



Projet Plantations expérimentales d'essences d'avenir¹

Design des plantations expérimentales

Ce rapport délivre des informations sur le design expérimental prévu du projet « Plantations expérimentales d'essences d'avenir ». Le design expérimental décrit peut encore subir de légères modifications. Le choix des essences et la sélection des placettes sont élaborés dans des rapports distincts²: « Choix des essences pour les plantations expérimentales », « Sélection des placettes pour les plantations expérimentales ». Une version allemande de ce document a été transmise aux cantons le 19/03/2018.

Abréviations: EF = essence(s) forestière(s); PE = plantation(s) expérimentale(s); PV = provenance(s) (synonyme: origine(s))

Auteurs: Esther Frei, Kathrin Streit, Peter Brang, WSL

Traduction: Claude Dequidt, Véronique Pézard (ttn)

Version 1, 17/04/2018

Table des matières

1	Introduction.....	2
1.1	Objectifs du projet et questions	2
1.2	Signification du design expérimental	3
2	Procédure d'élaboration du design expérimental.....	3
3	Design expérimental élaboré	3
3.1	Deux types de plantations expérimentales	3
3.1.1	Plantations expérimentales à design fixe	3
3.1.2	Plantations expérimentales à design flexible	4
3.2	Nombre et répartition des plantations expérimentales.....	4
3.3	Répartition des essences sur les plantations expérimentales.....	4
3.4	Design d'une plantation expérimentale	5
3.4.1	Superficie et nombre de plants.....	8
3.5	Autres aspects de l'expérimentation.....	10
3.6	Évaluation de l'expérimentation	11
4	Bilan et perspectives	11
5	Bibliographie	12
	Annexe: Catalogue des essences pour les plantations expérimentales à design fixe.....	13

¹ Le projet est réalisé par l'OFEV et le WSL dans le cadre du programme de recherche « Forêts et changements climatiques ».

² Les deux rapports cités ont été envoyés avec ce rapport.

Synthèse

Le changement climatique aura des répercussions sur l'aptitude climatique des essences sur leurs sites actuels. Le projet « Plantations expérimentales d'essences d'avenir » vise à tester le potentiel de survie et de prospérité des essences, sous diverses conditions climatiques. Il s'agit d'analyser quels facteurs environnementaux déterminent la prospérité de 18 essences ainsi que de 7 provenances de chacune de ces essences par grands gradients environnementaux. Afin de pouvoir formuler des évaluations statistiques pertinentes, toutes les plantations expérimentales doivent avoir un design expérimental cohérent, comprenant aussi bien la répartition des plantations expérimentales et des essences sur ces dernières, que la disposition des plantes au sein de chaque plantation expérimentale. Le design expérimental a été élaboré avec d'autres chercheurs, contrôlé par des statisticiens externes et optimisé par la suite de telle sorte que les résultats puissent être les plus pertinents possibles. Il faut maintenant créer un réseau de 50 à 60 plantations expérimentales, réparties sur toutes les régions biogéographiques et étages de végétation présents en Suisse et qui seront observées durant 30 à 50 ans. Chaque plantation expérimentale est subdivisée en 3 blocs. Au sein d'un bloc figurent toutes les essences et provenances prévues pour cette plantation expérimentale. Chaque essence est attribuée de façon aléatoire à une parcelle, le nombre d'essences par plantation expérimentale et donc le nombre de parcelles étant variables. Chaque parcelle est subdivisée à son tour en 4 sous-parcelles qui sont attribuées de façon aléatoire à 4 des 7 provenances. Chaque sous-parcelle comprend 9 individus d'une provenance. Le grand avantage du projet prévu réside dans la procédure coordonnée qui permet d'avoir des résultats sur le développement des essences sur de grands gradients environnementaux.

1 Introduction

1.1 Objectifs du projet et questions

Le changement climatique aura des répercussions sur l'aptitude climatique des essences forestières (EF) sur leurs sites actuels et donc sur les futures prestations forestières. Sur de nombreux sites forestiers, dans les conditions climatiques attendues à la fin du 21^{ème} siècle, d'autres EF pousseront mieux que celles qui y prospèrent actuellement (Pluess *et al.* 2016). Alors qu'une part des futures EF est déjà présente là où le climat à l'avenir leur sera vraisemblablement favorable, d'autres sont totalement absentes. Dans ce contexte, les praticiens forestiers se posent la question importante de savoir sur quels sites supposés adaptés vers la fin du 21^{ème} siècle, ces EF survivront déjà aujourd'hui et pourront prospérer. Du point de vue scientifique, il est intéressant de savoir quels sont les facteurs environnementaux qui définissent la capacité de survie, la vitalité et la croissance des EF examinées et de leurs provenances (PV, synonyme: origines) par grands gradients environnementaux. La réponse permettra de comparer la viabilité des EF et PV. Pour examiner ces questions, le projet « Plantations expérimentales d'essences d'avenir » a été initié. Dans le cadre de ce projet, un réseau de plantations expérimentales (PE) coordonnées sera établi dans toute la Suisse, où l'on examinera des questions importantes sur l'adaptation de la forêt au climat futur sur une durée d'observation de 30 à 50 ans. Ce projet servira à vérifier des connaissances issues du programme de recherche « Forêts et changements climatiques », à contribuer aux recommandations d'essences pour les praticiens et à établir une infrastructure à long terme pour la recherche appliquée. Parallèlement à l'élaboration du design fixe présenté dans ce rapport, il a été défini en consultation avec les offices des forêts cantonaux que 18 EF seront examinées. Alors qu'un catalogue principal de 9 EF sera testé en détail, les 9 EF du catalogue complémentaire seront examinées de façon moins approfondie.

1.2 Signification du design expérimental

Un design expérimental décrit comment est créée une expérimentation. Ceci comprend aussi bien la répartition des PE par gradient environnemental et la répartition des EF sur les PE que l'arrangement des plantes au sein de la PE. Afin de permettre des évaluations statistiques pertinentes, les principes de réplication et de randomisation doivent être respectés (Underwood 1997; Binkley 2008). Par réplication, on entend que les « unités d'expérimentation » (par exemple arbre individuel, PV, EF, PE) doivent être répétées multiples fois. Ainsi l'évaluation pourra montrer si par exemple la croissance supérieure à la moyenne d'une EF est un fruit du hasard ou si cette EF pousse rapidement en soi. Par randomisation, on entend un arrangement aléatoire des unités d'expérimentation. Ceci permet d'éviter par exemple qu'une EF donnée ne soit plantée qu'au bord d'une placette, et qu'elle y pousse sous des conditions environnementales différentes d'une autre EF à l'intérieur de la placette. Toutes les PE à design fixe (voir chapitre 3.1.1) doivent être créées, traitées et observées de façon similaire. Ceci est la seule façon d'obtenir des résultats statistiques fiables sur la performance à long terme des EF et PV testés.

2 Procédure d'élaboration du design expérimental

Le design expérimental a été élaboré dans un processus à plusieurs niveaux. Un premier projet a été présenté aux représentant-e-s des cantons³ dans le cadre d'ateliers, en juillet 2017. Ensuite le design expérimental a été développé plus avant au cours d'ateliers avec des représentants des praticiens et des forestiers. À l'automne 2017, une équipe externe de statisticiens a été chargée d'évaluer le design expérimental (Biomathematics and Statistics Scotland, James Hutton Institute, Aberdeen). Leur mission consistait à évaluer la pertinence statistique du design expérimental prévu, à l'aide de données semblables d'expérimentations du WSL sur la croissance forestière. En janvier 2018, les statisticiens ont présenté les résultats de leur contrôle du design expérimental (Meyer & Brocklehorst 2018). Le résultat le plus important de cette évaluation était qu'il fallait plus de PE par EF que prévu pour prouver les influences environnementales sur les EF. Chaque EF doit être représentée dans au moins 35 PE, plutôt que dans 15 PE en moyenne. Cette augmentation du nombre de PE par EF se répercute sur l'ensemble de l'expérimentation, dans la mesure où la tendance évolue vers le besoin de plus de placettes plus grandes. Pour ne pas grossir exagérément la surface nécessaire, le nombre de blocs (répétitions) a été réduit en contrepartie pour chaque PE de 4 à 3. Ceci est justifié, car le nombre de blocs influe sensiblement moins la pertinence statistique de l'expérimentation que le nombre de PE (Meyer & Brocklehorst 2018). Comme le nombre de PE influe fortement sur la pertinence statistique des résultats, le design expérimental peut encore subir des modifications en fonction du nombre définitif des placettes inscrites pour les PE à design fixe. Si le nombre de placettes disponibles devait s'avérer insuffisant, le nombre d'EF devrait toutefois être réduit.

3 Design expérimental élaboré

3.1 Deux types de plantations expérimentales

3.1.1 Plantations expérimentales à design fixe

Les PE à design fixe sont au centre du projet. Des prescriptions strictes s'appliquent à celles-ci, pour permettre une évaluation statistique. Les EF et PV ainsi que le design expérimental sont prescrits par

³ Tous les cantons ainsi que la Principauté du Liechtenstein ont été impliqués. Au total plus de 20 cantons ont participé au processus.

le WSL. Les PE à design fixe sont suivies étroitement et scientifiquement par le WSL. Les inventaires ont lieu selon un protocole homogène avec peu de caractéristiques pertinentes et faciles à mettre en évidence, qui sont collectées dans toutes les PE: Mortalité, croissance (hauteur d'arbre, diamètre du tronc), dégâts abiotiques et biotiques. Les prescriptions pour le design expérimental décrites dans ce rapport s'appliquent, sauf mention contraire, aux PE à design fixe.

3.1.2 Plantations expérimentales à design flexible

En complément du design fixe, il est possible d'avoir des PE à design flexible. Dans ces PE, d'autres EF ou PV peuvent être par exemple testées ou des questions supplémentaires être examinées, qui intéressent particulièrement les acteurs. Il est conseillé de s'appuyer autant que possible sur les prescriptions du design fixe pour les PE à design flexible et de n'en diverger que si nécessaire pour des questions spécifiques. L'accompagnement scientifique par le WSL est en règle générale léger pour ces PE. Mais le WSL peut être consulté au cas par cas pour l'élaboration du design. Comme les PE à design flexible ne répondent pas à toutes les prescriptions en matière de design, elles ne peuvent pas être prises en compte dans l'évaluation statistique, mais relèvent plutôt de l'étude de cas. Elles ne comptent donc pas au nombre de PE, un critère important pour la pertinence des évaluations statistiques.

3.2 Nombre et répartition des plantations expérimentales

Il est ressorti de la vérification statistique du design expérimental que le nombre de PE était l'élément le plus déterminant de la pertinence statistique. Pour le succès de ce projet, il est donc décisif que suffisamment de PE à design fixe soient installées et que celles-ci soient réparties de façon homogène dans toute la Suisse par région biographique et étage de végétation. Nous visons de ce fait en design fixe 50 à 60 PE, réparties sur toute la Suisse (Figure 1) et qui couvrent ainsi de grands gradients environnementaux. De même les placettes doivent comporter différents types de sol ou substrat géologique.



Figure 1. Exemple d'une possible répartition de 50 PE dans toute la Suisse. Source de données de la carte: swisstopo.

3.3 Répartition des essences sur les plantations expérimentales

Le WSL a choisi les EF à design fixe en concertation avec les cantons et d'autres participants. Le catalogue d'essences comprend un catalogue principal et un catalogue complémentaire de 9 EF chacun (voir Tableau 2 en annexe et rapport « Choix des essences pour les plantations expérimentales »). Il est résulté de l'évaluation statistique du design expérimental qu'une EF devait être plantée dans 35 PE

environ, afin de pouvoir en tirer des conclusions statistiques pertinentes. De ce fait chaque EF du catalogue principal sera plantée dans au moins 35 PE, tandis que chaque EF du catalogue complémentaire sera testée seulement dans un nombre restreint de 15 PE environ. Pour les EF du catalogue principal, il est possible d'obtenir des affirmations fiables sur leur adéquation et leur potentiel de croissance sous de larges gradients environnementaux ainsi que des comparaisons entre EF. À l'inverse pour les EF du catalogue complémentaire, la dépendance des caractères végétaux aux gradients environnementaux peut être définie de façon moins précise.

Les EF sont plantées dans les écorégions et étages de végétation ainsi que dans les sols correspondant à leur amplitude écologique actuelle, et à un ou deux étages de végétation supérieurs. En outre les EF seront plantées au-delà de leur aire de répartition régionale actuelle, pour pouvoir mieux définir leurs limites écologiques (Détails voir rapport « Choix des essences pour les plantations expérimentales »). Afin d'atteindre une répartition équilibrée des EF, le WSL définit pour chaque PE les EF à tester. Une répartition grossière des 18 EF sur 50 PE en tenant compte des étages de végétation a montré que les PE à haute altitude (comprenant dans ce rapport les étages de végétation subalpin et subalpin supérieur ainsi que l'étage haut-montagnard sur quelques sites moins productifs) comprennent 4 à 8 EF et de ce fait peuvent être relativement petites. Les PE à basse altitude (incluant dans ce rapport les étages de végétation collinéens à haut-montagnard) comprennent plutôt 8 à 15 EF et doivent donc être plus grandes. La raison réside dans le fait que la diversité des essences décroît avec l'altitude, ce qui ne se modifiera pas fondamentalement d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

3.4 Design d'une plantation expérimentale

L'agencement expérimental de chaque PE est un bloc design emboîté et randomisé (Figure 2; Underwood 1997 ; « randomized block design »). Pour ce faire, chaque placette est d'abord subdivisée en 3 blocs (répétitions). Au sein de chaque bloc figurent une fois toutes les EF et PV prévues pour cette PE. Chaque EF est attribuée de façon aléatoire à une parcelle carrée, le nombre d'EF par PE et donc le nombre de parcelles étant variable. Les parcelles sont à leur tour subdivisées en 4 sous-parcelles carrées, auxquelles sont attribuées de façon aléatoire 4 des 7 PV de l'EF correspondante. Dans chaque sous-parcelle, 9 plants de chaque PV sont plantés dans une disposition carrée de 3 x 3 plants. Ces plants sont une sélection aléatoire à partir de la quantité totale de plants cultivés de cette PV.

Le design présenté en Figure 2 d'une PE de 8 EF à 4 PV est idéalisé; lors de la réalisation concrète des PE en forêt, l'agencement des blocs et parcelles doit être adapté aux conditions rencontrées sur le terrain. Le WSL créera pour chaque PE un schéma de plantation personnalisé qui prenne en compte les réflexions décrites ici.

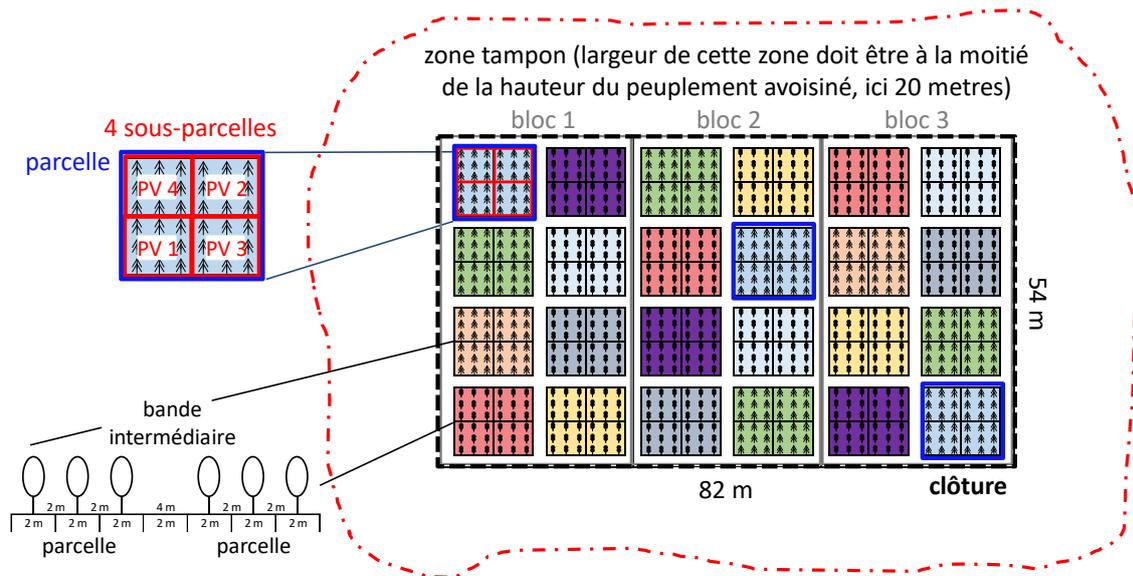


Figure 2. Agencement expérimental idéal d'un design fixe d'une PE à basse altitude composée de 3 blocs, 8 EF et 4 PV par EF. Les 9 plants des mêmes EF et PV dans un bloc sont désignés comme sous-parcelle et les 4 sous-parcelles ensemble sont désignées comme parcelle. Entre les parcelles, des bandes intermédiaires de 4 m doivent réduire la concurrence. La PE est entourée d'une clôture de protection contre la faune sauvage et d'une zone tampon, qui doit être environ égale à la moitié de la hauteur du peuplement avoisiné.

Avec un design de bloc randomisé, un compromis a été trouvé entre une randomisation totale, où chaque arbre de chaque EF et PV serait réparti de façon aléatoire sur toute la placette, et une ségrégation intégrale sans réplication où chaque EF avec tous les individus de ses PV ne serait représentée qu'une seule fois au sein d'une PE (Quinn & Keough 2002). Un agencement totalement randomisé serait certes avantageux du point de vue statistique, mais défavorable du point de vue écologique, car les EF à croissance rapide concurrenceraient de plus en plus fortement les EF à croissance lente. Par ailleurs un design intégralement randomisé serait source d'erreurs dans la mise en œuvre. Une ségrégation totale présenterait le risque que les différences de site au sein d'une placette faussent les résultats ou que les perturbations sur une partie de la placette influencent fortement chaque EF différemment.

Chaque aspect du design expérimental est expliqué par la suite plus en détail.

Blocs

On désigne par bloc (répétition) une surface partielle au sein d'une PE, où toutes les EF avec toutes leurs PV sont représentées une fois. Les blocs permettent de séparer dans l'évaluation statistique l'influence des différences de site connues et inconnues au sein de la placette des grandeurs d'influence qui nous intéressent ici (par exemple température de l'air) (König 2005). De plus les blocs peuvent limiter les dégâts, si une perturbation impacte si fortement une partie d'une PE qu'il n'est plus possible de procéder à des mesures exploitables. La formation de blocs garantit dans ce cas que le bloc concerné puisse être exclu comme un tout, alors que toutes les EF et PV des blocs restants soient encore répliquées. Trois blocs représentent un compromis entre l'exigence statistique de nombreux blocs (Quinn & Keough 2002) et l'augmentation de la surface nécessaire et donc des coûts avec le nombre de blocs. Trois blocs sont défendables comme minimum, car le nombre de blocs par rapport au nombre de PE n'a qu'un effet limité sur la pertinence statistique de l'expérimentation (Meyer & Brocklehorst 2018).

Dans la mesure du possible, les différences stationnelles au sein d'une PE doivent être évitées (voir le rapport « Sélection des placettes pour les plantations expérimentales » pour plus de détails). Si cependant, il y en a de telles dans certains facteurs environnementaux (par exemple gradients de l'humidité du sol), les blocs doivent être créés de sorte à « représenter » les gradients: un bloc est alors placé sur la partie la plus humide de la placette, un autre sur la partie la plus sèche et le troisième entre les deux. Des différences stationnelles à petite échelle (par exemple souches, roches, sentiers, petits ruisseaux) devraient être évitées; toutefois la surface nécessaire s'accroît. S'il n'est pas possible de trouver une autre solution, les 3 blocs d'une PE peuvent être aussi séparés spatialement, ce qui permet d'avoir des surfaces de coupe plus petites. Toutefois cette variante requiert une surface des zones tampons ainsi qu'une longueur de clôture plus grandes.

Parcelles d'essences

Chaque bloc est subdivisé en un nombre défini de parcelles, qui correspond au nombre d'EF testées sur cette PE. De ce fait le nombre de parcelles de chaque PE est variable. À l'inverse, le nombre de parcelles d'une PE est identique dans les 3 blocs. À l'intérieur de chaque bloc, les EF sont affectées de façon aléatoire aux parcelles. Pour réduire la concurrence entre les EF à croissance rapide et lente, les parcelles de résineux et de feuillus sont séparées au sein d'un bloc.

Sous-parcelles de provenances

Chaque parcelle est subdivisée en 4 sous-parcelles, selon un schéma 2 x 2. 4 PV d'une EF sont affectées de façon aléatoire aux 4 sous-parcelles. Sur toute l'expérimentation, 7 PV seront testées pour chaque EF. Afin que la placette ne soit pas plus grande, eu égard à cet impératif, seules 4 des 7 PV de chaque EF sont testées par PE. Alors qu'une PV est testée comme PV de référence dans toutes les PE, où figure l'EF, 3 des 6 PV restantes sont affectées de façon aléatoire à chaque PE. Chacune de ces 6 PV figure ainsi sur la moitié des PE. Ce compromis permet de couvrir relativement largement la variabilité des provenances au sein des EF, sans agrandir la surface nécessaire par PE. Pour chaque PE, la pertinence statistique diminue toutefois. Les véritables recommandations de provenance ne font cependant pas l'objet de cette expérimentation, car il faudrait pour ce faire tester bien plus de PV (König 2005).

Arbres individuels

Les 9 arbres d'une PV par bloc donnent pour 3 blocs 27 arbres par PV et PE ou 108 arbres par EF et PE. En observant les caractères de croissance, le nombre d'individus au sein d'une PE joue un rôle subalterne par rapport au nombre de placettes. Du point de vue statistique, une augmentation du nombre d'individus présente moins d'avantages qu'un plus grand nombre de PE par EF. Pour définir la mortalité dans chaque PE, il faut cependant un nombre suffisant d'individus par PE, afin de pouvoir détecter également des taux de mortalité relativement faibles. Ainsi la mort d'un seul arbre correspond à une mortalité de 3,7% si une PE comprend 27 arbres par PV.

De plus il faut également prendre en compte la mortalité pendant la durée de l'expérimentation, car le nombre d'arbres permettant d'effectuer des mesures de croissance s'en trouve réduit. Le nombre d'individus proposés permet de garantir que suffisamment d'arbres seront disponibles pour des mesures de croissance, y compris en cas de pertes. Si nous partons d'une mortalité de 50% sur 30 ans, il restera après 30 ans en moyenne encore 13,5 arbres par PV ou 54 arbres par EF dans chaque PE, ce qui permet encore des évaluations statistiques pertinentes.

Espacement (2 m ou 1 m)

L'espacement au sein d'une parcelle s'élève à 2 m à basse altitude et à 1 m à haute altitude. Ces distances doivent être aussi précises que possible, à savoir respecter ± 30 cm, pour conserver à

l'identique la concurrence par des plants voisins. Pour des raisons pratiques, l'espacement entre les différentes PV d'une même EF est équivalent, car on part du principe que de fortes différences de croissance entre PV ne se produisent que rarement.

Pour des raisons de faisabilité, l'espacement à haute altitude (étages subalpin et subalpin supérieur) a été réduit à 1 m. Les différents espacements ont pour conséquence que l'influence de ceux-ci ne peut pas être examinée en s'affranchissant de l'altitude, car les deux influences sont amalgamées (« confounded »). Comme les conditions concurrentielles à haute altitude sont, en raison de la faible croissance et l'espacement étroit, semblables à celles à basse altitude, où la croissance est plus vite et l'espacement plus grand, ceci ne pose pas de problème pour l'analyse globale.

Bandes intermédiaires entre parcelles (4 m ou 2 m)

Pour réduire la concurrence entre EF sur des parcelles voisines, l'espacement entre les parcelles a été doublé pour atteindre 4 m à basse altitude et 2 m à haute altitude (Figures 2 et 3). De la même façon, l'espacement doublé de 4 ou 2 m est respecté entre les blocs.

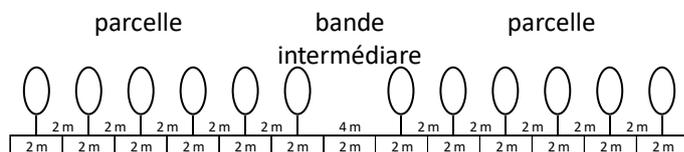


Figure 3. Représentation des espacements et de la largeur de la bande intermédiaire pour 2 parcelles d'une PE à basse altitude.

Layons de débardage

Il faut prendre en compte les layons de débardage existants et prévus lors du placement des parcelles sur les placettes. Afin que les arbres de l'expérimentation ne soient pas impactés par le passage sur les racines et les dégâts du débardage, les layons de débardage doivent être un peu plus larges que la bande intermédiaire prévue.

Zone tampon

Pour créer le plus possible de conditions environnementales semblables, par exemple réduire l'ombrage par les peuplements avoisinés, chaque PE est entourée d'une zone tampon, qui doit être abattu avant la plantation. La largeur de cette zone doit être environ égale à la moitié de la hauteur du peuplement avoisiné (Figure 2; Skovsgaard et al. 2006). La zone tampon doit être naturellement rajeunie de sorte que la plantation soit entourée d'une jeune forêt de même âge que la PE. Pour minimiser les coûts la zone tampon peut être créée hors de la clôture.

3.4.1 Superficie et nombre de plants

La superficie nécessaire à chaque PE résulte du nombre d'EF à tester, de l'espacement et de la hauteur du peuplement avoisiné. Dans les PE de basse altitude (collinéen à haut-montagnard), où il est prévu d'implanter environ 80% des PE, le plus grand nombre d'EF à tester, l'espacement supérieur et la nécessité de zones tampons plus larges engendreront un besoin en superficie plus élevé par rapport au PE de haute altitude (subalpin et subalpin supérieur).

Pour une PE à basse altitude où 10 EF sont testées, une surface globale de 1,32 ha environ est nécessaire, bandes intermédiaires et zone tampon compris (Tableau 1 et Figure 4). Pour 8 EF, la surface nécessaire se réduit à environ 1,15 ha alors que pour 12 EF, il faut compter une surface de 1,54 ha

environ. À haute altitude, la surface nécessaire de 0,45 ha pour 10 EF est sensiblement plus petite, en raison d'un espacement moindre. On suppose par ailleurs que moins d'EF sont testées à haute altitude, en règle générale. Pour 4 EF il faut une surface totale de 0,29 ha et pour 6 EF une de 0,36 ha.

Tableau 1. Surface nécessaire et nombre de plantes par PE en fonction du nombre d'EF pour les PE à basse altitude (étage collinéen à haut-montagnard) et haute altitude (subalpin et subalpin supérieur).

Nombre de EF	Nombre de plants par PE	PE à basse altitude					PE à haute altitude				
		Plantation [ha]	Bandes inter-médiaires [ha]	Zone tampon [ha]	Surface totale [ha]	Longueur de clôture [m]	Plantation [ha]	Bandes inter-médiaires [ha]	Zone tampon [ha]	Surface totale [ha]	Longueur de clôture [m]
4	432	0.17	0.04	0.54	0.75	188	0.04	0.01	0.23	0.29	94
5	540	0.22	0.06	0.59	0.86	216	0.05	0.01	0.25	0.32	108
6	648	0.26	0.07	0.65	0.98	244	0.06	0.02	0.27	0.36	122
7	756	0.30	0.08	0.70	1.09	272	0.08	0.02	0.29	0.39	136
8	864	0.35	0.10	0.70	1.15	272	0.09	0.02	0.29	0.40	136
9	972	0.39	0.13	0.76	1.27	300	0.10	0.03	0.32	0.44	150
10	1080	0.43	0.13	0.76	1.32	300	0.11	0.03	0.32	0.45	150
11	1188	0.48	0.15	0.87	1.50	356	0.12	0.04	0.36	0.51	178
12	1296	0.52	0.15	0.87	1.54	356	0.13	0.04	0.36	0.52	178
13	1404	0.56	0.20	0.93	1.68	384	0.14	0.05	0.38	0.57	192
14	1512	0.60	0.20	0.93	1.73	384	0.15	0.05	0.38	0.58	192
15	1620	0.65	0.20	0.93	1.77	384	0.16	0.05	0.38	0.59	192

Les cellules marquées en gris dans le tableau comprennent les valeurs mentionnées dans le texte.

Dans une PE, 108 plants sont testés par EF. Ce qui donne pour 4 EF 432 plants par PE, pour 8 EF 864 plants, pour 12 EF 1296 plants et pour 15 EF 1620 plants par PE. 27 plants sont testés par PV dans une PE. Pour une PV, ceci donne sur toute l'expérimentation un besoin en plants de 945 plants par EF du catalogue principal qui doivent être plantés dans 35 PE. Pour les EF du catalogue complémentaire, qui ne seront plantées que dans 15 PE seulement, 405 plants seront nécessaires. Si dans l'ensemble un supplément de 67% pour effectuer des regarnissages est inclus dans le calcul, on arrive à 1600 ou 700 plants qui doivent être cultivés par PV. Pour l'ensemble des EF, 83 000 plants doivent être produits. Si l'on compte un taux de regarnissage effectif de 20%, il ne faudra toutefois pour l'ensemble des PE que 50 000 plants.

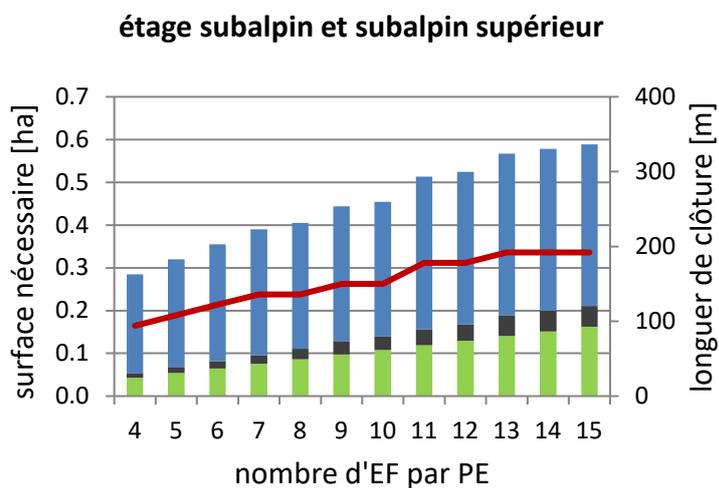
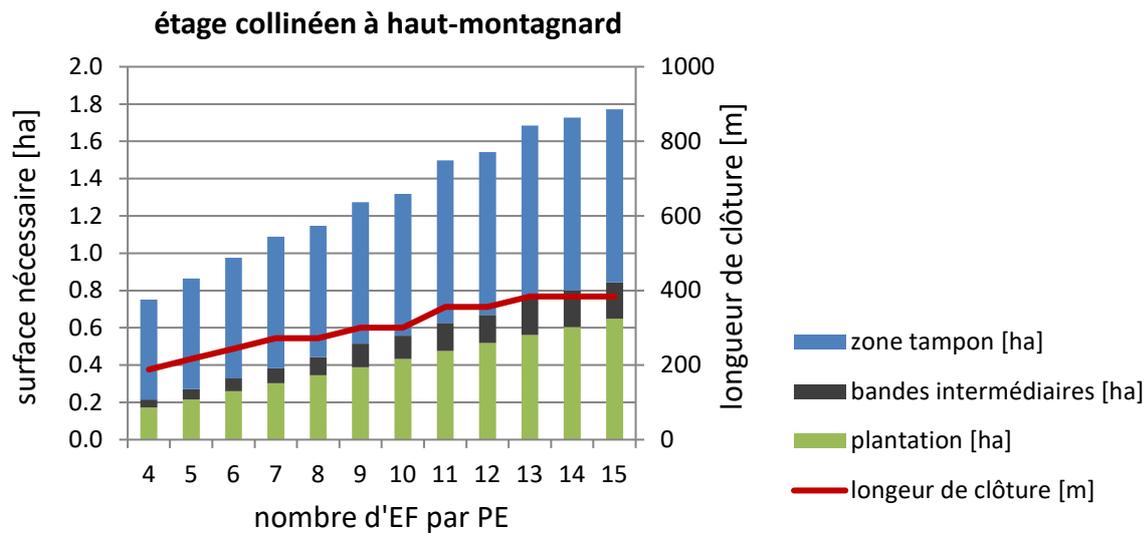


Figure 4. Surface nécessaire et longueur de clôture d'une PE par différents nombres d'EF à basse altitude (en haut) et haute altitude (en bas). Les surfaces nécessaires de plantation, des bandes intermédiaires entre les EF et de la zone tampon au bord de la placette sont indiquées séparément.

3.5 Autres aspects de l'expérimentation

Forêt pionnière

Par forêt pionnière, on entend des arbres à croissance rapide d'une autre essence (par exemple *Betula pendula* ou *Alnus incana*), qui fournissent de l'ombre aux EF testées, au cours des premières années suivant la plantation, et créent donc des conditions de croissance favorables. La forêt pionnière est supprimée au terme de quelques années avant de concurrencer fortement les EF testées. Dans le cadre du projet de PE, nous renonçons à une forêt pionnière, car celle-ci ne serait utile qu'à quelques EF (par exemple *Abies alba*). Mais un emploi sélectif uniquement pour quelques EF aurait pour conséquence que les EF seraient différemment traitées et donc ne seraient plus comparables.

Régénération naturelle

La régénération naturelle n'est pas intégrée par principe dans l'expérimentation. Toutefois il est possible d'observer la régénération naturelle sur une partie de la zone tampon ou dans des parcelles réservées à cet effet au sein de la surface plantée et donc de visualiser le potentiel de croissance des EF et PV locales.

Interventions culturelles

Il faut considérer qu'à terme de 10 à 15 ans, des interventions culturelles soient nécessaires pour réduire la concurrence entre les arbres plantés. Il est important à cet effet que ces interventions soient réalisées sur toutes les placettes selon les mêmes règles, afin que les PE restent comparables après celles-ci. La décision de savoir si les interventions doivent être effectuées selon des critères statistiques ou forestiers n'a pas été encore prise. Elle se répercutera sur la pertinence de l'expérimentation. En cas d'interventions aléatoires selon des critères expérimentaux, nous garantissons que les arbres restants correspondront aussi après les soins à un échantillon aléatoire de la population totale. En cas d'interventions selon des critères forestiers au contraire, la sélection se fera en fonction de la vitalité. Ainsi les arbres restants correspondront à un échantillon aléatoire des individus les plus vigoureux.

3.6 Évaluation de l'expérimentation

Pour l'évaluation statistique de l'expérimentation, il est prévu d'utiliser des approches de modélisation mixtes (« mixed effect models ») similaires à des modèles de régression (Bates *et al.* 2015). Elles ont pour but de modéliser les relations entre des variables dépendantes (croissance, mortalité) et une ou plusieurs variables indépendantes (variables environnementales). Pour une analyse statistique pertinente, les différences de conditions environnementales entre PE devraient être les plus grandes possible, et à l'inverse les plus faibles possible au sein d'une PE.

4 Bilan et perspectives

Selon nos connaissances, il s'agit de la plus grande expérimentation sur la croissance de la forêt qui n'ait jamais été menée en Suisse. Pour ce faire, nous avons accordé une grande valeur à l'élaboration d'un design expérimental pertinent. Le design expérimental des PE à design fixe a été élaboré au cours d'un processus comprenant plusieurs étapes, depuis l'information des représentant-e-s des cantons jusqu'au contrôle par des statisticiens externes, en passant par la conception du design et des consultations avec les chercheurs. Il s'agissait ici d'un processus d'optimisation avec compromis: alors que le nombre de blocs a été réduit à 3, le nombre de PE nécessaires par EF a été augmenté, pour obtenir des résultats statistiques pertinents. Ceci se répercute sur la taille et le nombre de placettes nécessaires. Au total 50 à 60 PE sont nécessaires, qui auront à basse altitude une taille de 1,15 à 1,54 ha (pour 8 à 12 EF). Mais des PE plus grandes et plus petites sont également possibles.

Avec les adaptations du catalogue d'essences, nous avons trouvé le moyen d'intégrer au total 18 EF dans l'expérimentation. Ainsi nombre d'EF passant pour avoir un potentiel d'avenir dans les forêts suisses dans le cadre du changement climatique sont représentées dans les PE prévues. Pour les EF du catalogue principal, il est possible d'obtenir des affirmations et des comparaisons fiables sur de larges gradients environnementaux, alors que la signifiante et la comparabilité seront moindres pour les EF du catalogue complémentaire, qui seront plantées sur un nombre plus restreint de PE. L'augmentation du nombre d'EF de 4 à l'origine à 7 permet en outre de mieux couvrir la variabilité entre provenances des EF testées.

Le grand avantage de ce projet réside dans sa démarche coordonnée. Alors qu'une PE isolée ne permettrait que de se prononcer sur la croissance des arbres plantés sur cette placette, un réseau de 50 à 60 PE permet de déterminer comment les EF testées prospèrent à long terme sous différentes conditions climatiques. L'expérimentation sur le long terme permettra en outre de mieux comprendre les effets des intempéries et événements extrêmes sur les EF et PV testées.

L'étape suivante dans l'élaboration du design expérimental est l'attribution des EF sur les placettes inscrites par les cantons auprès du WSL. Il y a lieu de garantir que le gradient environnemental à tester pour chaque EF soit le mieux couvert possible. En outre le WSL recherchera les PV adaptées et coordonnera l'approvisionnement en semences et plants pour les PE à design fixe avec les pépinières. Après une phase de culture de 2 à 4 ans pour chaque EF, les plants seront plantés dans chaque PE. Il est prévu de créer les PE sur les années 2020 à 2022.

5 Bibliographie

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M. & Walker, S. C. (2015) Fitting linear mixed effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67:1-48.
- Binkley, D. (2008) Three key points in the design of forest experiments. *Forest Ecology and Management* 255: 2022–2023.
- König, A. O. (2005) Provenance research: evaluating the spatial pattern of genetic variation. In: Geburek T. & Turok J. [Eds.] *Conservation and Management of Forest Genetic Resources in Europe*, Abora Publishers, Zvolen 693 p.
- Meyer, C.-D. & Brocklehorst, S. (2018) Power calculations for the planned WSL research infrastructure testing tree species adapted to future climates. *Final Report Experimental Design Evaluation*. Biomathematics and Statistics Scotland (BioSS), The James Hutton Institute, Aberdeen.
- Pluess, A. R., Augustin, S. & Brang, P. (2016). Messages et recommandations concernant la forêt dans le contexte des changements climatiques. *Forêts et changements climatiques. Éléments pour des stratégies d'adaptation*. (Réd. A.R. Pluess, S. Augustin & P. Brang) pp. 427-444. B Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne, & Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf.
- Quinn, G. P. & Keough, M. J. (2002) *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge, Cambridge University Press, 527 p.
- Skovsgaard, J. P., O'Connor, E., Graversgaard, H. C., Hochbichler, E., Mohni, C., Nicolescu, N., Niemistö, P., Pelleri, F., Spiecker, H., Stefancik, I. & Övergaard, R. (2006) Procedures for forest experiments and demonstration plots. *Scientific report from a COST E42 meeting in Denmark 28-30 Nov. 2006*.
- Underwood, A. J. (1997) *Experiments in ecology: Their logical design and interpretation using analysis of variance*. Cambridge University Press, Cambridge, 504 p.

Annexe: Catalogue des essences pour les plantations expérimentales à design fixe

Tableau 2. Catalogue définitif d'essences pour les PE à design fixe. Les EF du catalogue principal seront testées dans au moins 35 PE. Les EF du catalogue complémentaire seront testées seulement dans un nombre restreint de 15 PE environ. Source: Rapport « Choix des essences pour les plantations expérimentales ».

Catalogue principal de 9 EF	Catalogue complémentaire de 9 EF
<i>Abies alba</i> (sapin blanc)	<i>Acer opalus</i> (érable à feuilles d'obier)
<i>Acer pseudoplatanus</i> (érable sycomore)	<i>Acer platanoides</i> (érable plane)
<i>Fagus sylvatica</i> (hêtre)	<i>Cedrus atlantica</i> (cèdre de l'Atlas)
<i>Larix decidua</i> (mélèze européen)	<i>Corylus colurna</i> (noisetier de Byzance)
<i>Picea abies</i> (épicéa)	<i>Juglans regia</i> (noyer royal)
<i>Pinus sylvestris</i> (pin sylvestre)	<i>Prunus avium</i> (merisier)
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (douglas)	<i>Quercus cerris</i> (chêne chevelu)
<i>Quercus petraea</i> (chêne sessile)	<i>Quercus robur</i> (chêne pédonculé)
<i>Tilia cordata</i> (tilleul à petites feuilles)	<i>Sorbus torminalis</i> (alisier torminal)