant d'autres caractères (ex. fructification) avec possible rétroaction sur la sensibilité aux maladies et leur transmission. De plus, les effets d'interactions entre ces leviers sont rarement pris en compte. Par ailleurs, les événements climatiques extrêmes, de plus en plus fréquents, peuvent influencer la sensibilité des châtaigniers aux maladies et le développement épidémique. Nous manquons d'un outil permettant de comprendre et d'anticiper les effets conjoints de stratégies de contrôle, des pratiques culturales et du climat sur le risque et la sévérité épidémique.

Les pourritures : des dégâts en fort développement

Axe 1 : La connaissance du ravageur et des auxiliaires

Depuis le début des années 2000, il a été observé par les producteurs de châtaigne d'Italie, de France ou encore de Suisse une augmentation inhabituelle de la quantité de fruits pourris avant et après récolte. Ces dernières années, des centaines de tonnes de châtaigne ont été perdues car non récoltées ou impropres à la consommation (voir les bilans annuels de campagne FranceAgriMer RNM, notamment l'année 2023). Les pourritures des châtaignes affectent l'amande du fruit provoquant un brunissement et une nécrose de l'endosperme et de l'embryon. La maladie s'exprime principalement en post-récolte, toutefois des observations ont pu mettre en évidence l'apparition de ce brunissement sur des fruits encore attachés sur l'arbre. La singularité et la difficulté de diagnostic de cette maladie résident dans le fait que le fruit garde une apparence externe saine alors que l'amande est pourrie à l'intérieur. Cette pathologie est associée à de nombreux champignons communément rencontrés sur châtaignier : *Phomopsis castanae*, *Ciboria batschiana*, *Botrytis cinerea*, *Phoma castaneae*, etc... (Washington et al., 1997, Breisch, 2008 ; Visenti et al., 2012). Des études ont démontré récemment que la pourriture des fruits était désormais dans la majorité des cas due à un champignon émergent : *Gnomoniopsis castaneae* (Visenti et al., 2012 ; Dennert et al., 2015, Lione et al. 2019). Il a été démontré que *G. castaneae* n'est pas seulement pathogène, mais est aussi, comme de très nombreuses espèces du genre *Gnomoniopsis*, un champignon endophyte que l'on peut retrouver dans les organes et tissus du châtaignier sans que ce dernier exprime de symptômes (Walker et al., 2010 ; Vinsenti et al., 2012 ; Vannini et al., 2017). Ce ne serait qu'à la faveur de facteurs environnementaux spécifiques que les symptômes s'exprimeraient. Des températures chaudes et la présence de pluies durant la floraison seraient associées à une forte incidence de la maladie (Lione et al., 2015).

L'étude de la relation entre les conditions climatiques et les dégâts des châtaignes a permis de mettre au point en Italie un modèle climatique sur le développement de *Gnomoniopsis* (Lione et al., 2015). Leurs travaux corroborent également les observations de Pasche et al. (2016) sur le fait que le champignon est à l'origine d'autres symptômes, tels que des chancres sur l'écorce. Par ailleurs, plusieurs auteurs indiquent qu'il existe une corrélation entre le développement de ce champignon et la progression des galles liées au cynips du châtaignier (*Dryocosmus kuriphilus*). Si l'insecte ne semble pas être le vecteur, les galles semblent être un lieu de multiplication du champignon et maintiennent un niveau d'inoculum fort dans la parcelle.

L'identification récente de *Gnomoniopsis* sp. à l'échelle nationale et mondiale, demande de renforcer nos connaissances sur l'impact du microbiote (plante et sol) sur le développement du ravageur ou l'étude des mycorhizes du châtaignier et des microorganismes pouvant jouer le rôle d'antagoniste.

Des différences de sensibilités variétales aux pourritures sont observées, sans que les causes n'en soient connues.

Axe 2 : Les solutions à l'échelle de la plante

À ce jour, le problème de la pourriture des châtaignes est subi plutôt que contrôlé. En solutions agrochimiques, le Tébuconazole est la seule substance active homologuée contre la pourriture, mais son efficacité sur *Gnomoniopsis* est très limitée. Un produit à base de Boscalid + Pyraclostrobine bénéficie d'une dérogation annuelle (Art53) avec des effets limités. Un travail de screening de molécules chimiques (triazoles, azoxystrobine, ...) a été réalisé en 2021 au CTIFL. Il a permis de mettre en avant l'efficacité de nouvelles molécules. Ce travail nécessiterait d'être confirmé et approfondi. Ces solutions agrochimiques sont cependant transitoires, car au vu du très grand nombre d'exploitations castanéicoles engagées en agriculture biologique (plus de 60 % des surfaces), la priorité est de développer et d'améliorer les solutions de biocontrôle (par exemple l'efficacité de *Bacillus subtilis*), de biostimulation des défenses de l'arbre et l'usage des préparations naturelles peu préoccupantes d'intérêt.

Axe 3 : Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage

Les producteurs manquent de méthodes d'application adaptées à des arbres de très grandes tailles, pouvant dépasser 20 mètres de haut, ou localisés en zones de pente peu mécanisables.

Actuellement le principal moyen de lutte au verger est de porter une attention particulière à la récolte, en limitant la durée de contact des fruits avec le sol par des ramassages fréquents, la mécanisation de la récolte ou l'utilisation de filets.

Cependant, même si l'infection se fait au verger, la plupart des pourritures s'expriment en post-récolte. Les actions en période de récolte ne peuvent pas suffire et doivent s'intégrer dans une stratégie globale de protection. À partir de la récolte, les conditions de stockage et le tri sont d'une importance majeure pour réduire les fruits pourris sur les points de vente qui déçoivent les consommateurs et dans les châtaignes destinées à la transformation.

Des travaux de recherches ont été menés sur des méthodes de détection des défauts liés à la présence de larves d'insectes ou de pourritures internes : par spectroscopie proche infrarouge (Liu et al., 2010 ; Moscetti et al., 2014 ; Hu et al., 2017) ; par tomographie à rayons X ou tomodynamométrie (Donis-González et al., 2014) ; vision par ordinateur sans intelligence artificielle (Wang et al. 2011, Ao et al. 2012 et Alvarez-Valera 2014). Toutefois, soit les résultats de tri sont insuffisants soit leur mise en œuvre reste inaccessible pour la filière à court, voire moyen terme, du fait du coût très élevé des équipements et de la technicité requise. Des travaux sur le tri d'autres fruits secs tel que la noix de cajou (Sivaranjani et al. 2019) ou sur les noix (Fawwaz et al. 2023) utilisent des réseaux de neurones convolutifs et observent des résultats bien supérieurs à ce qui a été réalisé en vision par ordinateur.

En ce qui concerne l'itinéraire post récolte, plusieurs techniques sont actuellement utilisées pour réduire le développement des pourritures pendant le stockage et pour prolonger la conservation. Des essais de trempage ont été réalisés : un trempage long dans de l'eau froide ou un trempage court en eau chaude (Conedara et al., 2004 et Morales-Rodriguez et al., 2022). Ces deux techniques nécessitent une gestion de grands volumes d'eau pour la première et des équipements coûteux pour la seconde et présentent une efficacité partielle vis-à-vis des champignons et de *Gnomoniopsis* sp. Des premiers essais réalisés au CTIFL en 2021 avec l'eau chaude n'ont pas confirmé l'efficacité de ce traitement sur des châtaignes récoltées en France vis-à-vis des pourritures internes mis en évidence dans des travaux italiens. Ces résultats laissent supposer l'existence de différences liées aux variétés de châtaigne ou aux espèces de

champignons présentes en France et nécessitent une nouvelle évaluation pour adapter si possible le paramétrage des traitements. Des essais avaient également été réalisés soit en apportant des huiles essentielles fongistatiques dans l'eau de trempage (peu à pas d'efficacité et impact très fort sur la qualité gustative), soit en apportant des microorganismes antagonistes des pourritures dans l'eau de trempage (chambre d'agriculture d'Ardèche et d'Occitanie 2018-2021), avec des résultats plus prometteurs.

Pendant la conservation des fruits, des travaux récents ont également montré l'efficacité d'un traitement continu à l'ozone appliqué sur châtaigne (Vettraino et al, 2019). L'application de ce puissant oxydant sous la forme de gaz peut s'avérer être une technique intéressante et complémentaire, qu'il conviendra d'évaluer dans diverses conditions d'application et de conservation et en combinaison avec d'autres techniques appliquées en amont au verger ou à la récolte. Par ailleurs, le stockage en atmosphère contrôlée a permis de prolonger la conservation et de réduire le nombre de châtaignes atteintes par des pourritures (Cecchini et al., 2011). Toutefois, aucuns travaux publiés à notre connaissance n'évoquent un intérêt de cette atmosphère pour limiter l'expression de *G. castaneae*. De nombreuses études ont porté sur le refroidissement de produits horticoles (Nasser Eddine et al., 2022), mais elles ne concernent pas les châtaignes, qui ont une structure complexe et sont stockées dans différents contenants (palox, caisse, sachet). La chaleur de respiration, souvent négligée dans les études de refroidissement en convection forcée, peut entraîner une hausse de température dans les zones à faible vitesse, comme les palox. Or, son impact pendant le stockage est peu étudié. L'influence de l'itinéraire thermique et hydrique sur la qualité des châtaignes n'a pas été explorée.

Enfin, pour préserver la qualité des châtaignes fraîches jusqu'aux consommateurs, des travaux sont à mener pour trouver des solutions d'emballage efficaces compatibles avec la réglementation, qui vise notamment une réduction de l'usage du plastique.

Le chancre du châtaignier : une méthode de lutte biologique à renforcer

Axe 1 : la connaissance du ravageur et des auxiliaires

Le chancre du châtaignier est une maladie causée par *Cryphonectria parasitica*, champignon présent sur la quasi-totalité du territoire européen et sur la totalité du territoire français (Robin & Marchand 2022). Il attaque les arbres de toute taille. Les chancres actifs détruisent les tissus conducteurs de sève. La circulation de la sève est interrompue et la partie de l'arbre au dessus du chancre meurt les arbres. Les arbres sont affaiblis et la fructification est perturbée. Le chancre reste un important problème pour le renouvellement du verger car il est particulièrement virulent sur jeunes plants. Sur les greffons et sur les jeunes arbres, ces attaques peuvent être mortelles.

Les producteurs et observateurs des principales régions de production françaises font état d'une recrudescence de la problématique chancre tant en fréquence d'observation que d'intensité (voir les BSV Nouvelle Aquitaine et Rhône Alpes). Deux facteurs principaux en sont à l'origine : le changement climatique, qui augmente la vulnérabilité des arbres à la maladie, et le cynips du châtaignier (*Dryocosmus kuriphilus*). Ce parasite d'origine chinoise s'est développé ces dernières années dans tous les vergers français. Le cynips induit des galles en grand nombre sur les feuilles et les jeunes rameaux. Les galles sèches constituent des portes d'entrée du chancre du châtaignier. Une troisième raison du développement de la maladie n'est pas à exclure : l'hypothèse que les traitements de lutte biologique avec des souches hypovirulentes soient moins efficaces.

Axe 2 : Les solutions à l'échelle de la plante

La lutte biologique contre le chancre du châtaignier à partir de souches hypovirulentes a été mise au point par l'INRA dans les années 1970. Elle est pratiquée depuis en France et dans différents pays européens. Elle repose sur un mécanisme de régulation naturelle de l'agressivité de *C. parasitica* par un mycovirus (le *CryphonectriaHypoVirus1*, CHV1, Robin et al. 2000). Ce virus diminue l'agressivité du champignon, ce qui

permet aux arbres de cicatrifier les lésions corticales causées par l'agent pathogène. Elle s'est avérée efficace en forêt et en vergers. Cette méthode de lutte biologique est la seule actuellement utilisée pour réguler la sévérité de la maladie en vergers. Après une première homologation (n°84 000 29, accordée le 29 février 1984 pour une période de dix années) les souches hypovirulentes sont commercialisées depuis 2021 avec une autorisation de mise en marché provisoire qu'il faut pérenniser. Un arrêt de diffusion de cette méthode de lutte entraînerait une augmentation de l'impact des chancres et fragiliserait la production.

En parallèle, il est nécessaire de modifier la stratégie de déploiement des souches hypovirulentes au vu des résultats récents. *In planta* le virus se transmet entre groupes de compatibilité végétative différents à l'inverse de ce qui est observé *in vitro* (Brusini & Robin 2013). Il est donc nécessaire de tester dans différentes conditions l'efficacité de traitements à l'aide d'un mélange ou d'une souche unique. En effet, à l'heure actuelle, des mélanges différents sont produits et utilisés dans chacune des principales régions de production. Une telle simplification de la méthode faciliterait l'obtention d'un dossier d'homologation.

Axe 3 : les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage

Nous manquons d'un outil permettant de comprendre et d'anticiper les effets conjoints de stratégies de contrôle, des pratiques culturales et du climat sur le risque et la sévérité épidémique.

Les chenilles foreuses : jusqu'à 50 % de pertes de production

Axe 1 : la connaissance du ravageur et des auxiliaires

Chaque année ce sont 20 à 50 % des volumes de châtaignes qui sont perdus en raison d'attaques de chenilles foreuses (Sources BSV, suivis de parcelles et comptes-rendus d'essais 2017-2018-2019, programme FranceAgriMer Bioagresseurs, CRA Occitanie, CDA 07). En outre, une corrélation a été identifiée entre les dégâts de chenilles et les pourritures des fruits, autre problématique sanitaire majeure des producteurs.

Le principal insecte ravageur des fruits en France métropolitaine est le carpocapse de la châtaigne : ***Cydia splendana***, un lépidoptère dont la larve se meut jusqu'à la bogue et entre dans la châtaigne pour se nourrir, occasionnant des dégâts pouvant dépasser 50 % de fruits atteints. Des décalages entre les observations réalisées sur le verger et les modèles théoriques établis sont constatés et pourraient être liés à des facteurs climatiques particuliers certaines années, tels qu'une forte pluviométrie ou un épisode de canicule par exemple. S'il est possible de trouver une bibliographie assez importante sur les différents pays d'Europe, soulignant l'importance de ce ravageur, la connaissance précise du cycle de vie reste à approfondir pour pouvoir mieux paramétrer les modèles prédictifs.

Depuis plusieurs dizaines d'années dans le Sud-Est et depuis 2018 dans le Sud-Ouest de la France, la tordeuse du châtaignier ***Pammene fasciana*** devient un ravageur responsable de dégâts importants pouvant atteindre 40% des bogues, rattrapant ainsi le carpocapse. Sa présence et sa biologie sont décrites dans la littérature internationale mais il est important de traduire ces travaux en référence française en ce qui concerne les dates de vols et les sensibilités variétales.

Présents depuis quelques années sur quelques communes de l'Ardèche, ainsi que dans les Cévennes gardoises, un autre ravageur est responsable de dégâts importants : ***Cydia fagiglandana***. Ce lépidoptère, encore peu présent sur le territoire métropolitain, pourrait être amené à se développer avec le réchauffement climatique. C'est en effet un des principaux ravageurs responsables de fruits véreux en Italie, où il est plus problématique que la tordeuse. Son cycle, encore mal connu, est un peu plus tardif que celui de la tordeuse et plus précoce que celui du carpocapse de la châtaigne. Au vu des dégâts qu'il engendre en Italie et en France sur les secteurs touchés, une vigilance sur ce ravageur est à mettre en œuvre, pour pouvoir mieux anticiper son arrivée et les moyens de lutte à déployer.

Axe 2 : Les solutions à l'échelle de la plante

La stratégie de lutte à base de *Bacillus thuringiensis* (BT) consiste à pulvériser une solution contenant une formulation bactérienne sur les feuilles. L'ingestion des feuilles par les chenilles vont provoquer la mort de l'insecte. Cette solution biologique est utilisée dans de nombreuses cultures. Les essais réalisés en châtaigniers ont souvent été non efficaces, à l'exception d'essais d'application aérienne qui ont présenté des niveaux d'efficacité de près de 60 %. Le positionnement de la solution sur les organes véritablement ingérés par les chenilles pourrait expliquer ce résultat.

La confusion sexuelle consiste à saturer l'atmosphère de la parcelle de phéromones femelles du papillon cible. Dans cette surabondance de phéromones, les mâles de papillons ne retrouvent pas les femelles et cela limite de façon importante la reproduction (Delisle, 2005). Cette technique est très largement développée sur de nombreuses espèces fruitières. En châtaignier, elle se heurte à plusieurs problèmes : la pose de la confusion, qui doit se faire dans le haut d'arbres de très grandes tailles (le châtaignier peut dépasser 20 mètres de haut en verger) et l'utilisation de phéromones adaptées, le carpocapse du châtaignier étant une espèce distincte des espèces présentes sur les autres fruitiers (en particulier *Cydia pomonella* sur pomme). Elle a toutefois montré des efficacités intéressantes dans certaines situations. Les vergers de châtaigniers sont également souvent entourés de bois et taillis, réservoir de ravageurs qu'il n'est pas possible de traiter. À ce jour, deux formulations de confusion existent sur la châtaigne ciblant *Cydia pomonella* et *Cydia splendana*. Elles n'ont pour l'instant qu'une efficacité partielle sur châtaigniers (25 % en moyenne), avec des typologies de vergers où elles sont mises en défaut (vergers de pente entourés de taillis de chênes et châtaigniers par exemple).

Une autre solution de lutte biologique utilise des trichogrammes, une micro-guêpe de moins d'un millimètre. La femelle pond ses œufs dans ceux du ravageur, ce qui les détruit et empêche la naissance des chenilles. Ce type de technique permet d'agir avant les dégâts sur fruits et peut également compléter des solutions existantes comme la confusion sexuelle, augmentant les chances d'action sur les ravageurs lépidoptères à des stades précoces. Elle a aussi l'avantage de pouvoir être posée de façon manuelle ou à terme automatisée, car une partie des vergers ne sont pas mécanisables. Différentes espèces de trichogrammes ont été caractérisées (projets Lichen et ParasiT). L'étape suivante est de réussir l'élevage de ces insectes pour pouvoir envisager la possibilité de faire des lâchers en verger.

En complément de ces méthodes, il est possible d'envisager d'autres modes de lutte qui peuvent concerner une autre phase du cycle de vie du ravageur. Ainsi l'utilisation de nématodes (Juan, 2008) ou de champignons entomopathogènes Mascarin, 2016). Ces solutions présentent une certaine complexité dans leur application (condition de température et d'humidité du sol) et ont des efficacités en conditions contrôlées qui ne se retrouvent pas en conditions de production.

Axe 3 : Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage

Les producteurs manquent de méthodes d'application adaptées à des arbres de très grandes tailles ou localisés en zones de pente peu mécanisables.

Nous manquons également d'un outil permettant de comprendre et d'anticiper les effets conjoints de stratégies de contrôle, des pratiques culturales et du climat sur le risque et la sévérité épidémique.

Diagnostic Changement climatique

La rédaction du diagnostic selon l'approche 360° du PARSADA a été adaptée au contexte des questions spécifiques aux châtaigneraies fruitières en France en envisageant à la fois les maladies, les ravageurs et le changement climatique, considérés comme des enjeux forts et liés impactant la production.

Axe 1 : La connaissance des impacts physiologiques du changement climatique

Impacts variables des températures élevées et des sécheresses à l'échelle variétale et selon la diversité des conditions pédo-topoclimatiques des terroirs

Divers travaux montrent que les températures élevées agissent négativement sur la physiologie de la majorité des fruitiers, y compris le châtaignier, en rendant plus précoces ou plus tardifs différents stades phénologiques (Duchêne et al 2010, Pfliegerer et al. 2019, Freitas et al 2021). De plus, les températures trop élevées, combinées à la diminution des précipitations, de la capacité de rétention d'eau des sols, lessivés par des phénomènes pluvieux plus intenses, entraînent des conséquences négatives sur le statut hydrique de la plante. L'augmentation de l'évapotranspiration affecte la capacité photosynthétique, la croissance foliaire, et par conséquent aussi le développement des fleurs et des fruits (Ponsa 2022, Aumeeruddy-Thomas et al. 2024). L'accès à l'eau lors de la maturation fruitière est un facteur complexe, notamment du fait des dérèglements saisonniers de la pluviosité. De plus, la qualité des fruits et leur composition chimique dépendent aussi des facteurs climatiques, comme le montrent certains travaux sur la baisse de production liée à la carence d'éléments tels que le bore ou le magnésium (Portela et al 1999, 2021).

Des problèmes plus spécifiques sont également importants à considérer :

La levée de la dormance hivernale des bourgeons dormants est dépendante des températures hivernales et varie selon les variétés (Allona et al. 2009). Le changement climatique, notamment la hausse des températures hivernales, peut retarder la levée de la dormance ou la rendre plus précoce. Ceci affecte la période de floraison, comme il est prédit pour le pommier en Méditerranée (Pfliegerer et al. 2019). Les premiers résultats du projet ROC-CHÂ montrent que les variétés de châtaigniers en Ardèche souffriront avec des réactions variétales distinctes liées à l'augmentation des températures hivernales (Ponsa 2022). Des travaux menés au Portugal montrent également des différences très nettes entre les réponses de différentes variétés. Des approches de modélisation phéno-climatiques tels que développées sur d'autres espèces arborées constitueraient une approche permettant de produire des simulations pour prédire le devenir des variétés de châtaigner (Chuine et Beaubien 2001, Saltré et al. 2015) et leur adaptation aux conditions hétérogènes locales.

Peu de travaux sur les réponses des plantes cultivées au changement climatique prennent en compte la variabilité des caractéristiques biophysiques des variétés, en particulier la variabilité phénologique liées à des niches microclimatiques qu'elles occupent (Mosedale et al. 2016). Le plus souvent ce sont les conditions macro-climatiques et des valeurs théoriques optimales de production qui sont notées, ce qui ne permet pas d'identifier leurs besoins ou de mesurer des réponses effectives aux impact climatiques. Néanmoins, ces conditions microclimatiques et pédologiques, ainsi que les choix variétaux, procurent justement aux vignobles leur typicité de terroir. Concernant le châtaignier, une étude en Espagne a montré l'importance d'étudier les réponses des variétés au changement climatique à une échelle macro-climatique. Cette étude, basée sur l'analyse d'imagerie aérienne et le calcul d'indicateurs de production primaire net (NPP) et d'efficacité d'utilisation du carbone (CUE), a montré que la température et l'humidité sont les variables auxquelles les châtaigniers sont le plus sensibles à basses latitudes et altitudes. La précipitation n'est pas un facteur limitant dans les zones atlantiques, mais l'est en région méditerranéenne (Perez Giron et al. 2020).

Axe 2 : Les solutions à l'échelle de la plante

Puiser dans le patrimoine des ressources génétiques existantes, les individus résistants au changement

Les réponses des différentes variétés de *C. sativa* au changement climatique dans des conditions microclimatiques et pédologiques hétérogènes des zones de moyenne altitude du bassin Sud-Est sont quasi inconnues, les réponses des hybrides *C. sativa* X *C. crenata* et *C. sativa* x *C. mollissima* le sont encore moins, que ce soit dans les bassins de production du Sud-Ouest ou du Sud-Est. Le bassin Sud-Est castanéicole est une zone de montagne aux conditions topographiques hétérogènes. Des travaux de génétique liée à la répartition des variétés montrent qu'il y a une diversification génétique variétale importante avec des variations de vallée en vallée (Vidaller 2011, Poughon 2023). Cette diversification résulterait des patrons d'échange entre producteurs de « propagules végétatifs, les greffons ». Ces travaux sont partiels, ne couvrant que la Lozère et la répartition de ces variétés reste globalement inconnue en France, même si les patrons de distribution des ressources génétiques à l'échelle française ont été analysés (Bouffartigue 2019, 2020). Leurs principaux traits phénotypiques, potentiellement indicatifs de leurs réponses aux conditions climatiques des dernières décennies sont également inconnus. Par le passé, le châtaignier européen (*Castanea sativa* Mill) a montré une importante capacité à coloniser et à s'adapter à différentes niches climatiques. Des travaux menés récemment en Espagne montrent des processus de sélection naturels rapides, les plus fragiles disparaissant en faveur des plus robustes, qui se recombinaient dans des conditions de forte sécheresse et de températures élevées (Alcaide et al. 2019). Des travaux menés en France ont par ailleurs montré des populations distinctes qui pourraient refléter l'adaptation à différentes conditions pédoclimatiques ou une structuration spatiale liée à des réseaux sociaux d'échanges de greffons (Bouffartigue 2019, 2020).

La grande diversité variétale observée dans les vergers de châtaigniers du Sud-Est est inhabituelle en comparaison de la plupart des autres espèces fruitières. Dans des zones de montagne, avec une forte hétérogénéité topographique et pédoclimatique, sur des sols acides et pauvres, cette diversité représente une opportunité inestimable dans le cadre de l'adaptation au changement climatique à condition que nous puissions mieux identifier et caractériser ces ressources. De nombreuses exploitations ont des variétés allant des plus précoces aux plus tardives, permettant d'étaler la production, la charge de travail et de limiter les risques. D'autres critères, comme la sucrosité et la facilité d'épluchage, sont connus des castanéiculteurs. Les producteurs peuvent aussi avoir une vision précise de certaines maladies n'affectant que certaines variétés, ou de critères végétatifs (architecture des arbres, capacité à se régénérer après la coupe) (Aumeeruddy-Thomas et al. 2024). Les critères floraux sont cependant moins clairement identifiés par les producteurs. Le châtaignier montre une variabilité de types floraux, notamment la floraison mâle qui peut être astaminée (sans pollen et filet portant l'étamine), brachystaminée, mesostaminée ou longistaminée. Nous chercherons à comprendre la répartition de ces types floraux dans les gammes variétales étudiées, car l'impact du changement climatique sur la production de pollen n'est pas connu.

Une approche de génétique des populations sur les variétés et francs pieds conservés par les agriculteurs pour leurs qualités exceptionnelles de fruits ou de bois, est à conduire, combinant la génétique et le phénotypage afin de comprendre les traits phénologiques des variétés et francs-pieds en lien avec leur distribution, les traits floraux (notamment de la floraison mâle) ainsi que d'autres caractères issus des savoirs locaux. Ces variétés seront projetées sur des cartes topo-climatiques déjà testées sur un bassin versant en Lozère. Ces cartes seront développées en intégrant des données climatiques des sites d'étude et des données rapportées à des échelles plus fines de bases météorologiques (température et pluviométrie) internationales et nationales ainsi que des données climatiques du futur (données *DRIAS* issue des scénarios du GIEC). L'objectif de ces cartes est d'adapter les situations climatiques à une échelle micro-locale en intégrant les dimensions topographiques dans le calcul des conditions climatiques correspondant à des situations réelles des vergers à l'échelle locale.

Axe 3 : Les solutions à l'échelle des parcelles et du paysage

Agir à l'échelle de la parcelle avec des itinéraires techniques innovants

Les techniques d'atténuation des risques doivent également être approfondies. En effet, dans les vergers de châtaigniers, implantés pour plusieurs dizaines, voire centaines d'années, l'entrée en production est lente et les arbres continuent à produire sur une période très longue en fonction des soins apportés. Par conséquent, la majorité des vergers actuellement installés seront pour la plupart toujours en production en 2050 et au-delà et subiront directement les impacts du changement climatique. Leur remplacement par de nouveaux vergers ne peut être envisagé que progressivement. Il est donc primordial de proposer des solutions adaptées pour les vergers en place.

La sécheresse augmente la demande en eau. L'irrigation est une des solutions pour subvenir aux besoins en eau des plantes cultivées. Avec des sécheresses accrues et un moindre accès à l'eau, notamment en région méditerranéenne (MEDECC 2021, Bindi et Olesen. 2011), la recherche de techniques d'irrigation plus sobres et plus efficaces est une priorité. De nombreux travaux scientifiques montrent une multitude de façons de développer des techniques d'irrigation plus durable (Fader et al 2016, Rosa 2022, Jägermeyr et al. 2016). Les techniques mobilisées incluent la micro-aspersion et l'irrigation goutte-à-goutte, combinées à la modulation de la quantité d'eau livrée en fonction de l'état de stress hydrique des plantes. L'état de stress est appréhendé de diverses façons, par exemple à partir d'indicateurs comme le NDVI (Index de la végétation - Normalized Difference Vegetation Index) observables par télédétection, ou à partir de mesures conduites sur la plante (dendrométrie, autres). D'autres approches visent à agir sur la plante afin de diminuer l'évapotranspiration, tout en augmentant sa vigueur. Pour les espèces pérennes, la taille et l'élagage sont considérés comme des techniques pouvant agir efficacement sur l'écophysiologie des arbres, ce qui est avéré pour *C. sativa* (Freitas et al. 2021, Chiriaco et al. 2024, Gomes-Laranjo et al. 2017)). Diverses pratiques d'élagage ont été testées mais nécessitent d'être développées et formalisées dans différentes zones de production, afin de comparer les impacts de ces techniques, notamment sur la vigueur des arbres en situation de stress liée à différentes conditions climatiques locales.

L'application de différents produits de protection appliqués sur les feuilles a été testée en région Méditerranéenne sur différentes espèces pérennes, dont la vigne, et est également en cours d'expérimentation pour le châtaignier (Gomes-Laranjo et al. 2017). Des applications foliaires ou au sol de molécules et éléments (produits à base de silice, calcium, bore, zinc...) visant à favoriser la résistance de l'arbre sont pratiquées par des producteurs. Des expérimentations restent à conduire pour en confirmer l'efficacité et le bénéfice pour l'arbre et la production de fruit, ainsi qu'à l'échelle des parcelles dans différentes conditions climatiques in situ.

Enfin, les techniques d'amélioration de la qualité des sols, de leur capacité à retenir de l'eau, mais aussi d'amélioration de leur fertilité, sont parmi les moyens de diminuer divers stress affectant les plantes cultivées. Tout d'abord, les sols eux-mêmes sont modifiés par les impacts du C.C. par la diminution de leur contenu en matière organique (Rozenweig et Hilel, 2020) et des approches multiples sont à envisager pour palier à cela.

Une priorité est de tenter de conserver le carbone organique des sols pour améliorer leur structure et leur fertilité. La teneur élevée en tanins et autres composés polyphénoliques des feuilles, des bogues et des branches de châtaigniers, y compris des espèces japonaise et chinoise, ralentit considérablement leur dégradation. Les sols acides qui caractérisent les zones de production diminuent davantage le taux de décomposition.

Les techniques d'amélioration de la qualité des sols, de leur capacité à retenir l'eau, mais aussi d'amélioration de leur fertilité, sont parmi les moyens de diminuer divers stress affectant les plantes cultivées. Des approches multiples sont envisagées pour palier à cela, par exemple des pratiques antiérosives simples (andains).

Des expérimentations de compostage menées en Chine sur *C. mollissima*, avec des apports de matière organique animale montrent des résultats très nets d'amélioration de la vitesse de compostage et

d'augmentation de la vigueur des châtaigniers à la suite de l'épandage de ce compost (Chen et al. 2020). L'introduction de biochar (carbone pyrogénique) est une autre solution à considérer afin d'augmenter la rétention de l'eau et la fertilité, en vue d'augmenter la vigueur des arbres. Le biochar est un charbon de bois, résultant de la pyrolyse de la biomasse, connu pour avoir formé des sols très riches dans différentes régions du monde (Glaser et al. 2024).

Parmi les innovations techniques qui méritent plus d'attention, les apports classiques de minéraux (N, P, K) en quantité raisonnée, voire faible et en intégrant des oligoéléments tels que le magnésium, sont à tester. Ces approches ne sont pas à ce jour stabilisées pour divers types de vergers de châtaigniers en situation de stress climatique.

Enfin, l'enrichissement direct des sols par l'inoculation avec des champignons ectomycorhiziens est une solution innovante qui a été testée et semble donner de bons résultats sur la vigueur des arbres. En effet, ces champignons sont très connus comme étant des organismes mutualistes de *C. sativa* et de ses hybrides, améliorant leur capacité à accéder à l'eau du sol, à des macro et oligoéléments, tout en jouant un rôle très important dans la structuration de la matière carbonée des sols (Clemmensen et al. 2013). Des techniques d'enherbement peuvent favoriser l'expansion du réseau mycorhizien.

Axe 4 : Transfert et déploiement auprès des agriculteurs pour les deux diagnostics

Les conditions de transfert des connaissances sont perfectives.

Une quinzaine de départements ont produit plus de 400 tonnes de châtaigne par an en moyenne sur les cinq dernières années (données Agreste). Ils sont répartis dans quatre régions administratives du sud de la France : Auvergne-Rhône-Alpes, Nouvelle Aquitaine, Occitanie et Corse Cette dispersion des zones de production et le faible nombre de structures castanéicoles régionales ayant des salariés (6 sur l'ensemble de la France), complexifient le transfert des informations aux producteurs. Le soutien des chambres d'agriculture est variable car la castanéiculture n'est pas toujours reconnue comme une production agricole d'intérêt économique suffisant au regard d'autres priorités locales. Pour les mêmes raisons les organismes d'expérimentation sont peu nombreux et dotés de moyens limités à consacrer à ce fruit. Les organisations de producteurs de châtaigne sont également en faible nombre et ont peu de techniciens spécialisés. Les modestes échanges interprofessionnels nationaux rendent complexes la diffusion des bonnes pratiques de conservation du fruit frais aux acteurs aval de la filière, metteurs en marché et distributeurs. Le récent renforcement du syndicat national des producteurs de châtaignes peut contribuer à atténuer ces difficultés.

La monographie du châtaignier, éditée par le CTIFL a été mis à jour en 2023 avec l'appui des professionnels de la filière et des principales structures de recherche et d'expérimentation. Cet ouvrage présente les connaissances actualisées sur tous les aspects de la culture de la châtaigne. Il pourrait être complété par des guides techniques plus spécialisés. Des bulletins techniques régionaux (BVS notamment) sont disponibles mais restent relativement cloisonnés, avec des échanges nationaux qui pourraient être renforcés. Actuellement il n'existe pas de site internet qui rassemble l'ensemble des résultats des travaux de recherche et d'expérimentation. Très peu d'outils numériques de diagnostics, de suivis ou de conseils sont mis à disposition des producteurs. Les formations spécialisées, à destination des futurs agriculteurs ou des producteurs en activité, sont peu nombreuses et non coordonnées au niveau national. Une part significative de la récolte, non chiffrée avec précision, est assurée par des producteurs n'ayant pas de statut agricole (retraités, doubles actifs, ...). Ils n'ont pas accès au financement Vivea des formations agricoles. Trop peu de journées techniques, de visites ou de réunions d'échanges entre producteurs au niveau transrégional, national ou européen sont organisées. Les réunions nationales, permettant de partager les besoins, les axes de travail et les résultats entre chercheurs et représentants des producteurs, ont été irrégulières ces dernières années, mais ont été considérablement renforcées pour la préparation de ce Parsada.

Les conditions de déploiement des solutions et méthodes de lutte doivent être adaptées à des arbres de grande taille et à deux typologies de vergers distinctes. Une part des vergers est composée d'arbres plus que centenaires localisés en zone de montagne aux conditions d'exploitation difficiles. Une autre part est constituée de vergers plus récents, majoritairement implantés dans des zones permettant la mécanisation des interventions culturales. La réponse à certaines problématiques va passer par le renouvellement et la création de nouveaux vergers. Les producteurs sont confrontés à des coûts élevés. Les immobilisations financières sont importantes. La mise en production est longue, avec des récoltes « de croisière » atteintes au bout d'une dizaine d'années après plantation, voire plus selon les conditions de sols et de culture. Les nombreuses variétés adaptées aux contextes locaux sont souvent difficiles, voire impossible à trouver chez les pépiniéristes. Les risques induits par l'adoption de nouvelles techniques ne sont pas généralement pas couverts par des mesures incitatives ou des dispositions assurantielles. Les conditions de travail sont perfectibles, par exemple la réduction de la pénibilité de la récolte.

Plan d'actions Maladies et ravageurs

Axe	Maladie ciblée	Thèmes de travail	Actions	N° d'action	Priorité
Axe 1 - Connaissance des ravageurs et des auxiliaires	Pourriture	Approfondir la connaissance du champignon <i>Gnomoniopsis castaneae</i>	Améliorer et préciser notre connaissance du cycle du champignon <i>Gnomoniopsis castaneae</i> .	1.1	Fort
Axe 1 - Connaissance des ravageurs et des auxiliaires	Pourriture et encre	Etudier l'épidémiologie des pourritures et de l'encre	Déterminer les conditions pédoclimatiques, parcellaires et culturales ayant un impact sur l'expression de la maladie de l'encre et de la pourriture.	1.2	Fort
Axe 1 - Connaissance des ravageurs et des auxiliaires	Pourriture et encre	Caractériser et exploiter le microbiote du châtaignier	Explorer les possibilités de mobiliser le microbiote des châtaigniers pour lutter en préventif et en curatif contre les agents pathogènes de la pourriture et de l'encre.	1.3	Très fort
Axe 1 - Connaissance des ravageurs et des auxiliaires	Pourriture et encre	Caractériser et exploiter le microbiote du châtaignier	Evaluer le pouvoir antagoniste des stimulateurs de défense naturelle (SDN) des microorganismes détectés au sein du microbiote du châtaignier.	1.4	Fort
Axe 1 - Connaissance des ravageurs et des auxiliaires	Toutes	Caractériser et exploiter le microbiote du châtaignier	Etudier le lien entre environnement et changement climatique, organismes antagonistes et pathogénicité du bioagresseur.	1.5	Moyen
Axe 1 - Connaissance des ravageurs et des auxiliaires	Chancre	Evaluer la diversité génétique des populations de <i>Cryphonectria parasitica</i> et la distribution de l'hypovirulence	Réévaluer la biodiversité des souches de <i>Cryphonectria parasitica</i> .	1.6	Fort
Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Pourriture et encre	Evaluer les substances existantes	Elargir la palette des solutions à mettre à disposition des agriculteurs pour lutter contre les pourritures et l'encre.	2.1	Fort

Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Pourriture et encre	Développer des biosolutions innovantes	Identifier et développer des solutions de biocontrôle efficaces contre les agents pathogènes de l'encre et des pourritures, incluant les solutions biostimulantes des défenses de l'arbre.	2.2	Très forte
Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Chancre	Développer des biosolutions innovantes	Adapter si nécessaire les mélanges de souches hypovirulentes (nouvelles souches, nouveaux mélanges). Simplifier les mélanges de souches hypovirulentes pour aboutir à l'homologation et l'autorisation de mise sur le marché d'une seule souche ou d'un seul mélange pour toute la France.	2.3	Très fort
Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Chancre	Développer des biosolutions innovantes	Acquérir les données d'efficacité pour le dossier d'autorisation de mise sur le marché des souches hypovirulentes.	2.4	Très fort
Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Chancre	Développer des biosolutions innovantes	Tester et comprendre l'effet préventif des souches hypovirulentes.	2.5	Fort
Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Pourriture et encre	Améliorer et mieux connaître le matériel végétal	Déterminer la sensibilité des variétés et des porte-greffes aux pourritures et à la maladie de l'encre.	2.6	Fort
Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Pourriture	Améliorer et mieux connaître le matériel végétal	Déterminer les gènes de résistance et de sensibilité aux pourritures.	2.7	Moyen
Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Encre	Améliorer et mieux connaître le matériel végétal	Evaluer le comportement des variétés et porte-greffe selon les modes de multiplication et caractériser les résistances à l'encre.	2.8	Très forte
Axe 2 - Solutions à l'échelle de la plante	Encre et chancre	Améliorer et mieux connaître le matériel végétal	Développer un processus de production en pépinière de plants sains, limitant les contaminations.	2.9	Fort

Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Toutes	Améliorer les techniques d'application	Identifier les innovations permettant d'adapter les méthodes d'application aux nouvelles solutions et à tous les types de verger.	3.1	Fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Toutes	Adapter et/ou évaluer des mesures prophylactiques et de conduite en verger	Evaluer l'action des pratiques culturales sur l'expressions des maladies.	3.2	Fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Toutes	Adapter et/ou évaluer des mesures prophylactiques et de conduite en verger	Renforcer les défenses naturelles de l'arbre et du verger.	3.3	Moyen
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Pourriture et encre	Adapter et/ou évaluer des mesures prophylactiques et de conduite en verger	Tester les effets de la diversité spécifique et variétale (porte-greffes inclus) au sein du verger et l'hypothèse d'un effet de dilution de l'encre et des pourritures soit par plus faible compétence des arbres, soit par effet du microbiote associé.	3.4	Fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Toutes	Adapter et/ou évaluer des mesures prophylactiques et de conduite en verger	Connaitre les paramètres pédoclimatiques et géographiques limitant l'expansion des maladies.	3.5	Fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Toutes	Adapter et/ou évaluer des mesures prophylactiques et de conduite en verger	Intégrer l'apport et/ou l'impact de la flore à l'échelle de la parcelle et de son environnement.	3.6	Faible
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Pourritures	Evaluer les pratiques de récolte	Agir sur les pratiques pour accélérer le processus de récolte, réduire le temps de contact des châtaignes tombées au sol et améliorer le stockage à la ferme.	3.7	Très fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Pourritures	Evaluer et développer des technologies et itinéraires post-récolte	Identifier les techniques et équipements de tri non destructifs permettant de séparer les fruits atteints de pourriture interne.	3.8	Fort

Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Pourritures	Evaluer et développer des technologies et itinéraires post-récolte	Évaluer des techniques de traitement post-récolte pour limiter les pourritures, en station ou chez les producteurs, et évaluer leur impact sur la qualité des fruits.	3.9	Fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Pourritures	Evaluer et développer des technologies et itinéraires post-récolte	Identifier les conditions et les techniques de stockage sur le développement des pourritures.	3.10	Fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Pourritures	Evaluer et développer des technologies et itinéraires post-récolte	Evaluer l'impact des conditions d'ambiance du circuit logistique et commercial sur le développement des pourritures.	3.11	Fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Toutes	Concevoir de nouveaux itinéraires techniques et évaluer les combinaisons de leviers	Evaluer différentes combinaisons de biosolutions et de pratiques culturelles en pré-récolte.	3.12	Très fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Toutes	Concevoir de nouveaux itinéraires techniques et évaluer les combinaisons de leviers	Evaluer différentes combinaisons d'itinéraires, de techniques physiques et de biosolutions en post-récolte (depuis la récolte jusqu'au consommateur).	3.13	Très fort
Axe 3- Les solutions à l'échelle de la parcelle et du paysage	Toutes	Evaluer les nouvelles performances des stratégies	Réaliser des études technico-économiques et des approches coût - bénéfice sur les techniques et itinéraires les plus efficaces.	3.14	Très fort
Axe 4 - Transfert et déploiement	Toutes	Accompagner le déploiement des solutions	Développer des actions collectives pour lever les freins au déploiement des solutions.	4.1	Très fort
Axe 4 - Transfert et déploiement	Toutes	Accompagner le déploiement des solutions	Déployer les nouvelles solutions dans les exploitations et mobiliser les réseaux à l'échelle du territoire.	4.2	Très fort
Axe 4 - Transfert et déploiement	Toutes	Accompagner le déploiement des solutions	Accompagner les exploitations et opérateurs aval dans la mise en œuvre	4.3	Très fort

			des solutions pré et post récolte.		
Axe 4 - Transfert et déploiement	Toutes	Accompagner le déploiement des solutions	Évaluer et gérer le risque induit par l'adoption de nouvelles techniques.	4.4	Très fort
Axe 4 - Transfert et déploiement	Toutes	Valoriser les modèles et les OAD	Mettre à disposition des outils d'aide à la décision agricole (OAD) et accompagner leur utilisation.	4.5	Très fort
Axe 4 - Transfert et déploiement	Toutes	Communiquer et valoriser	Concevoir des supports techniques de diffusion, organiser des conférences, webinaires, visites d'essais et démonstrations.	4.6	Très fort
Axe 4 - Transfert et déploiement	Toutes	Concevoir des programmes de formations	Intégrer l'utilisation des nouveaux leviers et l'évolution des pratiques et techniques dans les programmes de formation.	4.7	Très fort

Plan d'actions Changement climatique

Axes	Thèmes de travail	Action	N° d'action	Priorité
Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Connaissance des effets des températures (élevées ou faibles) et du stress hydrique sur l'arbre et sur la production de fruits	Développer des observations et des modélisations pheno-climatiques prédictives des variétés de châtaignes (1) Développer des recherches sur une gamme variétale élargie, dans une plus grande diversité de zones bioclimatiques y compris sur des arbres de moins de 10 ans. (2) Paramétrer le modèle (PHENOFIT 5) pour le châtaignier et effectuer des prédictions du devenir d'une large gamme variétale dans le cadre de différents scénarios du GIEC	1.1.	Très Forte

Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Connaissance des effets des températures (élevées ou faibles) et du stress hydrique sur l'arbre et sur la production de fruits	<p>Elargir à travers une approche participative le réseau des sites ou parcelles expérimentales d'observation et de suivis des impacts du changement climatique</p> <p>(1) Rendre disponible ces sites pour divers suivis des impacts du changement climatique (2) Développement de protocoles de recherche partagés et coordination des modalités de mise en bases de données nationales & régionales</p>	1.2.	Forte
Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Connaissance des effets des températures (élevées ou faibles) et du stress hydrique sur l'arbre et sur la production de fruits	<p>Développer des recherches sur les impacts des températures élevées et du stress hydrique sur différentes parties du châtaignier (bois, feuille, fruits)</p> <p>(1) Développer des approches dendrométrique de mesure des amplitudes de rétractation des branches et tiges aux températures élevées dans diverses situations bioclimatiques (2) Etablir la faisabilité de mesures de cavitation sur châtaignier et les sensibilités variétales (3) Evaluer les besoins en eau des châtaigniers selon les périodes de l'année et les seuils de tolérance aux stress hydriques, éventuellement couplés aux stress thermique (4) Adapter les coefficients hydriques (K) au châtaignier selon les porte-greffes et variétés</p>	1.3.	Forte
Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Connaissance des effets des températures (élevées ou faibles) et du stress hydrique sur l'arbre et sur la production de fruits	<p>Améliorer notre compréhension de la biologie florale du châtaignier et des impacts du changement climatique sur la floraison</p> <p>(1) Etudier les effets des fortes températures et ou des stress hydriques sur la germination du pollen des variétés et des arbres issus de francs pieds (2) Mener des recherches fondamentales sur la physiologie de la floraison</p>	1.4	Forte
Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Impacts du changement climatique (température, sécheresse) sur l'arbre, et apport de la rétention en eau des sols	<p>Améliorer la connaissance des propriétés des soles des châtaigneraies notamment leur capacité de rétention de l'eau</p> <p>(1) Mettre en place et animer un groupe Interdisciplinaire sols et développer collectivement un bilan des connaissances à ce jour. (2) Impliquer ce groupe pour co-construire un concept d'approche expérimentale et évaluer le rôle du microbiote et de la micro et macrofaune du sol pour transformer la litière en sols.</p>	1.5	Forte à très forte

Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Connaissance de l'enracinement du châtaignier selon les porte-greffes et variétés	Améliorer la compréhension des systèmes racinaires selon différents types de porte-greffes (boutures, semis en place, semis repiqués)	1.6	Moyenne
Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Résilience des châtaigniers au changement climatique	Améliorer notre compréhension des effets croisés entre climat, sols, pratiques et bioagresseurs (1) Etudier l'effet de stress multiples entre maladies, paramètres climatiques (température, humidité), topographiques, édaphiques (sols) et pratiques des producteurs (2) Développer des travaux sur les décisions des castanéiculteurs fondées sur des savoirs holistiques (prise en compte simultanée de multiples facteurs) et des pratiques d'atténuation des effets de stress multiples	1.7	Forte
Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Effets du changement climatique sur les peuplements de châtaigniers	Prédire l'évolution des peuplements et vergers sous l'effet du changement climatique (1) Mise en place de nouvelles modélisations et cartes prédictives des peuplements de châtaignier selon l'état sanitaire, de dépérissement et selon l'indicateur d'impact du changement climatique des études portugaises, les liens aux facteurs bioclimatiques, selon les scénarios RCP (<i>Representative Concentration Pathways</i>) à l'échelle régionale (peuplements) et locale (vergers) et développer des outils d'aide à la décision à l'endroit des producteurs, de la filière et des pouvoirs publics. (2) Produire des modélisations cartographiques topo-climatiques liées aux approches de modélisations phéno-climatiques, des échelles de bassin versant aux parcelles et incorporant la distribution des variétés	1.8.	Moyenne à forte
Axe 1 : la connaissance des impacts physiologiques du changement climatique	Effets du changement climatique sur les peuplements de châtaigniers	Mettre en évidence les externalité positives de la castanéiculture (1) Evaluer l'impact des châtaigneraies sur l'atténuation du changement climatique (stockage de carbone) (2) Utiliser ces éléments pour favoriser le développement d'aides à l'entretien, plantation, remise en exploitation des châtaigniers. (3) Evaluer les services multiples des châtaigniers pour mesurer leur pleine valeur en tant que système socio-écologique dans un contexte de changement climatique	1.9	Forte

		(4) Identifier plus précisément le rôle des producteurs dans la production de ces différents services		
Axe 2 : les solutions à l'échelle de la plante	Identification de variétés tolérantes	<p>Evaluer les variétés ou francs-pieds existants et leurs comportements face au changement climatique</p> <p>(1) Développer des études du comportement agronomique des variétés en verger conservatoire et chez les producteurs</p> <p>(2) Mener des recherches de phénotypage et de génétique sur les ressources variétales et de francs pieds " repérés" par les producteurs, leurs distribution actuelles dans les fermes traditionnelles et environs proches en zone méditerranéenne. S'appuyer sur les savoirs locaux.</p> <p>(3) Rechercher des corrélations phénotypiques (phénologie, fleurs, fruits) avec des variétés traditionnelles suivies et dont le comportement a été modélisé.</p> <p>(4) Tester en vergers expérimental les variétés étrangères hors de leur zone pédoclimatique</p>	2.1	Forte
Axe 2 : les solutions à l'échelle de la plante	Création de variétés Tolérantes	<p>Créer de nouvelles variétés tolérantes au changement climatique</p> <p>Approche de tolérances multiples : changement climatique et pathogènes</p>	2.2	Moyenne
Axe 2 : les solutions à l'échelle de la plante	Choix des porte-greffes	<p>Rechercher des porte-greffes tolérants à l'encre et au stress hydrique</p> <p>(1) Développer les porte-greffes sativa résistants à l'encre disponibles et évaluer leur comportement vis à vis du stress hydrique</p> <p>(2) Identifier la résistance au stress hydrique et aux températures élevées des porte-greffes</p> <p>(3) Développer, sur des sites impactés par l'encre, le programme "Elite" d'identification des porte-greffes résistants à l'encre et à la sécheresse. (4) Rechercher de nouveaux porte-greffes sativa résistants</p> <p>(5) Suivre l'adaptation au gel de printemps tardifs</p> <p>(6) Suivre des porte-greffes hybrides français et européens dans leur comportement</p>	2.3	Très Forte
Axe 2 : les solutions à l'échelle de la plante	Choix du couple variétés et porte-greffe	Mieux connaître les effets des porte-greffes sur les variétés	2.4	Moyenne à forte

		Déterminer lien entre phénologie du porte-greffe (précoce ou tardif) et impact sur la phénologie de la variété.		
Axe 2 : les solutions à l'échelle de la plante	Adaptation de la conduite de l'arbre	Agir sur les pratiques d'élagage afin de renforcer la résistance au changement climatique (1) Développer des observations et expérimentations sur les types d'élagage et leurs impacts sur la tolérance au stress hydrique (2) Caractériser les différents types d'élagages afin de faciliter la communication entre castanéiculteurs et élagueurs. (3) Développer une revue bibliographique des effets de l'élagage sur des espèces proches ainsi que l'impact de l'élagage sur la tolérance aux changements climatiques (autres Fagacées).	2.5	Forte
Axe 2 : les solutions à l'échelle de la plante	Applications foliaires ou au sol	Evaluer les applications foliaires et au sol pour améliorer la tolérance au stress hydrique et aux températures élevées (1) Identifier les molécules ou éléments qui favoriseraient la capacité de résistance de l'arbre soit à la sécheresse, soit aux fortes températures. (2) Faire des expérimentations de compostage avec divers apports (ex : litière forestière fermentée, matière organique animale, ...), notamment sur des fermes	2.6	Moyenne
Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Adaptation de la parcelle et son environnement au changement climatique	Caractériser les parcelles offrant des conditions de culture adaptées au changement climatique en combinant outils cartographiques, variétés et porte-greffes tolérants et techniques d'atténuation identifiés dans les axes précédents	3.1	Forte
Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Adaptation de la parcelle et son environnement au changement climatique	Evaluer les moyens d'augmenter la réserve utile (1) Evaluer les effets d'apports de matières et molécules (2) Mener des expérimentations d'enherbement selon l'importance des couverts végétaux et diverses densités de vergers en zone de plaine et en pente (3) Mettre en place des pratiques antiérosives simples : Keyline, andains, ... (4) Evaluer l'impact en N+ 5 des diverses expérimentations sur l'augmentation de réserve utile et identifier le degré d'adaptation de l'arbre à la sécheresse	3.2.	Très forte

Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Adaptation de la parcelle et son environnement au changement climatique	<p>Agir sur l'irrigation</p> <p>(1) Echelle paysagère à parcellaires: Identifier les modalités de captage d'eau (pluies, ruissellement, condensation) via les modélisations cartographiques et prévoir la modélisation des besoins en eau</p> <p>(2) Echelle parcelle : définir les types d'apports (fréquence, volumes, période) pour maximiser l'efficacité de l'irrigation</p> <p>(3) Développer des modèles d'irrigation en conditions restreintes (peu d'eau disponible)</p> <p>(4) Établir des préconisations en matière d'irrigation du châtaignier : types d'apports / fréquence / volumes / période</p>	3.3	Moyenne à forte selon contexte
Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Adaptation de la parcelle et son environnement au changement climatique	<p>Agir sur l'évapotranspiration</p> <p>(1) Mesurer le degré d'évapotranspiration selon les conditions topographiques et climatiques des parcelles et selon la densité des arbres et les types de vergers</p> <p>(2) Mesurer les changements de l'évapotranspiration selon les types et rythmes d'élagage</p> <p>(3) Mesurer l'impact des couverts végétaux sur l'évapotranspiration et identifier les modes d'implantation sur des parcelles non-mécanisables</p>	3.4	Forte à Moyenne
Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Type de conduite (Conduire le verger pour limiter les impacts des stress climatique)	<p>Tester l'effet de la densité des arbres pour limiter les effets des températures élevées et du stress hydrique</p> <p>(1) Développer des recherches et expérimentation sur l'impact des températures, du stress hydrique, et des vents compte tenu de la densité.</p> <p>(2) Tester l'impact des pratiques existantes des castanéiculteurs (densité et associations végétales) et comparer avec des vergers expérimentaux.</p> <p>(4) Mesurer l'impact des vergers avec des arbres de différentes hauteurs, différents âges, houppiers occupant de multiple espace, sur l'eau du sol et le régime des vents</p> <p>(5) Modélisation des pratiques les plus adaptées</p>	3.5	Forte

Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Associations végétales pertinentes	<p>Agir sur les associations végétales</p> <p>(1) Rechercher différents types d'enherbements favorables et tester les effets sur les arbres</p> <p>(2) Rechercher des associations avec d'autres espèces arborées à l'échelle de la parcelle, mais aussi à l'échelle paysagère tels que des haies et des arbres de bordures (coupe-vent).</p> <p>(3) tester et comparer sur 5 ans les effets de l'Impact du changement climatique sur des vergers polyvariétaux et des vergers monovariétaux.</p>	3.6	Moyenne à forte
Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Reconception du système de culture	<p>Etudier les combinaisons de leviers</p> <p>Par une approche combinatoire, mettre en synergie les technologies, les méthodes culturales, les savoirs locaux et scientifiques, le matériel végétal, les méthodes expérimentales et participatives, ... à adapter aux spécificités régionales.</p> <p>Mener une réflexion sur l'organisation du travail, les aspects économiques et l'accompagnement des changements à opérer.</p> <p>Développer des outils de décisions et des politiques publiques adéquates.</p>	3.7	Moyenne à forte
Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Reconception du système de culture	<p>Développer des scénarios à court terme pour la profession et les pouvoirs publics</p> <p>Proposer des trajectoires d'évolution a court terme (2024-2028) sur la base des travaux des axes précédents</p>	3.8	Forte
Axe 3 : les solutions à l'échelle de parcelle et du paysage	Reconception du système de culture	<p>Développer des scénarios à long terme pour la profession et les pouvoirs publics</p>	3.9	Forte

Axe 4 : le transfert et le déploiement auprès des agriculteurs	Conditions du transfert et du déploiement	<p>Identifier et lever les freins aux changements</p> <p>Identifier les freins liés à la mécanisation, l'accès à l'eau, l'accès au foncier et à l'information.</p> <p>Identifier les freins et les besoins d'innovations d'outils agricoles, des organismes de recherche, les subventions et les soutiens publics requis.</p> <p>S'assurer de la production de guides techniques issus des résultats et les rendre accessibles à tous les producteurs.</p> <p>S'assurer de la large distribution des variétés et porte-greffes tolérants aux impacts du changement climatiques et aux problématiques sanitaires.</p> <p>S'assurer que la recherche et l'expérimentation intègrent des approches multicritères, participatives incluant des leviers multiples aux échelles nationales et régionales.</p> <p>Prendre en compte la longévité du châtaignier et le temps long nécessaire pour obtenir les résultats des expérimentations.</p>	4.1	Moyenne à forte
Axe 4 : le transfert et le déploiement auprès des agriculteurs	Condition de déploiement	Utiliser le principe de science pour l'action dans la mise en place et l'adoption d'innovation dans le contexte du changement climatique	4.2	Moyenne à forte
Axe 4 : le transfert et le déploiement auprès des agriculteurs	Outils de déploiement	<p>Communiquer sur les externalités positives de la castanéiculture</p> <p>Communiquer sur l'impact atténuateur du châtaignier vis à vis du changement climatique, notamment le stockage carbone.</p> <p>Identifier la castanéiculture sur le marché de la compensation carbone.</p>	4.3	Forte
Axe 4 : le transfert et le déploiement auprès des agriculteurs	Outils de déploiement	<p>Développer des outils numériques de diagnostics, suivis et conseils</p> <p>Mettre à disposition des producteurs des outils numériques d'aide à la décision agricole (OAD) incluant la dimension du changement climatique</p>	4.4	Moyenne à forte
Axe 4 : le transfert et le déploiement auprès des agriculteurs	Outils de déploiement	<p>Identifier et mettre en œuvre des outils de déploiements des innovations et des connaissances acquises pour la profession</p> <p>(1) Webinaires</p> <p>(2) Restitutions locales, départementales, régionales pour diffuser l'information.</p> <p>(3) Journées techniques</p> <p>(4) Formations et accompagnements individuels</p> <p>(5) Documents de synthèses des travaux,</p>	4.5.	Forte

		accessibles et compréhensibles par les professionnels		
Axe 4 : le transfert et le déploiement auprès des agriculteurs	Mobilisation des acteurs	Communiquer par les fermes et sites pilotes (1) Recenser et valoriser les exploitations et stations mettant en œuvre certaines actions ou cumuls d'actions (2) proposer des visites de ferme, sites pilotes et laboratoires de recherche travaillant sur le plan	4.6	Moyenne à forte
Axe 4 : le transfert et le déploiement auprès des agriculteurs	Mobilisation des acteurs	Développer un bulletin d'avertissement châtaignier (lien plan d'action maladie : bulletin commun maladies/ ravageurs/ changement climatique/ irrigation)	4.7	Moyenne à forte
Axe 4 : le transfert et le déploiement auprès des agriculteurs	Mobilisation des acteurs	Impliquer la profession dans l'élaboration des projets de recherche Impliquer les professionnels (individuels et collectifs), les producteurs, les transformateurs, ... en amont du processus de réalisation des protocoles scientifiques.	4.8.	Forte

Annexe - Références bibliographiques pour les deux diagnostics

- Alcaide, F., Solla, A., Mattioni, C., Castellana, S., & Martín, M. Á. (2019). Adaptive diversity and drought tolerance in *Castanea sativa* assessed through EST-SSR genic markers. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 92(3), 287-296.
- Allona, I., Ramos, A., Ibáñez, C., Contreras, A., Casado, R., & Aragoncillo, C. (2008). Molecular control of winter dormancy establishment in trees: a review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6, 201-210.
- Álvarez-Valera, H. H., Bolívar-Vilca, E., Cervantes-Jilaja, C., Cuadros-Zegarra, E. E., Barrios-Aranibar, D., & Patiño-Escarcina, R. (2014, November). Automation of chestnuts selection process using computer vision in real time. In 2014 33rd International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC) (pp. 87-91). IEEE.
- Aumeeruddy-Thomas Y., N. Ponsa, E. Calvet, H. Deplaupe, C. Franchi, J-F Lalfert, C. Mathieu, F. Michaux, P. Soullard and M. Grange (2024) Methodology for phenoclimatic observations and modelling of *Castanea sativa* mill. traditional cultivars and revitalizing chestnut growers' local knowledge in France, ROC-CHA project, Acta Horticultura, Special Issue, VII International Chestnut Symposium, Lugo, Spain.
- Barreneche T, Botta R, Robin C, (2019) Advances in breeding of chestnuts. Chapter taken from: Serdar, Ü. and Fulbright, D. (eds.), Achieving sustainable cultivation of tree nuts, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, 2019, (ISBN: 978 1 78676 224 5; www.bdspublishing.com). <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2018.0042.16>
- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). The responses of agriculture in Europe to climate change. *Regional Environmental Change*, 11, 151-158.
- Bouffartigue, C., Debille, S., Fabreguettes, O., Pereira-Lorenzo, S., Flutre, T., & Harvengt, L. (2019). High admixture between forest and cultivated chestnut (*Castanea sativa* Mill.) in France. bioRxiv.
- Bouffartigue, C., Debille, S., Fabreguettes, O., Cabrer, A. R., Pereira-Lorenzo, S., Flutre, T., & Harvengt, L. (2020). Two main genetic clusters with high admixture between forest and cultivated chestnut (*Castanea sativa* Mill.) in France. *Annals of Forest Science*, 77, 1-16.
- Bourgeois, C. (2004). *Le châtaignier : un arbre, un bois*. S.l. : Forêt privée française. ISBN 978-2-904740-90-9
- Brandano, A.; Serra, S.; Hardy, G.E.S.J.; Scanu, B. Potassium Phosphonate Induces Resistance in Sweet Chestnut against Ink Disease Caused by Phytophthora Species. *Pathogens* 2023, 12, 365. <https://doi.org/10.3390/pathogens12030365>
- Breisch H., (2008). Châtaignes : le point sur les pourritures. *Infos Ctifl* 240: 30-33.
- Bruneton-Governatori, Ariane *Le pain de bois : Ethnohistoire de la châtaigne et du châtaignier* (French Edition) ISBN 13: 9782865130276
- Brusini J., Robin C. (2013). Mycovirus transmission revisited by in situ pairings of vegetatively incompatible isolates of *Cryphonectria parasitica*. *Journal of Virological Methods*, 187 (2), 435-442,
- Cecchini M., Contini M., Massantini R., Monarca D., Moscetti R. (2011). Effects of controlled atmospheres and low temperature on storability of chestnuts manually and mechanically harvested. *Postharvest biology and technology*, 61(2-3), 131-136.
- Chambers, S. M., & Scott, E. S. (1995). In vitro Antagonism of *Phytophthora cinnamomi* and *P. citricola* by Isolates of *Trichoderma* spp. and *Gliocladium virens*. *Journal of Phytopathology*, 143(8), 471-477. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1995.tb04557.x>
- Chen, W., He, L., Tian, S., Masabni, J., Zhang, R., Zou, F., & Yuan, D. (2020). Combined addition of bovine bone and cow manure: Rapid composting of chestnut burrs and production of a high-quality chestnut seedling substrate. *Agronomy*, 10(2), 288.
- Chiriaco, M. V., Samad, N., Magnani, F., Vianello, G., Vittori-Antisari, L., Mazzoli, I., ... & Valentini, R. (2024). Ecophysiology of Mediterranean Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) Forests : Effects of Pruning Studied through an Advanced IoT System. *Forests*, 15(9), 1579.
- Clemmensen, K. E., et al. "Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest." *Science* 339.6127 (2013): 1615-1618

- Conedera, M., Krebs, P., Tinner, W., Pradella, M., & Torriani, D. (2004). The cultivation of *Castanea sativa* (Mill.) in Europe, from its origin to its diffusion on a continental scale. *Vegetation history and archaeobotany*, 13, 161-179.
- Chuine I. & E. Beaubien (2001) Phenology is a major determinant of temperate tree distributions. *Ecology Letters*, 4: 500-510.
- CTIFL (2023) Châtaigne, Le CTIFL, Interfel, Bordeaux
- Dennert FG, Broggin GAL., Gessler C., Storari M., (2015). *Gnomoniopsis castanea* is the main agent of chestnut nut rot in Switzerland. *Phytopathologia Maditerranea* 54 : 199-211.
- Desprez-Loustau ML, Robin C, Reynaud G, Deque M, Badeau V, Piou D, Husson C, Marçais B. 2007. Simulating the effects of a climate change scenario on geographical range and activity of forest pathogenic fungi. *Can J Plant Pathol.* 249 (2007) 246–253.
- Donis-González, I. R., Guyer, D. E., Fulbright, D. W., & Pease, A. (2014). Postharvest non-invasive assessment of fresh chestnut (*Castanea* spp.) internal decay using computer tomography images. *Postharvest biology and technology*, 94, 14-25.
- Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., & Merdinoglu, D. (2010). The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate research*, 41(3), 193-204.
- Fader, M., Shi, S., von Bloh, W., Bondeau, A., & Cramer, W. (2016). Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 953-973
- Fawwaz, I., Sagala, J., Sijabat, R., & Maringga, N. (2023). Implementation of Transfer Learning in CNN for Classification of Nut Type. *sinkron*. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v8i4.12784>
- Fernandes, L., Pereira, E. L., Fidalgo, M. D. C., Gomes, A., & Ramalhosa, E. (2020). Effect of modified atmosphere, vacuum and polyethylene packaging on physicochemical and microbial quality of chestnuts (*Castanea sativa*) during storage. *International Journal of Fruit Science*, 20(sup2), S785-S801. Fiore M., DI.
- Modugno N., Bruno C., De Nicol, T. and Fioretti M. (2021). Microwaves for mild postharvest fruit treatment. *Acta Hortic.* 1311, 403-410. DOI: 10.17660/ActaHortic.2021.1311.51 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1311.51>.
- Freitas, T. R., Santos, J. A., Silva, A. P., & Fraga, H. (2021). Influence of climate change on chestnut trees: A review. *Plants*, 10(7), 1463.
- Glaser, B., McKey, D., Giani, L., Teixeira, W., di Rauso Simeone, G., Schneeweiß, J., Nguyen, H., & Homburg, J. (2024). Historical accumulation of biochar as a soil amendment. Pp. 15-55. In: Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management. Science, Technology, and Implementation*. 3rd Edition. Routledge, London.
- Jägermeyr J, Gerten D, Schaphoff S, Heinke J, Lucht W and Rockström J 2016 Integrated crop water management might sustainably halve the global food gap *Environ. Res. Lett.* 11 0250.
- Lione G., Giordano L., Sillo F., Gonthier P., (2015). Testing modelling the effects of climate on the incidence of the emergent nut rot agent of chestnut *Gnomoniopsis castanea*. *Plant Pathology* 63: 852-863.
- Lione G., Danti R., Fernandez-Conradi P., Ferreira-Cardoso J. V., Lefort F., Marques G., Meyer J. B., Prospero S., Radócz L., Robin C., Turchetti T., Vettrai A. M., Gonthier P. 2019. The emerging pathogen of chestnut *Gnomoniopsis castaneae*: the challenge posed by a versatile fungus. *Eur J Plant Pathol*, 153, 671–685. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1597-2>.
- Liu J., Li X. Y., Li P. W., Wang W., Zhang J., Zhang R., & Liu P. (2010). Nondestructive detection of moldy chestnut based on near infrared spectroscopy. *African journal of Agricultural research*, 5(23), 3213-3218.
- Marchand M (2022). Vulnérabilité du châtaignier à la maladie de l'encre : barrières écologiques à la dissémination des agents pathogènes. Thèse de l'Université de Bordeaux.
- Maurel M., Robin C., Capron G., Desprez Loustau M. L. (2001a). Effects of root damage associated with *Phytophthora cinnamomi* on water relations, biomass accumulation, mineral nutrition and vulnerability to water deficit of five oak and chestnut species. *Forest Pathology*, 31, 353-369, <https://hal.inrae.fr/hal-02679096>

- Maurel M., Robin C., Capdevielle X., Loustau D., Desprez Loustau M. L. (2001b). Effects of variable root damage caused by *Phytophthora cinnamomi* on water relations of chestnut saplings. *Annals of Forest Science*, 58, 639-651, <https://hal.inrae.fr/hal-02674235>
- MEDECC 2021: https://medecc.org/wp-content/uploads/2021/05/MedECC_MAR1_SPM_ENG.pdfBindi, M., & Olesen, J. E. (2011). The responses of agriculture in Europe to climate change. *Regional Environmental Change*, 11, 151-158.
- Morales-Rodriguez, C., Bastianelli, G., Caccia, R., Bedini, G., Massantini, R., Moschetti, R., ... & Vannini, A. (2022). Impact of 'brown rot' caused by *Gnomoniopsis castanea* on chestnut fruits during the post-harvest process: critical phases and proposed solutions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(2), 680-687.
- Moschetti R., Monarca D., Cecchini M., Haff R. P., Contini M., Massantini R. (2014). Detection of mold-damaged chestnuts by near-infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 93, 83-90.
- Mosedale, J. R., Abernethy, K. E., Smart, R. E., Wilson, R. J., & Maclean, I. M. (2016). Climate change impacts and adaptive strategies: lessons from the grapevine. *Global change biology*, 22(11), 3814-3828
- Orsat V. and Raghavan GSV. (2007). Microwaves in Postharvest Applications with Fresh Fruits and Vegetables. *Fresh Produce*, Global Science Books. 1(1), 16-22.
- Panagou, E. Z., Vekiari, S. A., & Mallidis, C. (2006). The effect of modified atmosphere packaging of chestnuts in suppressing fungal growth and related physicochemical changes during storage in retail packages at 0 and 8 °C. *Advances in Horticultural Science*, 20(1), 82-89.
- Pasche S., Calmin G., Auderset G., Crovadore J., Pelleteret P., Mauch-Mani B., Barja F., Paul B., Jermini M., Lefor F., (2016). *Gnomoniopsis smithogilvyi* cause chestnut canker symptoms in *Castanea sativa* shoots in Switzerland. *Fungal Genetics and Biology* 87: 9-21.
- Pérez-Girón, J.C.; Álvarez-Álvarez, P.; Díaz-Varela, E.R.; Mendes Lopes, D.M. (2020) Influence of climate variations on primary production indicators and on the resilience of forest ecosystems in a future scenario of climate change: Application to sweet chestnut agroforestry systems in the Iberian Peninsula. *Ecol. Indic.* 2020, 113, 106199.
- Pfleiderer, P., Menke, I., & Schleussner, C. F. (2019). Increasing risks of apple tree frost damage under climate change. *Climatic Change*, 157(3), 515-525.
- Ponsa (2022) Influences du changement climatique sur les châtaigniers en Ardèche. Modélisation phénoclimatique et ethnoécologie. Master dissertation, MNHN, Paris
- Portela, E., J. Ferreira-Cardoso, and J. Louzada. 2011. Boron application on a chestnut orchard. Effect on yield and quality of nuts. *Journal of Plant Nutrition* 34: 1245–1253.
- Portela, E., J. Ferreira-Cardoso, J. M. Roboredo, and M. Pimentel-Pereira. 1999. Influence of magnesium deficiency on chestnut (*Castanea sativa* Mill.) yield and quality. In: *Improved Crop Quality by Nutrient Management*, eds. D. Anac, and P. Martin-Prével, pp. 153–158. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Poughon J. (2023) Etude de la diversité génétique de la châtaigneraie fruitière en Lozère et en Ardèche, Mémoire 2ème année d'école ingénieure agronome, Equipe Interactions Bioculturelles, CEFE, UMR 5175, INP ENSAT Toulouse.
- Pereira-Lorenzo, S., Ramos-Cabrera, A. M., Barreneche, T., Mattioni, C., Villani, F., Díaz-Hernández, B., ... & Martín, A. (2019). Instant domestication process of European chestnut cultivars. *Annals of Applied Biology*, 174(1), 74-85.
- Prospero S., Botella L., Santini A., Robin C. (2021). Biological control of emerging forest diseases: How can we move from dreams to reality ?. *Forest Ecology and Management*, 496, 119377, <https://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119377>, <https://hal.inrae.fr/hal-03282830>
- Robin C., Anziani C., Cortesi P. 2000. Relationship Between Biological Control, Incidence Of Hypovirulence, Diversity Of Vegetative Compatibility Types Of *Cryphonectria parasitica* In France. *Phytopathology* 90:730-737.
- Robin, C., & Marchand, M. (2022). Diseases of chestnut trees. In *Forest Microbiology* (pp. 311-323). Academic Press.

- Robin C., Morel O., Vettrano A.M., Perlerou C., Diamandis S., Vannini A. 2006 Genetic variation in susceptibility to *Phytophthora cambivora* in European chestnut (*Castanea sativa*). *Forest Ecology Management* 226:199-207
- Rosa, L. (2022). Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*, 17(6), 063008.
- Rosenzweig, C., & Hillel, D. (2000). Soils and global climate change: Challenges and opportunities. *Soil science*, 165(1), 47-56.
- Saltré F, Duputié A, Gaucherel C, Chuine I (2015) How climate, migration ability and habitat fragmentation affect the projected future distribution of European beech. *Global Change Biology*, 21 (2), 897-910. <https://doi.org/10.1111/gcb.12771>
- Sivaranjani, A., Senthilrani, S., Ashokumar, B., & Murugan, A. (2019). CashNet-15: An Optimized Cashew Nut Grading Using Deep CNN and Data Augmentation. 2019 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICSCAN.2019.8878725>.
- Vannini A., Vettrano AM., Martignoni D., Morales-Rodriguez C., Contarini M., Caccia R., Papparatti B., Speranza S., (2017). Does *Gnomniopsis castanea* contribute to the natural biological control of chestnut gall wasp. *Fungal Biology* 121 : 44-52.
- Vettrano, AM., Bianchini, L., Caradonna, V., Forniti, R., Goffi, V., Zambelli, M., Botondi, R., (2019). Ozone gas as a storage treatment to control *Gnomoniopsis castanea* preserving chestnut quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
- Vidaller, C., 2011. *Ecologie évolutive de la châtaigneraie cévenole : Structuration et diversité génétique des variétés greffées, des porte-greffes et des arbres issus de semis*. Mémoire Master 1, CEFE, UMR 5175 Equipe Interactions, Université Montpellier.
- Visentin, I., Gentile, S., Valentino, D., Gonthier, P., Tamietti, G. & Cardinale, F., (2012), *Gnomniopsis castanea* sp. nov. (Gnomoniaceae, Diapothales) as the causal agent of nut rot in sweet chestnut, *Journal of Plant Pathology*, vol. 94, n°2.
- Walker DM., Castlebury LA., Sogonv MV., White JF., (2010). Systematics of genus *Gnomniopsis* (Gnomoniaceae, Diapothales) based on a tree gene phylogeny, host associations and morphology. *Mycologia* 102(6): 1479-1496.
- Washington WS., Allen AD., Dooley LB., (1997). Preliminary studies on *Phomopsis castanea* and other organisms associated with healthy and rotted chestnut fruit in storage. *Australasian Plant Pathology* 26 : 37-43.
- Wang, C., Li, X., Wang, W., Feng, Y., Zhou, Z., & Zhan, H. (2011). Recognition of worm-eaten chestnuts based on machine vision. *Math. Comput. Model.*, 54, 888-894. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.012>.
- Xiang, Ao., Ying, Chen., Hu, Wan., Wei, Li., Yuzhi, Tan., Junxiong, Zhang. (2012). 1. Device for sorting fruits and method for sorting Chinese chestnut.