



Projet COCABIO

Comparaison et complétude de données autécologiques entre Caravane et BioClimSol

Date de publication : 15/02/2024

Version de travail du document : 1.6

Relecteurs : Éric Paillassa / Brigitte Musch / Benjamin Canot



Sommaire

1. Contexte de la mission :	4
2. Présentation du fonctionnement de BioClimSol et ClimEssences	5
2.1. BioClimSol : Anticiper le déprérissement à l'échelle parcellaire	5
2.2. ClimEssences (Caravane) : Informer vers l'adaptation future des espèces	6
3. Identification des informations à comparer	8
3.1. Espèces communes	8
3.2. Critères de comparaison retenus	9
3.2.1 Variables climatiques	10
3.2.2 Variables pédologiques	11
4. Méthodologie	12
4.1. Présentation de la méthode de comparaison	12
4.2. Mise en œuvre	13
4.2.1 Table de vérité	13
4.2.2 Guide de notation	14
4.2.3 Confrontation des informations entre Caravane et BioClimSol	15
5. Résultats et discussion	18
5.1. Présentation des résultats	18
5.2. Construction des fiches synthèses	20
5.3. Discussion	21
5.3.1 Cas particuliers liés à des raisons techniques	21
5.3.2 Limites imposé par la nature de conception de chaque outil	22
6. Bibliographie	23
7. Liste des annexes	23

Liste des tableaux

Tableau 1 : Variables climatiques BioClimSol.....	5
Tableau 2 : Variables pédologiques BioClimSol.....	6
Tableau 3 : Espèces communes aux deux outils	9
Tableau 4 : Correspondances entre les critères de ClimEssences et Bioclimsol.....	10
Tableau 5 : Table de vérité sur les notations du critère 2.3 « tolérance à l'acidité »	13
Tableau 6 : Guide de notation pour le critère de pH établi à partir des occurrences entre les deux systèmes de notation	14
Tableau 7 : extrait des informations de ClimEssences pour <i>Abies cilicica</i> et <i>Abies cephalonica</i>	15
Tableau 8 : répartition des corrections entre les deux outils	18
Tableau 9 : répartition des corrections entre les deux outils	19

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de présentation d'un critère (Capture d'écran de la base d'information Caravane au 24/01/2024)	7
Figure 2 : Exemple de fiche synthèse essence COCABIO	20

1. Contexte de la mission :

La nécessité d'adapter les forêts et la gestion forestière aux changements climatiques est désormais largement reconnue par les professionnels de la filière forestière. L'une des options d'adaptation la plus fréquemment envisagée est le choix d'essences objectif adaptées à l'évolution du climat.

Afin d'éclairer ce choix, plusieurs outils d'aide à la décision ont été développés ces dernières années. C'est notamment le cas de :

- **ClimEssences (ONF-CNPF)** : Le projet Caravane développé par le RMT AFORCE en 2015 est regroupé par la suite au sein de l'outil ClimEssences avec les projets IKSMAP 1 et 2. Ce projet permet la création d'une base de données regroupant de façon synthétique les connaissances sur 156 espèces endémiques et exotiques à la France métropolitaine. Ces connaissances sont proposées au travers de 37 critères (cf §3.3.2) pour lesquels un système de notation est proposé. L'outil permet de comparer l'autécologie des espèces, et ainsi d'aider au choix d'espèces futurs selon des contraintes climatiques, biotiques et sylvicoles rencontrées.
- **BioClimSol (CNPF-IDF)** : Cet outil a été conçu pour permettre aux gestionnaires forestiers de mieux appréhender le risque de dépérissement des peuplements forestiers présents sur leurs parcelles, pour 13 essences possible, dans un contexte de dérèglement climatique. BioClimSol offre une double approche : d'une part, il évalue les probabilités de dépérissement des peuplements existants diagnostiqués ; d'autre part, il utilise des modèles de niches pour proposer d'autres essences alternatives (actuellement 34) selon leur compatibilité climatique, pédologique et topographique.

ClimEssences et BioClimSol incluent tous deux des informations autécologiques et 44 espèces sont communes aux deux outils. Ces informations autécologique sont proposées aux utilisateurs, soit sous la forme de fiche espèces pour Caravane, soit au travers des paramétrages des solutions de boisement proposées par l'outil BioClimSol.

Ayant été développés indépendamment l'un de l'autre, les deux outils n'ont jamais été soumis à une vérification visant à évaluer la cohérence des informations autécologiques qu'ils proposent. Le projet COCABIO a donc pour objectifs de remédier à cela, en identifiant les informations autécologiques non cohérentes entre ces deux outils, en approfondissant la bibliographie et les avis d'experts pour fiabiliser l'information des espèces identifiées et en proposant des solutions de mise en cohérence.

La présentation de ce travail s'articule comme suit dans ce rapport : La première partie propose une synthèse du fonctionnement, ainsi que des spécificités techniques des deux outils. L'objectif principal est de fournir une compréhension concise de l'utilisation et de l'organisation des données autécologiques dans chacun des deux outils. Ensuite, après un rappel des attentes techniques liées à cette comparaison, la méthodologie de travail est exposée à travers un cas d'exemple concret. Enfin, le document final, regroupant l'ensemble des corrections proposées par le travail de COCABIO, est présenté avec la synthèse des résultats concluant cette étude.

2. Présentation du fonctionnement de BioClimSol et ClimEssences

2.1. BioClimSol : Anticiper le dépérissement à l'échelle parcellaire

BioClimSol utilise un modèle phénoménologique, axé sur la compréhension du dépérissement des espèces forestières. Son approche cherche à être holistique, considérant non seulement les facteurs climatiques, mais également pédologiques, topographiques et biotiques. En intégrant ces données, BioClimSol est en capacité d'évaluer l'adaptation autécologique d'une espèce, mais surtout d'identifier les facteurs explicatifs locaux, d'origines biotiques ou abiotiques, pouvant contribuer au phénomène de dépérissement. Son fonctionnement se veut local, à l'échelle de la parcelle forestière, et nécessite qu'un opérateur soit présent sur le terrain afin de renseigner les valeurs d'un certain nombre de paramètres (J. Lemaire, 2021).

ATTENTION : BioClimSol, n'est pas un modèle physiologique (ou mécaniste) simulant le risque de dépérissement à l'échelle de l'arbre en fonction d'une variable d'état comme son statut hydrique par exemple.

L'outil fonctionne selon deux types de modèles :

- Les modèles **IBS** (Indice BioClimSol) concernant 14 essences ayant fait l'objet d'études de dépérissement. Ce type de modèle calcule un indice de vigilance, basé sur la probabilité d'observer du dépérissement au regard de tous les facteurs explicatifs identifiés à l'échelle de la parcelle (J. Lemaire, M. Venetier, 2022).
- Les modèles **INB** (INB – indice de niche biologique). Ce type de modèle calcule pour une espèce, la probabilité que celle-ci soit en moyenne dans des conditions écologiques adaptées à sa présence potentielle.

Dans ces démarches de modélisation, l'autécologie climatique des espèces est étudiée à partir de 8 variables extraites des données de CHELSA, qui délimitent leur distribution mondiale au 90^{ème} percentile. Ces seuils sont ensuite utilisés pour être traduits en probabilités d'interception de la niche climatique, projetées sur la France à résolution de 50 m sur la base des valeurs du modèle NORCLIS (NORMales CLImatiques Spatialisées (Lemaire *et al*, 2022) INB.

Variables	Description	Résolution
PETP 0410	Déficit hydrique climatique* d'avril à octobre (mm)	50m
PETP 0509	Déficit hydrique climatique de mai à septembre (mm)	50m
PETP 0608	Déficit hydrique climatique de juin à août (mm)	50m
TMAN	Température moyenne annuelle (°C)	75m
TN01	Température minimale de janvier (°C)	75m
TN03	Température minimale de mars (°C)	75m
TX0608	Température maximale moyenne de juin à août (°C)	75m
TNABS	Température minimale absolue sous abri enregistrée sur la période 1981-2010 (°C)	75m

Tableau 1 : Variables climatiques BioClimSol.

Source : Référentiel technique BioClimSol

*Déficit hydrique climatique = Précipitation – évapotranspiration

L'expertise autécologique des modèles est complétée par des facteurs pédologiques (5 paramètres) et topographiques (1 paramètre) alimentée par un diagnostic de terrain réalisé par un opérateur (J. Lemaire, 2021). Les caractéristiques des essences sont paramétrées pour chacun de ces critères sur la base de 3 niveaux de sensibilité (facteur favorable, toléré, redhibitoire) et fondées sur des références bibliographies et enquêtes d'expertise.

Variables	Description
Compaction	Caractérisation simple entre sol meuble / compact
pH	pH pouvant varier entre 4 et 8
RUE150	Réserve utile sur 150 cm
Hydromorphie	Présence d'hydromorphie classe 3 ou 4
Effervescence	Présence de calcaire avant 50 cm
Sol lourd	Présence d'argile lourde avant 50 cm
Alimentation en eau	Evaluation visuelle des apports / pertes en eau, selon la topographie

Tableau 2 : Variables pédologiques BioClimSol.

Source : Référentiel technique BioClimSol

2.2. ClimEssences (Caravane) : Informer vers l'adaptation future des espèces

L'objectif principal de ClimEssences est d'informer, de façon objective et prospective, sur l'adaptation future des espèces aux climats à venir à l'échelle de la sylvoécorégion. Son fonctionnement repose sur deux approches synergiques :

- Une base d'information synthétique (**Caravane**) compilant, pour chaque espèce, les connaissances cumulées au fil du temps, issues de la bibliographie, d'expertises, d'observations, et d'expérimentations scientifiques sur le terrain.
- La modélisation des aires de compatibilité climatique des espèces par le modèle **IKS**.

Ce modèle IKS opère en tant que modèle sylvoclimatique, visant à modéliser les caractéristiques climats des essences selon trois indicateurs (déficit hydrique, température minimale, somme des degrés jours) correspondant chacun à des facteurs limitants la présence des espèces. La modélisation produite par IKS repose uniquement sur des critères climatiques, et n'intègre pas la dimension pédologique. L'analyse des informations en sortie du modèle est laissée au soin de l'opérateur qui peut les comparer aux références autécologiques proposées dans la base d'information Caravane.

Dans Cocabio, nous nous intéressons seulement aux données autécologiques de la base d'information Caravane. La comparaison de modèles comme IKS et BioClimSol, et d'autres est abordée dans un autre projet (Besic, N., Picard, N., 2023).

Comme évoqué ci-dessus, ClimEssences propose parallèlement à son modèle de compatibilité climatique IKS, un catalogue de 156 fiches espèces Caravane¹ pour lesquelles 37 critères compilent et synthétisent les connaissances actuelles sur leurs exigences et leurs comportements.

Ces critères sont répartis selon 8 axes : les facteurs limitants climatiques, les facteurs limitants édaphiques, la connaissance sur la diversité génétique, la croissance et la production de bois, les autres services écosystémiques, la mise en œuvre sylvicole, la vulnérabilité aux risques biotiques et aux risques abiotiques. Un axe est décrit par plusieurs critères et chaque critère fait l'objet d'une note allant de « A » pour excellent à « D » pour médiocre. Une note de fiabilité est attribuée pour qualifier cette note. Elle comporte 3 niveaux de fiabilité : faible, moyenne ou forte.

Abies alba L. - Sapin pectiné

Ajouter aux favoris

2 Facteurs limitants édaphiques

2.1 Tolérance à l'engorgement

Intolérant aux excès d'hydromorphie hivernaux.

Note **D** Fiabilité Terrain Expert Bibliographie : **7, 9, 14**

Figure 1 : Exemple de présentation d'un critère (Capture d'écran de la base d'information Caravane au 24/01/2024)

Les informations autécologique recherché pour la comparaison avec BioClimSol sont contenues dans les chapitres « facteurs limitants climatiques » et « facteurs limitants édaphiques ». Les autres chapitres ne seront pas utilisés pour l'étude. Le détail des critères inclue dans ces deux chapitres est présentés ci-dessous au paragraphe 3.2.

Important : Malgré la présence conjointe de Caravane et d'IKS au sein du même outil, les notations climatiques de Caravane n'ont pas été définies à partir des résultats de modélisation d'IKS. Seule une vérification de la cohérence entre les informations climatiques de Caravane et les seuils IKS a déjà été réalisée.

¹ Fiches espèces initiées dans le cadre du **projet NOMADE** et soutenues par le RMT AFORCE, permettant le recensement des informations disponibles sur des espèces autochtones et exotiques, potentiellement intéressantes pour la foresterie française.

3. Identification des informations à comparer

Comme évoqué en introduction du rapport, le développement indépendant des deux outils n'a pas permis d'assurer une cohérence des informations autécologique entre eux. En effet, pour une même espèce l'information peut différer pour plusieurs raisons : sources différentes (bibliographie, expert), information obtenue par des travaux de modélisation spécifique à l'un des deux outils, etc.

Le principal objectif de Cocabio est donc d'identifier et de proposer des ajustements d'information pour les espèces communes aux deux outils. Au-delà de cet objectif, plusieurs objectifs secondaires sont aussi attendus :

- Lever des inconnus (note I) dans Caravane dans le cas où BioClimSol propose une information autécologique et vice-versa.
- Dans la mesure du possible, réaliser un processus de transfert d'information entre les deux outils en instaurant une grille de lecture reliant les notes Caravane aux seuils de vigilance de BioClimSol.

Avant de détailler la méthodologie de comparaison adoptée pour cette étude, il est essentiel d'établir la liste des espèces communes qui feront l'objet de cette comparaison d'informations et d'identifier les correspondances entre les variables utilisées par les deux outils, sur lesquelles se concentrera l'analyse comparative.

3.1. Espèces communes

Initialement, 40 espèces communes à Caravane et Bioclimsol ont été identifiées.

Parmi les 34 espèces INB de BioClimSol, quatre d'entre elles ne sont pas encore dans ClimEssences :

- *Fagus orientalis* – Hêtre d'orient
- *Pyrus pyraster* – Poirier sauvage
- *Abies borisii-regis* – Sapin du roi Boris (hybride entre le sapin de Céphalonie et le sapin pectiné)
- *Liriodendron tulipifera* – Tulipier de Virginie

De plus, deux espèces présentent des différences de nomenclature, à savoir *Abies bornmuelleriana/equitrojani* et *Abies pinsapo/marocana*. Cette double dénomination provient de variations observées dans leurs aires naturelles de répartition. Le système de classification de Hillier, utilisé par ClimEssences, ne tient pas compte de cette distinction, regroupant ainsi les deux espèces sous les noms *d'Abies bornmuelleriana* (Sapin de Bornmuller) et *Abies pinsapo* (Sapin d'Espagne). Cela a pour conséquence de réduire le nombre d'espèces à comparer à 28 pour les espèces IBN.

Pour les 13 espèces IBS, seul *Fraxinus excelsior* (frêne commun) n'est pas commun aux deux outils soit un total de 12 espèces communes. Le tableau ci-dessous reprend la liste comparative des 40 espèces présente sur les deux outils.

INB			IBS	
<i>Sorbus torminalis</i>	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Abies cephalonica</i>		
<i>Betula pendula</i>	<i>Pinus nigra subsp. salzmanni</i>	<i>Abies cilicica</i>		
<i>Calocedrus decurrens</i>	<i>Pinus nigra var. corsicana</i>	<i>Abies nordmanniana</i>		
<i>Quercus cerris</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Juglans nigra</i>		
<i>Quercus ilex</i>	<i>Pinus nigra subsp. nigra</i>	<i>Pinus taeda</i>		
<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Pinus strobus</i>	<i>Tilia cordata</i>		
<i>Larix decidua</i>	<i>Malus sylvestris</i>	<i>Sequoia sempervirens</i>		
<i>Prunus avium</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Tilia platyphyllos</i>		
<i>Juglans regia</i>	<i>Abies numidica</i>	<i>Liriodendron Tulipifera</i>		
<i>Fagus orientalis</i>	<i>Pyrus pyraster</i>	<i>Abies borisii-regis</i>		
<i>Abies equitrojani</i>	<i>Abies marocana</i>	<i>Abies pinsapo</i>		
<i>Abies bornmuelleriana</i>				



Espèces ayant fait l'objet d'une nouvelle fiche

Espèces et sous espèces communes

Tableau 3 : Espèces communes aux deux outils

La réalisation de 5 nouvelles fiches Caravane* correspondants aux 5 espèces non communes initialement aux deux outils (4 INB & 1 IBS), a permis d'accroître la comparaison avec **un total de 44 espèces à comparer.**

**Fagus orientalis / Pyrus pyraster / Abies borisii-regis / Liriodendron Tulipifera / Fraxinus excelsior*

3.2. Critères de comparaison retenus

La comparaison autécologique souhaité nécessite d'identifier pour chaque critère de ClimEssences, une variable de BioClimSol permettant de décrire au mieux le critère en question. Dans le cas des critères pédologiques, le choix des variables est relativement simple étant donné qu'une seule variable est associée à chaque critère. A titre d'exemple, le critère « tolérance à l'acidité » ne peut être décrit que par la variable « pH » de BioClimSol.

A l'inverse, les critères climatiques font souvent référence à de multiples variables. Dans le cas du critère « tolérance à la sécheresse » de ClimEssences, de nombreuses variables s'y réfèrent dans BioClimSol comme le déficit hydrique climatique de juin à août, de mai à octobre (période de végétation) ou encore d'avril à septembre. Cette pluralité de variables BioClimSol pour un même critère ClimEssences contraint alors à faire des associations imparfaites puisque la précision de ces comparaisons dépend de la pertinence qu'a une variable retenue pour décrire le critère lui étant associé.

Le tableau ci-dessous présente les différentes variables BioClimSol retenues par critères ClimEssences pour la comparaison des deux outils. Les choix de ces associations sont détaillés à la suite de ce tableau.

Aussi, ClimEssences distingue pour certains critères des stades de croissance spécifique (juvénile/adulte). Ce niveau de précision n'est pas pris en compte dans la construction de l'information de BioClimSol, qui tient seulement compte des arbres au stade adulte. Les variables correspondant au stade juvénile ont donc été exclues de ce travail.

Critère ClimEssences		Variables Bioclimsol
Critères climatiques	1.1	Résistance juvénile aux fortes sécheresses
	1.2	Résistance adulte aux fortes sécheresses
	1.3	Adaptation aux climats déficitaires en eau
	1.4	Résistance aux fortes chaleurs (canicules)
	1.5	Résistance aux grands froids
	1.6	Résistance aux gels précoces
	1.7	Résistance aux gels tardifs
Critères pédologiques	2.1	Tolérance à l'engorgement
	2.2	Tolérance au calcaire
	2.3	Tolérance à l'acidité
	2.4	Tolérance aux sols lourds

Tableau 4 : Correspondances entre les critères de ClimEssences et Bioclimsol

3.2.1 Variables climatiques

⊕ 1.2 - Résistances au stade adulte aux sécheresses

Dans ClimEssences, cette résistance se réfère souvent aux épisodes français de mortalité d'adultes après des sécheresses emblématiques en France (1976, 1988-92, 2003, 2005...) ; à partir de la bibliographie et à dires d'experts pour les essences exotiques peu introduites.

BioClimSol possède deux variables susceptibles de pouvoir être comparées à ce critère, à savoir le déficit hydrique climatique de mai à septembre et le déficit hydrique climatique de juin à août. Après avoir testé ces deux variables avec la méthode présentée au paragraphe suivant, le déficit hydrique de juin à août a été jugé le plus pertinent pour être comparé à ce critère. La comparaison de ces deux variables est disponible en annexe 1.

⊕ 1.4 - Résistance aux fortes chaleurs

Ce critère composite dans ClimEssences désigne à la fois la capacité du feuillage à éviter le dessèchement ainsi que celle de l'écorce à résister aux coups de soleil. Bien que ce facteur soit aussi dépendant des conditions microclimatiques et de l'environnement local, son estimation est évaluée au travers de la sensibilité globale des espèces à la chaleur.

La variable de BioClimSol qui s'approche le plus de cette notion est le seuil de tolérance aux températures maximales de juin à août.

⊕ 1.5 - Résistance aux grands froids

ClimEssences définit ce critère comme étant la capacité d'une espèce à éviter les mortalités à l'âge adulte lors de froids hivernaux intenses de plusieurs jours. Ce critère est exprimé selon les quatre classes suivantes : A=< -25 °C ; B=-15 °C à -25 °C ; C=-5 °C à -15 °C ; D=< -5 °C

L'équivalence de cette variable dans BioClimSol est la **température minimale absolue sous abris**. Compte tenu de l'indisponibilité de cette variable dans les modèles climatiques mondiaux, il s'agit de la seule variable climatique renseignée à partir d'informations bibliographiques uniquement.

3.2.2 Variables pédologiques

2.1 - Tolérance à l'engorgement

L'outil BioClimSol traduit le degré d'hydromorphie selon les classes établies dans le référentiel pédologique de 2008 de l'AFES². Une distinction est faite entre l'hydromorphie de classe 3 et 4.

- Classe 3 - Matrice partiellement décolorée avec des tâches de réduction grises ou tâches de rouille abondantes entre 10 et 40%.
 - Conditions d'engorgement moins sévères que dans la classe 4, il y a encore une influence notable des processus de réduction ;
- Classe 4 - Gley à couleur homogène bleuâtre à verdâtre, voire blanche à grise, éventuellement avec quelques tâches de réoxydation. Tâches de réduction grises ou tâches de rouille abondantes >= 90%.
 - Conditions d'engorgement sévères, avec une saturation en eau prolongée.

Pour l'outil ClimEssences, la tolérance à l'engorgement d'un arbre est définie comme « la capacité à supporter un sol saturé en eau à proximité de la surface pendant une partie de la saison de végétation ». Le critère ne distingue pas directement dans sa notation le type d'hydromorphie (temporaire ou permanente), mais des informations à ce sujet peuvent être données (texte de synthèse sur le critère) au cas par cas dans les fiches d'espèces tolérant spécifiquement l'hydromorphie temporaire ou permanente.

Afin de pouvoir comparer le plus justement possible cette variable avec le critère de ClimEssences, les deux classes d'hydromorphie de BioClimSol vont être comparées par la méthode présenté au paragraphe suivant. Si le niveau de tolérance ne coïncide pas pour la classe 3, une seconde comparaison avec la classe 4 sera alors réalisée.

2.2 - Tolérance au calcaire

BioClimSol traduit la capacité d'un arbre à supporter le calcaire avant 50 cm de profondeur (profondeur théorique de l'évaluation pédologique réalisé par un opérateur sur une parcelle).

Pour ClimEssences, celle-ci correspond à la capacité à supporter le calcaire actif à proximité de la surface, soit avant 40 cm de profondeur.

2.3 - Tolérance à l'acidité

Les seuils utilisés par BioClimSol correspondent à une échelle de pH avec des classes 0.5 unité comprise entre 3 et plus de 6. Dans ClimEssences ce critère fait partie de ceux ayant des seuils de notes : A: excellente (pH 3,5-4,5); B: bonne (pH 4,5-5,5); C: moyenne (pH 5,5-6,5); D: médiocre (pH > 6,5).

² Association française pour l'étude des sols - <https://www.afes.fr/les-sols/referentiel-pedologique/>

2.4 - Tolérance au sol lourd

BioClimSol utilise comme indicateur la présence d'argile lourde avant 50 cm de profondeur.

Dans ClimEssences, le critère est traduit comme étant « la capacité de prospection racinaire en l'absence de microporosité ». Cette notion fait référence aux situations de texture lourde ayant une forte concentration de particules fines telles que l'argile.

4. Méthodologie

4.1. Présentation de la méthode de comparaison.

L'analyse nécessite de comparer deux variables qualitatives à savoir, 1) l'expression du niveau de vigilance de BioClimSol au travers de valeurs seuils, et 2) la note du critère de ClimEssences.

Pour ce faire, nous avons choisi d'entreprendre une analyse comparative deux à deux. Cette méthode a l'avantage d'être très simple et rapide dans sa mise en œuvre. Sa réalisation s'est effectuée en plusieurs étapes :

1. Sur le même principe que les « **tables de vérité** », utilisées par la méthode d'analyse qualitative comparée (QCA, pour ses initiales en anglais : Qualitative Comparative Analysis, B. Rihoux et G. De Meur, 2002). Nous avons entrepris d'établir pour chaque critère, une table répertoriant l'ensemble des profils de combinaisons notes / seuils obtenus sur les deux outils pour les 44 espèces, et pour chaque profil d'avoir le nombre d'occurrences effectives. L'objectif étant de repérer les incohérences de notation, et d'élaborer la liste des espèces correspondant à ces incohérences.
2. À partir de ces tables de vérité, un second type de table nommé « **guide de notation** » a pu être élaborée sur la base des récurrences d'associations de seuils et de notes observées pour chaque critère. Ces tables constituent un référentiel logique de notation qui pourra être utilisé afin de guider les ajustements des notes.
3. La vérification de l'ensemble des critères pour chaque espèce, avec une attention particulière sur les espèces ayant été identifiées comme ayant des notations divergentes dans la table de vérité.

4.2. Mise en œuvre

Afin d'illustrer cette méthode de comparaison, le critère de Tolérance à l'acidité (critère 2.3) est pris en exemple. Ce choix est justifié par le fait que ce critère possède de nombreuses classes et fait donc parti des critères illustrant au mieux les intérêts de la méthode. De plus, ce critère possède des seuils quantitatif de notation déjà définis pour les notes ClimEssences (cf §3.3.4) ce qui garantit une meilleure précision lors de sa comparaison.

4.2.1 Table de vérité

En suivant la méthode établie, la première étape de notre travail consiste à élaborer une table de vérité afin de pré-identifier d'éventuelles incohérences entre ClimEssences et BioClimSol.

La réalisation de cette table démontre une cohérence notable entre les deux outils. Malgré quelques inversions entre des notes successives. Les notes A correspondent bien aux seuils de vigilance les plus faibles, et les notes D aux seuils les plus élevés.

Tableau 5 : Table de vérité sur les notations du critère 2.3 « tolérance à l'acidité »

Code couleurs du niveau de vigilance : Vigilance maximale (2 rouge) / moyenne (1 jaune) / modérée (0 vert)

En jaune : occurrences jugées comme incohérentes

BioClimSol - Seuil de vigilance - pH							Note Caravane	occurrences
<3,5	3,5 à <4	4 à <4,5	4,5 à <5	5 à <5,5	5,5 à <6	>=6		
0	0	0	0	0	0	0	A	2
0	0	0	0	0	0	0	B	4
2	0	0	0	0	0	0	A	1
2	0	0	0	0	0	0	B	1
1	1	0	0	0	0	0	C	1
1	1	0	0	0	0	0	D	1
1	1	0	0	0	0	0	B	2
2	1	0	0	0	0	0	B	2
2	2	0	0	0	0	0	A	1
2	2	0	0	0	0	0	B	6
2	2	1	0	0	0	0	A	2
2	2	1	0	0	0	0	B	4
2	2	1	0	0	0	0	C	3
2	2	2	0	0	0	0	B	1
2	2	2	1	0	0	0	C	2
2	2	2	1	0	0	0	B	2
2	2	2	1	0	0	0	D	1
2	2	2	2	0	0	0	C	1

Seules deux incohérences sont détectées pour les notes C et D, associées à des niveaux de vigilance relativement faibles ($\text{pH} < 4$). La recherche des espèces associées à ces occurrences indique qu'il s'agit d'*Abies cephalonica* – Sapin de Céphalonie (note C) et *Abies cilicica* – Sapin de Cilicie (note D). La première hypothèse pour expliquer de ces incohérences serait une sous-évaluation de la sensibilité à l'acidité par BioClimSol, ou une surévaluation de la sensibilité à l'acidité par ClimEssences. Ces hypothèses seront vérifiées plus tard dans la méthode, lors de la comparaison des informations des deux outils, espèce par espèce.

4.2.2 Guide de notation

La seconde table élaborée par la méthode est le guide de notation. Pour rappel, sa fonction consiste à proposer, de la même manière qu'un abaque, une grille de lecture théorique entre les seuils de vigilance de BioClimSol et les notations de ClimEssences. Cette table pourra être utilisée, lors de la prochaine et dernière étape du travail de cette méthodologie consistant à comparer les informations autécologiques pour chaque espèce.

La construction du guide de notation est faite de façon logique, à partir des occurrences d'association « note » / « seuil de vigilance » observées dans la table de vérité. Dans le cas où le critère étudié posséderait déjà des seuils pour chaque note, comme dans notre cas d'exemple, ces seuils peuvent aussi être utilisés.

Seuil de vigilance de BioClimSol - pH									Note ClimEssences
<3,5	3,5 à < 4	4 à < 4,5	4,5 à < 5	5 à < 5,5	5,5 à < 6	6 à < 6,5	> 6,5		
0	0	0	0	0	0	0	0	A	
2	0	0	0	0	0	0	0	A	
2	1	0	0	0	0	0	0	A	
2	2	0	0	0	0	0	0	A	
2	2	1	0	0	0	0	0	B	
2	2	2	0	0	0	0	0	B	
2	2	2	1	0	0	0	0	B	
2	2	2	2	0	0	0	0	B	
2	2	2	2	1	0	0	0	C	
2	2	2	2	2	0	0	0	C	
2	2	2	2	2	1	0	0	C	
2	2	2	2	2	2	0	0	C	
2	2	2	2	2	2	1	0	D	
2	2	2	2	2	2	2	0	D	
2	2	2	2	2	2	2	1	D	
2	2	2	2	2	2	2	2	D	

Tableau 6 : Guide de notation pour le critère de pH établi à partir des occurrences entre les deux systèmes de notation

Rappel des seuils ClimEssences : A: excellente ($\text{pH } 3,5\text{--}4,5$); B: bonne ($\text{pH } 4,5\text{--}5,5$); C: moyenne ($\text{pH } 5,5\text{--}6,5$); D: médiocre ($\text{pH } > 6,5$).

4.2.3 Confrontation des informations entre Caravane et BioClimSol

Après avoir construit la table de vérité ainsi que le guide de notation, la dernière étape de la méthode consiste à comparer les informations pour chaque espèce. Cette comparaison est réalisée en confrontant les informations bibliographiques ayant servi à attribuer la note de ClimEssences, et le seuil de vigilance modélisé par BioClimSol. Les espèces indiquées comme potentiellement incohérentes lors de la réalisation de la table de vérité sont étudiées en priorité. Pour rappel, dans notre exemple il s'agissait d'*Abies cephalonica* et *Abies cilicica*.

Espèces	Note	Information complémentaire	Source bibliographique à l'appui
<i>Abies cephalonica</i>	C	Indifférent au pH	<ul style="list-style-type: none"> • The gymnosperm database - www.conifers.org • http://threatenedconifers.rbge.org.uk
<i>Abies cilicica</i>	D	Intolérant aux sols acides : pH optimum de 7.2 à 8.5.	<ul style="list-style-type: none"> • The gymnosperm database - www.conifers.org

Tableau 7 : extrait des informations de ClimEssences pour *Abies cilicica* et *Abies cephalonica*

Pour le cas d'*Abies cephalonica* :

Le seuil de vigilance donnée par BioClimSol correspond à des pH inférieurs à 4, ce qui concorde avec l'information de ClimEssences selon laquelle l'espèce est assez indifférente au pH. Cependant ces deux informations ne conviennent pas à la note C lui étant attribuée, et les sources bibliographiques à l'appui de cette information ne donnent aucune précision sur une éventuelle limite à cette tolérance. Des recherches complémentaires ont permis de trouver de nouvelles sources d'information qui confirment une préférence de l'espèce pour des pH basiques, mais ajoute aussi une limite de tolérance à l'acidité pour des pH inférieurs à 5.

- Fady, 1993. Caractéristiques écologiques et sylvicoles des sapins de Grèce dans leur aire naturelle et en plantation dans le Sud de la France. Perspectives pour le reboisement en région méditerranéenne. Revue forestière française, n°45, vol. 2, p. 119-133.
- Politi, Patrizia I., Margarita Arianoutsou, and George P. Stamou, 2009. Patterns of *Abies cephalonica* seedling recruitment in Mount Aenos National Park, Cephalonia, Greece. Forest ecology and management, 258.7,p1129-1136.
- Fornes N., Fady B. et Scotti-Saintagne C., 2021. Conseils d'utilisation d'*Abies cephalonica*. Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire.

A la lumière de ces nouvelles informations, les modifications suggérées seraient donc d'augmenter le niveau de vigilance à pH = 5 pour BioClimSol, et pour être cohérent vis-à-vis du guide de notation établi, de changer la note C en B pour ClimEssences.

Pour le cas d'*Abies cilicica* :

L'information « intolérance aux sols acides » est contradictoire avec le seuil de vigilance de BioClimSol n'intervenant qu'à partir des pH inférieurs à 4. La source d'information proposée par ClimEssences est jugée comme étant insuffisante pour confirmer l'intolérance de l'espèce aux sols acides. Des recherches complémentaires ont donc été réalisées.

- Efe, R. (2014). Ecological properties of vegetation formations on karst terrains in the Central Taurus mountains (Southern Turkey). *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 120, 673-679.
- Savill, P., Wilson, S. M., Mason, B., & Jinks, R. Silver Firs (*Abies spp*) of Europe and the Near East, *The royal forestry society*, January 2016, Vol 110 No.1.
- KELEŞ, H., Ahmet, K. A. R. A., YAĞAN, Ö., & DAĞDELEN, M., 2012. A New Distribution Area of the Taurus Fir (*Abies cilicica* Carr.) in Turkey. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 12(3), p.114-120.
- Sapin de Cilicie dans le parc du Glamis Castle, Kirriemuir, Écosse, Royaume-Uni [WWW Document], n.d. URL <https://www.monumentaltrees.com/fr/photos/80020/> (accessed 1.12.24).

Les informations trouvées dans ces nouveaux documents confirment la préférence de l'espèce pour les sols basiques (pH 7-8) dans son aire d'origine dans les monts Taurus (Turquie). Un Sapin de cilicie planté dans l'arboretum de Glamis Castle (Kirriemuir, Écosse) sur un sol avec un pH de 5,6 constitue la seule référence pour documenter la limite de tolérance à l'acidité de l'espèce.

En accord avec la logique établie dans le guide de notation, il conviendrait de modifier la note D en C pour ClimEssences. Pour BioClimSol, le niveau de vigilance pourrait par précaution être fixé à pH = 5,5 au lieu de pH = 4.

Cette méthode de comparaison a été appliquée sur chacun des 7 critères étudiés et pour les 44 espèces soit un total théorique de 308 comparaisons (44 espèces x 7 critères). Les résultats de ces comparaisons sont présentés au paragraphe V de ce rapport.

Concernant la bibliographie utilisée pour ce travail de comparaison, les recherches ont été réalisées dans les bases d'archives suivantes :

- **Google scholar** : Permet d'accéder à une large sélection de ressources, y compris des articles de revues spécialisées, des rapports et des publications grises.
- **PubMed** : Base de données de la National Center for Biotechnology Information (NCBI) qui se concentre principalement sur les sciences de la vie et la médecine. Il est fréquent d'y trouver des articles sur des sujets liés à la biologie des plantes, à la conservation, à la physiologie végétale.
- **ScienceDirect** (Elsevier) : Couvre une gamme de disciplines scientifiques comprenant l'écologie forestière. Principale source d'articles scientifiques.
- **Global Biodiversity Information Facility** (GBIF) : Utilisé pour accéder à des données sur la distribution des espèces.
- **Flora of North America** : Fournit des informations taxonomiques et des descriptions détaillées des plantes d'Amérique du Nord.
- **JSTOR** : Propose un accès à un large éventail de publications académiques en écologie forestière, y compris des revues spécialisées.
- **HAL** : Plateforme d'archives ouvertes spécialisées dans les publications scientifiques.
- **Euforgen** : Programme européen sur les ressources génétiques forestières. La plateforme en ligne permet l'accès à de la documentation sur de nombreuses thématiques forestières.

Parmi les résultats obtenus dans ces bases d'archives, plusieurs sources peuvent être considérées comme ayant eu un apport d'information majeur dans ce travail en raison de leurs pertinences et la qualité de leurs informations.

- **Flore forestière Française** Tome 1 plaine et collines & Tome 3 forêts méditerranéennes.
Principale source d'informations pour l'ensemble des espèces d'Europe de l'Ouest sur les critères climatiques et pédologiques (exigences trophiques et hydriques).
- **The gymnosperm database** - www.conifers.org
Base de données en ligne spécialisés sur les conifères. Utilisée en complément de la flore forestière française pour les conifères ayant une aire d'origine non couverte par la flore.
Informations recherchées : Exigences hydrique et trophique.
- **Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation :**
Fiche de synthèse produite par l'IRSTEA pour les espèces autorisées comme « matériel forestier de reproduction » (MFR).
Informations recherchées : autécologie, facteurs limitants.
- European Forest Genetic Resources Programme (**EUFORGEN**), European Forest Institute.
Base de données d'espèces relativement complète pour toutes les essences européennes.
Informations recherchées : aires de répartition.
- MRW (**Ministère de la Région Wallonne**), 1996 – Le fichier écologique des essences - [https://www.fichierecologique.be/#!/](https://www.fichierecologique.be/#/)
Source bibliographie majeure pour notre étude car, le fichier propose pour 49 espèces, un détail de tous les facteurs autécologiques.
- Gonin P., Larrieu L., Coello J., Marty P., Lestrade M., Beckey J. et Claessens H., 2013. **Autécologie des feuillus précieux.** IDF, Paris, 63p
Synthèse bibliographique sur l'autécologie de 7 espèces de feuillus précieux.
Informations recherchées : facteurs climatiques et pédologiques limitants.
- Little, E.L. (Jr), 1990. **Silvics of North America**, Vol. 1. Conifers. Agric. Handb. 654. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture. Pp 675.
Ouvrage agricole américain compilant les informations sylvicoles et écologiques de 200 espèces forestières, dont 50 natives d'Amérique du Nord.
- **Threatened Conifers of The World** - <https://threatenedconifers.rbge.org.uk/>
Base de données issues du programme de conservation des conifères. Principalement utilisée pour les espèces peu documentées.
Informations recherchées : distribution géographique des espèces, et description des habitats.

5. Résultats et discussion

La production finale de cette étude se matérialise sous la forme d'un catalogue répertoriant la liste des divergences identifiées ainsi que les corrections suggérées. Avant d'exposer la façon dont ce catalogue a pu être construit, une synthèse des résultats obtenus est brièvement présentée. Enfin pour conclure ce rapport, une discussion est proposée autour des limites et des cas particuliers rencontrés lors de la réalisation de ce travail.

5.1. Présentation des résultats

Initialement, 308 comparaisons étaient prévues (pour rappel 44 espèces x 7 critères), cependant en raison du renseignement non-exhaustif d'information pour certaines espèces, seule 206 comparaisons autécologiques ont pu être réalisée entre Caravane et BioClimSol. Les 98 comparaisons manquantes correspondent aux critères noté I sous ClimEssences ou des données manquantes sur des variables sous BioClimSol. Par ailleurs, lorsque l'information était manquante pour l'un des deux outils, mais disponibles dans le second, une proposition de note ou de seuils de vigilances a pu être faite en se référant au guide de notation.

Parmi ces 206 comparaisons, 58 divergences d'information autécologique ont pu être identifiées entre les deux outils. Le tableau ci-dessous reprend leurs répartitions par critère.

Critères	Divergences entre les deux outils
1.2 – Résistance adulte aux fortes sécheresses	8
1.4 - Résistance aux fortes chaleurs (canicules)	3
1.5 - Résistance aux grands froids	10
2.1 - Tolérance à l'engorgement	8
2.2 - Tolérance au calcaire	4
2.3 - Tolérance à l'acidité	15
2.4 - Tolérance aux sols lourds	10
Total :	58

Tableau 8 : répartition des corrections entre les deux outils

La grande majorité des divergences identifiées concerne des divergences pouvant être qualifiées de « légères », ou bien d'informations insuffisamment précises conduisant à des notations erronées. Seules quelques divergences importantes concernant de fortes contradictions entre les deux outils ont pu être identifiées. Celles-ci se retrouvent majoritairement sur des espèces peu connus et donc peu documentés, où, la seule l'absence d'une référence bibliographique commune aux deux outils, peut conduire à ce type de divergence.

Conformément au principe énoncé dans la méthodologie, chaque divergence a été examinée en vue de proposer des corrections, que ce soit pour l'un ou l'autre des outils, voir si besoin pour les deux. Le tableau ci-dessous présente la répartition de ces corrections en fonction des critères et des outils concernés.

Critères	Corrections Caravane	Corrections BioClimSol
1.2 – Résistance adulte aux fortes sécheresses	6	2
1.4 - Résistance aux fortes chaleurs (canicules)	2	3
1.5 - Résistance aux grands froids	9	8
2.1 - Tolérance à l'engorgement	2	10
2.2 - Tolérance au calcaire	0	1
2.3 - Tolérance à l'acidité	8	3
2.4 - Tolérance aux sols lourds	9	7
Total:	36	34

Tableau 9 : répartition des corrections entre les deux outils

Ces corrections sont au nombre de 70³. Elles concernent majoritairement des ajustements de note ou de seuils de vigilance. Pour certains cas rares, les corrections peuvent aussi concerter une modification des descriptions proposées par Caravane en accompagnement de la note.

L'analyse de la répartition de ces corrections entre les différents critères révèle que le critère « 1.5 – Résistance aux grands froids », ainsi que le critère « 2.4 tolérance aux sols lourds » sont ceux qui comportent le plus de corrections. Dans le cas du critère 1.5, cela s'explique par le fait que les informations font le plus souvent référence à des périodes de grands froids connus avant les années 2000, donnant lieu à des documents peu précis. Pour ce qui est du critère 2.4, beaucoup de corrections sont dû à la difficulté d'appréciation de ce critère. Les corrections proposées ont très souvent nécessité le croisement de nombreuses sources d'information pour parvenir à apprécier ce critère le plus justement possible.

Le travail de complémentation d'informations bibliographiques réalisé a permis l'ajout de 97 nouvelles références pour compléter la documentation des informations fournies par les deux outils. Ces références sont au nombre de 63 pour les critères climatiques (1.2 à 1.5) et 34 pour les critères pédologiques (2.1 à 2.4). L'ajout plus important de nouvelles références pour les critères climatiques s'explique par le fait que ces derniers sont aujourd'hui davantage documentés qu'ils ne l'étaient au commencement des projets Caravane (2011) et BioClimSol (2010). La seconde raison est que ces critères nécessitent de rendre compte d'une diversité de contextes climatiques, ce qui implique très souvent d'avoir recours à plusieurs publications pour garantir la fiabilité d'une seule information.

³ Différence entre le nombre de divergences et le nombre de corrections expliquée par le fait qu'une divergence peut conduire à deux corrections sur BioClimSol et Caravane.

5.2. Construction des fiches synthèses

L'ensemble des corrections sont répertoriées au sein de fiches synthèses pour chaque espèce. Dans ces fiches, chaque critère fait l'objet d'un paragraphe dans lequel il est possible de retrouver les informations suivantes :

- Un rappel de la note ClimEssences et du seuil de vigilances de BioClimSol sur lesquels se base l'analyse de la cohérence,
- l'information si une divergence a pu être identifiée,
- les corrections suggérées pour ClimEssences et BioClimSol.

La page suivant donne un exemple de la structure de ces fiches synthèse avec un rappel du contenu des différents champs d'informations.

Nom des champs	Détails
« Divergences »	Indique si une divergence a pu être identifiée.
« Information de ClimEssences »	Reprend les informations manuscrites de ClimEssences afin d'aider à la compréhension de la note.
« Commentaire de l'auteur »	Commentaire complémentaire ajouté lorsque jugé pertinent afin de mieux comprendre une divergence, ou à l'inverse une concordance des informations entre les deux outils.
« Modification » ClimEssences / BioClimSol	Dans le cas où une modification est suggérée, celle-ci apparaît en jaune afin d'être le plus visible lors du travail de relecture.
« Source 1, 2, 3 ...»	Références bibliographiques utilisées lors de la comparaison des informations. Si le document est nouveau, l'indication soulignée en jaune précise que celui-ci doit être rajouté à ClimEssences.

ID : 1 – *Sorbus torminalis*

Critères climatiques

1.2 – Résistance aux fortes sécheresses			
BioClimSol – DHY Juin à Août			ClimEssences
Inf. à -350 mm	-350 à -200 mm	Sup. à -200 mm	Note
Vigilance Maximale	Élevée	Modérée	B

Divergence : Divergence identifiée

Information ClimEssences : Bonne tolérance à la sécheresse et aux déficits hydriques estivaux.

Commentaire de l'auteur : Tolérance située entre bonne et moyenne

Modification ClimEssences : Changement de la note B en C

Modification BioClimSol :

Source 1 : MRW (Ministère de la Région Wallonne), 1996 – Le fichier écologique des essences. Namur : MRW, t3 : Fiches des essences, 205 p.

Source 2 : Right Trees For a Changing Climate [WWW Document], n.d. URL
<http://www.richtrees4cc.org.uk/members/tree.aspx?species=Sorbus+torminalis> (accessed 12.15.23).

Nouvelle référence - A rajouter dans ClimEssences

Source 3 : Paganová, V. "Ecology and distribution of *Sorbus torminalis* (L.) Crantz. in Slovakia." Horticultural Science 34.4 (2007): 138-151. Nouvelle référence - A rajouter dans ClimEssences

Figure 2 : Exemple de fiche synthèse essence COCABIO

Note : Ces fiches sont construites automatiquement par publipostage à partir d'une base d'information sous Excel.

5.3. Discussion

La méthode de comparaison développée lors de cette mission a permis de mener à bien le travail d'analyse de la cohérence entre Caravane et BioClimSol sur leurs données autécologiques respectives. L'ensemble des données communes aux deux outils ont pu être comparées, et la majorité des divergences identifiées ont pu faire l'objet de proposition d'harmonisation. Cette majorité n'inclue par de nombreux cas particuliers identifiés au cours de ce travail. Des cas spécifiques nous ont contraint dans plusieurs situations à ne proposer aucune modification ni harmonisation des outils pour des raisons techniques, mais aussi pour des raisons logique liés aux différences fondamentales des deux outils.

Ce paragraphe a pour objectif de porter à connaissance l'ensemble des situations irrégulière et cas particulier pouvant impacter la reproduction de la méthode. Dans un premier temps nous aborderons les cas particuliers liés à des raisons techniques, puis dans un second ceux liés à la nature de conception de chaque outil.

5.3.1 Cas particuliers liés à des raisons techniques

La première difficulté rencontrée provient d'une différence dans le domaine d'action de chaque outil. BioClimSol a en premier lieu été développé pour les questions liées au dépeuplement forestier. Même si l'ajout des modèles INB lui permet aussi de tenir compte de l'adaptation autécologique des espèces, l'information en sortie de l'outil ne permet pas d'apprécier l'impact de chaque variable sur la croissance des espèces. De ce fait, des écarts de notation peuvent émerger pour des espèces pouvant très bien tolérer un facteur, mais au détriment de leurs croissance. Par exemple, *Quercus ilex* (Chêne vert) tolère certains « sols lourds » dans lesquels sa croissance est très fortement réduite. Cela génère donc une divergence entre BioClimSol où la sensibilité est modérée, et ClimEssences où ce critère est noté C (moyen) en raison de l'impact sur sa croissance.

2.2 Tolérance au calcaire

Accepte les sols calcaires mais avec une croissance faible. Néanmoins il peut exploiter le phosphore et le calcium contenu dans le sol tout en éliminant les excès de magnésium.

Note

Fiabilité

Terrain

Expert

Bibliographie : 6

Figure 3 : Divergence pour *Calocedrus decurrens Flor.* en raison d'une notion de croissance

A cela s'ajoutent les combinaisons de facteurs considérées comme aggravants. En effet certaines espèces peuvent présenter une tolérance à un critère uniquement dans des conditions spécifiques. Un exemple fréquemment observé au cours de cette étude concerne la tolérance de certaines espèces aux sols lourds, mais exclusivement en l'absence d'hydromorphie. Dans ce cas de figure la notation de ClimEssences considère le critère isolément, tandis que le niveau de sensibilité des modèles de BioClimSol peut être influencé par ces combinaisons aggravantes.

La réponse choisie face à ces cas de figures est de ne pas procéder à une comparaison entre les outils et de simplement faire figurer la raison dans le champ « commentaire de l'auteur ».

Un dernier cas particulier concerne les critères dit « binaires » comme la tolérance au calcaire notée dans BioClimSol sous la forme de présence/absence. Compte tenu de la simplicité de construction de ces variables, il est difficile de réaliser des comparaisons très précises. Certaines divergences ont donc pu ne pas être correctement identifiées.

5.3.2 Limite imposé par la nature de la conception de chaque outil

Au-delà des différents cas particuliers pouvant être rencontrés lors du travail de Cocabio, une limite de la méthode est rencontrée pour les 13 espèces IBS de BioClimSol. Pour ces espèces, les seuils de vigilance dérivés d'un modèle de dépérissement, résultent de l'analyse autécologique de l'espèce dans un contexte précis qui est celui du dépérissement de l'espèce et non celui de son aire complète.

Les informations autécologique obtenue à partir de ce type de modèles peuvent ne pas représenter le potentiel autécologique d'une espèce de façon exhaustive, et ainsi être à l'origine de certains décalages dans l'information fournis pour la comparaison avec ClimEssences.

Conscient de ce fait, les informations autécologiques des espèces IBS de BioClimSol ont tout de même été comparées avec les informations de Caravane. Cependant davantage de souplesse a été accordée dans le cas où les divergences d'information étaient jugées « légères » (cf §5.1), autrement dit qu'elles ne concernent pas une réelle contradiction d'information.

6. Bibliographie

L'analyse quali-quantitative comparée (AQQC-QCA) : Approche, techniques et applications en sciences humaines / De Meur, Gisèle;Rihoux, Benoît - Paris : L'Harmattan, 2002 - Science politique - ISBN: 9782296492431 - Permalink: <http://digital.casalini.it/9782296492431> - Casalini id: 5508632

Jean Lemaire, Michel Vennetier, Bernard Prévosto, Maxime Cailleret, Interactive effects of abiotic factors and biotic agents on Scots pine dieback: A multivariate modeling approach in southeast France, *Forest Ecology and Management*, Volume 526, 2022, 120543, ISSN 0378-1127,
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120543>.

Lemaire, Jean & Bec, Raphaël & Peyrin, Simon & Jourde, Maxime & Havet, Noemi & Rosa, Jerome & Pillon, Sylvain & Cano, Benjamin & Becquey, Jacques & Saintonge², François-Xavier. (2021). Bien comprendre l'outil de vigilance BioClimSol pour réaliser un diagnostic de qualité en forêt dans un contexte de dérèglement climatique.. 10.13140/RG.2.2.31641.95845.

Basic, N., Picard, N., Sainte-Marie, J. *et al.* A Novel Framework and a New Score for the Comparative Analysis of Forest Models Accounting for the Impact of Climate Change. *JABES* (2023). <https://doi.org/10.1007/s13253-023-00557->

7. Liste des annexes

1. Comparaison des deux variables de déficit hydrique
2. Tables de vérités
3. Guides de notation
4. Liste d'espèces

Annexe I - Comparaison des deux variables de déficit hydrique

id	Type	Espèce	Déficit hydrique juin-août				Déficit hydrique mai-septembre				Note
			< -350 mm	-350 à -200 mm	-200 à -50 mm	> -50 mm	< -500 mm	-500 à -300 mm	-300 à -200 mm	-200 à -100 mm	
12	INB	<i>Pinus nigra subsp. salzmannii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	A
26	INB	<i>Abies pinsapo</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	A
36	IBS	<i>Quercus ilex</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	A
13	INB	<i>Pinus nigra var. corsicana</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	B
20	INB	<i>Abies cilicica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	B
21	INB	<i>Abies nordmanniana</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	B
41	IBS	<i>Pinus sylvestris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	B
8	INB	<i>Juglans regia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	C
3	INB	<i>Calocedrus decurrens</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	A
11	INB	<i>Pinus halepensis</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	A
18	INB	<i>Abies numidica</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	A
19	INB	<i>Abies cephalonica</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	A
30	IBS	<i>Cedrus atlantica</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	A
4	INB	<i>Quercus cerris</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	B
28	INB	<i>Fagus orientalis</i>	1	1	0	0	1	0	0	0	NA
14	INB	<i>Pinus pinaster</i>	2	1	0	0	1	1	0	0	A
22	INB	<i>Sequoia sempervirens</i>	2	1	0	0	2	1	0	0	A
1	INB	<i>Sorbus torminalis</i>	2	1	0	0	2	1	0	0	B
10	INB	<i>Pinus taeda</i>	2	1	0	0	2	1	0	0	B
15	INB	<i>Pinus nigra subsp. nigra</i>	2	1	0	0	1	1	0	0	B
34	IBS	<i>Quercus pubescens</i>	2	1	0	0	2	1	0	0	B
16	INB	<i>Malus sylvestris</i>	2	1	0	0	2	1	0	0	C
35	IBS	<i>Quercus petraea</i>	2	1	0	0	2	2	1	0	C
27	INB	<i>Pyrus pyraster</i>	2	1	0	0	2	1	0	0	NA
39	IBS	<i>Fraxinus excelsior</i>	2	1	0	0	2	1	1	0	NA
9	INB	<i>Juglans nigra</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	A
17	INB	<i>Robinia pseudoacacia</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	B
23	INB	<i>Tilia platyphyllos</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	B
24	INB	<i>Tilia cordata</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	B
31	IBS	<i>Castanea sativa</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	B
7	INB	<i>Prunus avium</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	C
33	IBS	<i>Quercus robur</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	C

2	INB	<i>Betula pendula</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	0	D
5	INB	<i>Acer pseudoplatanus</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	0	D
37	IBS	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	0	D
29	INB	<i>Liriodendron Tulipifera</i>	2	1	1	0	2	2	1	0	0	NA
38	IBS	<i>Picea abies</i>	2	2	1	0	2	2	2	1	0	D
40	IBS	<i>Fagus sylvatica</i>	2	2	1	0	2	2	2	1	0	D
42	IBS	<i>Abies alba</i>	2	2	1	0	2	2	2	1	1	D
6	INB	<i>Larix decidua</i>	2	2	2	1	2	2	2	2	1	D
25	INB	<i>Abies nordmanniana equi-trojani</i>	NA	B								
32	IBS	<i>Quercus suber</i>	NA									

Annexe II - Tables de vérités

Ces tables de vérité présente de façon exhaustives pour chaque critère, l'ensemble des associations entre les seuils de vigilances BioClimSol et les notes ClimEssences en indiquant le nombre d'occurrences rencontrées pour chaque association.

1.2 Résistance à la sécheresse

< -350 mm	-350 à -200 mm	> -200 mm	> -50 mm	Note ClimEssences	Occurrences
1	0	0	0	A	5
1	0	0	0	B	1
2	1	0	0	A	2
2	1	0	0	B	4
2	1	0	0	C	2
2	1	1	0	A	1
2	1	1	0	B	4
2	1	1	0	C	2
2	1	1	0	D	3
2	2	1	0	D	3
2	2	2	1	D	1

1.4 Tolérance Résistance aux fortes chaleurs (canicules)

BioClimSol – T° max annuel (°C)				Note ClimEssences	Occurrences
< 35°C	35 à 40°C	40 à 45°C	> 45°C		
0	0	0	1	A	1
0	0	1	2	A	3
0	0	1	2	B	2
0	0	1	2	C	1
0	1	1	2	A	1
0	1	1	2	B	1
0	1	1	2	C	1
0	1	2	2	B	2
0	1	2	2	C	1

1.5 Tolérance aux grands froids

BioClimSol - T°min sous abris (°C)				Note ClimEssences	Occurrences
< -30°C	-30 à -25°C	-25 à -20°C	> -20°C		
1	0	0	0	A	4
1	1	0	0	A	3
1	1	0	0	B	2
2	1	0	0	A	3
2	1	0	0	B	2
2	1	0	0	C	1
2	1	1	0	B	3
2	2	1	0	A	3
2	2	1	0	B	1
2	2	2	1	C	3
2	2	2	1	B	3
2	2	2	1	C	3

2.1 Tolérance à l'hydromorphie

BioClimSol - profondeur apparition hydromorphie (cm)					Note ClimEssences	Occurrences
0-25	25-50	50-75	75-100	> 100		
1	0	0	0	0	A	1
1	0	0	0	0	B	1
1	1	0	0	0	A	2
1	1	0	0	0	B	2
2	1	0	0	0	B	1
2	1	1	0	0	C	1
2	2	1	0	0	B	4
2	2	1	0	0	C	8
2	2	1	0	0	D	4
2	2	1	1	0	D	1
2	2	2	1	0	C	1
2	2	2	1	0	D	12

2.2 Tolérance au calcaire avant 50cm

Calcaire avant 50 cm	Note ClimEssences	Occurrences
0	A	15
0	B	9
0	C	4
1	A	2
1	B	3
1	C	2
2	C	1
2	D	7

2.3 Tolérance à l'acidité

BioClimSol - Seuil de vigilance - pH							Note ClimEssences	Occurrences
<3,5	3,5 à <4	4 à <4,5	4,5 à <5	5 à <5,5	5,5 à <6	>=6		
0	0	0	0	0	0	0	A	2
0	0	0	0	0	0	0	B	4
2	0	0	0	0	0	0	A	1
2	0	0	0	0	0	0	B	1
1	1	0	0	0	0	0	C	1
1	1	0	0	0	0	0	D	1
1	1	0	0	0	0	0	B	2
2	1	0	0	0	0	0	B	2
2	2	0	0	0	0	0	A	1
2	2	0	0	0	0	0	B	6
2	2	1	0	0	0	0	A	2
2	2	1	0	0	0	0	B	4
2	2	1	0	0	0	0	C	3
2	2	2	0	0	0	0	B	1
2	2	2	1	0	0	0	C	2
2	2	2	1	0	0	0	B	2
2	2	2	1	0	0	0	D	1
2	2	2	2	0	0	0	C	1

2.4 Tolérance aux sols lourds

Argiles lourde avant 50 cm	Note ClimEssences	Occurrences
0	A	4
0	B	9
0	C	1
0	D	4
1	A	0
1	B	1
1	C	2
1	D	1
2	D	5

Annexe III - Guides de notation

1.2 Résistance à la sécheresse

Déficit hydrique de juin à août				Note ClimEssences
< -350 mm	-350 à -200 mm	> -200 mm	> -50 mm	
1	0	0	0	A
1	1	0	0	B
2	1	0	0	B
2	1	1	0	C
2	2	1	0	D
2	2	1	1	D
2	2	2	1	D

1.4 Tolérance Résistance aux fortes chaleurs (canicules)

Température maximale				Note ClimEssences
< 35°C	35 à 40°C	40 à 45°C	> 45°C	
0	0	0	1	A
0	0	1	2	B
0	1	1	2	C
0	1	2	2	C
1	2	2	2	D

1.5 Tolérance aux grands froids

BioClimSol - T°min enregistré sous abris (°C)							Note ClimEssences
< -30°C	-30 à -25°C	-25 à -20°C	-20 à -15°C	-15 à -10°C	-10 à -5°C	>-5°C	
1	0	0	0	0	0	0	A
1	1	0	0	0	0	0	A
2	0	0	0	0	0	0	A
2	1	0	0	0	0	0	B
2	2	1	0	0	0	0	B
2	2	2	1	0	0	0	B
2	2	2	2	1	0	0	C
2	2	2	2	2	1	0	C
2	2	2	2	2	2	1	D
2	2	2	2	2	2	2	D

2.1 Tolérance à l'hydromorphie

BioClimSol - profondeur apparition hydromorphie (cm)					Note ClimEssences
0-25	25-50	50-75	75-100	> 100	
0	0	0	0	0	A
1	0	0	0	0	A
1	1	0	0	0	B
2	0	0	0	0	B
2	1	0	0	0	B
1	1	1	0	0	C
2	2	0	0	0	C
2	2	1	0	0	C
2	2	2	0	0	C
2	2	2	1	0	D
2	2	2	2	0	D
2	2	2	2	1	D
2	2	2	2	2	D

2.2 Tolérance au calcaire avant 50cm

Présence de calcaire avant 50 cm	Note ClimEssences
0	A
0	B
1	C
2	D

2.3 Tolérance à l'acidité

Seuil de vigilance de BioClimSol - pH								Note ClimEssences
<3,5	3,5 à < 4	4 à < 4,5	4,5 à < 5	5 à < 5,5	5,5 à < 6	6 à < 6,5	> 6,5	
0	0	0	0	0	0	0	0	A
2	0	0	0	0	0	0	0	A
2	1	0	0	0	0	0	0	A
2	2	0	0	0	0	0	0	A
2	2	1	0	0	0	0	0	B
2	2	2	0	0	0	0	0	B
2	2	2	1	0	0	0	0	B
2	2	2	2	0	0	0	0	B
2	2	2	2	1	0	0	0	C
2	2	2	2	2	0	0	0	C
2	2	2	2	2	1	0	0	C
2	2	2	2	2	2	0	0	C
2	2	2	2	2	2	1	0	D
2	2	2	2	2	2	2	0	D
2	2	2	2	2	2	2	1	D
2	2	2	2	2	2	2	2	D

2.4 Tolérance aux sols lourds

Présence d'argiles lourdes avant 50 cm	Note ClimEssences
0	A
0	B
1	C
2	D

Annexe IV - Liste d'espèces

Deux listes exhaustives de l'ensemble des espèces intégrées aux deux outils (à la date de rédaction du rapport Cocabio). Les espèces surlignées en jaunes correspondent à espèces communes aux deux outils.

ClimEssences		
<i>Abies alba L.</i>	<i>Cupressus goveniana Gord.</i>	<i>Pinus nigra ssp. nigra var. pallasiana Asch. & Graebn. (incl. var. caramani)</i>
<i>Abies amabilis Dougl.</i>	<i>Cupressus guadalupensis S.Wats.</i>	<i>Pinus nigra ssp. salzmannii Franco</i>
<i>Abies balsamea Mill.</i>	<i>Cupressus leylandii Rushforth</i>	<i>Pinus nigra ssp. salzmannii var. corsicana Hylander</i>
<i>Abies cephalonica Loud.</i>	<i>Cupressus lusitanica Mill. & C. lusitanica var. benthamii Carr.</i>	<i>Pinus palustris Mill.</i>
<i>Abies cilicica Carr.</i>	<i>Cupressus macrocarpa Hartw.</i>	<i>Pinus peuce Griseb.</i>
<i>Abies concolor Lindl.</i>	<i>Cupressus nootkatensis D.Don</i>	<i>Pinus pinaster Ait.</i>
<i>Abies firma Sieb. & Zucc.</i>	<i>Cupressus pygmaea Sarg.</i>	<i>Pinus pinea L.</i>
<i>Abies fraseri Poir.</i>	<i>Cupressus sargentii Jeps.</i>	<i>Pinus ponderosa Dougl.</i>
<i>Abies grandis Lindl.</i>	<i>Cupressus sempervirens L.</i>	<i>Pinus pungens Lamb.</i>
<i>Abies homolepis Sieb. & Zucc.</i>	<i>Cupressus torulosa D. Don</i>	<i>Pinus radiata D.Don</i>
<i>Abies koreana E.H.Wils.</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Pinus reflexa Engelm.</i>
<i>Abies lasiocarpa Nutt.</i>	<i>Eucalyptus gunnii Hook.f. (incl. E.gunnii ssp.divaricata B.M.Potts & E. ar</i>	<i>Pinus rigida Mill.</i>
<i>Abies lasiocarpa var.arizonica Nutt.</i>	<i>Eucalyptus x irbyi R.T.Baker & H.G.Sm.</i>	<i>Pinus sabiniana Dougl.</i>
<i>Abies lowiana A.Murr.</i>	<i>Fagus sylvatica L.</i>	<i>Pinus serotina Michx.</i>
<i>Abies magnifica Rehd.</i>	<i>Ginkgo biloba L.</i>	<i>Pinus strobus L.</i>
<i>Abies magnifica var.shastensis Lemm.</i>	<i>Juglans major x regia</i>	<i>Pinus sylvestris L.</i>
<i>Abies nordmanniana Spach</i>	<i>Juglans nigra L.</i>	<i>Pinus taeda L.</i>
<i>Abies nordmanniana ssp. equi-trojani Coode & Cullen</i>	<i>Juglans nigra x regia</i>	<i>Pinus uncinata Ramond</i>
<i>Abies numidica De Lannoy</i>	<i>Juglans regia</i>	<i>Pinus wallichiana A.B.Jacks</i>
<i>Abies pinsapo Boiss. et Abies marocana Trabut</i>	<i>Juniperus drupacea Labill.</i>	<i>Platanus orientalis</i>
<i>Abies procera Rehd.</i>	<i>Juniperus virginiana L.</i>	<i>Prunus avium L.</i>
<i>Abies veitchii Lindl.</i>	<i>Larix decidua Mill.</i>	<i>Pseudotsuga macrocarpa Mayr</i>

<i>Acer campestre</i> L.	<i>Larix kaempferi</i> Gord.	<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>glaucoides</i> Franco
<i>Acer monspessulanum</i> L.	<i>Larix laricina</i> K.Koch	<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>Menziesii</i> Franco
<i>Acer platanoides</i> L.	<i>Larix x marschlinsii</i> Coaz	<i>Quercus afra</i> Pomei
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	<i>Quercus canariensis</i> Willd.
<i>Alnus cordata</i> Desf.	<i>Malus sylvestris</i>	<i>Quercus cerris</i> L.
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu & Cheng	<i>Quercus frainetto</i> Ten.
<i>Alnus incana</i>	<i>Ostrya carpinifolia</i>	<i>Quercus ilex</i> L.
<i>Betula pendula</i> Roth	<i>Paulownia tomentosa</i> Steud.	<i>Quercus macranthera</i> Fisch. & C.A.Mey.
<i>Betula pubescens</i>	<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst	<i>Quercus petraea</i> Liebl.
<i>Calocedrus decurrens</i> Flor.	<i>Picea engelmannii</i> Parry et P. <i>engelmannii</i> ssp. <i>mexicana</i> P. A. Schmidt	<i>Quercus pubescens</i>
<i>Carpinus betulus</i> L.	<i>Picea jezoensis</i> Endl. et <i>Picea</i> <i>jezoensis</i> var. <i>hondoensis</i> Endl.	<i>Quercus robur</i> L.
<i>Carya cordiformis</i> K.Koch	<i>Picea likiangensis</i> var. <i>rubescens</i> Rehder & E. H. Wilson	<i>Quercus rubra</i> L.
<i>Castanea sativa</i> Mill.	<i>Picea omorika</i> Purk.	<i>Quercus suber</i>
<i>Cedrus atlantica</i> Manetti	<i>Picea orientalis</i> Link	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.
<i>Cedrus deodara</i> G.Don	<i>Picea pungens</i> Engelm.	<i>Salix caprea</i>
<i>Cedrus libani</i> A. Rich.	<i>Picea sitchensis</i> Endl.	<i>Sequoia sempervirens</i> Endl.
<i>Celtis australis</i> L.	<i>Pinus brutia</i> ssp. <i>eldarica</i> Silba	<i>Sequoiadendron giganteum</i> Buchh.
<i>Chamaecyparis</i> <i>lawsoniana</i> Parl.	<i>Pinus brutia</i> Ten.	<i>Sorbus aria</i>
<i>Chamaecyparis obtusa</i> Endl.	<i>Pinus cembra</i> L. et <i>P. sibirica</i> Du Tour	<i>Sorbus domestica</i> L.
<i>Chamaecyparis pisifera</i> Sieb. & Zucc.	<i>Pinus contorta</i> Dougl.	<i>Sorbus torminalis</i> Crantz.
<i>Corylus colurna</i> L.	<i>Pinus contorta</i> ssp. <i>latifolia</i> Critchfield	<i>Taxodium distichum</i> A.Rich.
<i>Cryptomeria japonica</i> D.Don	<i>Pinus contorta</i> ssp. <i>murrayana</i> Critchfield	<i>Taxus baccata</i>
<i>Cunninghamia</i> <i>lanceolata</i> Hook.	<i>Pinus coulteri</i> D.Don	<i>Tetraclinis articulata</i> Mast.
<i>Cupressus abramsiana</i> C. B. Wolf	<i>Pinus echinata</i> Mill.	<i>Thuja plicata</i> J.Donn
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	<i>Pinus elliottii</i> Engelm.	<i>Thujopsis dolabrata</i> Endl., incl. <i>T. dolabrata</i> var. <i>hondae</i> Mak.

<i>Cupressus atlantica</i> GausSEN	<i>Pinus engelmannii</i> Carr.	<i>Tilia cordata</i>
<i>Cupressus bakeri</i> Jepson	<i>Pinus halepensis</i> Mill.	<i>Tilia platyphyllos</i>
<i>Cupressus dupreziana</i> A. Camus	<i>Pinus heldreichii</i> Christ.	<i>Torreya californica</i> Torr.
<i>Cupressus forbesii</i> Jeps.	<i>Pinus jeffreyi</i> Balf.	<i>Tsuga heterophylla</i> Sarg.
<i>Cupressus glabra</i> Sudw.	<i>Pinus nigra</i> ssp. <i>nigra</i> Arn.	<i>Tsuga mertensiana</i> Carr.

Bioclimsol		
INB	IBS	Futurs essences
<i>Abies borisii-regis</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Acer platanoides</i>
<i>Abies bornmuelleriana</i>	<i>Castanea sativa</i>	<i>Alnus cordata</i>
<i>Abies cephalonica</i>	<i>Cedrus atlantica</i>	<i>Carpinus betulus</i>
<i>Abies cilicica</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Cedrus libani</i>
<i>Abies equitrojani</i>	<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Larix x marschlinsii</i>
<i>Abies marocana</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Picea sitchensis</i>
<i>Abies nordmanniana</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus brutia</i>
<i>Abies numidica</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Pinus heldreichii</i>
<i>Abies pinsapo</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Pinus pinea</i>
<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Quercus petraea</i>	<i>Pinus radiata</i>
<i>Betula pendula</i>	<i>Quercus pubescens</i>	<i>Pinus strobus</i>
<i>Calocedrus decurrens</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Pinus taeda</i>
<i>Fagus orientalis</i>	<i>Quercus suber</i>	<i>Populus</i>
<i>Juglans nigra</i>		<i>Quercus faginea</i>
<i>Juglans regia</i>		<i>Quercus frainetto</i>
<i>Larix decidua</i>		<i>Quercus rubra</i>
<i>Liriodendron tulipifera</i>		<i>Sorbus domestica</i>
<i>Malus sylvestris</i>		
<i>Pinus halepensis</i>		
<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>nigra</i>		
<i>Pinus nigra</i> var. <i>corsicana</i>		
<i>Pinus</i> <i>nigra</i> subsp. <i>salzmannii</i>		
<i>Pinus pinaster</i>		
<i>Pinus strobus</i>		
<i>Pinus taeda</i>		
<i>Prunus avium</i>		
<i>Pyrus pyraster</i>		
<i>Quercus cerris</i>		
<i>Quercus ilex</i>		

<i>Robinia pseudoacacia</i>
<i>Sequoia sempervirens</i>
<i>Sorbus torminalis</i>
<i>Tilia cordata</i>
<i>Tilia platyphyllos</i>