

1. Nous avons vu, dans la première partie, les objectifs et le contexte de la formation théorique, ainsi que la préparation de la répartition spatiale des sondages de sol à réaliser sur le terrain, dans la seconde partie, comment réaliser et décrire des sondages de sol sur le terrain, dans les parties 3 à 5 comment réaliser des diagnostics de sensibilité des sols à l'export des menus bois, au tassement et à l'érosion. La 6^{ème} partie, que nous allons aborder maintenant, explique comment réaliser un diagnostic de sensibilité aux sécheresses et comment adapter nos choix d'essences aux caractéristiques du sol.
2. Bienvenue dans la sixième partie de cette formation théorique. Elle comprend 3 sous-parties. La première sous-partie détaillera les critères du sol déterminant le choix des essences à favoriser ou à implanter. La deuxième présentera le diagnostic de sensibilité aux sécheresses et comment le réaliser. Enfin la dernière sous-partie expliquera comment interpréter les résultats de ce diagnostic.
3. Cette première sous-partie explique comment choisir, à partir d'une description de sol, les essences les mieux adaptées aux conditions locales.
4. Chaque espèce végétale a des besoins spécifiques en eau, en air, en éléments minéraux et en chaleur que lui fournit son milieu de vie. Ces besoins sont complexes à mesurer. Afin de rendre accessibles aux forestiers les critères nécessaires au choix des essences, sans mettre en place un suivi intensif, le concept de station forestière s'est développé depuis les années 70. La station forestière est une zone homogène en ce qui concerne les besoins des arbres, que l'on qualifie à partir d'un climat, qui était supposé constant sur l'emprise géographique du catalogue de station, d'un type de sol et d'un type de relief. Les propriétés de la station indiquent les fonctions remplies par la station vis-à-vis des besoins des arbres, comme par exemple la disponibilité en éléments nutritifs et en eau. Il s'agit d'un diagnostic pour choisir les essences adaptées au sol et au climat local qui a été plus ou moins utilisé selon les régions et qui doit être revu pour intégrer les changements climatiques.
5. Nous allons rapidement vous présenter l'approche classique de cartographie des conditions écologiques via les typologies et cartographies de stations. Nous ne détaillerons pas cette approche car elle n'est pas harmonisée entre zones géographiques. D'une part, la couverture des zones boisées françaises n'est pas complète, même si elle est conséquente comme nous le montre cette carte. D'autre part, le climat n'est pris en compte que de manière implicite pour toutes les typologies.
6. Chaque typologie de station est construite sur une zone relativement homogène qui correspond à l'emprise de la typologie. Ici, vous avez la typologie des plateaux calcaires de Lorraine. Des relevés de sol et de végétation réalisés sur l'ensemble de la zone sont répartis en différents groupes selon les principes suivants :

- au sein de chaque groupe, les contraintes et potentialités forestières sont similaires
- les contraintes et potentialités forestières sont très différentes entre groupes

Un groupe de relevés correspond alors à une station pour laquelle on réalise ensuite un relevé type plus complet sur fosse pour bien caractériser les propriétés de la station et les choix sylvicoles qui en découlent. Une clé de détermination des stations est construite. Quelques critères simples de topographie, sol et végétation permettent de cartographier finement les potentialités forestières avec un investissement en temps limité. Si les principales contraintes sur la zone étudiée sont d'ordre hydrique comme la typologie des plateaux calcaires de Lorraine, les préconisations sylvicoles par station peuvent assez facilement être adaptées pour prendre en compte les changements climatiques tout en gardant la même clé de détermination sur le terrain. En revanche, si les principales contraintes sur la zone étudiée sont d'ordre chimique et non pas hydrique, comme par exemple les typologies des Vosges, la typologie ne permet pas de choisir les essences adaptées en climat changeant. Les contraintes hydriques seront de plus en plus prégnantes, il est donc essentiel d'adapter les choix sylvicoles préconisés par ces typologies. Cependant, il s'agit d'un travail conséquent qui n'a, pour l'instant, été entrepris que dans quelques régions. Dans la suite de cette partie, nous allons vous proposer une approche basée sur les critères sol, qui est valable même en l'absence de typologie de stations forestières dans la zone d'étude.

7. Nous allons tout d'abord détailler les critères déterminant le choix des essences qui ne varieront pas en climat futur à l'échelle de temps qui intéresse les forestiers. Ces critères doivent servir de filtre "oui-non" avant ou après avoir réalisé le diagnostic de sensibilité aux sécheresses que nous verrons dans la 2^{ème} sous-partie. Par exemple, si l'essence n'est pas sensible à l'intensité des sécheresses observées sur la parcelle étudiée mais qu'elle ne supporte pas la compacité d'un des horizons du sol, elle ne sera pas à sa place et pourrait dépérir ou subir la concurrence d'autres essences plus adaptées. Le premier critère que nous allons présenter est la classe de texture et la compacité de certains horizons de sol qui peuvent représenter une contrainte pour certaines essences. Un certain nombre d'ouvrages et d'outils comme ClimEssences et BioClimSol recensent l'état des connaissances sur le degré de tolérance des essences forestières pour chaque critère sol. Ils sont listés dans les références pour aller plus loin de la formation IPRSol. Dans la majorité des cas, les connaissances disponibles sur la réponse des essences aux critères sol sont basées sur du dire d'experts et peuvent être contradictoires selon les sources. Pour le critère compacité et classe de texture, l'outil "Fichier écologique des essences" est utilisé à titre d'exemple. Pour les sols comportant un horizon compact ou un horizon de classe de texture Agrile lourde, il est possible de choisir du chêne sessile et il est très fortement déconseillé de choisir du cèdre de l'atlas.
8. Concernant l'engorgement temporaire, nous allons illustrer l'utilisation des critères sol pour le choix des essences avec l'outil ClimEssences. Selon cet outil, le sapin pectiné et le cèdre de l'atlas ne tolèrent pas l'engorgement temporaire et le chêne sessile le tolère moyennement. Nous le voyons grâce aux notes en couleur allant de D pour les essences ne tolérant pas l'engorgement jusqu'à A pour les essences

tolérant très bien l'engorgement temporaire. Pour certaines essences et certains critères sol, la note peut être 1 pour inconnu, car il s'agit d'un cas non étudié à ce jour. ClimEssences donne également une indication de fiabilité sur 3 points. Si un seul point est grisé sur les trois, les informations sont rares, même si elles sont de qualité. Si les informations sont contradictoires, la fiabilité sera également considérée comme faible. Si deux points sont grisés sur les trois, les informations sont suffisamment nombreuses et non contradictoires. Si trois points sont grisés sur les trois, les informations sont très abondantes, sérieuses et se recoupent. La capacité des essences à supporter un sol saturé en eau à proximité de la surface pendant une partie de la saison de végétation est mal connue pour plusieurs raisons. Nous ne savons pas exactement quantifier la fréquence et la durée d'asphyxie sans mettre en place un suivi assez lourd et la réponse des essences est donnée en degré de tolérance sans distinguer la profondeur d'apparition et l'intensité de l'asphyxie. De plus, l'engorgement temporaire des sols pourrait varier en climat futur mais nous ne savons pas prédire cette évolution. A priori, nous devrions dans le futur être confrontés à une accentuation de la double contrainte: "trop sec en été" et "trop humide en hiver". A partir des bases de connaissances actuelles, nous allons quand même essayer de vous donner des pistes pour quantifier l'intensité de l'engorgement à partir des diagnostics de terrain.

9. Pour quantifier l'intensité de l'engorgement à partir des diagnostics de terrain, nous nous basons sur les traces d'hydromorphie. L'hydromorphie est liée au confinement d'un sol engorgé en eau provoqué par un faible drainage interne ou par la présence d'un niveau imperméable sous-jacent et/ou à une position de réceptacle topographique. Quand le sol se sature en eau, l'air de la porosité du sol est progressivement remplacé par l'eau, or la diffusion de l'oxygène devient 10 000 fois plus lente en milieu saturé en eau par rapport à un sol bien drainé. La respiration aérobie épuise assez rapidement, en quelques heures à quelques jours, l'oxygène présent dans le sol. Cela conduit à une période d'hypoxie puis d'anoxie, c'est-à-dire d'insuffisance puis d'absence d'oxygène. La respiration devient alors anaérobie c'est-à-dire que l'accepteur d'électron n'est plus l'oxygène mais d'autres oxydants. Si on suit un gradient décroissant d'oxygène dans le sol, l'accepteur d'électron devient successivement le nitrate NO_3^- , puis le manganèse Mn^{4+} puis le fer Fe^{3+} puis le soufre SO_4^{2-} et enfin le dioxyde de carbone, CO_2 .
10. Ainsi, lors des périodes d'engorgement du sol, après les nitrates et le manganèse, le fer est réduit sous forme de cations Fe^{2+} de couleur bleu vert. Une partie du fer à l'état réduit est solubilisée dans la nappe et devient mobile. Le fer peut alors migrer dans le sol sous l'influence de la circulation de la nappe, ce qui conduit à un appauvrissement localisé marqué par une couleur gris à blanc. Lorsque l'eau de la nappe disparaît, elle est progressivement remplacée par de l'air, plus riche en oxygène. Alors le fer se réoxyde, redevient insoluble et s'accumule localement dans le sol en prenant une couleur ocre à rouille. Les mêmes dynamiques sont observées pour le manganèse, la forme réduite en présence de la nappe est mobile, le manganèse migre. Lorsque l'eau de la nappe disparaît, le manganèse se ré-oxyde, en prenant une couleur noire. Les processus d'oxydo-réduction du fer et du manganèse laissent ainsi des traces visibles dans le sol, appelées traces d'hydromorphie, qui sont une conséquence de l'engorgement temporaire des sols. Ces traces d'hydromorphie

peuvent prendre la forme de tâches ou de petits nodules appelés concrétions de couleurs ocre ou noire, mais aussi la forme de décolorations, c'est-à-dire de tâches plus claires que la couleur de la matrice. A noter que la réduction du fer dépend du pH du sol, plus le pH est élevé plus la teneur en oxygène devra être faible pour que le fer passe à l'état réduit. Ainsi sur les sols neutres à carbonatés, il est plus rare d'observer des traces d'hydromorphie.

11. Relier l'hydromorphie des sols à la durée de présence d'une nappe asphyxiante dans le sol nécessite des études par type de sol et de climat. Dans le cas de la forêt domaniale de Chaux située à proximité de Dôle dans le Jura, une étude a permis d'établir une telle relation. Dans ce massif, la présence de plus de 30% de tâches, photo de gauche, principalement ocre et noire, correspond à une durée cumulée annuelle d'engorgement de 2 à 4 mois. Un recouvrement du sol de 100 % de tâches ocre et blanchies, photo du centre, indique une durée d'engorgement cumulée annuelle comprise entre 5 et 7 mois. Un recouvrement de 100 % de tâches avec une dominance de tâches blanchies est liée à une durée d'engorgement supérieure à 8 mois. Ces durées ne s'appliquent pas aux sols alluviaux à forte perméabilité, qui sont souvent caillouteux et à texture grossière, et où les tâches sont peu abondantes malgré des durées d'engorgement longues. De même, ces durées ne s'appliquent pas à d'autres types de climat et de sol.
12. Les sols à nappe temporaire engendrent deux contraintes successives pour les essences forestières. Durant les périodes hivernale et printanière, les arbres sont confrontés à l'hypoxie qui a pour conséquence immédiate une diminution de la croissance racinaire, de l'absorption et de l'alimentation minérale des arbres, notamment la nutrition azotée. Puis, durant la période estivale, les arbres doivent faire face à un déficit hydrique, qui n'est pas spécifique de ces sols mais s'y trouve exacerbé. En effet, d'une part, l'hypoxie augmente la mortalité des racines fines et impose leur renouvellement accéléré et, d'autre part, les propriétés physiques de l'horizon plancher limitent l'enracinement en profondeur. En particulier, lorsque le plancher de la nappe constitue une discontinuité physique importante, il limite fortement la colonisation par les racines fines de certaines essences. Sur ces sols, il est essentiel de choisir une essence tolérant l'engorgement temporaire sinon l'arbre ne s'enracinera pas dans les horizons hydromorphes, son réservoir en eau utilisable et sa stabilité seront alors très fortement réduits.
13. Concernant la tolérance au calcaire, le sapin pectiné et le cèdre de l'atlas tolèrent mieux la présence de carbonates dans la terre fine à proximité de la surface, notamment avant 40 cm de profondeur, que le chêne sessile. Pour rappel, la présence de carbonates dans la terre fine est diagnostiquée grâce à l'effervescence de la terre fine à l'acide chlorhydrique. Traduire la note de tolérance en profondeur exacte d'apparition de l'effervescence est impossible en l'état actuel des connaissances. De plus, il existe des phénomènes de compensation, par exemple une pluviométrie élevée et bien répartie dans l'année permet de diluer la solution du sol. Les essences ne tolérant pas la présence de carbonates ou l'excès de calcium pourront les tolérer si la solution du sol est diluée une grande partie de l'année. Concernant la tolérance à l'acidité, le chêne sessile donnera de meilleurs résultats sur sols acides que le cèdre de l'atlas ou le sapin pectiné qui tolèrent toutefois assez bien

l'acidité. La forme d'humus est un bon indicateur de l'acidité du sol, l'indicateur de sensibilité à l'export des menus bois que nous avons vu dans la partie 3 peut être utilisé ici. Par exemple, les sols de faible sensibilité à l'export des menus bois, donc plutôt riches "chimiquement", peuvent accueillir des essences ne tolérant pas l'acidité.

14. L'acidité du sol peut être diagnostiquée grâce à un pHmètre de terrain ou un relevé floristique. Attention, ces deux techniques donnent des résultats avec une erreur de l'ordre de 1 unité pH. L'outil d'aide à la décision BioClimSol prévoit une mesure du pH parmi les paramètres à relever pour faire un diagnostic. Cette mesure est réalisée au moyen d'un pHmètre électronique sur un échantillon de terre prélevé à 20 cm de profondeur, soit sur le terrain, soit a posteriori. Cette mesure est particulièrement intéressante sur les parcelles en renouvellement, où il est difficile de déterminer la forme d'humus. L'estimation du pH via un relevé floristique peut également être utilisée.
15. Vous pouvez maintenant visionner la vidéo 15 sur les sols engorgés.