

---

Analyse contextualisée  
des mécanismes d'expansion du stock  
de bois sur pied

---



## 1 Introduction, grands principes de l'analyse

### 1.1 Analyse du bilan de stock de bois en surface terrière

Nous avons précédemment analysé la dynamique des forêts françaises en étudiant les variations de surface, de stock de bois et de densité de stock à travers des strates définies par le département, la propriété et la composition en essence. L'analyse a permis de caractériser cette expansion et de révéler les fortes hétérogénéités en fonction des différents facteurs étudiés.

Les données de l'IFN, en plus de renseigner la surface et le volume, apportent des informations dendrométriques telles que le diamètre des arbres, permettant de **ventiler le stock de bois par stade de maturation dimensionnelle des forêts**. De plus, les flux de bois, comprenant la croissance des arbres sur les 5 ou 10 dernières années, l'évaluation du recrutement, l'inventaire des arbres morts ou prélevés, sont également renseignés. **Ces informations permettent une analyse des mécanismes démographique d'expansion en stock sur pied, en tentant de comprendre quels sont les termes du bilan de stock de bois qui influencent son augmentation. Le principe est d'établir ce bilan à partir des inter-cycles départementaux de l'inventaire AM (dont la durée est en moyenne supérieure à 10 ans).**

**L'étude sera conduite, non pas sur le volume de bois, mais sa surface terrière. La raison fondamentale est de se rapprocher le plus possible de mesures vraies, et non pas d'estimations fondées sur des modèles, dans un contexte où nous verrons qu'un des termes du bilan, les prélèvements de bois, est fortement sous-estimé par une procédure d'inventaire qui repose depuis son origine sur des placettes temporaires.** Dans ce contexte, les prélèvements seront dits estimés par la « méthode du bilan », les autres flux ne posant a priori pas de difficulté.

### 1.2 Une analyse contextualisée et hiérarchique

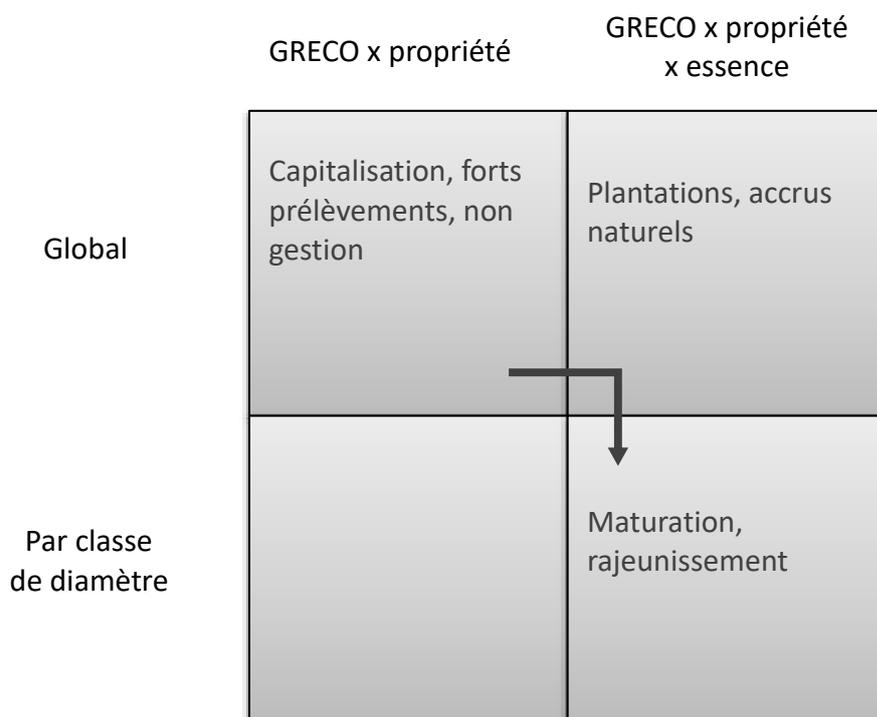
**L'analyse sera contextualisée selon les régions écologiques de l'inventaire (GRECO), la propriété, et les espèces forestières, à partir d'une partition des forêts françaises qui permettra d'identifier les grands systèmes de production à l'œuvre dans l'expansion (et en négligeant la composition des plus petits), en les mettant en correspondance avec leurs propriétés dynamiques.** L'étude a été menée à deux niveaux hiérarchiques : d'abord au niveau de strates de la forêt française définies par régions écologiques et classes de propriété, puis en introduisant les essences forestières, auxquelles une structuration diamétrique apporte une information sur le stade de maturité de ces forêts. **Les raisons essentielles tiennent : (i) à la nécessité d'explorer progressivement les mécanismes de l'expansion, (ii) à la nature très différente des données mobilisées, la première analyse du stock ayant un sens au**

**niveau des « points d'inventaire », la seconde ayant un sens au niveau de l'arbre (essence, classe de diamètre), auquel aucune surface forestière de référence ne se rattache.**

Le nombre d'essences identifiées par l'IFN étant trop important et ne permettant pas une bonne lisibilité des résultats, une analyse des compositions en essences de la forêt française a permis de sélectionner les essences dominantes dans chaque GRECO, les autres étant regroupés selon deux groupes généraux « divers feuillus » et « divers résineux », et d'ainsi diminuer le nombre de strates étudiées.

Les deux partitions successives apportent une information différente (**Figure 4.1**). La partition par GRECO et propriété permet d'identifier des groupes de strates présentant la même dynamique et d'adjoindre les variations de surfaces forestières à cette analyse. L'analyse des stocks par essence forestière et par classe de diamètre repose sur des informations au niveau de l'arbre, sans analyse complémentaire à ce niveau. Cependant, ce niveau de résolution supérieure permet de relier les dynamiques précédemment observées à des structures diamétriques et des essences et ainsi de mieux approcher les causes forestières de l'expansion, comme, par exemple, la conversion des TSF ou la plantation d'essences à croissance rapide.

Un schéma de la démarche de l'analyse est présenté en **Figure 4.2**.



**Figure 4.1. Schéma de la démarche hiérarchique de l'analyse de l'expansion du stock de bois sur pied**

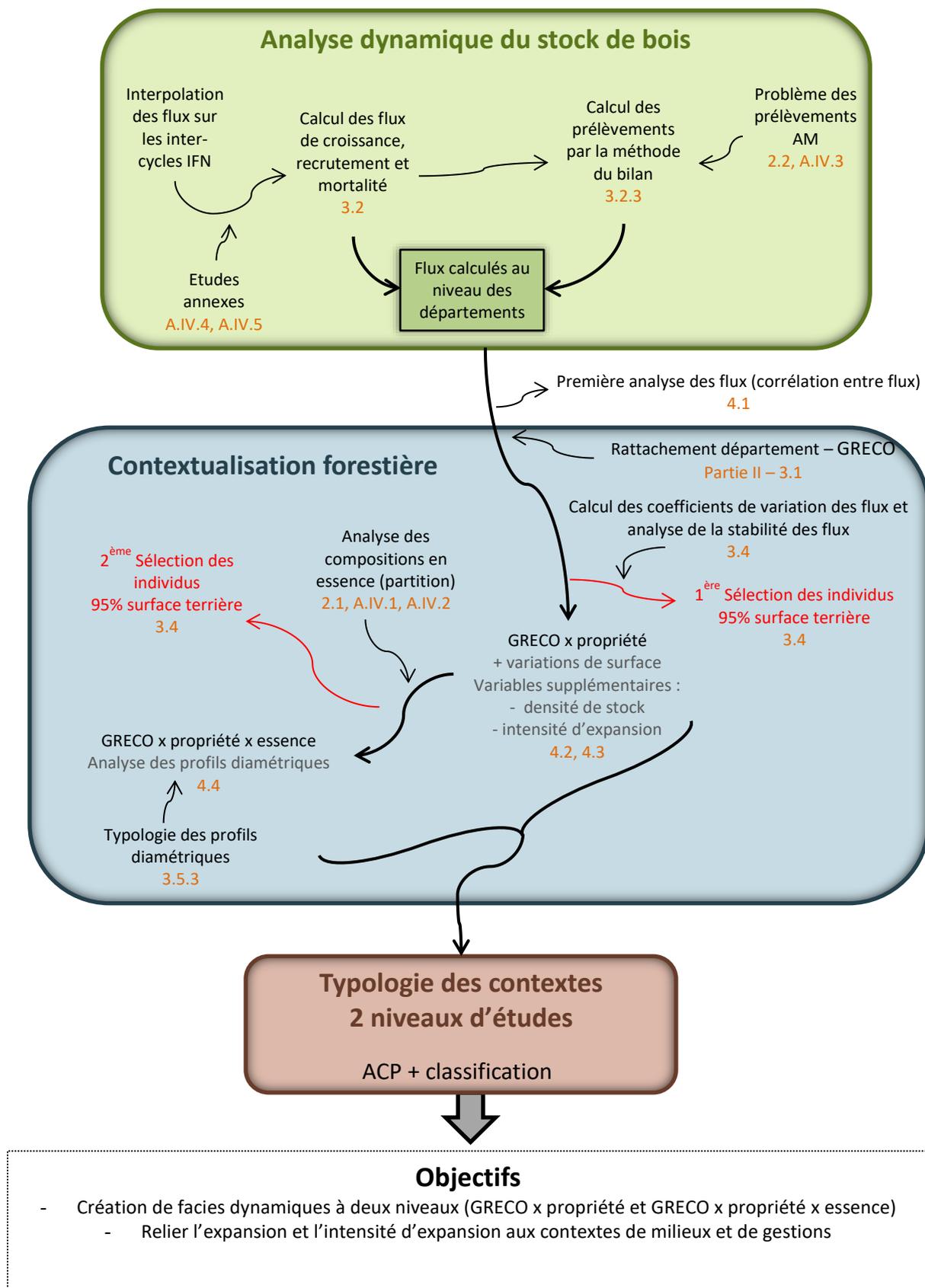


Figure 4.2. Démarche de l'analyse de la dynamique des stocks des forêts française. Les indices renvoient à des parties du manuscrit.

## 2 Analyses techniques préliminaires

En préalable à l'analyse des flux de bois, des analyses préliminaires ont été nécessaires. Elles ont permis :

- i) De constituer la partition de la forêt française en identifiant les compositions en essences dominantes dans chaque GRECO, en s'assurant de sa compatibilité entre méthodes d'inventaire.
- ii) D'analyser la continuité de la donnée de prélèvements de bois entre ancienne (AM/M1) et nouvelle méthodes (NM/M2) et ainsi de mettre en œuvre une stratégie d'estimation recevable.
- iii) D'estimer enfin certaines données dendrométriques non systématiquement disponibles (épaisseur d'écorce de l'arbre à partir du diamètre à 1,30 m et circonférence à 1,30 m en fonction de la circonférence à la base), par exemple pour les arbres prélevés dont le diamètre à 1,30 m n'est par définition pas connu.

Les résultats fondamentaux de ces analyses sont présentés à la suite, les développements techniques étant renvoyés dans des annexes de cette partie (**Annexes IV**).

### 2.1 Identification des compositions dominantes sur les surfaces des forêts françaises

Le nombre d'essences différentes relevées dans la forêt française est très élevé (90 essences identifiées par l'IFN ; voir partie II – 2.1). Cette diversité ne permet pas une bonne lisibilité des résultats et risque de donner trop d'importance à des compartiments non significatifs de la forêt française, de nombreuses essences étant très peu représentées.

Dans un premier temps, il a donc été décidé de travailler avec les compositions en essences des points d'inventaires plutôt que les essences d'arbres, ayant l'avantage de la solidité des mesures fondamentales prises sur le terrain pour celles collectées dans la nouvelle méthode d'inventaire. Cependant, le nombre de compositions identifiées par l'IFN est encore important (117 modalités, IGN, 2014) et doit être réduit.

Ces compositions sont basées sur les taux de couvert libre relatifs (TCLR ; **Encadré 4.1**) des différentes essences, correspondant au rapport, pour chaque essence, de la surface des houppiers ayant accès à la lumière sur la surface totale de la placette couverte par les houppiers des arbres (IGN, 2014).

### Mesure des compositions dans la nouvelle méthode d'inventaire (NM)

La procédure de construction des types de composition NM est expliquée par Morneau *et al.* (2008). Elle peut être résumée comme suit :

- Peuplements sans composition : peuplement dont le couvert absolu de la strate recensable est strictement supérieur à 15%
- Identification des peuplements purs :
  - une essence avec un TCLR supérieur à 75%
  - ou
  - une essence avec un TCLR supérieur à 50% et aucune autre avec un TCLR supérieur à 15%
- Identification des peuplements mélangés : peuplements où au moins deux essences ont des TCLR compris entre 15 et 75%. On y trouve, des mélanges feuillus (où la somme des TCLR des feuillus est supérieure ou égale à 75%), des mélanges résineux (où la somme des TCLR des feuillus est inférieure à 25%), et des mélanges mixtes (où la somme des TCLR des feuillus est comprise entre 25 et 75%). Ces peuplements sont ensuite regroupés dans les 91 types de mélanges identifiés par l'IFN.

#### Encadré 4.1. Description de procédure de construction des types de composition dans la nouvelle méthode d'inventaire forestier

Le TCLR n'est pas disponible en AM. Cependant, une donnée d' « importance essence » (IMPRESS) renseigne sur le couvert relatif des essences. Nous avons donc dans un second temps vérifié si cette donnée était utilisable afin de partitionner les compositions en AM et voir si ces compositions étaient cohérentes avec celles identifiées en NM.

Finalement, une analyse a été indispensable pour :

- i) regrouper ces compositions déjà identifiées par l'IFN en ensembles dominants significatifs dans la forêt, les autres ensembles étant regroupés au sein de compartiments régionaux génériques « divers feuillus / divers résineux / Divers mixtes »
- ii) Tenter d'utiliser la donnée de composition des points d'inventaire AM, afin de voir si cette donnée peut être homogénéisée entre AM et NM, **ce qui n'a pas été le cas**,
- iii) Transcrire cette partition en stock de bois attaché à l'information d'essence collectée sur les arbres, seule méthode permettant d'assurer une continuité temporelle.

### 2.1.1 Partition de la surface forestière en compositions dominantes sur la nouvelle méthode.

La première phase du travail a consisté en la création d'une partition en composition plus simple que celle présente dans les données IFN. Il a été décidé de travailler au niveau des GRECO et d'identifier dans chacune d'entre elles les compositions en essence dominantes.

Les données utilisées dans cette analyse sont les moyennes entre 2005 et 2014 des surfaces et des stocks sur pieds des forêts de chaque GRECO ventilées par type de composition. A l'intérieur de chaque GRECO, les compositions ont été ordonnées par ordre de surfaces décroissantes. Les types principaux, représentant une part importante de la surface forestière totale, et les essences se retrouvant souvent en mélange ont été identifiés. Des regroupements ont alors été effectués entre les différents mélanges comportant ces essences afin de créer de nouveaux types plus agrégés. A partir de ces nouvelles compositions, les types les plus importants sont sélectionnés jusqu'à ce qu'au moins 50% de la surface forestière de la GRECO soit représentée. Une certaine homogénéité entre GRECO voisines et entre GRECO de montagnes est recherchée afin de garder une certaine cohérence. Après avoir atteint les 50%, les compositions non sélectionnées sont regardées au cas par cas et ont pu être rajoutées si la part de la surface et du volume qu'elles représentent est considérée comme non-négligeable et que ces peuplements sont historiquement importants (exemple des peuplements purs de mélèzes dans les Alpes). Les compositions non-sélectionnées sont ensuite regroupées en 3 catégories : pur feuillus, pur résineux et mixtes. **Une description plus détaillée du protocole est présentée dans un article récemment soumis (Bontemps *et al.*, soumis ; Annexe IV.1).**

Afin de faire des choix de regroupements de composition judicieux, il a parfois été utile d'étudier la localisation des différentes compositions afin de voir si elles correspondent à des milieux différents ou non. Cela a été le cas pour les pins de Corse et les châtaigniers purs et en mélange de la GRECO SO. La localisation des pins en Corse montre que les pins laricio et maritime sont présents sur des milieux différents. Alors que le pin laricio est plus présent sur les hauteurs, le pin maritime est principalement localisé plus près de la côte. Il a donc été décidé de ne pas regrouper ces deux pins sous une seule et même composition. L'étude des châtaigniers du SO montre en revanche que la localisation des châtaigneraies pures et mélangées est identique. De plus, il a été vérifié que le nombre de plantations identifiées par l'IGN de châtaigniers purs n'est pas élevé. Il a donc été choisi de regrouper ces deux types.

Ce travail a permis d'identifier 27 types de composition différents, sans compter les trois grands types agrégés (feuillus résineux et mixtes ; **Tableau 4.1**). Entre 4 (GRECO GO et Co) et 11 (GRECO MC) types de compositions ont été identifiés pour chaque GRECO. La surface totale représentée par ces types se situe entre 51,8 (GRECO Py) et 76,2% (GRECO SO) de la surface totale des GRECO. Certaines compositions ont été identifiées dans de nombreuses GRECO et représentent donc une part importante de la forêt française. C'est le cas des types « pur chêne sessile » (identifié dans les GRECO GO, CN, GE, Vo et MC) et « mélange de

chêne pédonculé et autre(s) feuillu(s) » (identifié dans les GRECO GO, CN, GE, SO, MC et Py). Au contraire, d’autres compositions sont spécifiques à une seule GRECO comme le « pur mélèze » dans les Alpes et le « pur Douglas » dans le Massif Central. Enfin, certains types sont spécifiques à un seul type de GRECO comme les peuplements purs d’épicéa dans les GRECO montagnardes hors Pyrénées (Vo, Ju, MC et Al).

GRECO	Abréviation	Composition	Surface (x10 <sup>3</sup> ha)	Part dans la surface totale de la GRECO (%)	Volume (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Grand-Ouest Cristallin et Océanique	GO	Chêne pédonculé et autre(s) feuillu(s)	137,6	23,7	20,8
		Pur chêne pédonculé	70,2	12,1	10,5
		Pur pins	55,8	9,6	10,2
		Pur chêne sessile	42,0	7,2	8,9
		Pur chêne sessile	422,6	16,1	96,2
Centre Nord semi- océanique	CN	Chêne pédonculé et autre(s) feuillu(s) (autre que frêne et charme)	345,5	13,1	55,7
		Frêne pur ou avec feuillu(s)	327,5	12,5	59,7
		Charme pur ou avec chêne(s) (et autre(s) feuillu(s))	292,2	11,1	55,1
		Pur chêne pédonculé	256,9	9,8	44,6
		Pur pins	185,9	7,1	37,0
Grand Est semi- continental	GE	Charme pur ou avec chêne(s) (et autre(s) feuillu(s))	344,3	17,2	59,5
		Hêtre pur ou avec chêne sessile (et autre(s) feuillu(s))	317,0	15,8	64,7
		Frêne pur ou avec feuillu(s)	308,2	15,4	61,6
		Chêne pédonculé et feuillu(s) (autre que frêne et charme)	175,8	8,8	30,3
		Pur chêne sessile	144,7	7,2	27,9
Vosges	Vo	Hêtre et sapin et/ou épicéa (et autre(s))	72,6	13,3	21,8
		Pur sapin	66,1	12,1	22,2
		Pur hêtre	63,6	11,7	16,1
		Pur épicéa	51,8	9,5	19,8
		Mélange sapin et épicéa	33,3	6,1	11,4
		Hêtre et chêne sessile (et autre(s) feuillu(s))	32,3	5,9	8,9
		Pur chêne sessile	25,5	4,7	6,5
Jura	Ju	Hêtre et sapin et/ou épicéa (et autre(s))	102,6	21,7	30,0
		Frêne pur ou avec feuillu(s)	82,9	17,5	14,5
		Pur épicéa	46,4	9,8	16,0
		Pur hêtre	32,1	6,8	8,0
		Pur sapin	31,7	6,7	12,7
		Mélange sapin et épicéa	28,0	5,9	9,9

Tableau 4.1. Compositions identifiées par GRECO

GRECO	Abréviation	Composition	Surface (x10 <sup>3</sup> ha)	Part dans la surface totale de la GRECO (%)	Volume (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Sud-Ouest océanique	SO	Pur pin maritime	601,2	29,6	75,6
		Pur chêne pubescent	370,7	18,2	38,0
		Châtaignier pur ou avec feuillu(s)	204,2	10,1	32,4
		Chêne pédonculé et feuillu(s) (autre que châtaignier)	203,6	10,0	31,6
		Pur chêne pédonculé	169,0	8,3	26,3
		Chêne pédonculé et feuillu(s) (autre que châtaignier)	258,2	10,0	47,2
		Châtaignier pur ou avec feuillu(s)	254,4	9,8	41,7
Massif Central	MC	Pur douglas	173,9	6,7	54,7
		Pin sylvestre et feuillu(s)	161,5	6,2	25,6
		Pur pin sylvestre	157,0	6,1	25,4
		Pur hêtre	138,5	5,3	31,7
		Pur chêne pédonculé	124,0	4,8	23,9
		Pur chêne pubescent	114,2	4,4	7,6
		Pur épicéa	107,2	4,1	34,2
		Pur chêne sessile	103,7	4,0	20,2
		Pur sapin	102,3	3,9	41,3
		Alpes	Al	Pur pin sylvestre	200,7
Pin sylvestre et feuillu(s)	120,3			10,5	12,0
Hêtre et sapin et/ou épicéa (et autre(s))	105,0			9,2	33,3
Pur chêne pubescent	76,2			6,7	3,9
Pur hêtre	73,4			6,4	15,4
Pur épicéa	68,1			5,9	25,1
Pur mélèze	61,6			5,4	12,4
Pur pin noir	48,8			4,3	6,8
Pyrénées	Py	Pur hêtre	131,8	19,1	27,5
		Frêne pur ou avec feuillu(s)	92,2	13,4	13,1
		Pur chêne pubescent	46,2	6,7	3,6
		Chêne pédonculé et feuillu(s) (autres que frêne)	44,9	6,5	8,3
		Pur sapin	42,0	6,1	14,0

Tableau 4.1. Compositions identifiées par GRECO (suite)

GRECO	Abréviation	Composition	Surface (x10 <sup>3</sup> ha)	Part dans la surface totale de la GRECO (%)	Volume (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Méditerranée	Me	Pur chêne vert	255,8	22,9	8,7
		Pur chêne pubescent	189,2	16,9	11,3
		Chêne(s) et pin	155,5	13,9	11,6
		Pur pin d'Alep	138,7	12,4	10,7
		Chêne vert et pubescent	94,0	8,4	4,7
Corse	Co	Chêne vert et feuillu(s)	95,3	28,2	8,1
		Pur chêne vert	82,1	24,3	7,4
		Pur pin laricio	23,8	7,0	7,2
		Pur pin maritime	23,1	6,8	5,5

**Tableau 4.1. Compositions identifiées par GRECO (fin)**

### 2.1.2 Essai d'homogénéisation des informations de composition en essence des points d'inventaire entre l'ancienne et la nouvelle méthode d'inventaire

Cette démarche est présentée en **Annexe IV.2**.

L'analyse montre qu'il n'est pas possible d'utiliser l'information IMPESS collectée en ancienne méthode pour « reconstruire » des compositions compatibles avec celles de la NM. **Ce résultat nous a conduits à considérer l'information d'essence à l'échelle de l'arbre (donnée exacte) et non du point.**

Finalement, la stratégie a consisté à reprendre la partition constituée sur les surfaces forestières en la transposant aux volumes. L'**Annexe IV.1** montre que cette transposition est aisée. Pour chaque GRECO, nous nous sommes donc appuyés sur les compositions identifiées en 1.1 afin de sélectionner les essences **dominantes en stock dans les forêts françaises, et avec une homogénéité garantie entre méthodes (Tableau 4.2)**. **Dans chaque GRECO, les essences non dominantes sont regroupées en « divers feuillus » et « divers résineux »**. Les trois essences les plus représentées pour chaque GRECO dans ces deux classes ont été identifiées (**Tableau 4.3**). Parmi les feuillus, on y retrouve régulièrement le châtaignier (GRECO GO, CN, Al, Py, Me et Co), le bouleau dans la moitié Nord (GRECO GO, CN, GE et MC) ainsi que divers chênes (chêne sessile, pédonculé, tauzin et chêne-liège). Parmi les résineux, le Douglas est très présent (GRECO GO, CN, Vo, Ju, SO et Me).

2 – Analyses techniques préliminaires

GRECO	Abréviation de la GRECO	Essences dominantes			
		Feuillus	Volume (x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Résineux	Volume (x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Grand-Ouest Cristallin et Océanique	GO	Chêne pédonculé	23	Pins (pin laricio, pin maritime, pin sylvestre)	18
		Chêne sessile	12		
		Hêtre	8		
Centre Nord semi-océanique	CN	Chêne sessile	163	Pins (pin laricio, pin maritime, pin noir, pin sylvestre)	67
		Chêne pédonculé	119		
		Charme	44		
		Hêtre	39		
		Frêne	30		
Grand Est semi-continental	GE	Chêne sessile	58		
		Hêtre	53		
		Chêne pédonculé	44		
		Charme	38		
		Frêne	20		
Vosges	Vo	Hêtre	32	Sapin	38
		Chêne sessile	16	Epicéa	31
		Chêne pédonculé	7		
Jura	Ju	Hêtre	26	Epicéa	38
		Frêne	9	Sapin	34
Sud-Ouest océanique	SO	Chêne pédonculé	49	Pin maritime	99
		Chêne pubescent	42		
		Châtaignier	28		
Massif Central	MC	Chêne pédonculé	55	Douglas	67
		Hêtre	55	Sapin	66
		Chêne sessile	42	Pin sylvestre	52
		Châtaignier	39	Epicéa	49
		Chêne pubescent	17		
Alpes	Al	Hêtre	37	Epicéa	61
		Chêne pubescent	16	Pin sylvestre	39
				Sapin	36
Pyrénées	Py			Mélèze	20
		Hêtre	37	Pin noir	11
		Chêne pédonculé	22	Sapin	17
		Chêne pubescent	11		
Méditerranée	Me	Frêne	9	Pins (pin d'Alep, pin à crochets, pin laricio, pin maritime, pin noir, pin pignon, pin sylvestre)	37
		Chêne pubescent	18		
		Chêne vert	15		
Corse	Co	Chêne vert	14	Pin laricio	9
				Pin maritime	9

**Tableau 4.2. Essences dominantes en stock dans les forêts françaises identifiées par GRECO. Les essences non dominantes ont été regroupées en deux groupes génériques de résineux et feuillus.**

GRECO	Abréviation de la GRECO	Divers feuillus	Divers résineux
		Essence	Essence
Grand-Ouest Cristallin et Océanique	GO	Châtaignier Bouleau Tremble	Douglas Epicéa de Sitka Sapin pectiné
Centre Nord semi-océanique	CN	Châtaignier Bouleau Tremble	Douglas Epicéa commun Sapin pectiné
Grand Est semi-continental	GE	Grand érable Petit érable Bouleau	Epicéa commun Sapin pectiné Pin sylvestre
Vosges	Vo	Frêne Charme Grand érable	Pin sylvestre Douglas Mélèze d'Europe
Jura	Ju	Chêne sessile Charme Chêne pédonculé	Pin sylvestre Pin noir Douglas
Sud-Ouest océanique	SO	Charme Chêne sessile Chêne tauzin	Pin sylvestre Pin laricio Douglas
Massif Central	MC	Frêne Bouleau Charme	Pin laricio Epicéa de Sitka Pin maritime
Alpes	Al	Châtaignier Frêne Chêne sessile	Pin à crochets Pin d'Alep Pin cembro
Pyrénées	Py	Châtaignier Chêne sessile Robinier faux acacia	Pin à crochets Pin sylvestre Epicéa commun
Méditerranée	Me	Châtaignier Hêtre Chêne-liège	Sapin pectiné Douglas Epicéa commun
Grand-Ouest Cristallin et Océanique	Co	Châtaignier Hêtre Arbousier	Pin d'Alep Genévrier thurifère Sapin pectiné

**Tableau 4.3. Trois principales essences en stock des classes « divers feuillus » et « divers résineux » de chaque GRECO.**

## 2.2 Comparaison des prélèvements entre ancienne et nouvelle méthode

Le changement de méthode d'inventaire en 2005 a entraîné la mise en place d'un nouveau protocole de relevé des arbres prélevés, **fondé sur une adaptation radicale du plan de sondage, liée au caractère temporaire depuis l'origine des points d'inventaire :**

- L'ancien protocole (P\_AM) consistait à relever les souches des arbres considérés comme ayant été prélevés dans les cinq dernières années précédant l'inventaire des points temporaires, d'après une estimation visuelle de l'âge des souches. **Bien qu'imparfaite et subjective, cette méthode est la seule possible pour un sondage temporaire,**
- Le nouveau protocole (P\_NM) repose toujours sur un inventaire à placettes temporaires totalement renouvelées chaque année, mais **la différence majeure est d'opérer un retour sur les points de sondage cinq ans après le premier levé, afin d'inventorier les arbres qui ont été** effectivement prélevés dans l'intervalle (points semi-permanents). C'est donc à un inventaire exact des flux de prélèvement qu'il est procédé.

**L'analyse effectuée consiste à comparer le nombre de tige prélevé issus des deux protocoles, sur un même système de point d'inventaires (NM).** Cependant, alors que P\_AM se focalise sur les cinq années qui précèdent le relevé du point, P\_NM prend en compte les prélèvements effectués lors des cinq années qui suivent le relevé du point. **Il y a donc nécessité de comparer ces protocoles sur des domaines forestiers statistiques assez larges,** en se fondant sur l'hypothèse que la quantité de prélèvements, calculée sur un domaine spatial large (*e.g.* à l'échelle du pays ou de la GRECO) est relativement constante sur une période courte (10 ans).

L'analyse est présentée en **Annexe IV.3.**

**Les résultats montrent une forte corrélation entre les prélèvements estimés par les deux méthodes. Cependant, les prélèvements du protocole P\_NM sont 2,4 fois plus élevés que ceux du protocole P\_AM.** De plus, la corrélation diminue quand l'étude est stratifiée par type de propriété. Ces fortes variations lorsque l'on stratifie par type de propriété et GRECO montre que cette donnée est peu précise et qu'**il est impossible d'utiliser la variable de prélèvement qui est trop biaisée.** Il est donc indispensable d'estimer ces prélèvements par une autre méthode. Nous utiliserons par la suite un bilan de flux pour calculer les prélèvements (cf. 3.2.3).

### **3 Matériel et méthodes**

La démarche d'analyse est présentée en **Figure 4.2.**

#### **3.1 Choix du matériel d'étude**

Notre analyse a été effectuée sur l'inter-cycle défini par les deux premiers inventaires AM disponibles directement en base (*i.e.* hors « archeodendro » et « paleodendro » ; voir partie II - 2.1 ; **Figure 4.3**).

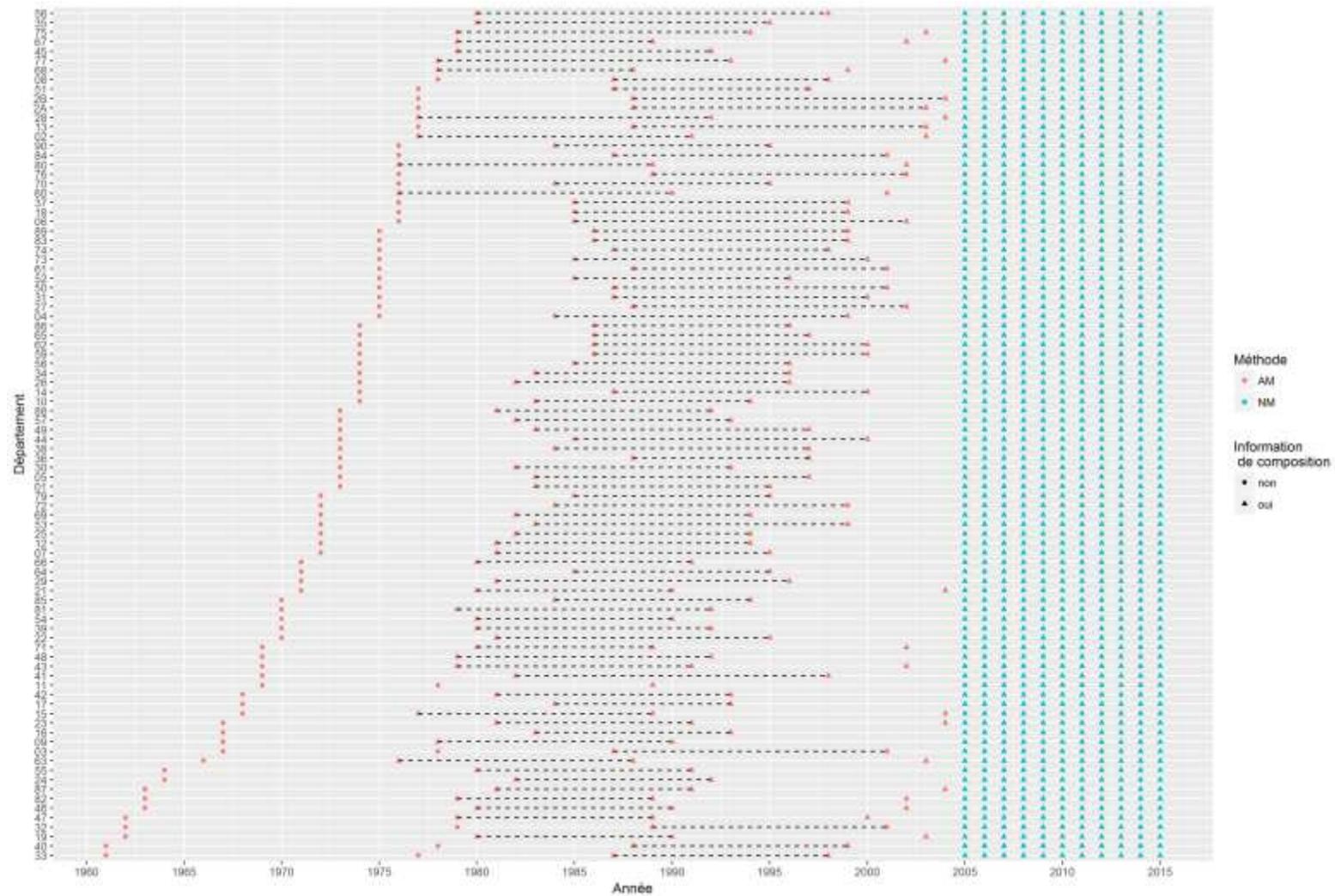
Il a été choisi de travailler sur cette période éloignée, car une analyse parallèle de l'évolution temporelle des flux de bois, se basant sur la comparaison des flux calculés à partir de ces cycles et ceux calculés à partir du dernier cycle AM et du premier cycle NM (forme de dernier inter-cycle disponible), était envisagée (*i.e.* les deux périodes disponibles directement en base les plus éloignées dans le temps). L'étude n'a pu être effectuée, faute de temps.

Comme présenté en 1.2, l'analyse a été effectuée à deux niveaux : sans (niveau 1) ou avec (niveau 2) prise en compte des essences. Les essences utilisées sont les essences identifiées en 2.1.2. L'inventaire forestier historique est un inventaire départemental désynchronisé. **C'est pourquoi les flux restent fondamentalement calculés au niveau des départements.** Chaque département a cependant été rattaché à une approximation de la partition des GRECO (voir partie II - 3.1), l'analyse se fera à ce niveau. Cela permet de diminuer le nombre de strates étudiées (90 départements IFN contre 11 GRECO) et d'avoir une meilleure lisibilité des variations en fonction de conditions écologiques. Les individus statistiques étudiés sont donc représentés par un département et un type de propriété (et une essence au niveau 2). Ces individus sont regroupés en strates définies par une GRECO et un type de propriété (et une essence au niveau 2).

L'année moyenne du début de la période d'étude est 1983 et l'année de fin 1995 (**Tableau 4.4**). La durée moyenne de la période est de 12,5 ans. Seul le département de l'Aude ne comporte qu'un cycle d'inventaire et n'a donc pas pu être étudié.

	<b>moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>
Année début	1982,9	3,5
Année fin	1995,3	4,2
Durée	12,5 ans	2,1

**Tableau 4.4. Statistiques temporelles sur la période d'étude**



**Figure 4.3. Années d’inventaire IFN des départements français et identification de la méthode d’inventaire et de l’existence d’information sur la composition.** Ligne en pointillés : période étudiée dans la présente étude. Les départements 75, 78, 91, 92, 93, 94 et 95 sont regroupés sous le numéro 75

### 3.2 Calcul des flux de bois en surface terrière

L’étude a été effectuée, pour chaque département  $i$ , entre deux dates,  $t_{1i}$  et  $t_{2i}$ . Quatre flux de surface terrière (croissance, recrutement, mortalité et prélèvement) ont été calculés entre ces deux dates. Le flux de croissance correspond à l’augmentation de surface terrière des arbres déjà présents et inventoriés (*i.e.* dont le diamètre à 1,30m est supérieur ou égal à 7,5 cm) au début de l’inter-cycle (à  $t_{1i}$ ). Le recrutement est l’apport de surface terrière des nouveaux arbres (*i.e.* les arbres qui avaient un diamètre à 1,30m inférieur à 7,5 cm à  $t_{1i}$ ). La mortalité et les prélèvements représentent des diminutions de surface terrière d’arbres vifs, associées respectivement à la mort ou au prélèvement d’un ou plusieurs arbres pendant la période. Tous les flux sont calculés sur écorce.

L’inventaire forestier français est non permanent, ainsi, l’état à  $t_{1i}$  des arbres inventoriés à  $t_{2i}$  est inconnu et doit être estimé à partir des données relevées à  $t_{2i}$ . Ces données décrivent les 5 ou 10 années précédant l’inventaire et ne couvrent en général pas l’ensemble de la période étudiée (12,5 ans en moyenne ; **Tableau 4.4**). Une estimation de ces données sur la période non couverte a dû être effectuée à partir d’une moyenne entre la donnée relevée à  $t_{2i}$  sur l’arbre étudié et la valeur moyenne de cette donnée sur les arbres à  $t_{1i}$  de même catégorie (méthode inspirée de Pignard, 1994).

#### 3.2.1 Flux de Croissance et recrutement en surface terrière

Afin de calculer les flux de croissance et de recrutement, pour chaque arbre  $j$  du département  $i$ , les diamètres sur écorce à  $t_{1i}$  ( $d_{t_{1i},ij}$ ) des arbres présents à  $t_{2i}$  ont dû être calculés. Pour cela, il a fallu retrancher au diamètre sur écorce de chaque arbre à  $t_{2i}$  ( $d_{t_{2i},ij}$ ) l’accroissement radial de l’arbre pendant la période  $t_{2i}-t_{1i}$  ainsi que l’accroissement de l’épaisseur de son écorce.

L’accroissement de l’écorce n’est pas renseigné par l’IFN. Une modélisation a permis, pour chaque essence, de relier l’épaisseur de l’écorce ( $ec$ ) au diamètre ( $d_{13}$ ) à 1,30m (**Annexe IV.4**).

$$\ln(ec) = a + b \ln(d_{13}) \quad (1)$$

Le diamètre sous écorce ( $d_{t_{2i},ij}^{sec}$ ) de l’arbre a alors été calculé à partir de son diamètre à 1,30m et l’épaisseur de son écorce ( $ec_{t_{2i},ij}$ ):

$$d_{t_{2i},ij}^{sec} = d_{t_{2i},ij} - 2 ec_{t_{2i},ij} \quad (2)$$

Une information d’accroissement radial de l’arbre est relevée par l’IFN (IR). Ces IR sont mesurés sur les 5 et 10 dernières années (respectivement IR5 et IR10), ce qui ne couvre généralement pas la période étudiée (en moyenne 12,5 ans ; **Tableau 4.4**). On a donc choisi d’utiliser l’IR10, couvrant une période de temps plus grande, et d’estimer l’accroissement

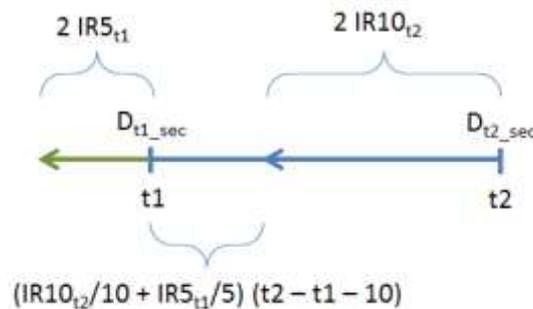
radial sur le reste de la période lorsque celle-ci était plus large que 10 ans. L'estimation est effectuée en combinant une méthode d'imputation conditionnelle et une interpolation. Ainsi, est calculée la moyenne entre l'IR5 à  $t_1$  ( $IR5_{t1ij}$ ) des arbres appartenant à la même essence, au même département, à la même propriété foncière et à la même classe de diamètre que l'arbre étudié et l'IR10 à  $t_2$  de l'arbre ( $IR10_{t2ij}$ ). Dans le cas où une telle moyenne n'était pas calculable car aucun arbre de même catégorie n'était relevé, la catégorie a été élargie en supprimant d'abord le critère de classe de diamètre, puis celui d'essence si nécessaire. Pour chaque arbre  $j$ , le diamètre sous écorce à  $t_1$  ( $d_{t1\_sec,ij}$ ) a ainsi été calculé à partir de  $d_{t2\_sec,ij}$ .

Si  $t_2 - t_1 < 10$  :

$$d_{t1\_secij} = d_{t2\_secij} - 2 \frac{IR10_{t2ij}}{10} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

Si  $t_2 - t_1 \geq 10$  (**Figure 4.4**) :

$$d_{t1\_secij} = d_{t2\_secij} - 2 IR10_{t2ij} - \left( \frac{IR10_{t2ij}}{10} + \frac{IR5_{t1ij}}{5} \right) (t_2 - t_1 - 10) \quad (4)$$



**Figure 4.4.** Schéma du calcul du diamètre sous écorce à  $t_1$  ( $dt1\_sec$ ) d'un arbre donné à partir du diamètre sous écorce à  $t_2$  ( $dt2\_sec$ ) lorsque la période  $t_2-t_1$  est supérieure à 10 ans. L'IR10 $t_2$  correspond à l'IR10 à  $t_2$  de l'arbre étudié. L'IR5 $t_1$  correspond à la moyenne de l'IR5 des arbres présents à  $t_1$  appartenant à la même essence, au même département, à la même propriété foncière et à la même classe de diamètre que l'arbre étudié

Dans le cas où ni l'IR5, ni l'IR10 n'étaient renseignés, l'IRN (accroissement radial sur N années, N étant inférieur à 5) a été utilisé (**Annexe IV.5**)

Enfin,  $d_{t1ij}$  a été calculé grâce à la relation (1) :

$$d_{t1ij} = d_{t1\_secij} + 2 e^{a+b \ln(d_{t1\_secij})} \quad (5)$$

Un  $d_{t1ij}$  inférieur à 7,5 cm (limite de recensabilité de l'arbre) correspond à un arbre qui a été recruté sur la période. Le flux de recrutement correspond donc à la surface terrière à  $t2_i$  de ces arbres qui ont un  $d_{t1ij}$  inférieur à 7,5 cm.

$$Rt = \sum \pi \frac{d_{t2ij}^2}{4} \quad (6)$$

Si  $d_{t1ij}$  est supérieur à 7,5 cm, l'arbre n'a pas été recruté sur la période. Le flux de croissance est donc défini comme l'accroissement de surface terrière de ces arbres.

$$CR = \sum \pi/4 (d_{t2ij}^2 - d_{t1ij}^2) \quad (7)$$

### 3.2.2 Flux de Mortalité en surface terrière

Selon le protocole d'inventaire, les arbres morts sont relevés seulement s'ils sont réputés être morts dans les 5 dernières années. **La présence de ces arbres, et la faible taille de ce flux, rend cette estimation moins erratique que celle des prélèvements, bien que la question d'une appréciation subjective pose aussi question.** Cependant, seule la circonférence à la base ( $C_0$ ) est relevée. Une modélisation a permis de relier, pour chaque essence, la circonférence à la base à celle à 1,30 m ( $C_{13}$ ; **Annexe IV.4**) :

$$\ln(C_{13}) = a + b \ln(C_0) \quad (8)$$

Au même titre que l'accroissement radial de l'arbre, les cinq ans ne couvrent pas la totalité de la période d'étude. Une interpolation entre la mortalité sur les 5 années avant  $t2_i$  et celle sur les cinq années avant  $t1_i$  a donc été effectuée afin d'estimer la mortalité sur la période d'étude non couverte par l'estimation de la mortalité à  $t2_i$ . La mortalité ( $Mt$ ), surface terrière des arbres qui sont morts entre  $t1_i$  et  $t2_i$  et qui n'ont pas été prélevés, correspond donc à la mortalité relevée sur le terrain sur les 5 années avant  $t2_i$  et la mortalité calculée sur le reste de la période.

La mortalité à  $t1_i$  a à nouveau été estimée par imputation conditionnelle, en effectuant une moyenne de la mortalité dans chaque classe département x année d'inventaire x propriété x essence. Dans le cas où une telle moyenne n'était pas calculable car aucun arbre de même classe n'était relevé, la catégorie a été élargie en enlevant d'abord le critère d'essence puis celui de propriété si nécessaire.

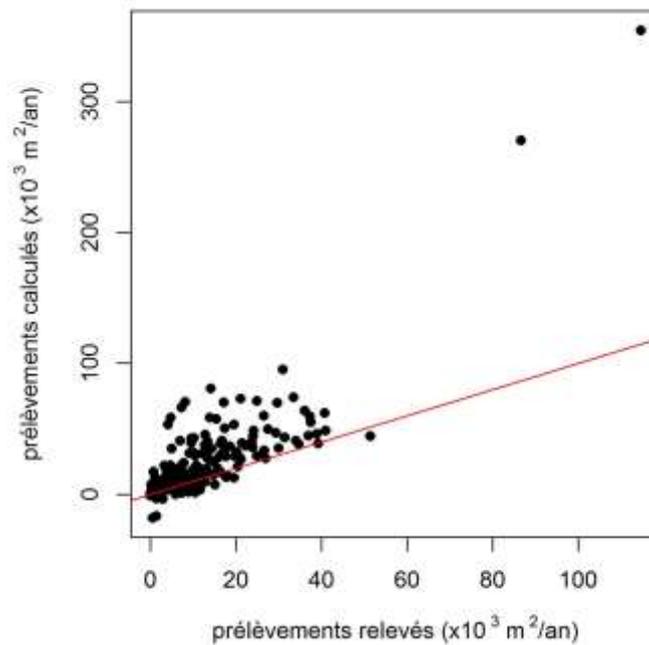
### 3.2.3 Flux de prélèvement en surface terrière

Les prélèvements mesurés par l'inventaire avant la mise en place des retours sur points sont sous-estimés (Annexe IV.3). **Il faut donc reconstituer ces prélèvements, ce qui signifie être le plus précis possible sur l'estimation des autres flux dans le bilan du stock en surface terrière.** Sachant que l'on connaît la surface terrière à  $t_{1i}$  et à  $t_{2i}$  (respectivement,  $G_{t_{1i}}$  et  $G_{t_{2i}}$ ), il est possible, par un bilan de conservation de la matière sur écorce d'obtenir une estimation des prélèvements ( $P_t$ ) effectués sur la période :

$$G_{t_{2i}} = G_{t_{1i}} + CR + Rt - Mt - Pt \quad (9)$$

$$Pt = G_{t_{1i}} + CR + Rt - Mt - G_{t_{2i}} \quad (10)$$

Les prélèvements en surface terrière, calculés à partir de la méthode du bilan ont été comparés à ceux relevés directement sur le terrain. La corrélation entre les deux au niveau département x propriété est de 0,86 (Figure 4.5). **Une régression linéaire a montré que les flux calculés sont 2,2 fois plus élevés que ceux relevés.** Ces résultats rappellent ceux issus de la comparaison des prélèvements en nombre de tiges relevés par les protocoles AM et NM et confortent ainsi nos résultats (Annexe IV.3).



**Figure 4.5. Comparaison entre les prélèvements en surface terrière ( $m^2$ ) calculés par la méthode du bilan et ceux relevés sur le terrain par l'inventaire. La droite rouge est la droite de la fonction identité.**

### 3.2.4 Standardisation des flux de bois en taux démographiques

L'inventaire AM étant désynchronisé et la durée d'un inter-cycle étant non constante, il a été décidé de travailler avec des flux annualisés afin de pouvoir les comparer entre eux.

Pour pouvoir comparer les différents flux entre strates, il a été décidé de standardiser les flux (flux relatifs). Ainsi, les flux ont été rapportés à la surface forestière initiale de la strate pour les variations de surface forestière (var\_surf\_S1 ; **Tableau 4.5**), à la surface terrière initiale pour la croissance (CR\_G1), le prélèvement (Pt\_G1) et la mortalité (Mt\_G1) ou aux deux quantités pour le recrutement (notés Rt\_S1 pour le recrutement rapporté à la surface forestière initiale et Rt\_G1 pour celui rapporté à la surface terrière initiale de la strate) qui est un flux pouvant dépendre de l'extension des surfaces forestières.

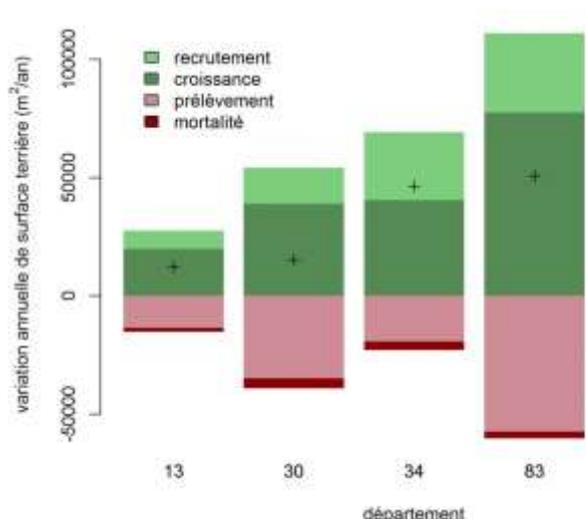
Code flux	Flux de bois
CR_G1	Croissance rapportée à la surface terrière initiale
Pt_G1	Prélèvement rapporté à la surface terrière initiale
Mt_G1	Mortalité rapportée à la surface terrière initiale
Rt_G1	Recrutement rapporté à la surface terrière initiale
Rt_S1	Recrutement rapporté à la surface forestière initiale
var_surf_S1	Variation de surface forestière rapportée à la surface forestière initiale

**Tableau 4.5. Codification des flux de bois relatifs annualisés utilisés dans l'étude.** En gris : les deux flux non étudiés au niveau 2 de l'analyse (niveau prenant en compte les essences d'arbres).

### 3.3 Représentation des flux de bois, problème des prélèvements négatifs

Les flux de bois ont été représentés par des diagrammes en barres. Leur position par rapport à l'horizontale indique leur signe, afin d'apprécier visuellement l'équilibre entre les flux d'augmentation et de diminution du stock de bois.

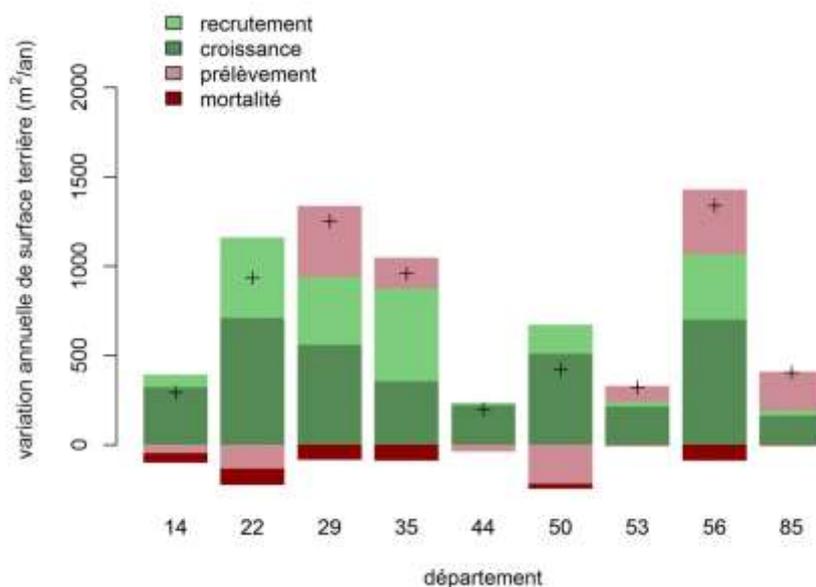
Ces diagrammes montrent que parmi tous les flux de bois, la mortalité est généralement le plus faible et, parmi les flux positifs, les recrutements sont généralement plus faibles que la croissance (exemple **Figure 4.6**).



**Figure 4.6.** Un exemple de diagramme de flux de bois pour les forêts privées de la GRECO méditerranéenne. (+) indique le sens de variation du stock de bois sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

L'ensemble des diagrammes sont présentés en **Annexe IV.6**.

**Pour plusieurs individus de l'analyse, il a été possible d'identifier des prélèvements de signe négatif** (représentés alors du côté des flux positifs sur les diagrammes ; exemple **Figure 4.7**), ces derniers n'étant pas estimés directement, mais par la fermeture d'un **bilan matière**. Cela constitue une aberration et a donc nécessité une étude approfondie afin de comprendre leur origine.



**Figure 4.7.** Diagramme des flux pour les forêts communales de la GRECO Grand Ouest. (+) représente la variation de surface terrière de la strate sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

Afin de mieux comprendre l'origine des flux de prélèvement négatifs, une analyse de leur occurrence a été effectuée (**Tableau 4.6**). On remarque que les prélèvements négatifs ne s'observent pas dans toutes les GRECO, mais essentiellement dans le Grand-Ouest (18,5% des couples département – propriété présentent des prélèvements négatifs ; **Tableau 4.6**) et Corse (66,7%).

Parmi les types de propriété, **les forêts communales présentent plus de prélèvements négatifs (14.6%) que les domaniales (3,4%) et les privées (2,2%). Une première hypothèse serait de supposer un lien avec la soumission des forêts communales au régime forestier.** En effet, ne sont catégorisées « forêts communales » que les forêts communales soumises effectivement à la date d'inventaire. La soumission éventuelle de forêts entre les dates  $t_{1i}$  et  $t_{2i}$ , par le transfert de forêt depuis les strates « forêt privée » vers « forêt communale », entraîne une augmentation de stock de surface terrière provenant de forêts n'étant pas inventoriées dans cette catégories à  $t_{1i}$ . Le stock sur pied à  $t_{1i}$  correspondant à celui observé à  $t_{2i}$ ,  $G'_{t_{1i}}$  serait donc égal à  $G_{t_{1i}} + \alpha$ ,  $\alpha$  correspondant à la surface terrière ajoutée par soumission. Ainsi, si l'on note  $Pt'$  les prélèvements réels et  $Pt$  les prélèvements sous hypothèse de stabilité de la propriété, on obtient :

$$Pt' = G'_{t_{1i}} + CR + Rt - Mt - G_{t_{2i}} \quad (11)$$

$$Pt' = G_{t_{1i}} + \alpha + CR + Rt - Mt - G_{t_{2i}} = Pt + \alpha \quad (12)$$

$$Pt = Pt' - \alpha \quad (13)$$

A la condition que  $\alpha > Pt'$ , les prélèvements peuvent devenir négatifs.

La forte occurrence de prélèvements négatifs en Corse (66,7%) et en méditerranée (6,7%) **conduit à une seconde hypothèse, qui serait que ces prélèvements négatifs seraient, en partie, causés par une sous-estimation de la croissance radiale du chêne vert par les mesures sur le terrain**, dont la lecture des cernes reste très difficile au point que les mesures de cernes viennent d'être abandonnées pour cette espèce (Mérian et Hervé, 2014). La croissance radiale est utilisée dans le calcul du flux de croissance et de recrutement. Ainsi, si l'on note  $CR'$  et  $Rt'$ , respectivement, la croissance et le recrutement réels, et  $\beta$  la différence de surface terrière associée à la sous-estimation des mesures de terrain, on a :

$$CR' + Rt' = CR + Rt + \beta \quad (14)$$

De même que précédemment, on obtient :

$$Pt' = G_{t_{1i}} + CR' + Rt' - Mt - G_{t_{2i}} \quad (15)$$

$$Pt' = G_{t1i} + CR + Rt + \beta - Mt - G_{t2i} \quad (16)$$

$$Pt = Pt' - \beta \quad (17)$$

A la condition que  $\beta > Pt'$ , les prélèvements peuvent devenir négatifs.

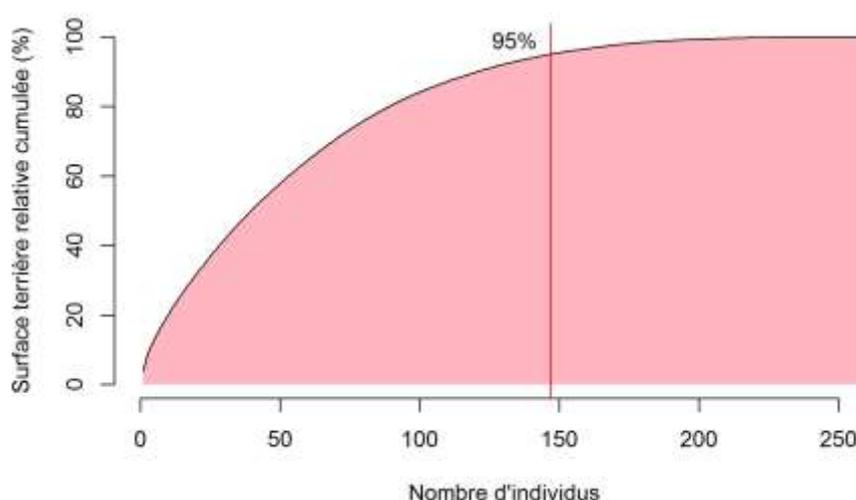
Au vu de la proportion très importante de prélèvements négatifs en Corse (**Tableau 4.6 ; Annexe IV.6**), il a été décidé d'écarter cette GRECO de notre étude par la suite.

GRECO	Propriété (% GRECO)			Total (%)	Essences principales (part du volume dans la GRECO)
	Domanial	Communal	Privé		
Grand-Ouest	0	55.5	0	18.5	Chêne pédonculé (21.0%) Chêne sessile (11.2%) Pins (17.1%) Châtaignier (11.0%)
Centre Nord	0	20.83	0	6.9	Chêne sessile (26.0%) Chêne pédonculé (18.9%) Pins (10.6%)
Grand-Est	0	0	0	0	Chêne sessile (17.9%) Hêtre (16.5%) Chêne pédonculé (13.5%) Charme (11.8%)
Vosges	0	0	0	0	Sapin pectiné (22.4%) Hêtre (18.8%) Epicéa commun (18.0%)
Jura	0	0	0	0	Epicéa commun (22.8%) Sapin pectiné (20.7%) Hêtre (15.6%)
Sud-Ouest	10	10	0	6.7	Pin maritime (35.9%) Chêne pédonculé (17.6%) Chêne pubescent (15.4%)
Massif Central	8.3	0	0	2.6	Douglas (12.4%) Sapin pectiné (12.3%) Chêne pédonculé (11.02%) Hêtre (10.3%) Pin sylvestre (9.7%)
Alpes	0	0	0	0	Epicéa commun (21.1%) Pin sylvestre (13.4%) Hêtre (12.9%) Sapin pectiné (12.5%)
Pyrénées	0	0	0	0	Hêtre (24.3%) Chêne pédonculé (14.6%) Sapin pectiné (11.3%)
Méditerranée	0	20	0	6.7	Chêne pubescent (16.0%) Pins (32.6%) Chêne vert (12.9%)
Corse	50	50	100	66.7	Chêne vert (29.3%) Pin maritime (19.8%) Pin laricio (18.9%)
Total	3.4	14.6	2.2	6.8	

**Tableau 4.6. Occurrence des prélèvements négatifs par GRECO et propriété. Les flux sont calculés au niveau des individus département x propriété. L'occurrence est calculée en pourcentage du nombre de fois qu'un prélèvement négatif est observé dans la strate GRECO x propriété.**

### 3.4 Analyse de la variabilité intra-strate des flux de bois en fonction de la taille des strates de l'analyse et sélection des individus

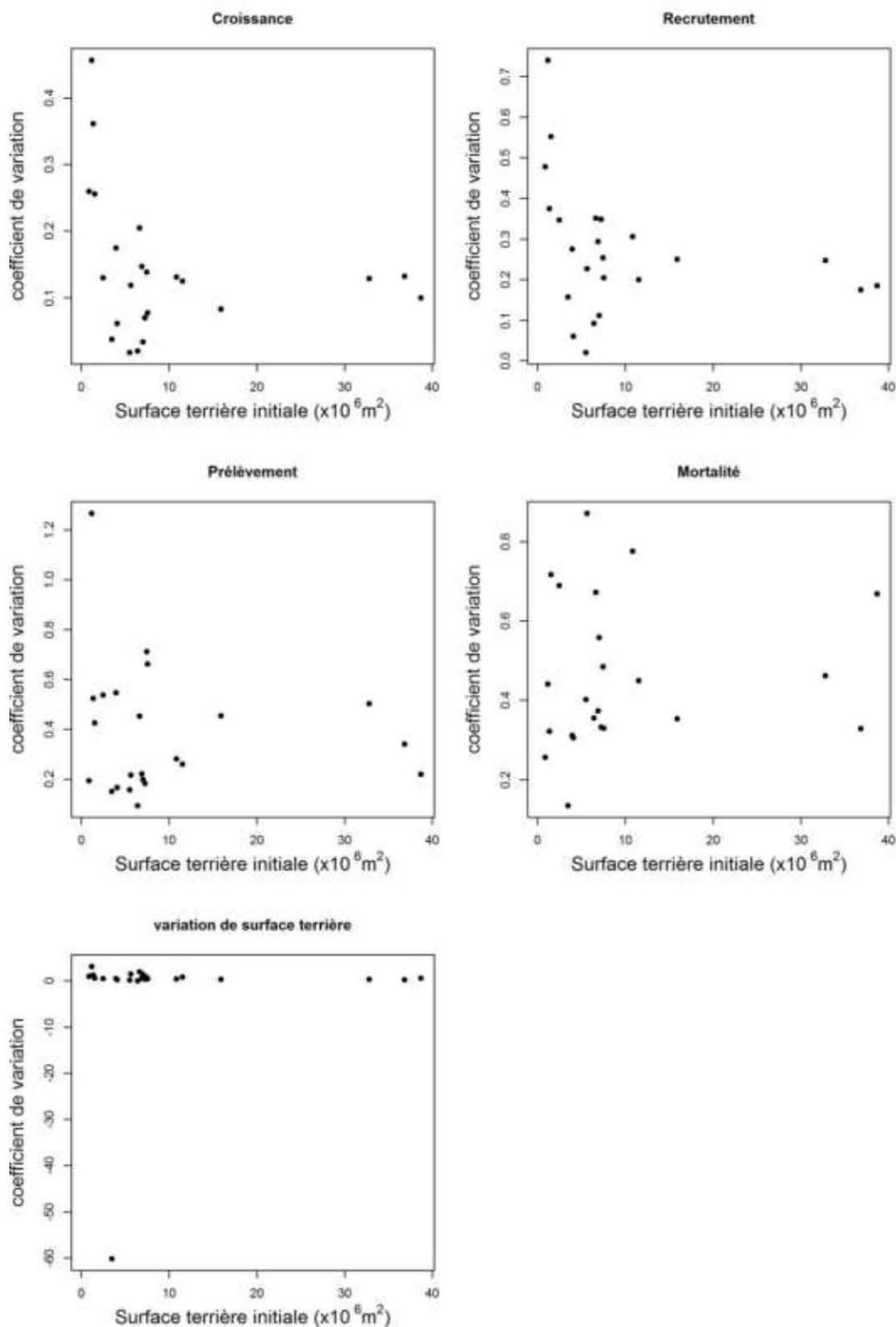
La surface terrière totale des individus département – propriété a été calculée. La distribution du pourcentage cumulé de la surface terrière des individus rangés par taille décroissante montre une forte queue de distribution constituée d'individus ayant une part très faible dans la surface terrière initiale totale (**Figure 4.8**). Cette faible « taille » peut avoir un effet sur nos calculs de flux si elle est trop faible, lié à la taille du domaine statistique couvert par les points d'inventaire.



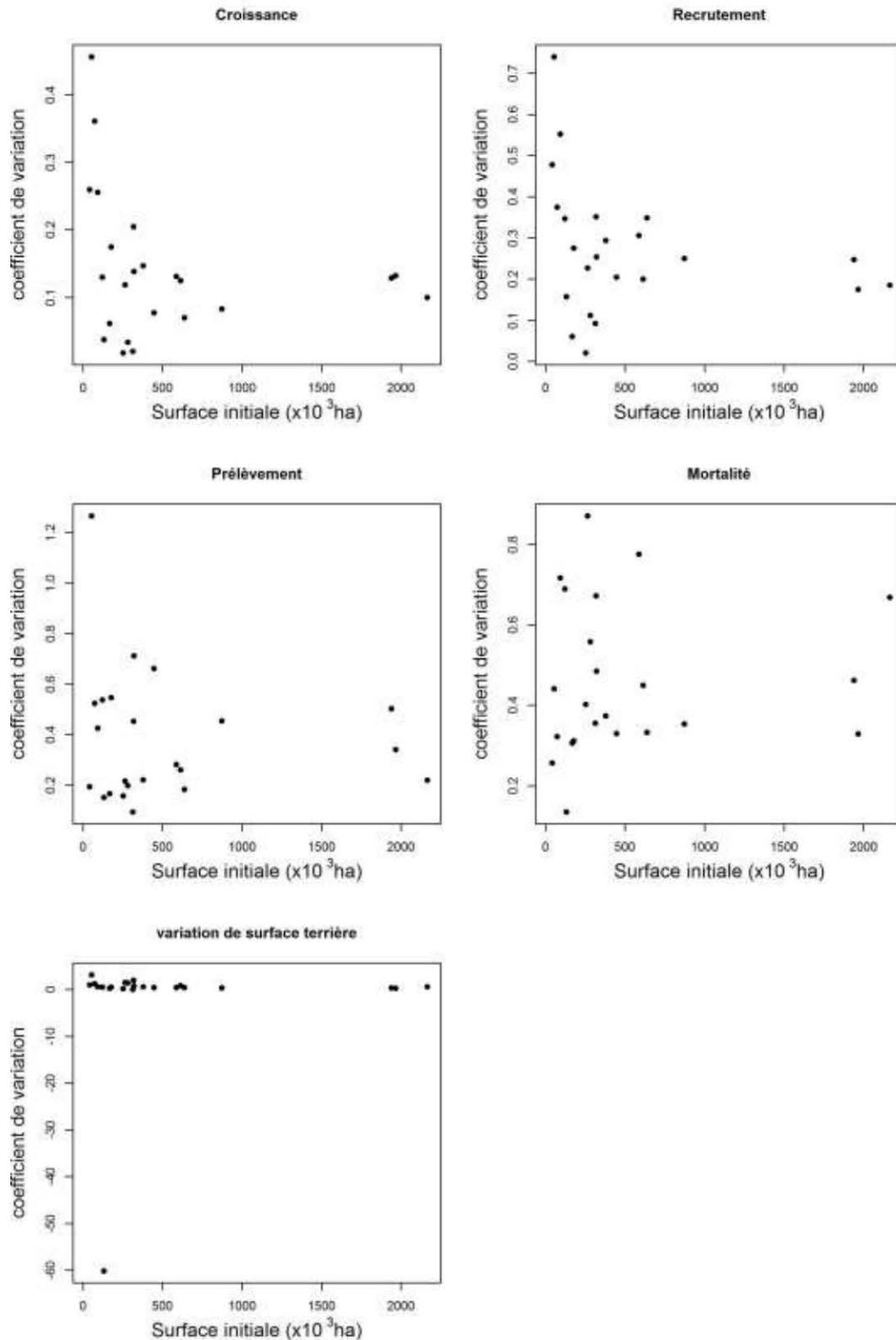
**Figure 4.8. Surface terrière relative cumulée en fonction du nombre d'individus département-propriété, rangés par taille décroissante de surface terrière.** La droite rouge représente le nombre d'individus nécessaires pour atteindre 95% de la surface terrière.

Nous avons analysé l'effet de la taille des strates sur la variabilité des flux. Pour cela, un coefficient de variation intra-strate (écart-type divisé par la moyenne) a été calculé pour chaque strate GRECO x propriété et chaque flux. La corrélation entre ces coefficients et la surface terrière initiale ainsi que la surface forestière initiale a été étudiée (**Figures 4.9 et 4.10**). La corrélation entre les différents flux et la surface terrière initiale et la surface forestière initiale a été étudiée en utilisant un test de Spearman (**Tableau 4.7**).

Aucune corrélation significative n'a été trouvée. Cependant, pour le recrutement et la croissance, une tendance très nette, en limite de significativité montre qu'il existe un effet négatif de la taille du domaine statistique (en surface terrière et en surface) sur ces deux variables. Les groupes présentant une faible surface terrière sont plus hétérogènes.



**Figure 4.9.** Coefficient de variation intra strate (GRECO-propriété) en fonction de la surface terrière initiale totale de la strate. Cette analyse intra-strate repose sur la variabilité inter-départementale.



**Figure 4.10.** Coefficient de variation de chaque flux par GRECO-propriété en fonction de la surface forestière initiale totale de la strate. Cette analyse intra-strate repose sur la variabilité inter-départementale.

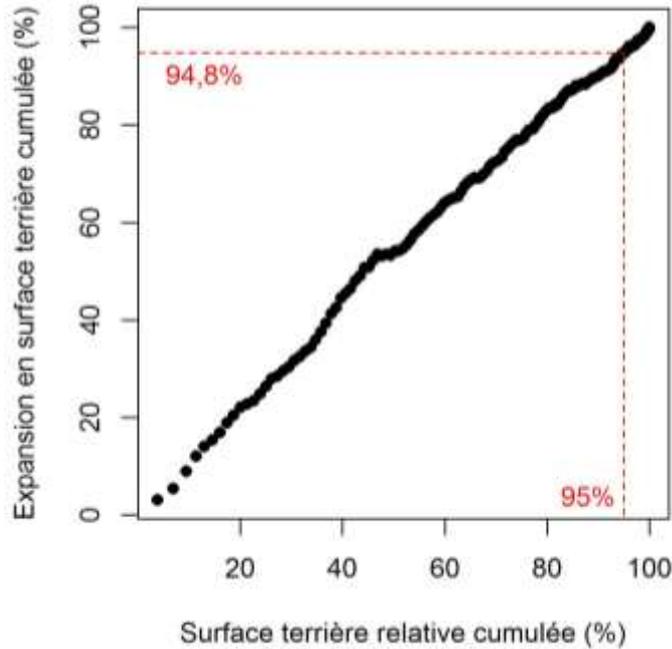
	Corrélation avec Gt1		Corrélation avec St1	
	corrélation	probabilité critique (p)	corrélation	probabilité critique (p)
CR	-0.34	0.11	-0.32	0.13
Rt	-0.41	0.05	-0.34	0.11
Pt	0.03	0.88	-0.00	0.99
Mt	0.23	0.30	0.18	0.40
dG	-0.25	0.24	-0.28	0.19

**Tableau 4.7. Corrélation de Spearman entre les différents flux de stock sur pied et la surface terrière initiale (Gt1) et la surface initiale (St1) du groupe GRECO-propriété.** Mt : mortalité. CR : croissance. Pt : prélèvement. Rt : recrutement. dG : variation de surface terrière

Pour éviter une forte variabilité intra-strate liée aux strates de surface terrière faible, il aurait été possible d'écarter les strates de faible surface terrière mais cela revenait à écarter un grand nombre de strates. Il a donc été décidé d'écarter les individus de faible surface terrière afin de **représenter 95% de la surface terrière initiale totale de la forêt française** en minimisant le nombre de strates. **Ainsi, sur les 260 individus département x propriété hors Corse, l'étude ne se focalise que sur les 147 individus les plus importants (Annexe IV.7).**

**Ce choix est conforté par le fait qu'en écartant ces individus, on se focalise déjà sur 94,8% de de l'augmentation du stock mesurée pour les inter-cycles d'inventaire étudiés (Figure 4.11). Fait intéressant, les individus départements x propriété présentant des flux de prélèvement négatifs ne sont que des individus à faible surface terrière et sont alors écartés par cette sélection.** En plus de l'effet de la soumission des forêts communales et de la lecture des cernes de certaines essences, il serait donc possible que la faible taille des individus ait eu un effet sur les calculs de prélèvements.

**Au deuxième niveau d'étude (département x propriété x essence), l'analyse s'est portée sur les individus département x propriété précédemment retenus** (représentant 95% de la surface terrière initiale, hors Corse), et de la même manière que précédemment, **les nouveaux individus département x propriété x essence (DPE) présentant un poids faible dans la surface terrière initiale ont été éliminés, en ne retenant que les individus permettant de représenter 95% du stock total en surface terrière** (692 individus sur les 1109 ; Annexe IV.8). **On représente ainsi 90% du stock initial et 80% de l'expansion en surface terrière de la France métropolitaine (hors Corse).**



**Figure 4.11. Part dans l’expansion cumulée en fonction de la surface terrière relative cumulée au niveau 1 de l’analyse (GRECO x propriété)**

### 3.5 Stratégie d’analyse des flux

#### 3.5.1 Analyse des corrélations au niveau des individus département x propriété

Une première analyse globale des flux a été effectuée au niveau des individus département x propriété, niveau auquel ils sont calculés. Cette analyse a consisté à étudier les corrélations entre ces flux mais aussi la corrélation entre ces flux et l’expansion en stock de ces individus. L’expansion a été étudiée sous deux angles : la part de l’individu dans l’expansion totale et l’« **intensité d’expansion** », définie comme le ratio entre la part de l’individu dans l’expansion totale ( $P_e$ ) et la part que représentait l’individu dans la surface terrière initiale totale ( $P_0$ ).

$$IE = \frac{P_e}{P_0} \quad (18)$$

Cette analyse permet d’avoir une première vision simple du lien entre nos variables d’étude et la dynamique d’expansion.

### 3.5.2 Analyse en composante principale et classification

#### 3.5.2.1 Analyse en composante principale

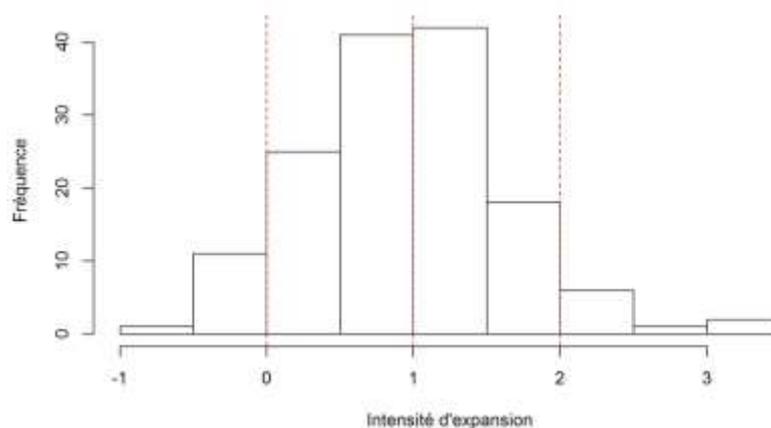
Aux deux niveaux d’étude (département x propriété et département x propriété x essence), le nombre d’individus étant important (respectivement 147 et 692) et l’analyse portant sur plusieurs variables (respectivement 6 et 4 ; **Tableau 4.5**), il a été choisi d’utiliser une Analyse en Composante Principale (ACP) à partir de ces flux afin d’étudier le lien entre les variables et les similitudes entre les individus. Les variables de cette ACP étant d’unités différentes, elles ont été centrées et réduites (ACP normée ou ACPn) et un poids, correspondant à la surface terrière initiale de la strate, a été attribué à chaque individu afin de ne pas donner trop d’importance aux individus de faible surface terrière.

Ainsi, deux ACPn ont été effectuées : une pour chaque niveau d’étude. Le premier niveau a l’avantage de permettre d’étudier les variations de surface alors que le deuxième, apportant un niveau d’information supérieur, ne permet pas l’étude des surfaces.

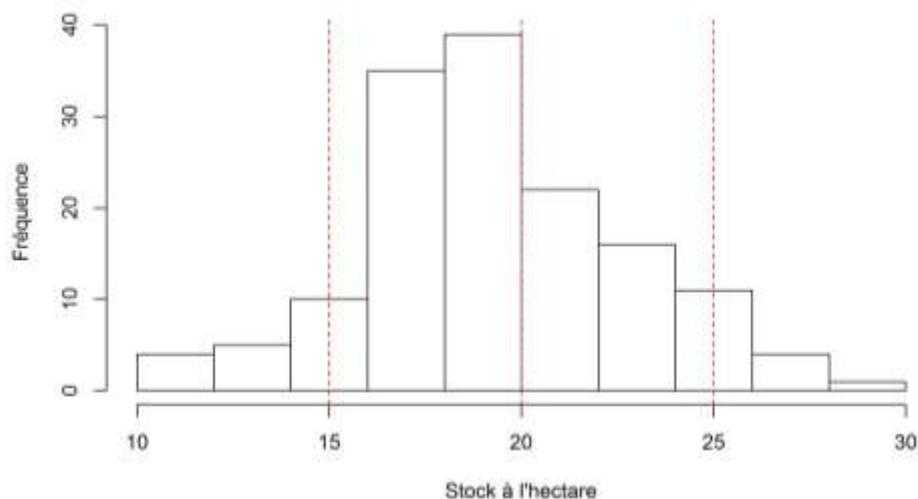
#### Ajout de variables supplémentaires au niveau département x propriété

L’intensité d’expansion a été calculée pour chaque individu département x propriété et a été scindée en quatre classes (IE négative, IE entre 0 et 1, entre 1 et 2 et supérieure à 2 ; **Figure 4.12**). Cette variable ainsi que sa version qualitative a été introduite en variable supplémentaire de l’ACP, respectivement, quantitative et qualitative.

De même, le stock à l’hectare (VS), défini comme la surface terrière totale de la strate rapportée à sa surface, a été calculé pour chaque individu département x type de propriété et a été scindé en quatre classes (0-15, 15-20, 20-25, 25-30 ; **Figure 4.13**). Le stock à l’hectare a été ajouté comme variable quantitative supplémentaire, ainsi que sa version qualitative.



**Figure 4.12.** Histogramme de l’intensité d’expansion en surface terrière pour l’ensemble des individus statistiques de l’analyse de niveau 1 (GRECO x propriété). 147 individus dans 25 strates propriété x GRECO. La discrétisation du stock à l’hectare est figurée.



**Figure 4.13.** Histogramme du stock à l'hectare en surface terrière pour l'ensemble des individus statistiques de l'analyse de niveau 1 (GRECO x propriété). 147 individus sur 25 strates GRECO x propriété. La discrétisation du stock à l'hectare est figurée.

### 3.5.2.2 Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois

Les individus statistiques étant nombreux, une typologie a été raisonnée au niveau des strates regroupant ces individus (c'est-à-dire agrégeant les départements d'une même GRECO) par souci de lisibilité. Pour chaque niveau d'étude, les coordonnées des centres de gravité des strates sur les premières composantes principales ont servi de base à une approche par classification ascendante hiérarchique.

A partir de cette classification, des « **facies dynamiques** », définis comme un groupe de strates présentant des dynamiques similaires, ont été créés (7 au niveau 1 et 14 au niveau 2). Le nombre de classe a été définie de façon subjective afin de représenter à la fois la diversité de la forêt française mais aussi de permettre une lecture relativement aisée des dynamiques. L'analyse des différents facies a permis des regroupements, *a posteriori*, de facies présentant des dynamiques similaires.

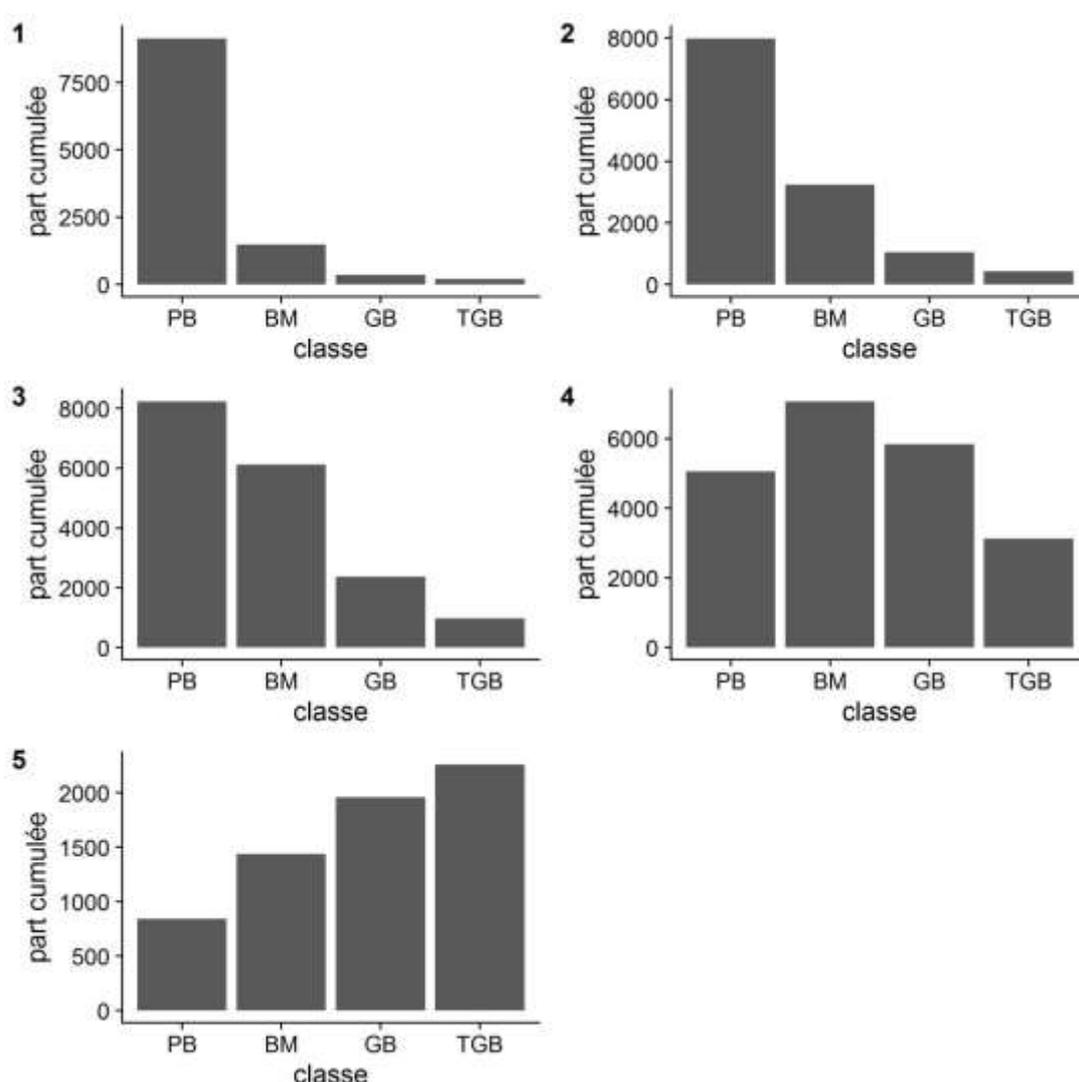
### 3.5.3 Information auxiliaire des profils diamétriques au niveau 2 de l'analyse

La structure diamétrique du stock de bois renseigne sur le stade de maturation des forêts. Cette information est donc essentielle pour comprendre le profil dynamique des strates forestières. Par exemple, une absence de prélèvement dans une forêt nouvelle, composée principalement de d'arbres de faibles diamètres, ou dans une forêt mature, n'aura pas le même sens. Dans le premier cas, on est dans une phase de maturation d'une forêt potentiellement gérée alors que dans le deuxième, on est dans le cas d'une forêt mature non gérée.

Afin de caractériser les structures présentes au sein des strates GRECO x propriété x essence, et pas seulement la structure diamétrique moyenne, nous avons constitué **une typologie de**

**profils diamétriques sur les individus département x propriété x essence (DPE)**, à partir d'une classification définie par les classes de taille de bois de l'IFN: petit bois (PB ; entre 7,5 et 22,5 cm), bois moyen (BM ; entre 22,5 et 37,5 cm), gros bois (GB ; entre 37,5 et 52,5 cm) et très gros bois (TGB ; diamètre supérieur à 52,5 cm). L'approche est présentée dans l'**annexe IV.9**. Elle a permis d'identifier 5 profils diamétriques (**Figure 4.14**). **Pour chaque strate GRECO x propriété x essence, la part des changements en surface terrière peut alors être ventilée selon chaque profil diamétrique.**

Trois profils présentent des structures à faibles diamètres (profils 1, 2 et 3 ; **Figure 4.14**). On remarque une augmentation de la part des BM, GB et TGB entre le 1 et le 2 et entre le 2 et le 3. Le profil 4 est celui qui est le plus équilibré dans chaque classe de diamètre. Le profil 5 présente des forêts matures, dont les parts des GB et des TGB sont les plus importantes.



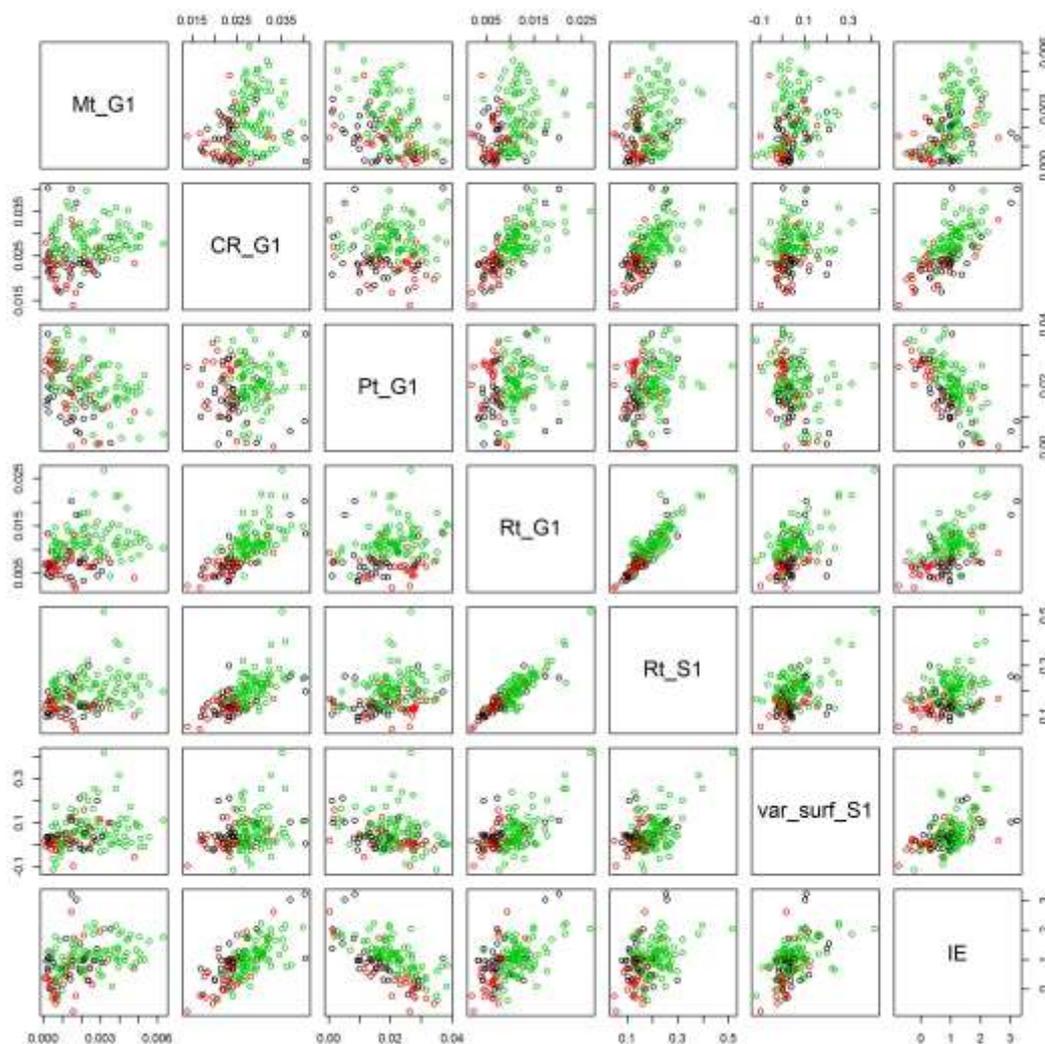
**Figure 4.14. Profils diamétriques identifiés par classification.** PB : petit bois (entre 7,5 et 22,5 cm) ; BM : bois moyen (entre 22,5 et 37,5 cm) ; GB : gros bois (entre 37,5 et 52,5 cm) ; TGB : très gros bois (supérieur à 52,5 cm). Les diamètres sont mesurés à 1,30 m.

## 4 Résultats

### 4.1 Analyse de la corrélation entre les flux et l'expansion au niveau des individus définis par les départements et la propriété

Une première analyse des flux de bois au niveau des départements a été effectuée afin d'avoir une première vision globale des corrélations entre flux et de celle entre ces flux et les changements de stock.

On observe une forte corrélation entre  $Rt\_S1$  et  $Rt\_G1$  (corrélation de 0,90,  $p < 0,001$  ; **Figure 4.15** ; **Tableau 4.8**) ainsi qu'une plus faible mais toujours forte corrélation entre la croissance et le recrutement (corrélation de 0,73 entre  $CR\_G1$  et  $Rt\_G1$  et de 0,66 pour  $CR\_G1$  et  $Rt\_S1$  ;  $p < 0,001$ ). **De façon spectaculaire, on remarque également qu'aucune corrélation n'est observée entre la croissance et le prélèvement à un niveau très agrégé intra-propriété, ce qui suggère l'existence de contrastes importants pour cette relation au sein de la forêt française.**



**Figure 4.15. Matrice des corrélations entre les différents flux relatifs démographiques et selon le type de propriété.** En noir, les forêts communales, en rouge les forêts domaniales et en vert les forêts privées. IE: Intensité d'expansion = ratio de la part d'expansion en surface terrière à la part de la surface terrière des individus.

	CR_G1	Pt_G1	Rt_G1	Rt_S1	Var_surf_S1	IE	Part dans l'expansion
Mt_G1	0,27***	-0,37***	0,32***	0,30***	0,27***	0,41***	0,45***
CR_G1		0,02	<b>0,73***</b>	<b>0,66***</b>	0,30***	<b>0,70***</b>	<b>0,56***</b>
Pt_G1			0,20*	0,29***	-0,27***	<b>-0,65***</b>	-0,25**
Rt_G1				<b>0,90***</b>	<b>0,55***</b>	<b>0,53***</b>	0,37***
Rt_S1					0,49***	0,39***	0,33***
Var_surf_S1						<b>0,53***</b>	0,20*

**Tableau 4.8. Corrélation entre les différents flux de bois, et entre ces flux et les indices d'expansion des individus.** IE: Intensité d'expansion. Significativité des tests :  $P < 0.1$  : (\*),  $P < 0.05$  : \*,  $P < 0.01$  : \*\*,  $P < 0.001$  : \*\*\*. En gras : corrélations supérieures à 0,50 ou inférieures à -0,50

Par ailleurs, les corrélations entre ces flux relatifs et l'intensité d'expansion sont logiquement corrélés de façon plus intense qu'avec la part dans l'expansion.

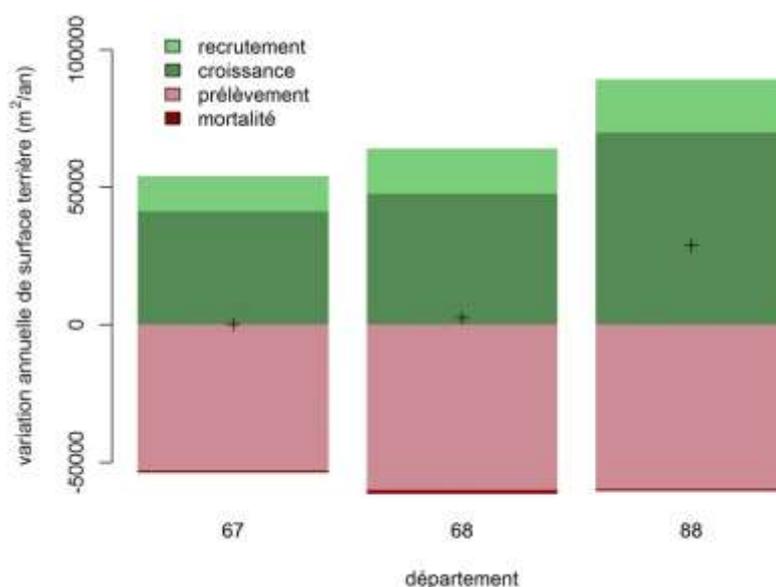
Les corrélations entre les différents flux et l'IE et la part dans l'expansion montrent que les individus connaissant de fortes expansions de surface terrière sont ceux présentant les plus forts taux de croissance (corrélation de 0,56 ; **Tableau 4.8**). Ce sont aussi ces individus qui connaissent une forte intensité d'expansion (corrélation de 0,70). A contrario, les individus présentant de faibles intensités d'expansion sont ceux qui présentent les plus forts prélèvements (corrélation de -0,65). L'intensité d'expansion est aussi positivement corrélée aux variations de surface forestière relative de la même période (corrélation de 0,53). Les individus présentant les plus fortes variations de surface forestière relative sont ceux présentant une part croissante dans la surface terrière totale.

## 4.2 Explorations préliminaires, analyse des diagrammes des flux

L'ensemble des diagrammes des flux est présenté en **Annexe IV.6**.

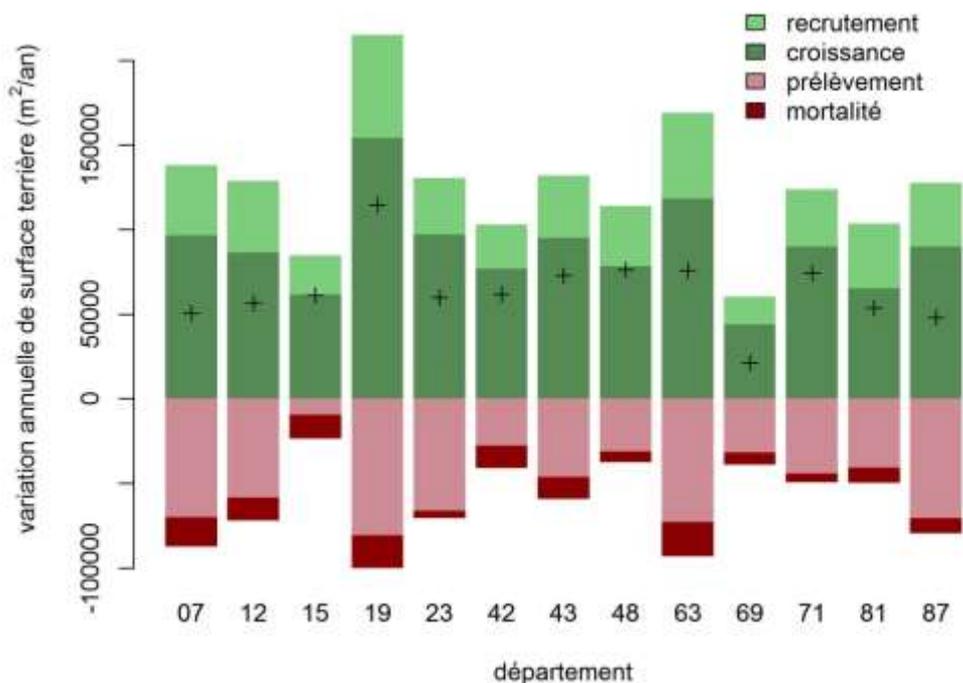
Une analyse des diagrammes de flux permet de remarquer différents facies de strates GRECO x type de propriété :

- Des strates globalement à l'équilibre, entre flux d'augmentation et de diminution de surface terrière, avec une absence de mortalité. C'est le cas, par exemple, des forêts communales de la GRECO Vosges (**Figure 4.16**).



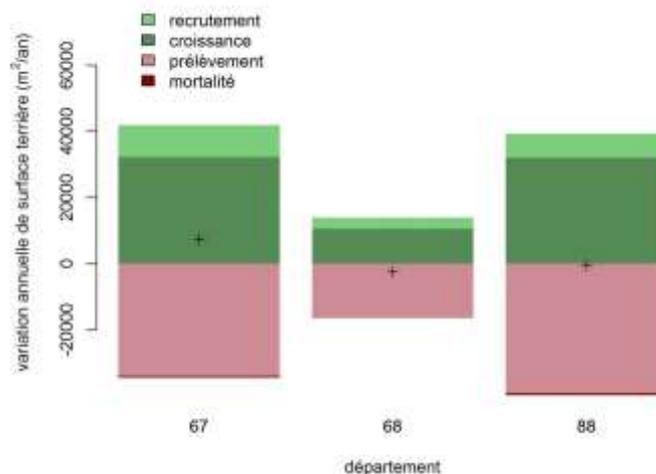
**Figure 4.16. Diagramme des flux pour les forêts communales de la GRECO des Vosges.** (+) représente la variation de surface terrière de la strate sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif

- Des strates avec un accroissement net du stock de bois, un terme de recrutement élevé, et peu de prélèvements comme les forêts privées des Pyrénées ou du Massif Central (**Figure 4.17**), avec un terme de mortalité qui devient cette fois nettement identifiable.



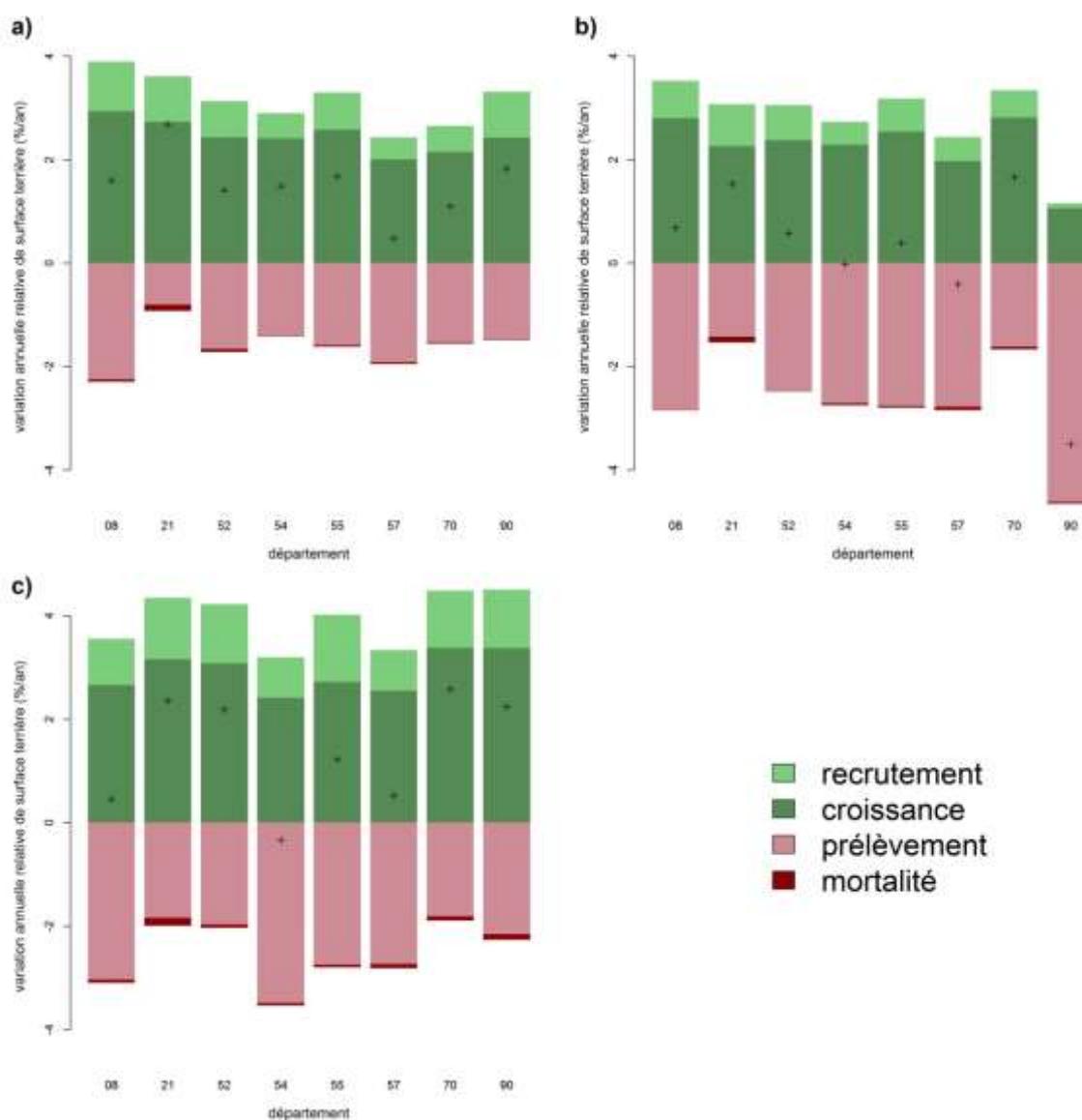
**Figure 4.17. Diagramme des flux de bois pour les forêts privées de la GRECO du Massif Central.** (+) représente la variation de surface terrière sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

- Des forêts en limite de décapitalisation. C'est le cas, par exemple, des forêts domaniales du Haut-Rhin (département 68, **Figure 4.18**). **En règle générale, les forêts domaniales sont celles qui révèlent le plus de décapitalisation** (exemple dans les forêts du Grand-Est ; **Figure 4.19**).



**Figure 4.18. Diagramme des flux de bois pour les forêts domaniales de la GRECO des Vosges.** (+) représente la variation de surface terrière sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.

#### 4 - Résultats



**Figure 4.19. Flux annuels relatifs par rapport à la surface terrière initiale pour la GRECO Grand-Est et pour chaque type de propriété : communal (a), domanial (b) et privé (c). (+) représente la variation de surface terrière sur la période étudiée. Les départements sont renseignés par leur numéro administratif.**

Parmi les différentes zones géographiques, les GRECO des Alpes, des Pyrénées et de la Corse présentent les plus fortes mortalités (**Annexe IV.6**).

### 4.3 Analyse de la dynamique du stock de bois pour les strates définies par les GRECO et la propriété

#### 4.3.1 Répartition de l’expansion du stock de bois, analyse de l’intensité d’expansion

Les parts relatives de la surface terrière initiale et de l’expansion représentée par les différentes strates GRECO x type de propriété sont présentées au **Tableau 4.9**. Les forêts privées comptabilisent les trois-quarts de la surface terrière initiale. Les forêts privées du Massif Central représentent à elles seules quasiment un quart de l’expansion totale. Les seules forêts privées du Centre Nord semi-océanique (CN), du Sud-Ouest océanique (SO) et du Massif Central (MC) comptabilisent près de 50% de la surface terrière initiale et de l’expansion totale.

GRECO	Part dans la surface terrière initiale totale (%)				Part dans l’expansion totale en surface terrière (%)			
	Domanial	Communal	Privé	Total	Domanial	Communal	Privé	Total
GO	NR	NR	3,0	3,0	NR	NR	4,2	4,2
CN	2,9	0,7	17,1	20,7	1,0	1,1	14,0	16,1
GE	2,5	4,8	5,1	12,4	0,4	4,5	4,9	9,8
Vo	1,5	3,1	1,8	6,4	0,1	0,9	1,5	2,5
Ju	0,2	2,4	2,8	5,4	0,0	1,9	2,9	4,8
SO	NR	0,2	14,5	14,7	NR	0,2	15,3	15,5
MC	0,2	0,6	16,2	17,0	0,2	0,7	23,2	24,1
Al	1,1	3,3	7,0	11,4	1,2	2,6	8,1	11,9
Py	0,5	1,7	3,3	5,5	0,1	2,0	4,6	6,7
Me	0,4	NR	3,2	3,6	0,3	NR	4,0	4,3
Total	9,3	16,8	74	100	3,3	13,9	82,7	100

**Tableau 4.9. Tableau 5. Part des strates GRECO x type de propriété dans le stock de bois total décrit par les inventaires initiaux de la période d’étude (1983 – 1995).** Le stock est exprimé en surface terrière. Les strates non renseignées (NR) ont été écartées de l’analyse du fait de leur petite taille, voir section 3.4 et Annexe IV.7.

**L’intensité d’expansion (IE), décrite comme le rapport entre la part dans l’expansion totale et la part dans la surface terrière initiale a été calculée. Elle représente le changement d’importance de la strate par rapport au total.** On peut remarquer que les forêts privées présentent, en général, les plus fortes IE, au-dessus de l’unité (**Figure 4.20**), alors que les forêts domaniales présentent les plus faibles IE. Parmi les strates privées présentant la plus forte expansion, on retrouve les GRECO du Massif Central, du Sud-Ouest et du Centre Nord, ces deux dernières présentant toutefois un indice d’expansion plus proche de l’unité. Les forêts domaniales des Vosges, du Grand-Est et du Jura, des Pyrénées et du Centre-Nord connaissent les plus faibles IE, traduisant une intensité de gestion plus marquée dans les forêts domaniales soumises à l’aménagement, et gérées par un organisme dédié.

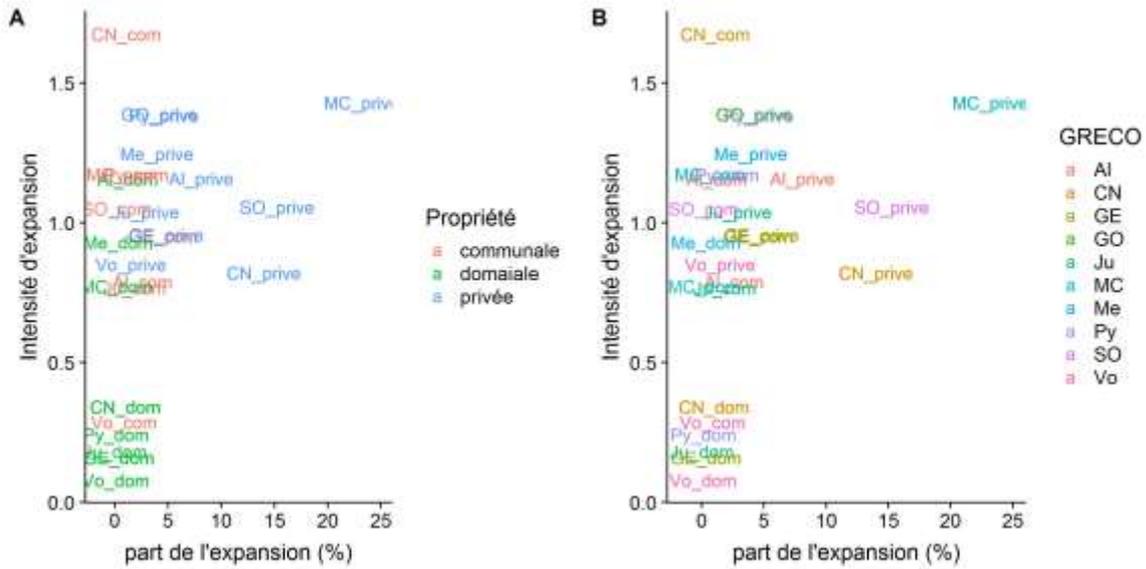


Figure 4.20. Intensité d'expansion en fonction de la part dans l'expansion totale des couples GRECO x propriété. Les couleurs permettent de distinguer les propriétés (à gauche) et les GRECO (à droite)

### 4.3.2 Structuration des states selon les flux de bois, analyse en composantes principales

#### 4.3.2.1 Analyse de l'inertie

Le diagramme d'inertie du tableau individus x variables est présenté à la Figure 4.21. Il montre que les 3 premières composantes principales de l'ACP représentent à elles seules 89% de l'inertie totale (somme des variances des variables étudiées) de ce tableau (près de 50% pour la première composante). Nous sommes donc a priori amenés à conduire la typologie dynamique des strates étudiées sur la base de ces 3 composantes principales.

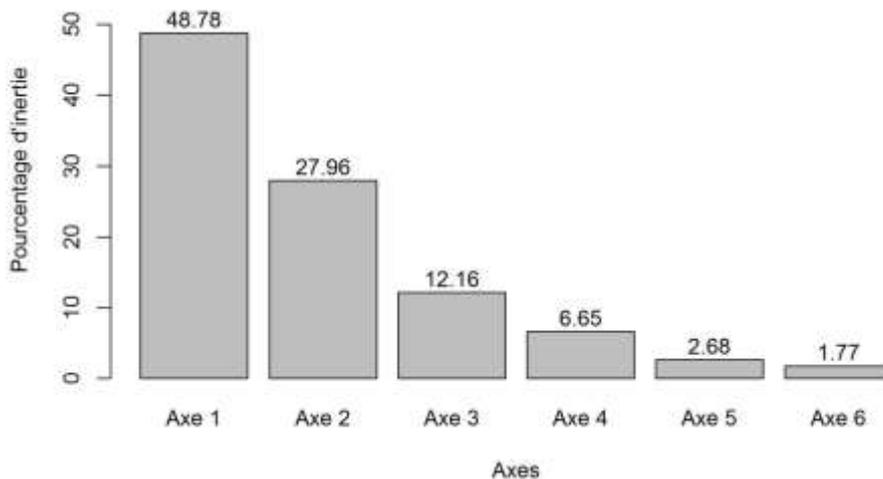
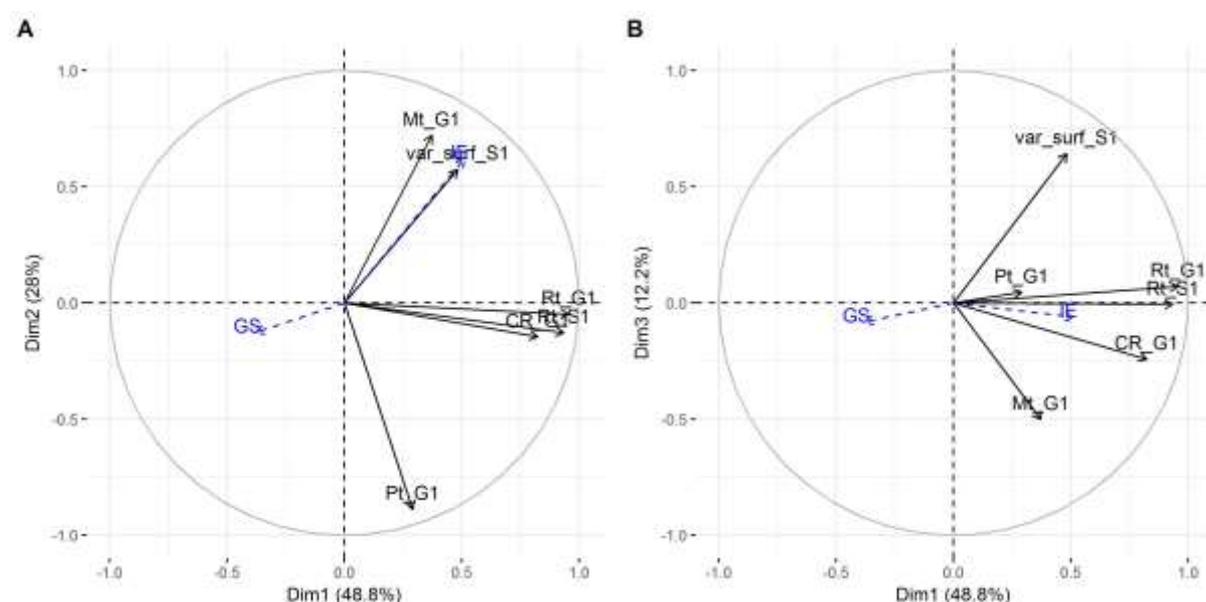


Figure 4.21. Diagramme d'inertie de l'ACP selon ses 6 composantes principales (en % de l'inertie totale).

### 4.3.2.2 Interprétation des axes principaux

Les cercles des corrélations relatifs aux deux premiers plans de l'ACP sont présentés en **figure 4.22**. Afin de faciliter l'interprétation, les corrélations entre les variables initiales et ces composantes sont par ailleurs présentées au **Tableau 4.10**.



**Figure 4.22. Cercles de corrélation de l'ACP selon les axes 1 et 2 (A) et 1 et 3 (B).** Les variables supplémentaires quantitatives sont représentées en bleu. G2\_G1\_rel : variation de surface terrière de la strate entre t1 et t2 rapporté à la surface terrière initiale de la strate. IE : intensité d'expansion. GS : stock à l'hectare

	Corrélation		
	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Mt_G1	0,37	<b>0,72</b>	<b>-0,50</b>
CR_G1	<b>0,82</b>	-0,15	-0,24
Pt_G1	0,29	<b>-0,89</b>	0,05
Rt_G1	<b>0,96</b>	-0,05	0,07
Rt_S1	<b>0,94</b>	-0,13	-0,01
Var_surf_S1	0,48	<b>0,57</b>	<b>0,64</b>

**Tableau 4.10. Corrélation entre les variables statistiques étudiées (flux de bois relatifs et de surface) et les composantes principales de l'ACP.** En gras : corrélations de plus de 0,50 ou de moins de -0,50

### **Axe 1. Un gradient de croissance biologique des forêts**

L'axe 1 se corrèle à la croissance et au recrutement (corrélations de 0.82 pour CR\_G1, 0.96 pour Rt\_G1 et 0.94 pour Rt\_S1 ; **Figure 4.22** et **Tableau 4.10**). Il existe une corrélation positive entre ces trois flux, les strates à forts recrutements étant aussi des strates où les arbres connaissent une forte croissance. **L'axe 1 est donc l'axe qui représente un gradient dynamique de croissance des forêts.**

### **Axe 2. Un gradient d'intensité de gestion**

Le deuxième axe est corrélé positivement à la mortalité et aux variations de surfaces forestières (corrélations de 0.72 pour Mt\_G1 et 0.57 pour var\_surf\_S1 ; **Tableau 4.10**) et négativement aux prélèvements (corrélations de -0,89). Cela signifie qu'il oppose des situations de forts prélèvements, où la mortalité est logiquement absente, et qui correspondent aussi à des forêts stationnaires au plan de leurs surfaces, de façon plausible de contextes forestiers déjà anciens et gérés, à des situations où les prélèvements sont faibles, et où la mortalité se manifeste, et qui se trouvent correspondre à des strates où la forêt est en extension (à la fois faible gestion et déprise sur les territoires concernés), auquel cas cette mortalité correspond à la mortalité juvénile liée à l'installation des peuplements. L'axe 2 peut donc être interprété **comme un gradient d'intensité de gestion forestière.**

### **Axe 3. Un gradient de maturité forestière pour des forêts en évolution naturelle ?**

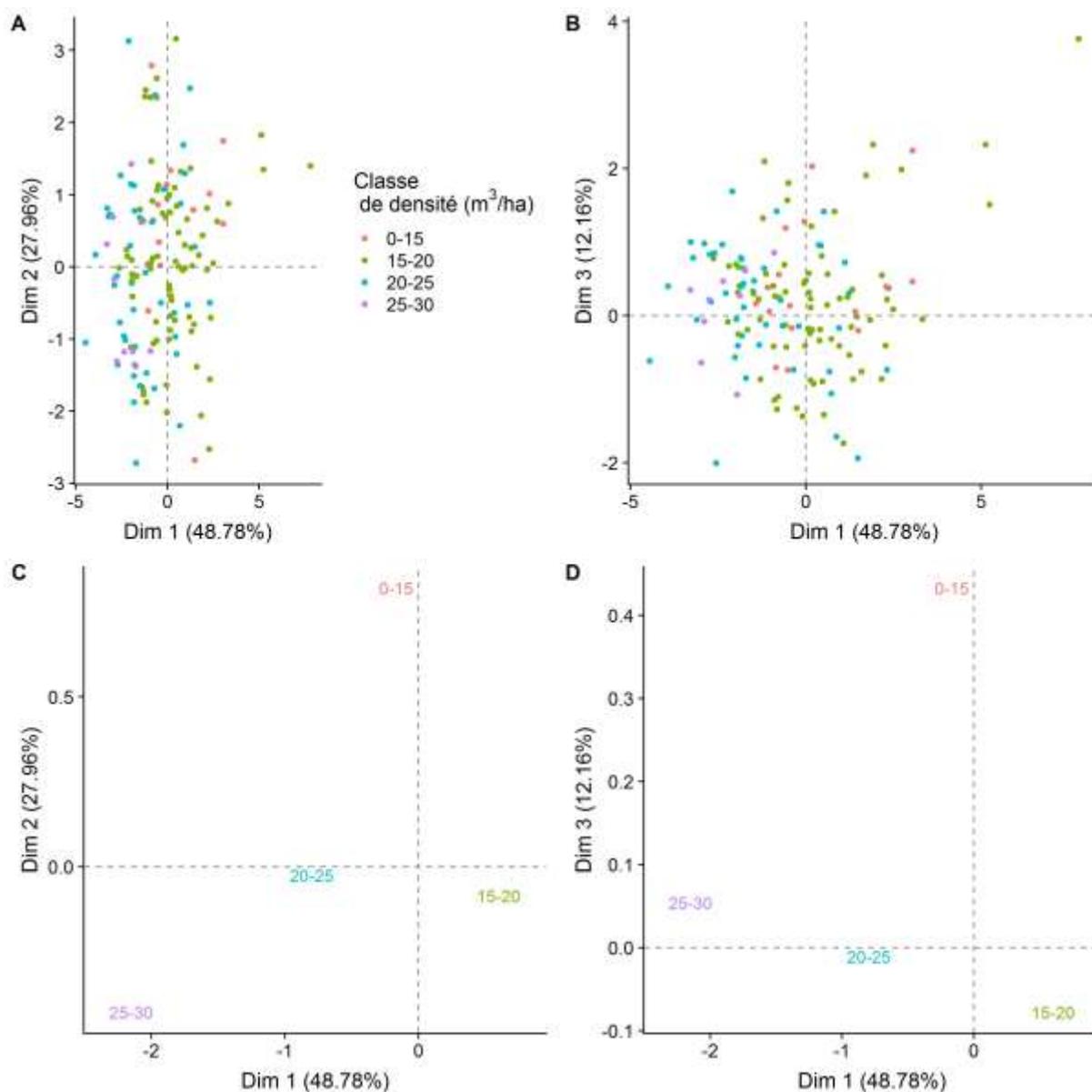
Enfin, l'axe 3 se corrèle à nouveau à la mortalité et aux variations de surface forestière, mais cette fois de façon opposée relativement à l'axe 2 (corrélations de -0,50 pour la mortalité et 0.64 pour les variations de surface). Cet axe permet de différencier les individus connaissant des augmentations de surface forestière (avec des faibles mortalités) de ceux connaissant de fortes mortalités (avec de faibles variations de surface forestière), et semblerait donc pouvoir correspondre, au sein de forêts peu prélevées (puisque ces variables s'opposent aux prélèvements) à un **gradient de maturité forestière**, allant de jeunes forêts résultant d'extension surfacique, à des forêts où la mortalité se manifeste en l'absence de prélèvements.

#### **4.3.2.3 Apport des variables supplémentaires**

Sur l'axe 1, le stock à l'hectare (GS) s'oppose à la croissance et au recrutement ce qui est logique et correspond **au phénomène de densité-dépendance**. On remarque aussi que GS s'oppose aux augmentations de surface. Les nouvelles forêts présentent peu d'arbres et donc une surface terrière à l'hectare faible. L'IE se corrèle à la fois aux axes 1 et 2, indiquant que soit la croissance, soit le renouvellement des forêts, sont associées à une forte augmentation de stock.

La visualisation des individus selon les axes 1, 2 et 3 en fonction de leur classe de densité montre que les individus ayant une densité très faible (entre 0 et 15 m<sup>2</sup>/ha) sont ceux qui présentent les plus fortes augmentations de surface forestière (**Figure 4.23**). **Cela est logique**

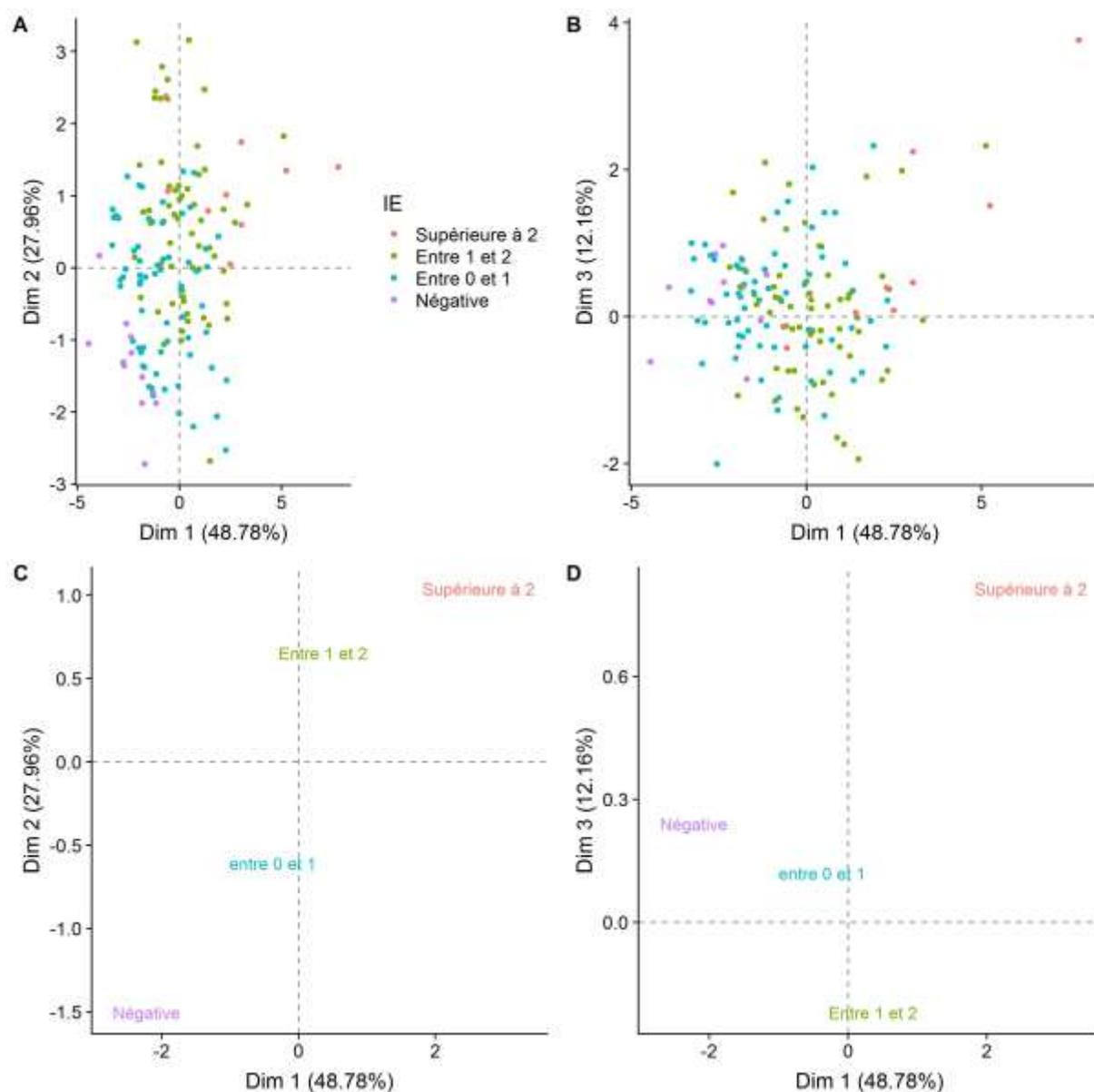
**pour des nouvelles forêts présentant des arbres jeunes et une surface terrière faible.** Ensuite, on remarque que les trois autres classes se différencient selon l'axe 1. Les forêts les plus denses présentent des croissances et des recrutements plus faibles, **ce qui correspond au phénomène classique de densité-dépendance des processus de croissance.** Cela peut également traduire une dimension de maturation progressive des forêts.



**Figure 4.23. Position des individus selon les axes 1, 2 et 3 en fonction de leur densité et position du centres de gravité des classes de densité**

La position des centres de gravité des différentes classes d'IE a également été étudiée (**Figure 4.24**). Les fortes IE sont associées au recrutement et à la croissance ainsi qu'aux taux d'augmentations de la surface forestière. Les faibles IE sont plutôt liées à de forts

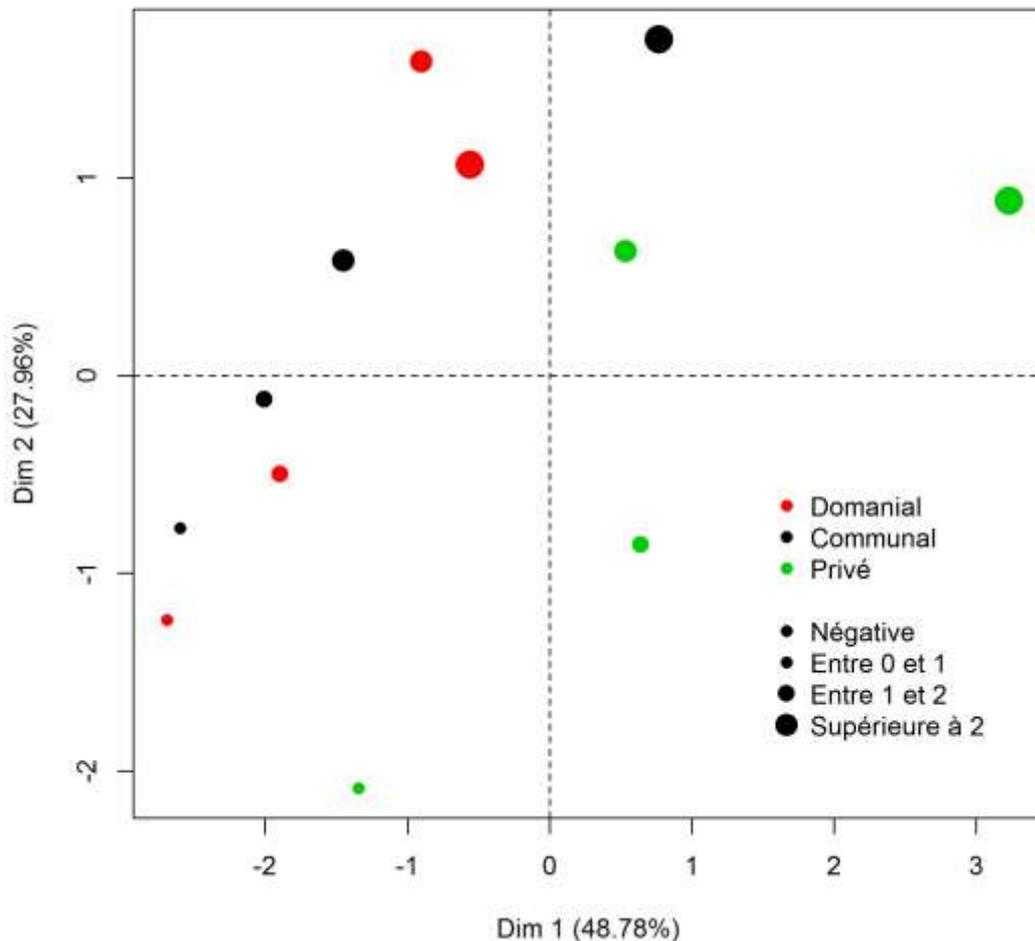
prélèvements associés à une faible croissance et une faible mortalité, appuyant la corrélation déjà présentée entre IE et croissance et prélèvement (**Tableau 4.8**).



**Figure 4.24. Position des individus selon les axes 1, 2 et 3 en fonction de leur intensité d'expansion (IE) et position du centres de gravité des classes d'intensité d'expansion**

Les classes d'IE et de propriété forestière ont été analysées conjointement, et le même schéma d'organisation (fortes IE associées au recrutement et à la croissance ainsi qu'aux taux d'augmentations de la surface forestière et faibles IE plutôt liées à de forts prélèvements associés à une faible croissance et une faible mortalité) se retrouve dans chaque type de

propriété (**Figure 4.25**) montrant que les causes d'intensité d'expansion sont globalement les mêmes au sein de chaque propriété.

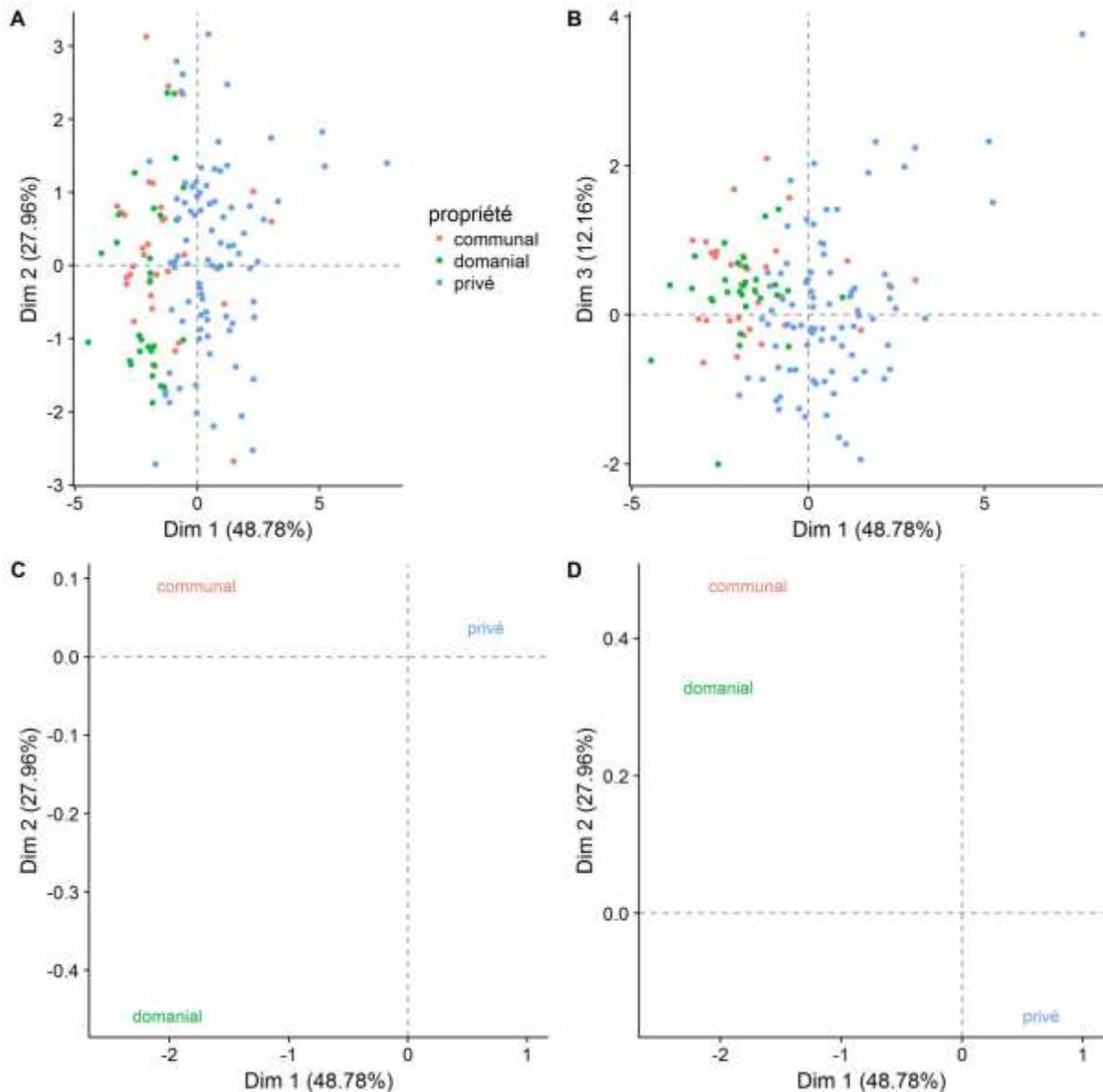


**Figure 4.25. Position des centres de gravité des classes d'intensité d'expansion par type de propriété selon les trois premiers axes de l'ACP**

#### 4.3.2.4 Rôle de la stratification en propriété forestière et GRECO

Le nuage de point des individus par type de propriété montre des classes peu séparées (**Figure 4.26**). Cependant, on peut remarquer que les forêts privées présentent des coordonnées plus élevées sur l'axe 1 que les forêts publiques, ce qui correspond à de plus fortes croissances au sens large (croissance et recrutement), et que les forêts domaniales sont moins avancées que les forêts communales sur l'axe 2, c'est-à-dire davantage sujettes à prélèvements. En outre, sur l'axe 3, la forêt privée domine le pôle de mortalité mais aussi celui des nouvelles forêts, ce qui est logique, étant donné que l'expansion en surface des forêts française est dominée par ces forêts (cf. partie III).

Pour mieux différencier les types de propriété, la localisation des centres de gravité des trois propriétés forestières a été étudiée (**Figure 4.26**). Les forêts privées présentent des coordonnées positives selon les axes 1 et 2 et négatives selon l'axe 3, correspondant à des forêts à forte croissance et fortes mortalité. Les forêts publiques présentent de plus faibles croissances (coordonnées négatives selon l'axe 1) et les forêts domaniales de faibles mortalités. Les forêts domaniales connaissent les plus forts prélèvements que les forêts communales.

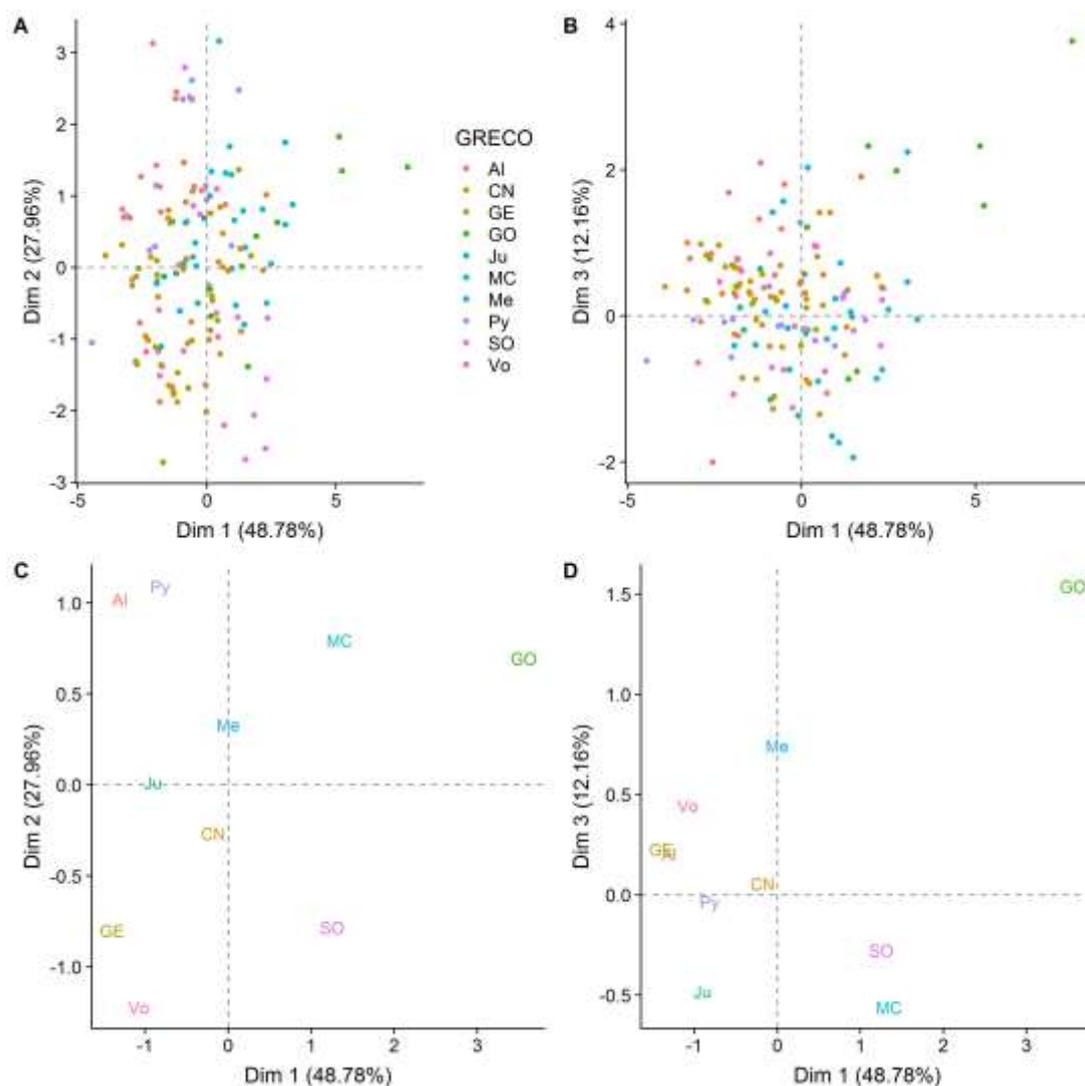


**Figure 4.26.** Représentation des individus dans les deux premiers plans principaux de l'ACP selon le type de propriété (A et B) et localisation des centres de gravité par type de propriété (C et D)

L'étude du centre de gravité des différentes GRECO montre que sur l'axe 1, on peut différencier deux groupes : d'un côté les GRECO de l'Ouest (SO, MC et GO), présentant une forte croissance et un fort recrutement et, à l'opposé, les GRECO du Nord et du Nord-Est et de haute montagne (CN, GE, Vo, Ju, Al et Py), présentant une faible croissance et un faible recrutement (**Tableau 4.11** ; **Figure 4.27**). Sur l'axe 2, on remarque les GRECO du Nord et du Nord-Est (CN, GE et Vo) qui connaissent une diminution de leurs surfaces et la GRECO SO connaissant de forts prélèvements contrairement aux GRECO de hautes montagne (Py et Al) qui connaissent les plus faibles prélèvements. Enfin, sur l'axe 3, on peut distinguer la GRECO GO qui présente des fortes variations de surface terrière relative et la GRECO MC qui présente une mortalité élevée.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Grand-Est	-1,4	-0,8	0,03
Alpes	-1,3	1,02	0,2
Vosges	-1,08	-1,22	0,44
Jura	-0,9	0,01	-0,48
Pyrénées	-0,82	1,09	-0,03
Centre Nord	-0,18	-0,27	0,06
Méditerranée	0	0,33	0,74
Sud-Ouest	1,3	-0,78	-0,28
Massif Central	1,3	0,8	-0,56
Grand-Ouest	3,56	0,69	1,54

**Tableau 4.11. Coordonnées des centres de gravité des GRECO sur les trois premiers axes de l'ACP**



**Figure 4.27. Position des centres de gravité des GRECO selon les trois premiers axes de l'ACP**

Les variables de GRECO et de type de propriété ont été croisées. On peut remarquer que la GRECO Grand Est (GE ; **Figure 4.28**) ainsi que les Vosges (Vo) présentent de faibles variations relatives de surface forestière ainsi qu'une faible croissance, et cela spécialement dans les forêts domaniales. Les GRECO de haute montagne, Alpes (Al) et Pyrénées (Py), connaissent également une faible croissance mais contrairement aux GRECO du Nord-Est, elles connaissent de faibles prélèvements et principalement dans les forêts publiques. Les forêts les plus prélevées sont celles du SO et principalement du SO communal. Les forêts privées du GO connaissent à la fois les plus fortes croissances et les plus fortes variations de surface forestière relative. Les forêts du MC présentent également de fortes croissances mais les forêts privées y connaissent également de fortes mortalités.

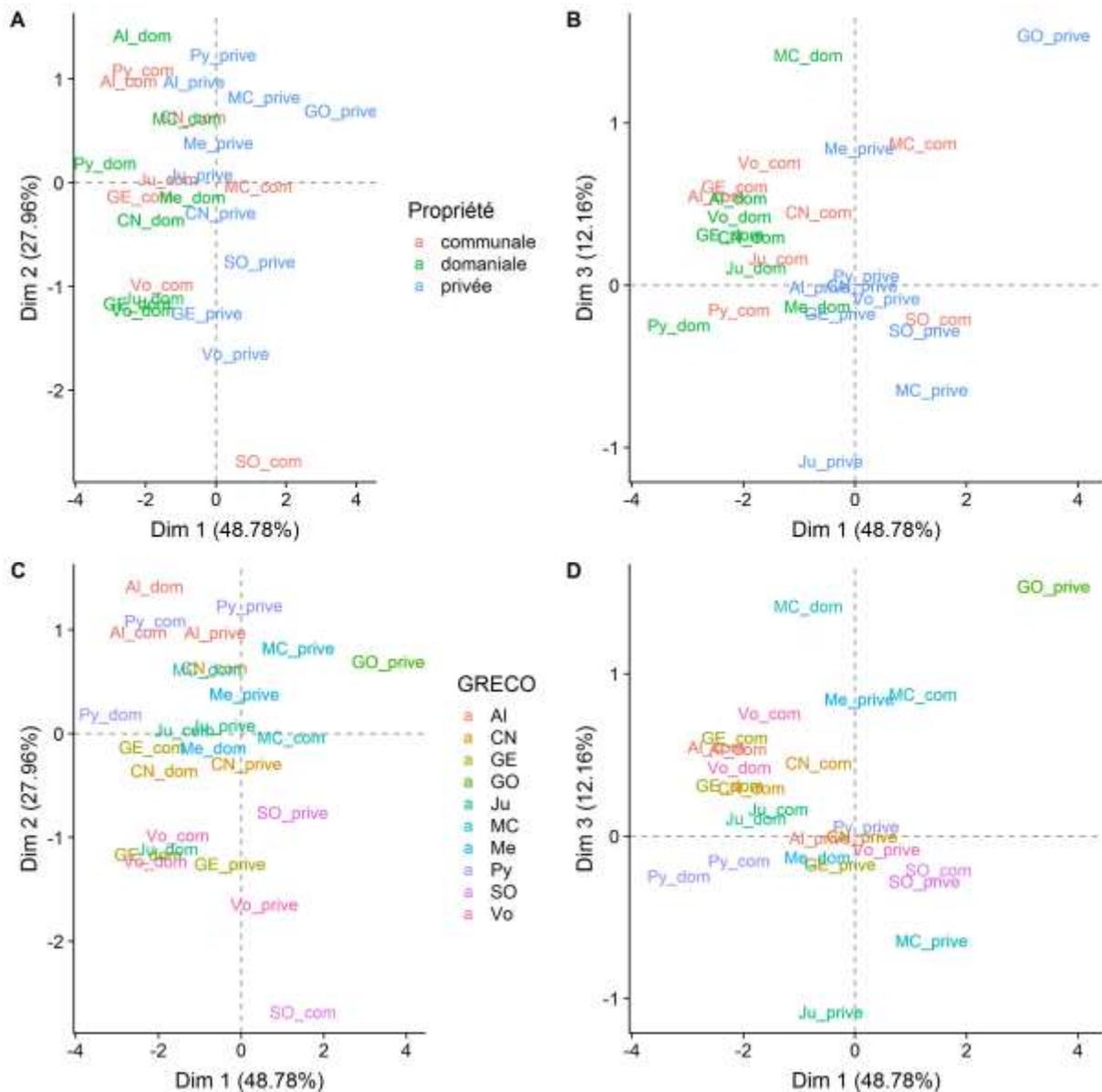
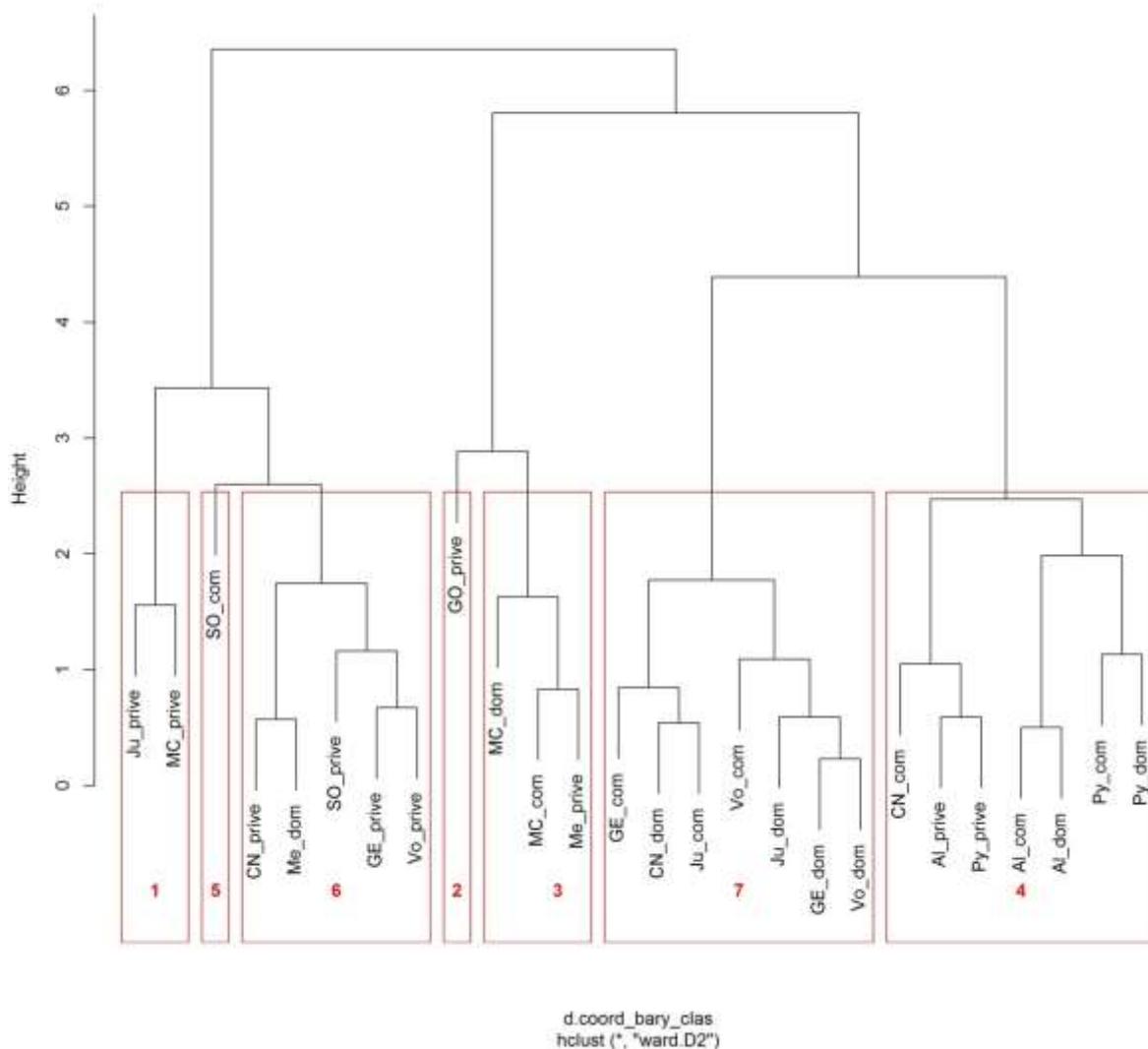


Figure 4.28. Position des centres de gravité des strates GRECO x type de propriété selon les trois premiers axes de l'ACP

#### 4.3.3 Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois

Une classification ascendante hiérarchique a été effectuée sur les strates à partir de leurs coordonnées sur les trois premiers axes principaux significatifs (cf. 4.3.2.1 et 4.3.2.2). Elle révèle une organisation assez lisible. Cependant, elle a été réorganisée (individus isolés), et sept classes, appelées « faciès dynamiques » dans la suite, ont été raisonnées (Figure 4.29). Les faciès dynamiques ont été classés par IE décroissante.



**Figure 4.29. Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique appliquée aux centres de gravité des strates GRECO x type de propriété.** Le dendrogramme a été construit à partir des 3 axes principaux de l'ACP. 7 facies dynamiques (cadres rouges) primaires ont été identifiées.

Les projections des strates dans les deux premiers plans principaux sont présentées en **Figure 4.30**. Les diagrammes de flux de bois associés à ces 7 facies sont présentés à la **Figure 4.31**. Les caractéristiques de ces facies dynamiques sont enfin présentées au **Tableau 4.12** où les niveaux relatifs des flux ont été codés de façon synthétique.

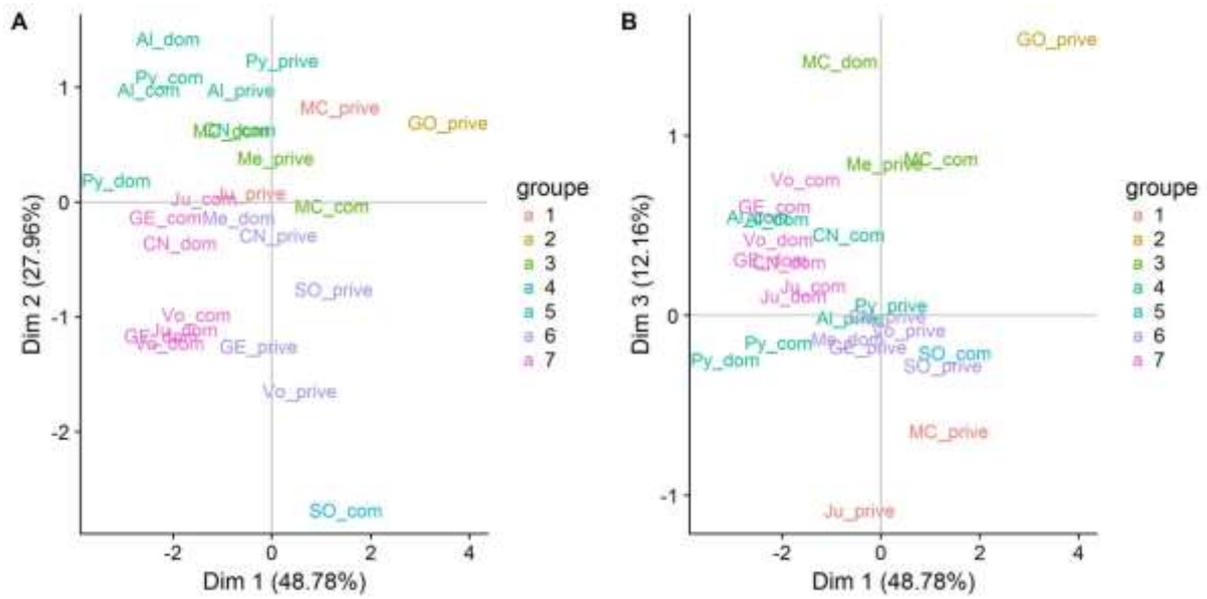


Figure 4.30. Représentation des facies formés par la classification selon les trois premiers axes de la classification

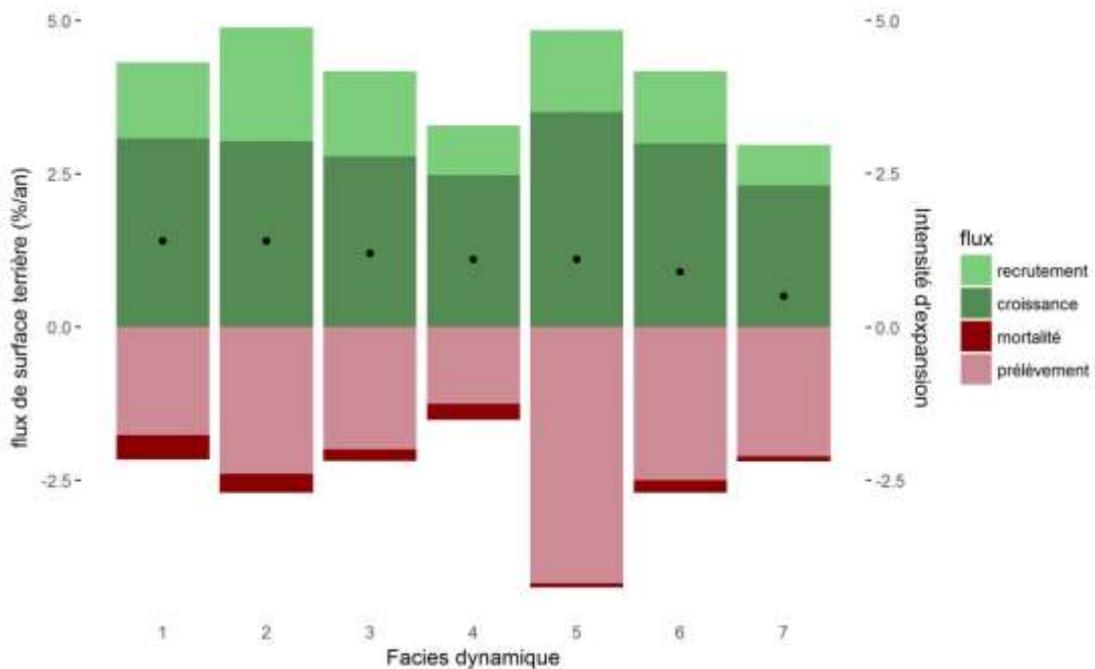
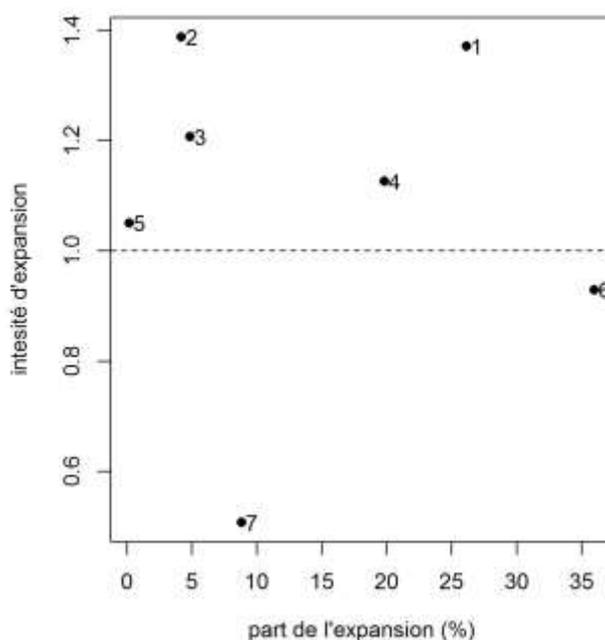


Figure 4.31. Histogramme des flux relatifs annuels pour chacun des facies dynamiques identifiés

Facies	Nom	Part du facies dans la surface terrière initiale (%)	Part du facies dans l'expansion totale (%)	IE du facies	Stock à l'hectare (m <sup>2</sup> /ha)	Dynamique			
						CR et Rt	Variation de surface	Pt	Mt
1	Forêts privées de moyenne montagne	19,0	26,1	1,4	19,0	+	0	-	+
2	Forêts privées du Nord-Ouest	3,0	4,2	1,4	18,2	+	+	-	0
3	Principalement forêts privées méditerranéennes	4,0	4,9	1,2	12,4	0	+	-	0
4	Forêts des Alpes et des Pyrénées (haute montagne)	17,6	19,7	1,1	19,1	-	0	-	0
(5)	(Forêts communales du Sud-Ouest)	(0,2)	(0,2)	(1,1)	14,6	(+)	(-)	(+)	(-)
6	Forêts privées de tradition forestière de plaines du Nord-Est et du Sud-Ouest	38,9	36,0	0,9	17,8	0	-	+	-
7	Forêts publiques de plaine et moyenne montagne du Nord et Nord-Est de la France	17,4	8,8	0,5	21,2	-	-	+	-

**Tableau 4.12. Tableau synoptique des facies dynamiques identifiés au grain GRECO x propriété forestière par classification ascendante hiérarchique.** Dynamique : représente l'importance des flux dans la dynamique des facies. CR : croissance ; Rt : recrutement ; Pt : prélèvement ; Mt : mortalité ; + : flux fort ; 0 : flux moyen ; - : flux faible. Le facies 5 a été présenté en gris clair et entre parenthèse car sa contribution dans la surface terrière totale et l'expansion est anecdotique



**Figure 4.32. Part dans l'expansion totale des facies en fonction de leur intensité d'expansion**

**Facies dynamiques ayant un poids croissant dans la ressource forestière ( $IE > 1$ ) :**

- (i) **Facies 1** ( $IE = 1,4$  ; 26,1% de l'expansion ; **Tableau 4.12 ; Figure 4.32**) : **il est composé principalement des forêts privées de moyenne montagne (Massif Central principalement, et Jura). Ces forêts connaissent de forts niveaux de croissance et de faibles prélèvements mais une mortalité marquée, la plus élevée des différents types (Tableau 4.12, Figures 4.30 et 4.31). En revanche, les termes de recrutement et d'augmentation des surfaces sont plus modestes, et traduisent une dynamique déjà avancée. On peut y reconnaître la signature des boisements déjà anciens du programme de boisement FFN,**
- (ii) **Facies 2** ( $IE = 1,4$  ; 4,2% de l'expansion) : **il est composé des forêts privées du Grand-Ouest. Ces forêts connaissent de fortes croissances. Par différence avec le facies précédent, elles montrent cependant des niveaux de recrutement plus marqués, une densité de stock (stock à l'hectare) plus faible, ainsi que de fortes augmentations de surface forestière relative. Elles sont donc en plein essor, et on peut supposer un stade de développement moins avancé que pour le facies 1, correspondant à des forêts plus récentes. Une étude prenant en compte les essences forestières pourra confirmer l'hypothèse selon laquelle il s'agit là de plantations dans cette région.**
- (iii) **Facies 3** ( $IE = 1,2$  ; 4,9% de l'expansion) : **Il est composé des forêts privées, essentiellement de Méditerranée. Leur profil dynamique est très semblable à**

celui du premier type (**Figure 4.31**). Comme pour le type précédent, elles connaissent de fortes augmentations de surface forestière relative, mais des **niveaux de croissance moindres**.

- (iv) **Facies 4** (IE = 1,1 ; 19,7% de l'expansion) : il est constitué des **forêts des grands massifs de montagne, Alpes et Pyrénées, toute catégorie de propriété confondue** (même si la forêt privée domine ces strates ; **Annexe IV.10**), **suggérant que le contexte biophysique prédomine sur la propriété dans leur dynamique de stock**. Ces forêts présentent un niveau moyen de croissance faible, logique en montagne, mais le niveau moyen de taux de prélèvement est aussi le plus faible de l'ensemble des groupes (**Figures 4.30 et 4.31**), et permet de comprendre leur contribution à l'expansion. Le recrutement reste modéré. Ce facies présente une densité plus forte que celle des trois facies précédents, signe d'une forêt déjà plus mature.

#### **Facies ayant un poids décroissant dans la ressource forestière (IE < 1) :**

- (i) **Facies 5** (IE = 1,1 ; 0,2% de l'expansion) **et Facies 6** (IE = 0,9 ; 36% de l'expansion) : le caractère négligeable du 5<sup>e</sup> groupe dans le stock total, et sa forte proximité dynamique avec le groupe 6 (**Tableau 4.12**), amènent à les considérer conjointement. Ce groupe est dominé par les **forêts privées des plaines du Nord, de l'Est, et du Sud-Ouest, de tradition forestière ancienne**, complété par des forêts publiques du Sud. **Le niveau des prélèvements (Figures 4.30 et 4.31) y est le plus marqué des différents groupes, avec un taux de mortalité parmi les plus faibles, et traduit la vocation forestière de ces forêts. Leur caractère ancien est confirmé par une absence de progression des surfaces (Figure 4.30)**. Les prélèvements restent néanmoins inférieurs à l'accroissement, expliquant son expansion.
- (ii) **Facies 7** (IE = 0,5 ; 8,8% de l'expansion) : **il correspond aux forêts exclusivement publiques du Nord et Nord-Est de la France, incluant les massifs de moyenne montagne des Vosges et du Jura**, avec par conséquent des similitudes géographiques avec le groupe 6. Ces forêts présentent le niveau relatif de **prélèvement le plus élevé à ce niveau de croissance**. Le recrutement y est faible. La mortalité y est absente. **Le niveau des prélèvements, plus modeste que dans les autres groupes, trouve son explication dans le niveau de densité élevé, traduisant probablement le phénomène de densité-dépendance de la croissance (Tableau 4.12)**

A titre comparatif, on peut remarquer la forte ressemblance des facies 4 et 7 quant à leur surface terrière initiale (entre 40,0 et 39,5 millions de m<sup>2</sup> respectivement ce qui représente 17,4 et 17,6% ; **tableau 4.12**). Cependant, le facies 7, composé de forêts publiques du Nord et

du Nord-Est, ne représente que 8,8% de l'expansion forestière alors que le facies 4, composé principalement des forêts des Pyrénées et des Alpes, connaît une expansion beaucoup plus forte, représentant 19,8% de l'expansion totale. Ces deux facies se distinguent principalement par leur niveau de prélèvements.

#### 4.3.4 Synthèse

Au niveau de résolution défini par les GRECO et la propriété forestière, **l'ensemble des strates forestières contribue à l'expansion du stock de bois** (expansion décrite, correspondant à 95% de l'expansion totale ; voir 3.4), sous-tendu par le constat de **niveaux de prélèvement toujours en deçà des niveaux de croissance/recrutement**, y compris dans les strates de forêts publiques les plus gérées. Au plan de la gestion forestière, cela souligne l'intérêt de politiques forestières visant à mobiliser davantage de bois.

**Deux ensembles significatifs contribuent à l'expansion, avec une intensité d'expansion très marquée.** Il s'agit (a) **des forêts exclusivement privées des moyennes montagnes du Massif Central et du Jura** (complétées par les forêts privées du Grand Ouest plus jeunes, et celles de Méditerranée), (b) **des forêts de haute montagne des Alpes et des Pyrénées, toute catégorie de propriété confondue**, avec un niveau de croissance plus faible. Les taux de recrutement y restent modérés, traduisant le caractère déjà assis de ces forêts. **Deux facteurs sont ainsi mis en évidence pour leur rôle dans l'expansion : la formation de nouvelles ressources en forêt privée (plaine et moyenne montagne), et le handicap naturel à la mobilisation de bois formé par la haute montagne.**

Ces ensembles sont complétés par la **forêt privée de plaines** (Nord, Nord-Est et Sud-Ouest), déjà ancienne et avec des termes de progression dynamique (surface, recrutement) faibles. **Tandis que ce groupe montre les prélèvements les plus élevés, et perd de l'importance dans la ressource, son importance absolue l'amène à contribuer autant à l'expansion absolue que les deux premiers ensembles. Il s'agit pourtant de forêts gérées.**

### En résumé

L'expansion du stock décrite (*i.e.* 95% de l'expansion totale) de bois est sous-tendue par trois compartiments dominants:

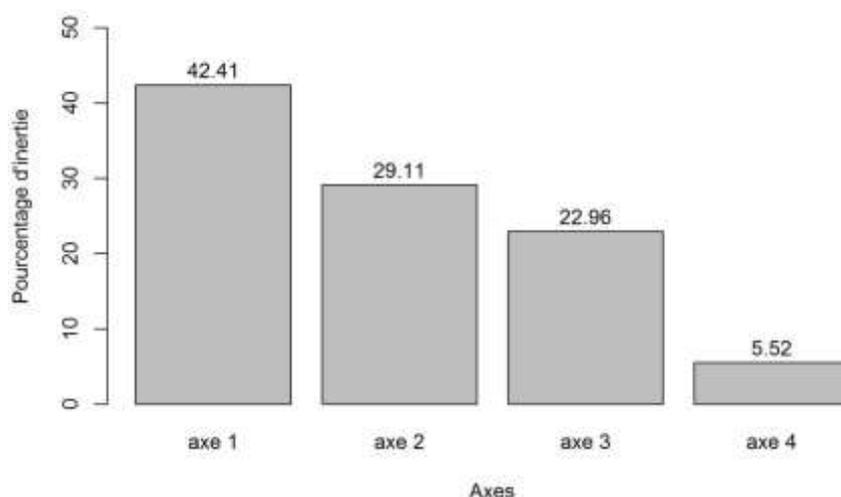
- (i) des ressources nouvelles ou récentes en forêt privée de plaine à moyenne montagne, en plein essor (25%),
- (ii) des ressources de haute montagne de toute propriété dont l'exploitation est contrainte par le relief (25%)
- (iii) des ressources déjà assises en forêt privée, ou le prélèvement est significatif malgré son niveau inférieur aux accroissements (50%). Les leviers d'une mobilisation supplémentaire de bois (par comparaison au groupe des forêts publiques) ne paraissent aisés à court terme que dans le dernier compartiment. L'enjeu de mobilisation est une question de coût pour le second, de temps et de volonté de gestion pour le premier.

Ces constats soulèvent plusieurs questions : la mortalité observée dans les forêts privées du Massif Central (facies 1) est-elle représentative d'un phénomène de mortalité généralisé de cette strate ou est-ce l'empreinte de phénomènes plus localisés ? Les forêts de haute montagne (facies 4) présentant une croissance et des prélèvements faibles sont-elles de jeunes forêts qui présentent des difficultés à s'établir (à cause, par exemple, du climat difficile de la région) ou des forêts matures non exploitées ? Ces questions nous poussent à préciser notre étude à la fois par essence et par classe de diamètre.

#### 4.4 Analyse de la dynamique des stocks de bois pour les strates définies par les facteurs GRECO x type de propriété x essence

L'ACP normée des individus DPE a été réalisée, avec deux variables qui n'existent toutefois plus : les flux de surface forestière, et le recrutement relatif à la surface forestière. De même, l'expansion a été utilisée en variable supplémentaire, mais le stock à l'hectare n'a plus de signification puisqu'il se rapporte à une surface de référence.

Ses axes diffèrent peu de ceux de l'ACP de premier niveau. Trois axes permettent de représenter 94% de l'inertie totale (**Figure 4.33**).



**Figure 4.33. Diagramme d'inertie de l'ACP normée sur les flux de bois relatifs des individus DPE.** Les chiffres indiqués correspondent à la part de l'inertie portée par chaque axe

#### 4.4.1 Interprétation des axes

L'axe 1 se corrèle à la croissance et au recrutement (corrélations de 0,87 pour CR\_G1 et 0,93 pour Rt\_G1; **Tableau 4.13** ; **Figure 4.34**). L'axe 1 représente à nouveau le **gradient de dynamique de croissance biologique**.

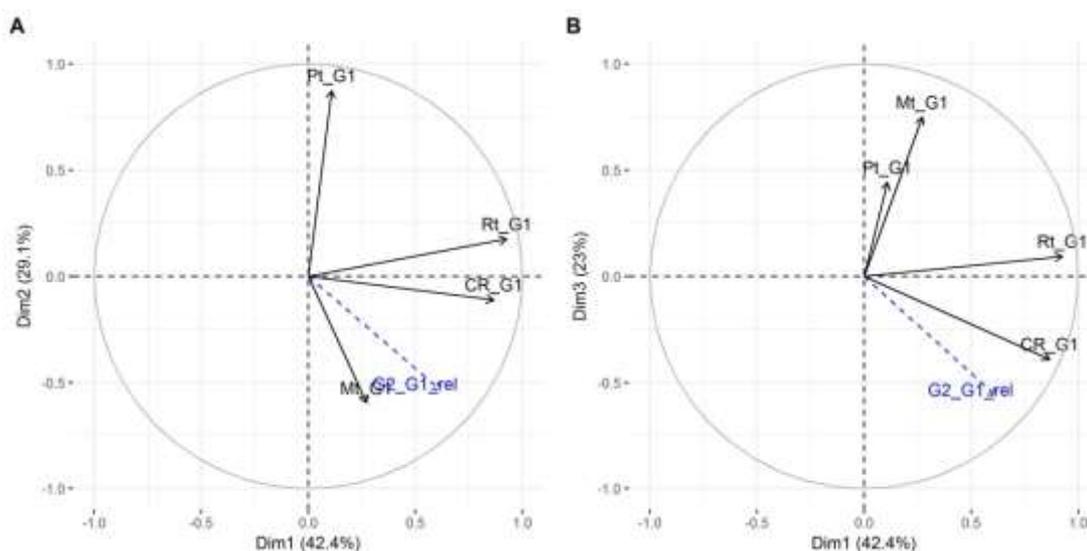
L'axe 2 se corrèle positivement aux prélèvements (corrélation de 0,87) et négativement à la mortalité (corrélation de -0,60; **Tableau 4.13**). L'axe 2 peut donc être interprété à nouveau comme un **gradient d'intensité de gestion**.

Enfin, l'axe 3 se corrèle à nouveau à la mortalité (corrélation de 0,75), selon une dimension indépendante de la précédente. **Bien qu'on puisse parler de gradient de mortalité, son interprétation sera à éclaircir dans la mesure où il ne s'agit vraisemblablement pas de mortalité densité-dépendante.**

Afin de regrouper des strates forestières présentant une dynamique similaire et les relier aux indicateurs d'expansion du stock de bois, une nouvelle classification ascendante hiérarchique a été opérée sur les coordonnées des centres de gravité de ces strates sur les trois premiers axes de l'ACP. **Le choix a donc été raisonné de concevoir une nouvelle classification à ce niveau d'analyse, plutôt que d'augmenter simplement le niveau de résolution de la première classification. Il tient à une attitude de prudence, consistant à faire l'hypothèse que des strates très homogènes au niveau GRECO x propriété pourraient masquer des hétérogénéités marquées avec le niveau supplémentaire de l'essence, conduisant à l'éventualité que les sous-strates appartiennent en réalité à des faciès dynamiques différents.**

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
<b>Mt_G1</b>	0,27	<b>-0,60</b>	<b>0,75</b>
<b>CR_G1</b>	<b>0,87</b>	-0,11	-0,39
<b>Pt_G1</b>	0,11	<b>0,87</b>	0,44
<b>Rt_G1</b>	<b>0,93</b>	0,18	0,09

**Tableau 4.13. Corrélations des variables sur les trois premiers axes principaux.** En gras : les corrélations supérieures à 0,50 ou inférieures à -0,50



**Figure 4.34. Cercles de corrélation de l'ACP selon les axes 1-2 (A) et 1-3 (B).** La variable supplémentaire quantitative d'expansion de stock relatif (G2\_G1\_rel), ne rentrant pas dans la création des axes, est représentée en bleu.

#### 4.4.2 Typologie des strates forestières fondée sur les flux de bois

Quatorze facies dynamiques ont été identifiés (Tableau 4.14 ; Figure 4.35), et ont été numérotés en fonction de leur indice d'expansion décroissant (Figure 4.37). Le diagramme des flux est figuré en figure 4.37. Leur projection dans les 2 premiers plans principaux est présentée en figure 4.36. Le détail de composition des facies est fourni en annexe IV.11.

##### 4.4.2.1 Observations générales

A ce niveau d'analyse, la variabilité de l'expansion observée (*i.e.* 80% de l'expansion totale ; voir 3.4) couverte par chaque groupe augmente fortement (de 24% à négligeable). De même, l'IE présente des gradients beaucoup plus marqués, allant de plus de 8 à des niveaux négatifs (strates contribuant négativement à l'expansion, c'est-à-dire en décapitalisation de stock).

On peut remarquer que la classification est fortement influencée par les essences. Certaines essences ont des comportements très spécifiques. C’est le cas des châtaigniers, qui connaissent de très fortes mortalités et du douglas qui présente une croissance importante.

En règle générale, les résineux présentent de plus fortes croissances que les feuillus. Les classes « divers feuillus » et « divers résineux » présentent aussi globalement des croissances plus fortes que les feuillus et les résineux identifiés individuellement.

Cependant, même si les essences influencent fortement la classification, certains milieux (comme la haute montagne) ou propriété (différence entre privé et public) ont également un rôle important. **Ce résultat conforte notre choix de classification.**

#### 4 - Résultats

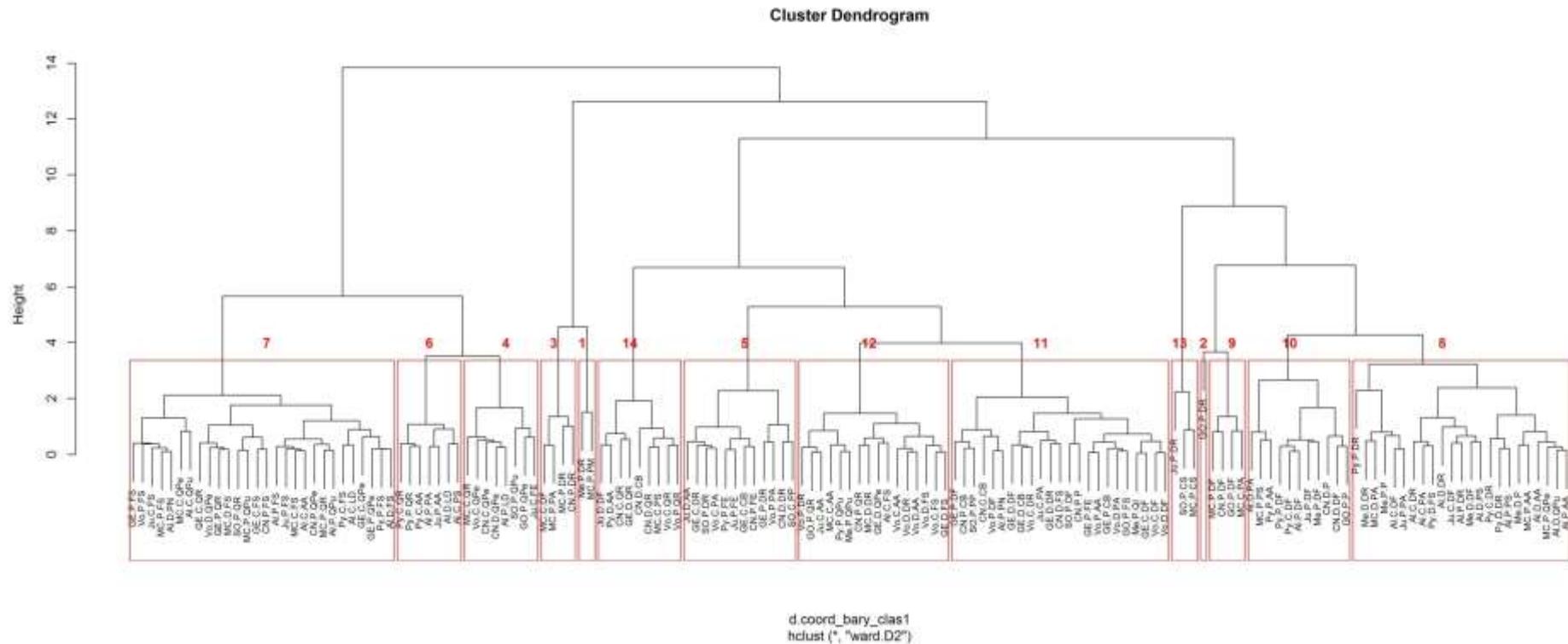


Figure 4.35. Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique appliquée aux centres de gravité des strates GRECO x propriété x essence ligneuse. Le dendrogramme a été construit à partir des 3 axes principaux de l'ACP. 14 facies dynamiques (cadres rouges) primaires ont été identifiés.

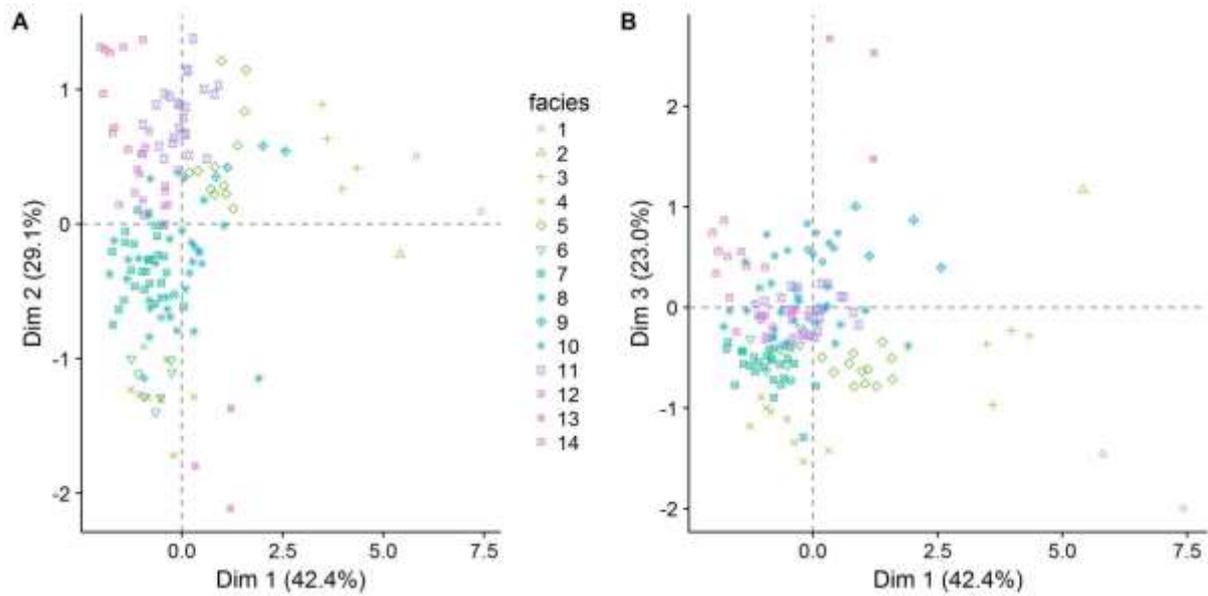


Figure 4.36. Représentation des facies dynamiques identifiés par classification dans les plans 1-2 et 1-3 de l'ACP

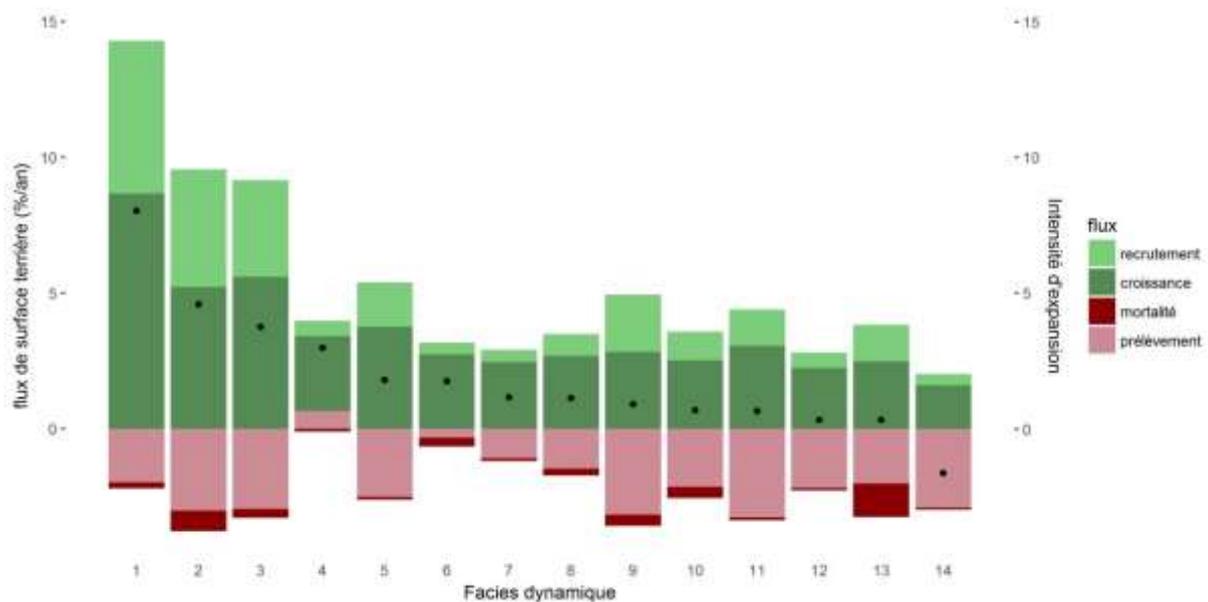


Figure 4.37. Diagramme des flux relatifs annuels pour chacun des 14 facies dynamiques identifiés par la classification hiérarchique

#### 4 - Résultats

Facies	Description	Part du facies dans la surface terrière initiale (%)	Part du facies dans l'expansion totale (%)	IE du facies	Part du facies dans l'expansion totale par profil diamétrique (%)					Dynamique		
					1	2	3	4	5	CR Et Rt	Pt	Mt
1	Douglas du massif central privé	0,6	4,6	8,0	1,3	1,6	1,7	0	0	+	0	-
2	Divers résineux du grand ouest privé	0,2	0,9	4,6	0	0,9	0	0	0	+	0	+
3	Résineux des forêts privées du massif central, et du Centre-Nord	1,7	6,5	3,8	1,0	2,4	3,1	0	0	+	+	-
4	Chênes (essentiellement sessile) de plaine et de moyenne montagne, de toute propriété	2,9	8,6	3,0	3,9	0,8	0,2	3,0	0,7	-	-	-
5	Feuillus d'accompagnement et résineux de plaine et de moyenne montagne en forêt communale et privée, et dans le Nord / Nord-Est	4,4	7,9	1,8	0,9	2,0	3,8	1,2	0,1	+	+	-
6	Essentiellement résineux de forêts de haute montagne, communales et privées	3,1	5,4	1,8	0	0	0,5	2,9	1,9	-	-	-
7	Hêtres et chênes de forêts essentiellement communales et privées des massifs de moyenne et haute montagne	21,5	24,9	1,2	2,5	1,6	10,4	8,4	2,0	-	-	-
8	Résineux essentiellement de forêts publiques de moyenne et haute montagne dans la moitié sud du pays	10,0	11,3	1,1	0,5	2,2	5,5	2,9	0,3	-	-	0
9	Feuillus divers de forêts privées du quart nord-ouest et du massif central	7,7	6,9	0,9	4,1	2,2	0,5	0,2	0	+	+	+
10	Pins du quart NO et divers feuillus de moyenne et haute montagne, essentiellement en forêts privées	10,5	7,1	0,7	1,9	2,2	3,3	-0,2	0	0	-	+
11	Feuillues (charme et divers) et pins du quart nord-est (plaines et Vosges) et du sud-ouest, essentiellement en forêts privées	21,0	13,7	0,7	3,7	2,2	1,6	6,4	-0,1	0	+	0
12	Hêtres et sapins de moyenne montagne et hêtres et chênes de plaine	10,9	3,6	0,3	1,1	0,1	0,1	2,0	0,3	-	0	0
13	Châtaigniers de forêts privées	3,9	1,3	0,3	1,0	-0,5	0,4	0,4	0	+	-	+
14	Feuillus (essentiellement chêne pédonculé) de forêts domaniales et communales de plaine et de moyenne montagne	1,7	-2,7	-1,6	0	-0,1	-0,1	-1,5	-1,1	-	+	0

**Tableau 4.14. Tableau récapitulatif des résultats de la classification globale par GRECO x propriété x essence**

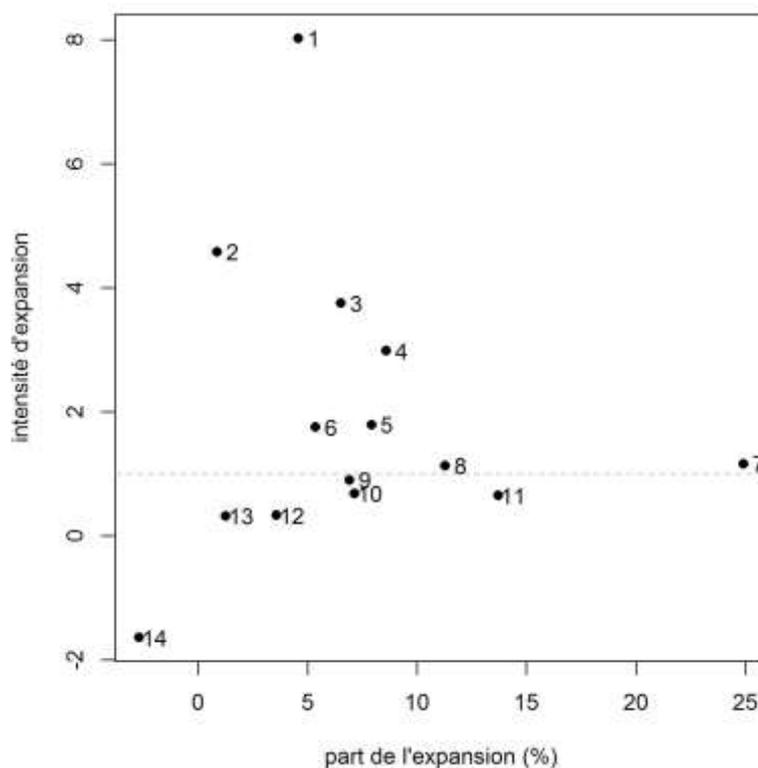


Figure 4.38. Part dans l'expansion totale des facies en fonction de leur intensité d'expansion au niveau GRECO x propriété x essence

Facies dynamique	Part de chaque profil diamétrique dans la surface terrière initiale du facies (%)					Part de chaque profil diamétrique dans l'expansion du facies (%)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	17,5	36,8	45,6	0	0	28,7	33,9	37,4	0	0
2	0	100	0	0	0	0	100,0	0	0	0
3	13,2	35,1	51,7	0	0	15,9	36,9	47,2	0	0
4	33,8	9,1	3,5	35,5	18,1	45,8	8,9	2,2	35,4	7,7
5	9,7	33,0	37,6	18,6	1,1	10,7	25,1	47,9	15,4	0,9
6	0	0	16,3	59,6	24,1	0	0	9,5	54,4	36,1
7	6,5	8,8	31,7	37,2	15,9	10,0	6,5	41,8	33,8	7,9
8	3,5	15,3	48,8	28,8	3,6	4,3	19,1	48,6	25,6	2,4
9	55,7	38,2	5,5	0,7	0	58,5	31,6	7,7	2,2	0
10	15,4	29,5	48,4	6,4	0,4	25,8	31,1	45,4	-2,7	0,3
11	17,5	18,2	13,7	48,2	2,4	26,6	16,1	11,4	46,8	-0,9
12	10,0	6,6	19,8	47,2	16,3	29,2	1,4	3,9	56,3	9,2
13	31,9	27,0	14,9	26,2	0	79,2	-38,4	29,6	29,6	0
14	0	3,0	10,3	43,6	43,0	0	-2,9	-4,4	-54,0	-38,6

Tableau 4.15. Part des profils diamétriques dans la surface terrière initiale et l'expansion de chaque facies dynamique au niveau 2 d'analyse

#### 4.4.2.2 Description et analyse des facies dynamiques GPE

##### Facies très jeunes à très forte intensité d'expansion (Figure 4.38) :

- (i) **Facies 1** (IE = 8,0 ; 4,6% de l'expansion): il est constitué du **Douglas des forêts privées du Massif Central** et présente les plus forts niveaux relatifs de croissance et de recrutement (**Figure 4.36**). Son stock est ventilé sur les trois premiers profils diamétriques uniquement et **correspond donc à un stock jeune**.
- (ii) **Facies 2** (IE = 4,6 ; 0,9% de l'expansion): il est constitué des **divers résineux des forêts privées du Grand-Ouest**, majoritairement du Douglas, comme l'essence présente dans le premier facies, et de l'épicéa de Sitka, deux essences de plantation à croissance rapide. Il présente des croissances et recrutements élevés, mais aussi une mortalité importante, et des prélèvements plus marqués (**Figures 4.36 et 4.37**). Leur part dans la surface terrière totale française est en nette progression. Leur profil diamétrique est exclusivement le deuxième. Ce sont donc encore des stocks jeunes en installation.
- (iii) **Facies 3** (IE = 3,75 ; 6,5% de l'expansion): il est constitué de **divers résineux et d'épicéas privés des GRECO Centre-Nord et Massif Central**. Comme les facies dynamiques 1 et 2, ces stocks présentent des niveaux de croissance et prélèvements marqués, et sont à nouveau plus prélevés. La répartition du stock sur les profils diamétriques permet d'indiquer que ces forêts sont cependant à un stade de développement plus avancé.

Ces trois premiers facies présentent donc le point commun d'être constitués de forêts résineuses privées à faible diamètre (profils diamétriques principaux 1, 2 et 3 ; Tableau 15). Ce sont donc des forêts jeunes. On peut remarquer la part importante des recrutements dans leurs flux (Figure 4.37). La mortalité qui les caractérise est donc à interpréter comme de la mortalité juvénile. Elles sont à rapprocher des facies 1 et 2 de la première analyse.

##### Facies à intensité d'expansion marquée (stocks jeunes) :

- (i) **Facies 4** (IE = 3,0 ; 8,6% de l'expansion) : Il est principalement **constitué de chênes (chênes sessile, pédonculé, pubescent) de plaine et de moyenne montagne, dans toutes les propriétés**. Il marque une nette rupture avec les précédents (**Figure 4.37**) et présente des flux de croissance et de prélèvements faibles (**Figure 4.36**), avec des prélèvements souvent négatifs. Sa composition en profils diamétriques montre qu'il est **principalement constitué à la fois de jeunes stocks (profil diamétrique 1), dont l'origine est sans doute du taillis (cas du**

**chêne pubescent dans le Sud-Ouest, sessile et pédonculé du NO) et d'arbres plus matures (profil diamétrique 4) qui peuvent correspondre à la strate de futaie de ces anciens TSF.** On peut remarquer la forte expansion des stocks jeunes du profil diamétrique 1 (45,8% de l'expansion totale du facies; **Tableau 4.15**) bien qu'ils représentaient une part déjà importante, mais plus modeste, à l'état initial (33,8%),

- (ii) **Facies 5** (IE = 1,8 ; 7,9% de l'expansion) : il est composé de **feuillus secondaires (charme, frêne) et de résineux des plaines et moyenne montagne du Nord-Est et du Sud-Ouest, essentiellement en forêt communale et privée.** Ces stocks connaissent une croissance modeste et un fort prélèvement. Ils sont plus capitalisés que ceux des premiers facies (profil diamétrique 3 principalement) pouvant expliquer leur croissance plus faible et leurs prélèvements plus importants. **Néanmoins, la composante de recrutement y reste importante.** Pour les feuillus en plaine, la présence du charme et du frêne suggère une maturation de forêts récentes ou d'anciens taillis.

#### **Stocks matures à intensité d'expansion >1 :**

- (i) **Facies 6** (IE = 1,8 ; 5,4% expansion) : il regroupe des **chênes pédonculés et des résineux (sapin, épicéa, mélèze) de haute montagne, principalement des Alpes et des Pyrénées, en forêt communale et privée.** Ces stocks présentent une structure diamétrique de forêt mature (profils diamétriques principaux 4 et 5). De façon cohérente, ils sont peu prélevés, entraînant leur capitalisation. Le terme de recrutement y est parmi les plus faibles. Cette capitalisation est importante principalement dans les profils déjà les plus matures (le profil diamétrique 5 représentant 24,1% de la surface terrière initiale et 36,1% de l'expansion ; **Tableau 4.15**). Ce facies est à rapprocher du facies 4 de l'analyse précédente.
- (ii) **Facies 7** (IE = 1,2 ; 24,9% de l'expansion) est constitué de **hêtres et de chênes (chênes rouvres, pédonculés et pubescents) des forêts privées et communales des massifs de montagne français et des plaines du Nord et de l'Est.** De profil dynamique similaire au facies 6, il est marqué par des niveaux de prélèvements intermédiaires, plus marqués, qu'on peut relier à une meilleure facilité d'accès à ces forêts. Ce facies, relativement mature (profils diamétriques 3 et 4 majoritaires), représente une part importante de la forêt française car il cumule à lui seul 22% de la surface terrière initiale et un quart de l'expansion totale. On peut remarquer la part importante du profil diamétrique 3 dans l'expansion de ce facies (41,8% ; **Tableau 4.15**). **A la fois son profil dynamique, sa structure diamétrique, et sa distribution géographique et en propriété, en font une prolongation du facies 6 dans des conditions d'accessibilité probablement supérieures.**

- (iii) **Facies 8** (IE = 1,1 ; 11,3% de l'expansion) : il regroupe essentiellement **des résineux de haute et moyenne montagne** (Alpes, Pyrénées, Massif Central et Jura) **et de toute propriété**. Ces strates montrent **des profils de mâtures** (profils diamétriques 3, 4 et 5 majoritaires), et des niveaux de prélèvements faibles, mais supérieurs à ceux du facies 6 (haute montagne exclusive), qui expliquent leur moindre intensité de capitalisation.

**Facies contribuant à l'expansion, à IE < 1 (compartiments dont la part dans la ressource totale diminue) :**

- (i) **Facies 9** (IE = 0,9 ; 6,9% de l'expansion) : il regroupe **des « divers feuillus » de forêts privées** (châtaignier, bouleau, tremble, frêne, charme, **Tableau 4.3**) **dans le quart Nord-Ouest du pays et le Massif Central**. Ces essences sont essentiellement des essences d'accompagnement et de sous-étage, et **trois d'entre elles sont significatives dans les peuplements de taillis et TSF** (charme, bouleau, châtaignier). Ce stock est de faible diamètre (profils diamétriques 1 et 2 majoritaires, présence des profils 3 et 4) et le terme de recrutement est le plus important après celui des trois premiers facies (**Figure 4.37**). Les prélèvements et la croissance sont plutôt marqués. La mortalité significative, surprenante pour un groupe où les prélèvements existent, est sans doute à relier à la présence du châtaignier (voir facies 13 ci-dessous). **La structure diamétrique, la composition en essences, et le niveau des prélèvements suggèrent qu'il s'agit de peuplements qui peuvent avoir une origine de taillis**, exploités pour le bois de chauffage.
- (ii) **Facies 10** (IE = 0,7 ; 7,1% de l'expansion): il est composé de **pins du quart Nord-Ouest du pays et de divers feuillus (surtout du châtaignier) des massifs de moyenne et haute montagne, pour l'essentiel en forêt privée**. Ce stock présente de faibles diamètres (profils diamétriques 2 et 3 majoritaires) bien que l'ensemble des profils soient représentés. Les prélèvements sont faibles, mais la croissance y est elle aussi modérée, expliquant une intensité d'expansion faible. On peut remarquer une décapitalisation dans le profil diamétrique 4 (-2,7% de l'expansion du facies ; **Tableau 4.15**) alors que les stocks du profil diamétrique 5 se maintiennent. La mortalité est présente dans ce facies (**Figures 4.36 et 4.37**), et est à relier à nouveau à la présence du châtaignier dans le stock des feuillus divers.
- (iii) **Facies 11** (IE = 0,7 ; 13,7% de l'expansion) : il correspond à **des feuillus et des pins de forêts essentiellement privées du Nord-Est et du Sud-Ouest de tradition forestière ancienne**. Ce groupe est donc à rapprocher du facies 5 de l'analyse du niveau 1, et peut correspondre à des situations très hétérogènes. On retrouve ainsi dans ce facies le pin maritime des forêts privées du sud-ouest

(Figure 4.39) qui présente de forts prélèvements, principalement dans les départements des Landes et de la Gironde. Leur part dans la forêt française est importante (21,0%) mais tend à diminuer ( $IE < 1$ ). **Le niveau relatif des prélèvements y est des plus élevés parmi les facies (Figure 4.36)**. Ce facies est constitué de stocks jeunes (profils diamétriques 1 et 2), dont l’expansion est importante (respectivement 26,6% et 16,1% de l’expansion totale du facies), et de stocks plus matures (profil diamétrique 4) qui pèsent plus de 50% de l’expansion de ce facies. Les stocks du profil diamétrique 5 sont les seuls à présenter une décapitalisation, signe d’un rajeunissement de ce facies. **La capitalisation dans les profils jeunes et la décapitalisation dans les profils matures montre un signe de gestion appuyé par les forts prélèvements observés.**

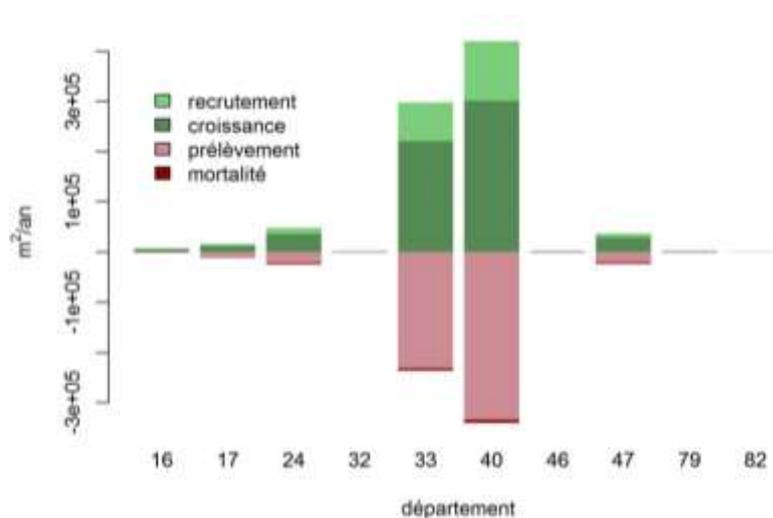


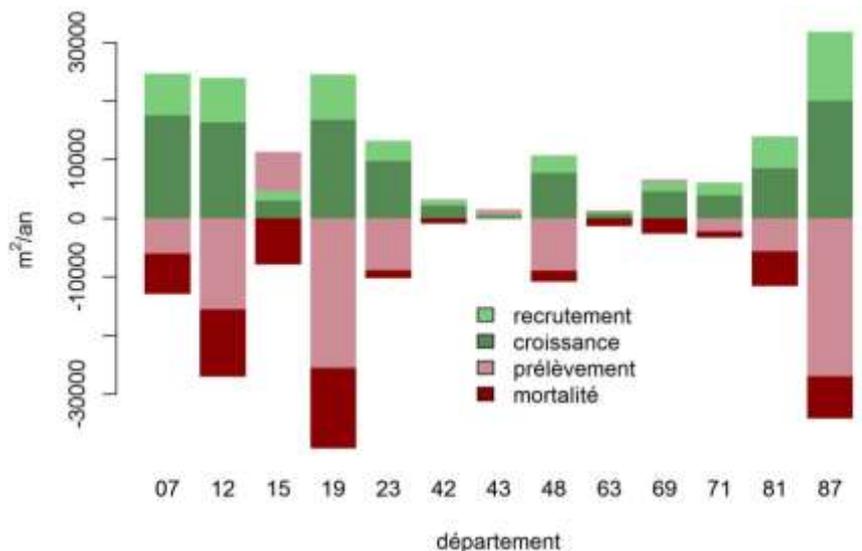
Figure 4.39. Histogramme des flux pour la strate des pins maritimes des forêts privées du sud-ouest

**Facies de contribution nulle ou négative à l’expansion :**

- (i) **Facies 12** ( $IE = 0,3$  ; 3,6% de l’expansion) : ce stock, qui est important dans la forêt française (près de 11%) est composé de **hêtraies et sapinières de montagne, et de chênaies et hêtraies de plaines, avec une domination de strates de forêt domaniale et communale sur l’ensemble du territoire**. Les prélèvements déjà marqués entrent en équilibre avec un taux de croissance faible et un recrutement minimal **conduisant à une expansion anecdotique**. Ce stock est équilibré en structure diamétrique (profil diamétrique 4 majoritaire). On remarque toutefois la capitalisation forte des profils diamétriques 1 (29,2% de l’expansion totale du

facies) et 4 (56,3%) comparée à leur poids initial (10,0% et 47,2% respectivement ; **Tableau 4.15**).

- (ii) **Facies 13** (IE = 0,3 ; 1,3% de l'expansion) : ce facies anecdotique correspond au **châtaignier des forêts privées du Sud-Ouest et du Massif Central** (exemple pour le Massif Central ; **Figure 4.40**). Ce stock à faible diamètre (profil diamétrique 1 majoritaire ; 31,9% de la surface terrière initiale ; **Tableau 4.15**) montre aussi un terme de recrutement important, à interpréter comme la maturation de taillis de châtaignier. **Il connaît une très forte mortalité, à rapprocher des problèmes sanitaires massivement rencontrés par cette essence.** On peut souligner la très forte part de l'expansion représentée par le profil diamétrique 1 (79,2%) et la très forte décapitalisation du profil diamétrique 2 (-38,4%).



**Figure 4.40. Histogramme des flux pour la strate des châtaigniers des forêts privées du Massif Central**

- (iii) **Facies 14** (IE = -1,6 ; -2,7% de l'expansion) : ce stock est composé essentiellement de **feuillus des forêts publiques (chêne pédonculé prédominant), principalement domaniales, du Centre-Nord et du Nord-Est du pays.** Son intensité d'expansion négative marquée souligne la forte décapitalisation à l'œuvre dans ce stock. Il présente une croissance faible et les prélèvements les plus marqués des 14 facies. Il est constitué de **stocks matures** (profils diamétriques 4 et 5 majoritaires). On peut remarquer que la décapitalisation est particulièrement importante dans le profil diamétrique 4 (-

54,0% ; Tableau 4.15). Il traduit l’arrivée à maturité, et l’exploitation, de forêts publiques feuillues dont la mise en valeur est déjà ancienne.

#### 4.4.3 Synthèse

Un schéma récapitulatif des 14 facies explicités et de leur regroupement suggéré est présenté en Figure 4.41.

A ce niveau d’analyse, la finesse fournie par l’analyse des essences permet d’identifier une hétérogénéité beaucoup plus forte, marquée par un gradient élargi d’intensités d’expansion (de -1,6 à 8), et des facies plus subtiles. **Le déficit de prélèvements est à nouveau un phénomène très général**, même s’il ne concerne pas les facies de forêt publique 12 et 14, proches de l’équilibre ou en décapitalisation.

Quatre ensembles forestiers de nature très distincte apparaissent très nettement comme responsables de l’expansion observée (*i.e.* 80% de l’expansion totale ; voir 3.4) :

- (i) un premier ensemble défini par **les facies 1 à 3 et 10** en partie (pins du NO), il s’agit de **peuplements de résineux en forêt privée (divers résineux, pins, douglas, épicéa) situé dans le Grand-Ouest, le Centre-Nord, et dans le Massif central**. Il s’agit d’un stock de structure diamétrique jeune, qui fait écho aux programmes de boisements récents et plus anciens (fin du FFN dans le massif central),
- (ii) un second ensemble défini **essentiellement par des résineux et des chênes pédonculés de haute montagne, de toute propriété (facies 8) ou en communale et privée (facies 6)**, auxquels il faut **partiellement adjoindre le facies 10** (divers feuillus de haute et moyenne montagne).

Le premier ensemble (jeunes résineux privés) représente **plus de 12% de l’expansion (*i.e.* moins de 1/5)**, et le second groupe (stocks majoritairement résineux de haute montagne) représente **autour de 20% de l’expansion (*i.e.* plus de 1/5)**.

- (iii) un troisième ensemble remarquable, **fondé sur les grandes essences feuillues sociales**, comprenant les jeunes chênes de plaine du Nord et Sud-Ouest de toute propriété (**facies 4**, 9% de l’expansion), les chênes et hêtres plus matures des plaines du NE et des massifs français en forêt communale et privée (**facies 7** ; 25% de l’expansion) et les divers feuillus d’accompagnement et de taillis des forêts privées du quart NE et du massif central (**facies 9**, 7% de l’expansion), auxquels il faut adjoindre les châtaigniers privés du SO et du MC, eux aussi issus de taillis (facies 13 ; 1% de l’expansion) mais présentant une dynamique très particulière

liée à leur forte mortalité. C'est donc au total **42% (2/5) de l'expansion qui trouve son origine au sein d'un stock de feuillus sociaux ou d'accompagnement dont l'origine plus ou moins lointaine, au moins en partie, en taillis et TSF est manifeste,**

- (iv) un ensemble formé par des **stocks traditionnels essentiellement des forêts privées des régions du Nord-Est et du Sud-Ouest du pays, à base de feuillus et résineux**, qu'il s'agisse des forêts privées de feuillus divers et pins (**facies 11**, 13,7% de l'expansion) ou des forêts communales et privées de feuillus secondaires et résineux (**facies 5**). **Ce groupe représente 18% de l'expansion (1/5).**

Enfin, certaines forêts publiques, **essentiellement domaniales**, ont une contribution nulle à cette expansion, ce qui cache en réalité une hétérogénéité, une décapitalisation dans les feuillus (dont chênes) des forêts publiques essentiellement domaniales de plaine (NE, Centre Nord, **facies 14**), et une capitalisation très faible mais positive dans les hêtraies-chênaies et hêtraies-sapinières publiques, de plaine et de montagne sur le territoire (**facies 12**).

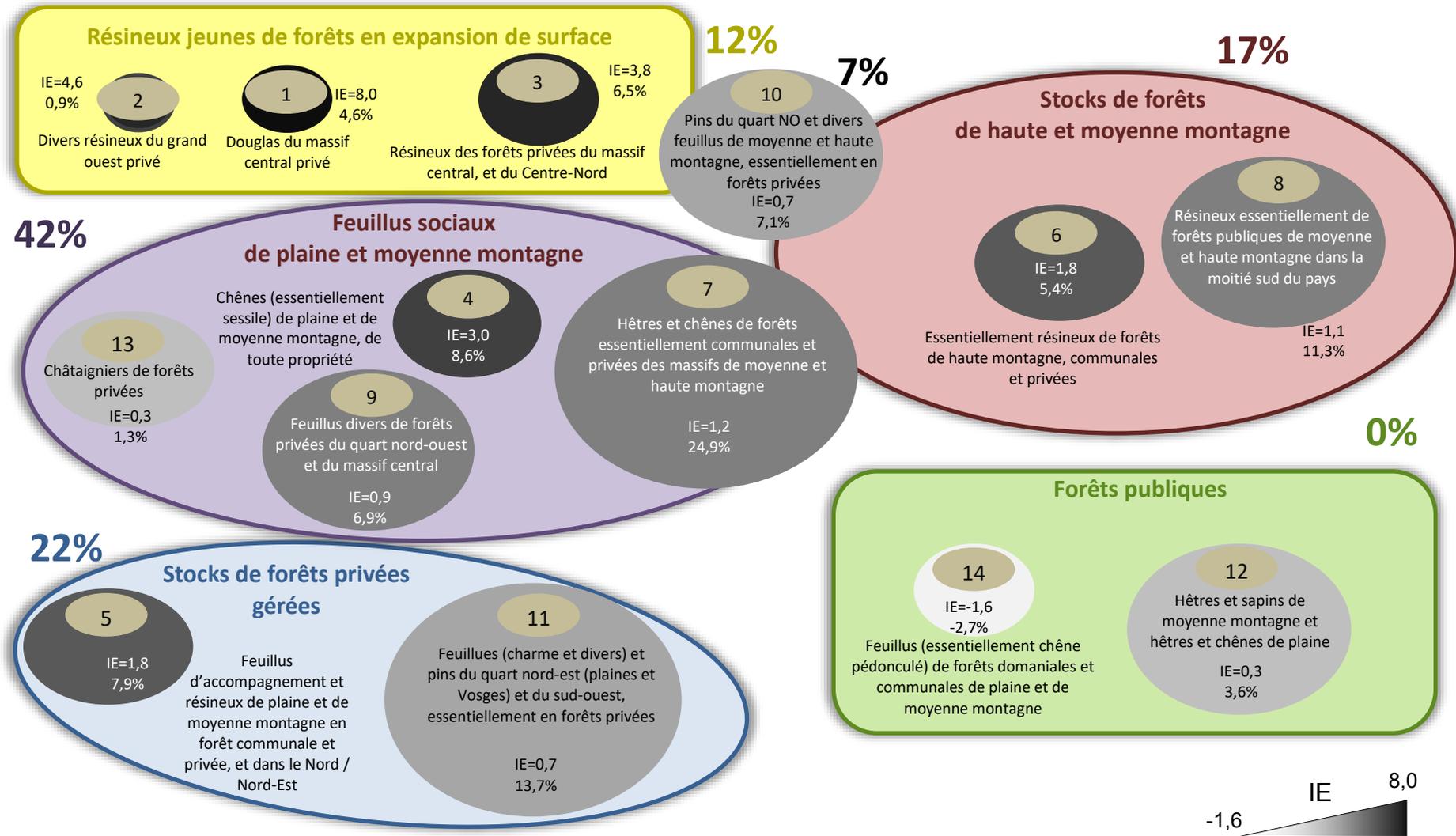


Figure 4.41. Schéma des 14 facies identifiés au niveau 2 de l'analyse. Les pourcentages correspondent à la part de l'expansion décrite expliquée. La taille des ronds représentant les strates est proportionnelle à la taille dans la surface terrière initiale.

### En résumé

A ce niveau d'analyse GRECO x propriété x essence, et en idéalisant encore davantage, l'expansion décrite (*i.e.* 80% de l'expansion totale ; voir 3.4) paraît pouvoir s'interpréter selon 4 compartiments :

- (i) un compartiment prépondérant, formé par les feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne de structure jeune, à relier à la maturation de taillis anciens (2/5 de l'expansion décrite),
- (ii) de jeunes résineux de forêts privées du Massif Central et du Nord-Ouest (<1/5 de l'expansion décrite),
- (iii) des stocks essentiellement résineux de forêts de haute montagne de toute propriété (>1/5 de l'expansion décrite),
- (iv) des stocks de forêts privées traditionnelles feuillues et résineuses (Nord-Est et Sud-Ouest), où l'intensité de gestion permet une accumulation de bois (1/5 de l'expansion décrite).

Il est donc important, pour les politiques de forestières futures de distinguer les différents enjeux de mobilisation de bois : un enjeu en montagne (20%) lié à des forêts difficilement prélevables (conditions de terrain difficiles), un enjeu futur pour de jeunes ressources résineuses ou ressources feuillues en maturation (20 + 40%), et un enjeu d'intensification dans des forêts privées déjà gérées (20%).

Alors que les dernières forêts semblent directement utilisables, les deuxièmes correspondent à des forêts encore, à priori, jeunes pouvant, ne pouvant, pour certaines, pas encore être exploitées. Les premières nécessiteraient une amélioration forte des techniques de débardage en milieu difficile et une amélioration de l'accessibilité des forêts. Vu ces contraintes, il semble possible d'augmenter les prélèvements dans ces dernières mais impossible d'obtenir un équilibre croissance-prélèvement.

## 5 Discussion

### 5.1 Aspects méthodologiques

#### 5.1.1 Flux de prélèvements de bois

La sous-estimation des prélèvements en AM nous a contraints à les estimer à partir d'un bilan de flux. Cette méthode se base sur des approximations des termes du bilan liées à la nature temporaire des points de l'inventaire forestier. Elle s'est montrée cohérente et nous permet de comparer les différentes strates entre elles. Cette approximation a néanmoins entraîné, pour certaines strates, l'obtention de prélèvements négatifs, aberrants. L'analyse de ces prélèvements négatifs nous a amené à écarter la GRECO Corse ne présentant que des prélèvements négatifs (**Tableau 4.6**). Même si dans l'analyse GRECO x propriété la suppression des strates représentant une très faible part dans la surface terrière totale a entraîné la suppression de l'ensemble des prélèvements négatifs, dans l'analyse par essence, certains subsistent. Ces résultats sont, à priori, la preuve de prélèvements très faibles dans ces strates. De plus, leur occurrence est plus forte en forêt communale (**Tableau 4.6**) que dans les autres types de propriété. Cela pourrait être lié à la soumission de forêts communales pendant la période d'étude, entraînant une augmentation de la surface terrière à t2. En effet, les forêts communales non soumises sont répertoriées comme forêts privées par l'IFN.

#### 5.1.2 Intérêt d'une analyse à deux niveaux hiérarchiques

Notre étude, à plusieurs niveaux permet d'avoir une vision complète de la dynamique. En effet, l'analyse par GRECO x propriété permet d'étudier les variations de surfaces, ce qui n'est pas possible avec l'analyse par essence au niveau de l'arbre. Cependant, nos résultats de la deuxième classification mettent en évidence le rôle de certaines essences dans la création de faciès dynamiques (*e.g.* le douglas et le châtaignier) et conforte notre choix de partition, et de séparation des procédures de classification. Elle a de plus l'avantage de pouvoir s'appuyer sur des profils diamétriques du stock, ce qui est essentiel pour l'identification du stade de maturité des forêts sous-jacentes.

La partition par essence a permis de créer des faciès plus homogènes que ceux identifiés à partir des strates GRECO x propriété. En effet, elle permet, par exemple, de séparer au sein de la strate des forêts privées du Massif Central à forte croissance et forte mortalité, les forêts de châtaignier, présentant une mortalité importante, et les plantations de douglas et autres résineux, à forte croissance, des autres peuplements ne présentant pas la même dynamique. Cependant, on observe encore de l'hétérogénéité au sein de certains faciès. C'est le cas, par exemple, des faciès 4 et 11 qui présentent à la fois des forêts jeunes (profil diamétrique 1) et matures (profil diamétrique 4 ; **Tableau 4.15**), qui peut correspondre à deux sous-compartiments sous-jacents (taillis maturés, strate de réserves de taillis sous futaie ou TSF). **Cette hétérogénéité au niveau des profils diamétriques aurait pu être prise en compte par une partition, plus fine encore, par GRECO x propriété x essence x classe de**

**diamètre.** Cependant, cette division multiplie par 4 le nombre de strates étudiées et complexifie fortement l'étude. C'est la raison pour laquelle nous avons préféré adjoindre une information auxiliaire associée à une typologie des profils diamétriques.

### 5.1.3 Retour sur la mise en œuvre d'une méthode de classification

Afin de constituer des facies dynamique, nous avons utilisé une classification ascendante hiérarchique. Le nombre de classe (*i.e.* facies) a été choisi de façon arbitraire. L'objectif était d'avoir un nombre assez élevé de facies afin de permettre une analyse fine des dynamiques forestières. L'analyse de leurs dynamiques nous a permis, par la suite, de les regrouper en un nombre restreint de classes, permettant une lecture facile de la dynamique forestière française. Ainsi, au niveau 1, sept facies étaient identifiés et ont permis d'identifier trois compartiments responsables de l'expansion : des forêts de résineux jeunes, des forêts de montagne et des forêts privées gérées. Au niveau 2, 14 facies étaient identifiés et ont été regroupés en 4 compartiments responsables de l'expansion et un compartiment de forêts publiques stationnaire en stock. **La cohérence entre les deux systèmes de décomposition de l'expansion est très marquée.**

## 5.2 Aspects de la dynamique des forêts

Nos résultats montrent qu'**aucune corrélation n'existe entre croissance et prélèvement (Tableau 4.8)**. Les forêts qui poussent le plus rapidement ne sont pas plus prélevées que les autres. Cependant, il existe une **corrélation négative entre prélèvement et mortalité** (-0.37 ; **Tableau 4.8**), révélant un effet de gestion sur la mortalité. Deux causes, l'une technique, l'autre écologique, peuvent l'expliquer. Tout d'abord, un arbre ne peut être comptabilisé comme mort par l'IFN que s'il n'a pas été prélevé. Or, dans les zones à forte gestion, les arbres dépérissants ou morts (par tempête par exemple) sont généralement prélevés rapidement. Ce biais dans les relevés de la mortalité peut également expliquer les faibles mortalités observées globalement par notre étude. Par ailleurs, la mortalité reste aussi un phénomène largement densité-dépendant, plus marquée là où le stock à l'hectare est plus élevé (Westoby, 1984). Cet effet se manifeste nécessairement dans notre étude.

L'étude de la densité des peuplements montre qu'elle est négativement corrélée à la croissance (**Figure 4.23**). Cela est confirmé par l'étude des profils diamétriques à l'intérieur des facies (**Tableau 4.14**) qui montre que les profils présentant le plus de gros bois, qui sont certainement les plus denses en volume, sont aussi ceux qui présentent les plus faibles croissances (exemple du facies 14).

Globalement, **l'intensité d'expansion est positivement corrélée à la croissance, aux recrutements et aux variations de surface ainsi que négativement aux prélèvements (Tableau 4.8).**

### 5.3 Analyse des facies dynamiques

Les facies GRECO x propriété présentant les plus fortes IE sont ceux du MC privé (IE = 1,4 ; **Tableau 4.12**) et du NO privé (IE=1,4). Ces deux facies présentent de très fortes croissances. **L'analyse par essence a montré que cette forte expansion est principalement due à la présence de boisements résineux à forte croissance** (Douglas pour le MC privé et Douglas et Epicéa de Sitka pour le NO privé ; **Tableau 4.3**). Le Douglas a d'ailleurs été une des essences privilégiées par le FFN (Cottin, 1995 ; Pourtet, 1972). **Ces forêts présentent des arbres à faibles diamètres attestant de la relative jeunesse des peuplements**. Alors que les boisements du FFN ont principalement été effectués au début de la période 1946-1999 (voir partie I – 1.3.4), les boisements du Grand-Ouest sont plus récents, expliquant la plus grande variation de surface au niveau 1 de ce facies.

Derrière ces deux premiers facies, on trouve celui composé essentiellement des forêts privées de Me (IE = 1,2) qui présente une forte variation de surface. **Ces forêts sont donc en forte expansion. Ce phénomène est particulièrement connu dans les forêts méditerranéennes où il est lié à la déprise agricole** (Chakir et Madignier, 2006, Cavailhès et Normandin, 1993).

De façon opposée, les forêts publiques de plaine et de moyenne montagne du Nord-Est présentent la plus faible IE (IE = 0,5 ; **Tableau 4.12**). Ces forêts présentent à la fois de faibles croissances et de faibles variations de surfaces. L'analyse par essence a montré une forte décapitalisation des feuillus dans ces strates. Cependant, ces forêts étaient initialement fortement capitalisées (*i.e.* elles sont principalement composées d'arbres à diamètres importants), expliquant les prélèvements de ces arbres.

L'analyse par essence a permis de montrer le comportement très spécifique de certaines essences. Par exemple, les châtaigniers du sud-ouest et du Massif Central connaissent de très fortes mortalités entraînant ainsi une forte diminution de leur part dans la surface terrière totale des forêts. La maladie de l'encre, arrivée au XVIII<sup>ème</sup> siècle en Europe (Vannini et Vettraino, 2001), est connue pour entraîner le dépérissement puis la mort des châtaigniers et peut expliquer cette forte mortalité observée.

Cependant, certaines GRECO présentent aussi des dynamiques particulières. On peut, par exemple, retenir le Nord-Est et le Sud-Ouest, zones de tradition forestière, dont les forêts sont fortement prélevées ou les GRECO des hautes montagnes (Alpes et Pyrénées) qui, au contraire, sont peu prélevées, du fait du handicap physique à leur exploitation.

De manière générale, on remarque que **les strates qui décapitalisent sont principalement celles présentant de faibles croissances associées à de forts prélèvements. Ces strates sont principalement des strates de forêts publiques et, le plus souvent, des forêts domaniales. On retrouve souvent des feuillus, et principalement des chênes et des hêtres, dans ces strates**. Alors que les forêts communales et privées qui décapitalisent sont des forêts présentant des diamètres moyens élevés (>20 cm), cela n'est pas le cas pour les forêts

domaniales qui présentent parfois des diamètres moyens faibles (14,78 cm pour Ju.D.DF ou 11,9 cm pour CN.D.CB).

De même, **les strates dont le poids augmente sont celles présentant de faibles prélèvements, quelle que soit leur croissance. Celles présentant une forte croissance sont plutôt liées à des strates en expansion de surface (comme les divers résineux du Grand Ouest privé) alors que celles présentant de faibles croissances correspondent plutôt à des forêts en maturation (comme les forêts de haute montagne, essentiellement résineuses, communales et privées).**

Cette étude se base sur les deux premiers inventaires et donc sur une période allant, en moyenne par département, de 1983 à 1995 (**Tableau 4.4**). Cette période est assez récente à l'échelle forestière mais depuis cette époque, il y a eu certaines modifications dans la gestion des forêts françaises (*e.g.* Arrêt du FFN). **Il serait donc intéressant, par la suite d'étudier ces flux sur une période plus récente et de comparer les résultats obtenus avec ceux présentés ici.**

#### 5.4 Compartiments de la forêt et systèmes de production responsable de l'expansion en stock des forêts

L'analyse au niveau 1 permet d'identifier 3 compartiments responsables de l'expansion décrite (*i.e.* 95% de l'expansion totale ; voir 3.4) : les forêts privées récentes (1/4 de l'expansion), les forêts de haute montagne toutes propriétés confondues (1/4 de l'expansion) et les forêts privées gérées (1/2 de l'expansion ; **Figure 4.42**).

$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$
Forêts privées récentes	Forêts de haute montagne	Forêts privées gérées

**Figure 4.42. Idéalisation des compartiments responsables de l'expansion en stock décrite (95% de l'expansion totale) identifiés au niveau 1.** Les ratios correspondent à la part que chaque groupe représente dans l'expansion décrite.

Cette analyse ne permet toutefois pas de relier ces compartiments à des systèmes de production précis et à leur trajectoire historique. C'est ce qui a été permis par l'analyse au niveau 2.

A ce niveau, 4 compartiments sont identifiés comme responsables de l'expansion décrite (*i.e.* 80% de l'expansion totale ; voir 3.4) :

- (i) Les forêts résineuses (principalement douglas et épicéa) privées du Massif Central et du Nord-Ouest. **Ces forêts sont des forêts jeunes, à l'évidence issues des**

- boisements du FFN** (principalement dans le MC) et de boisements plus récents plus récents (dans le Nord-Ouest, voir partie I),
- (ii) des **forêts de haute montagne** essentiellement, majoritairement résineuses mais aussi feuillues (chêne pédonculé, facies 6), **toutes propriétés confondues**. Ces forêts sont de stade beaucoup plus mature, avec de faibles recrutements. C’est typiquement la forêt résineuse de montagne, qui cache une diversité élevée (pins, sapins, mélèze, épicéa, *etc.*), et **dont l’exploitation est physiquement contrainte**,
  - (iii) un troisième compartiment, très emblématique, comprend : les chênes jeunes de plaine toute propriété (9%), puis les chênes et hêtres de moyenne montagne plus matures (communal et privé) (25%), et enfin les divers feuillus d’accompagnement du privé dans des régions forestières traditionnelles, de stade intermédiaire (8%), auxquels il faut ajouter les châtaigneraies. **Ces essences sont emblématiques de l’ancien système prédominant du taillis et TSF en France (chênaies de plaines, hêtraies altitudinales et châtaigneraies de moyenne montagne) qui a fait l’objet d’une conversion massive** (Degron, 1999) ou d’un abandon (châtaigneraie, hêtraies altitudinales ; Decoopman et Derioz, 1994 ; Chollet et Demarcq, 1998),
  - (iv) la forêt **privée traditionnelle, gérée mais dont les prélèvements restent inférieurs à la croissance**, parmi laquelle on trouve des divers feuillus et des résineux dont les pins.

Ces faits sont représentés dans la **figure 4.43**.

1/5 Jeunes résineux privés	1/5 Résineux de haute montagne	1/5 Stocks de forêts privées gérées	2/5 Feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne
-------------------------------------	---	---	--

**Figure 4.43. Idéalisation des compartiments responsables de l’expansion en stock décrite (80% de l’expansion totale) identifiés au niveau 2.** Les ratios correspondent à la part que chaque groupe représente dans l’expansion décrite.

Les individus écartés de notre analyse de niveau 2 représentent 10% de la surface terrière initiale et 20% de l’expansion totale (voir 3.4). Ces individus de faible taille n’ont pas pu être analysés ici mais ont une intensité d’expansion forte (IE = 2) et contribuent à eux seuls à 1/5 de l’expansion totale.

## 5.5 Conséquences pour la gestion et la mobilisation des bois

Nos résultats ont montré qu'il est possible de distinguer quatre groupes de forêts qui contribuent à l'expansion (**Figure 4.47**). Parmi ces groupes, deux se présentent comme des peuplements relativement jeunes (les jeunes résineux privés et les feuillus sociaux de plaine et de moyenne montagne) qui ne forment pas des **ressources immédiatement disponibles (à l'exception d'une utilisation potentielle pour le bois de chauffage pour les feuillus sociaux)**. Ces deux faciès représentent à eux seuls 3/5 de l'expansion. Le troisième groupe est constitué des **résineux de haute montagne. Ces stocks sont peu prélevés du fait des fortes contraintes physiques du milieu** (fortes pentes, faible densité de réseau de desserte ; IGN, 2012). L'amélioration des techniques de débardage et la densification du réseau de desserte pourrait permettre une petite augmentation de ces prélèvements mais il semble cependant impossible d'égaliser la croissance. Enfin, le quatrième groupe est constitué des forêts privées gérées. Ces forêts sont moins gérées que les forêts publiques, expliquant leur plus forte expansion. Dans le cadre de politiques d'intensification des prélèvements forestiers, il semble donc que ce soit principalement dans ce dernier groupe, qui représente 1/5 de l'expansion forestière, que les efforts doivent se concentrer. **Toutefois, les stocks de bois des forêts privées restent en moyenne plus faibles qu'en forêt publique, et le choix de ne pas prélever l'intégralité de l'accroissement biologique peut être étayé dans une perspective de gestion visant l'accroissement de valeur du capital forestier.**

Une partie des jeunes résineux identifiés proviennent des boisements du FFN effectués principalement au début de la période 1946-1999. Sur la période étudiée dans notre analyse (en moyenne 1983-1995 ; **Tableau 4.4**), ces peuplements étaient encore jeunes. Mais actuellement, ils commencent à atteindre leur âge d'exploitabilité et constituent donc un nouveau stock utilisable.

## Résumé chapitre IV

L'étude des flux de surface terrière a permis d'étudier plus en détail les mécanismes d'expansion de la forêt française. Une première approche par GRECO et type de propriété a permis d'étudier ces flux à un grain assez large et de les lier aux changements de surfaces. Une analyse plus détaillée a été effectuée grâce à une seconde approche par GRECO, type de propriété et essence. Cependant, cette dernière est liée aux arbres et non aux points d'inventaires et ne permet donc pas une analyse des changements de surface. Aux deux niveaux, des faciès dynamiques de la forêt française ont été identifiés.

Nos résultats ont montré que l'intensité d'expansion (rapport entre la part d'une strate dans l'expansion totale et la part que représente cette strate dans la forêt initiale) est principalement liée positivement à la croissance et négativement aux prélèvements.

Les forêts présentant les plus fortes intensités d'expansion sont les forêts jeunes (*i.e.* à faible diamètre) de résineux (principalement Douglas et épicéa de Sitka) du Massif Central et du grand-ouest. Ces forêts présentent une forte croissance (dont une forte part de recrutement) et de très faibles prélèvements.

Un autre groupe de forêt présente une intensité d'expansion relativement élevée. On y retrouve, entre autre, les forêts de haute montagne. Ces forêts, plus capitalisées que les précédentes, présentent également de très faibles prélèvements, liés aux contraintes physiques du milieu, mais ont une croissance faible. Alors que le premier groupe correspond à des forêts en expansion de surface, le deuxième correspond à des forêts qui capitalisent et dont la surface n'évolue pas.

Deux autres groupes dont l'intensité d'expansion est plus faible participent à l'augmentation du stock : les forêts privées gérées et les Feuillus sociaux de plaine et moyenne montagne. Ces derniers représentent 2/5 de l'expansion totale et sont à lier à la maturation des taillis et des TSF suite à leur conversion ou leur abandon.

Inversement, les forêts présentant une très faible intensité d'expansion sont des forêts à faible croissance et forts prélèvements, comme les forêts publiques, principalement feuillues à diamètres élevés. Parmi ces forêts, les forêts domaniales présentent le plus souvent une décapitalisation.

La mortalité est globalement faible par rapport aux autres flux, mais elle est très marquée dans les strates de châtaigniers, et particulièrement celle des forêts privées du Massif Central qui sont peu prélevées mais présentent quand même une intensité d'expansion faible.

Les résultats démontrent la nécessité de raisonner l'accroissement éventuel de la mobilisation de bois des politiques forestières actuelles en fonction de contextes forestiers très hétérogènes, et de dépasser une analyse globale fondée sur le taux moyen de prélèvement.

